

Jesús Gallego Navarro

Desarrollo de criterios de
optimización de diseño de
infraestructuras eficientes para
automóviles eléctricos

Departamento
Ingeniería Mecánica

Director/es
Larrodé Pellicer, Emilio

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

**DESARROLLO DE CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN
DE DISEÑO DE INFRAESTRUCTURAS EFICIENTES
PARA AUTOMÓVILES ELÉCTRICOS**

Autor

Jesús Gallego Navarro

Director/es

Larrodé Pellicer, Emilio

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ingeniería Mecánica

2012

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Autor: Jesús Gallego Navarro

Director: Dr. D. Emilio Larrodé Pellicer, Catedrático del área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza

Zaragoza, septiembre 2012

Tesis doctoral presentada para optar al Título de Doctor correspondiente al programa de doctorado: *Nuevas Tecnologías en Automoción*

Universidad de Zaragoza
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Centro Politécnico Superior
Departamento de Ingeniería Mecánica
Área de Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes



Universidad
Zaragoza

A Irene, mi gran amor y apoyo incondicional
A mis padres y hermano, que siempre han estado a mi lado

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a quienes con su apoyo han hecho posible el desarrollo de esta tesis doctoral.

A Emilio, director de esta tesis y director del Grupo de Investigación en Transporte y Logística (GITEL), a cuyo amparo se han realizado los trabajos comprendidos en esta tesis. Por tu ayuda, consejos y las largas conversaciones dedicadas a la tesis, sin las cuales no habría sido posible que este reto llegara a buen puerto. Por las oportunidades que me has ofrecido y me han hecho crecer profesionalmente, pero también como persona, desde aquel ya lejano año 2006 en el que llamé a tu despacho con la simple intención de que me dirigieras el proyecto final de carrera; gracias por el apoyo y confianza que has depositado en mí desde entonces.

A mis compañeros del GITEL, a los que hace mucho dejé de llamar compañeros para llamarlos amigos. Esta tesis lleva un trocito de cada uno de vosotros. Con el esfuerzo personal diario se alcanzan resultados, pero el trabajo en equipo es lo que marca la diferencia, y nosotros hemos sido un equipo campeón. Gracias por vuestro compañerismo y apoyo. Esta etapa de nuestras vidas es de las que no se olvidan nunca.

A IDOM. Sin la confianza depositada en la Universidad de Zaragoza, y más concretamente en GITEL, para participar en el proyecto ecoTrans no habría sido posible el desarrollo de los trabajos presentados en la presente tesis. La metodología desarrollada para IDOM dentro del contexto del proyecto ecoTrans “Tecnologías Ecológicas para el Transporte Urbano”, encuadrado dentro del proyecto CENIT 2008/0712 del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial del Ministerio español de Ciencia y Tecnología, cuyo líder es CAF, han constituido la base en la que se cimenta el desarrollo posterior de la presente tesis.

A los numerosos compañeros y amigos de APPICE, los Cursos de verano de Jaca que imparte la Universidad de Zaragoza, Zytel, IDOM y la Fundación del Hidrógeno, con los que a lo largo de estos años he coincidido o colaborado en diferentes proyectos y actividades. De todos vosotros he aprendido algo y habéis contribuido a mi crecimiento profesional.

A mi familia. A mis padres, los cuales, con su esfuerzo y ejemplo han contribuido a que hoy sea la persona que soy y de los que he aprendido que no hay que rendirse nunca. Gracias por vuestra generosidad y la formación que me habéis dado; a mi hermano, mi mejor amigo, y a Pili, por estar pendientes de mi y prestarme vuestro tiempo siempre que os he necesitado; a mis abuelos, tíos, primos y a Pilar, con vuestro simple interés me habéis hecho no desfallecer. Y sobre todo a Irene, por haber tenido que sufrir la tensión que supone escribir una tesis, por ayudarme a superar los retos diarios y contribuir a que cada día sea mejor persona y porque sin ti, esto no habría sido posible. Gracias a todos por vuestro apoyo y ánimos incesantes.

Y a vosotros, mis amigos, que no por ser los últimos en ser nombrados sois los menos importantes, a vosotros que os conozco desde que jugábamos juntos en el parque, desde el cole, el instituto, el equipo de fútbol, la carrera..., a vosotros que me habéis aguantado los días buenos y los malos y que habéis tenido que sufrir algún plantón y retraso a causa de esta tesis, gracias por vuestra comprensión y apoyo; gracias por ser como sois.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	15
RELACIÓN DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	24
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	31
1.1. MOTIVACIÓN	33
1.2. OBJETIVOS	38
1.3. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.....	40
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS	43
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	47
2.1. BIBLIOGRAFIA CIENTÍFICA ESPECIALIZADA	49
2.1.1. <i>Métodos aproximados</i>	49
2.1.2. <i>Consumo de energía en el sector transporte</i>	51
2.1.3. <i>Ciclos de funcionamiento</i>	51
2.1.4. <i>Sistemas de tracción con motorización alternativos</i>	52
2.1.5. <i>Optimización de los sistemas de energía</i>	54
2.1.6. <i>Vehículos de hidrógeno</i>	58
2.1.7. <i>Incorporación del hidrógeno al sector transporte</i>	60
2.1.8. <i>Dimensionamiento de hidrogeneras</i>	62
2.1.9. <i>Operativa de hidrogeneras</i>	65
2.2. PROYECTOS A NIVEL INTERNACIONAL	67
CAPÍTULO 3. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO. ALTERNATIVAS A LOS VEHÍCULOS CON SISTEMAS DE TRACCIÓN CON MOTORIZACIÓN TRADICIONAL	85
3.1. INTRODUCCIÓN	87
3.2. TECNOLOGÍAS DE TRACCIÓN.....	93
3.3. ALTERNATIVAS A LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN TRADICIONALES PARA VEHÍCULOS DE CARRETERA	94
3.3.1. <i>Vehículos de emisión cero</i>	94
3.3.2. <i>Vehículos híbridos</i>	99
3.3.3. <i>Vehículos propulsados con combustibles alternativos</i>	111
3.3.4. <i>Comparativa entre tecnologías de tracción alternativas</i>	120
3.4. ARQUITECTURAS FLEXIBLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA	124
3.4.1. <i>Ciclos de funcionamiento</i>	126
3.4.2. <i>Sistemas de almacenamiento de energía</i>	128
3.5. OPORTUNIDADES RESULTADO DEL PROCESO DE ELECTRIFICACIÓN DEL SECTOR TRANSPORTE.....	133
3.5.1. <i>Cambio en los procesos productivos</i>	137
3.5.2. <i>Consecuencias derivadas de la electrificación del sector transporte</i>	138
3.6. CONCLUSIONES	143
CAPÍTULO 4. TECNOLOGÍAS DEL HIDRÓGENO Y SU INTEGRACIÓN EN UN SISTEMA DE TRANSPORTE SOSTENIBLE	147
4.1. INTRODUCCIÓN	149
4.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL USO DEL HIDRÓGENO EN EL SECTOR TRANSPORTE.....	150
4.2.1. <i>Ventajas</i>	150
4.2.2. <i>Inconvenientes</i>	151
4.3. LOS SISTEMAS DE HIDRÓGENO	154
4.3.1. <i>Tecnologías de Producción y Almacenamiento</i>	154
4.3.2. <i>Instalaciones de Repostaje de Hidrógeno</i>	192

4.3.3. Vehículos. Estado Actual y Evolución	207
4.4. CONCLUSIONES.....	215
CAPÍTULO 5. DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES E INFRAESTRUCTURAS DEL HIDRÓGENO	223
5.1. INTRODUCCIÓN.....	225
5.2. PREDIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES DE HIDRÓGENO.....	226
5.2.1. Datos de partida	229
5.2.2. Propulsión.....	234
5.2.3. Número de vehículos.....	234
5.2.4. Número de dispensadores.....	236
5.2.5. Capacidad de repostaje.....	237
5.2.6. Tipo de abastecimiento.....	237
5.2.7. Cantidad abastecimiento in situ.....	238
5.2.8. Cantidad abastecimiento exterior.....	239
5.2.9. Capacidad de almacenamiento.....	240
5.2.10. Costes.....	243
5.2.11. Ejemplo funcional.....	244
5.3. DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES DE HIDRÓGENO.....	250
5.3.1. Modelo de cálculo.....	250
5.3.2. Implementación del modelo de cálculo.....	295
5.3.3. Descripción del software.....	306
5.3.4. Criterios de selección SIG.....	342
5.4. CONCLUSIONES.....	365
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE LAS VARIABLES ECONÓMICAS MÁS INFLUYENTES A LA HORA DE ESTABLECER UNA INFRAESTRUCTURA DE RECARGA PARA VEHÍCULOS DE HIDRÓGENO. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	367
6.1. INTRODUCCIÓN.....	369
6.2. ESCENARIOS TEMPORALES.....	374
6.3. DETERMINACIÓN DE COSTES.....	381
6.3.1. Costes de Inversión y Explotación de Hidrogeneras.....	382
6.3.2. Costes de Inversión y Explotación de Flotas de Vehículos.....	397
6.3.3. Costes de Mantenimiento.....	402
6.4. VIABILIDAD ECONÓMICA Y ESTRATÉGICA DEL MODELO DE INTRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO EN EL TRANSPORTE URBANO.....	408
6.4.1. Cuaderno de Hipótesis.....	408
6.4.2. Modelo Económico.....	433
6.4.3. Análisis de Sensibilidad del Modelo.....	450
6.5. CONCLUSIONES.....	484
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES	487
7.1. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	489
7.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	497
REFERENCIAS.....	499
ANEXO 1. OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN DE VEHÍCULOS NO CONTAMINANTES.....	509
A1.1. DEFINICIÓN DE CONSTANTES.....	512
A1.2. SIMULACIONES.....	516
A1.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	521
A1.4. CONCLUSIONES.....	524
ANEXO 2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	525

A2.1.	SISTEMAS PRIMARIOS O ACTIVOS.....	528
A2.2.	SISTEMAS SECUNDARIOS O PASIVOS.....	542
ANEXO 3.	SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.....	565
ANEXO 4.	HERRAMIENTA DE VALORACIÓN.....	599
A4.1.	SUBVENCIONES.....	602
A4.2.	VEHÍCULOS.....	604
A4.3.	INFRAESTRUCTURAS.....	610
A4.4.	COSTE DEL HIDRÓGENO.....	618
A4.5.	INGRESOS PROVENIENTES DE LA VENTA DEL HIDRÓGENO.....	623
A4.6.	HERRAMIENTA.....	627
ANEXO 5.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	641
A5.1.	VARIABLES DE MAYOR INFLUENCIA SOBRE LA INVERSIÓN TOTAL A REALIZAR.....	652
A5.2.	VARIABLES DE MAYOR INFLUENCIA SOBRE EL BENEFICIO BRUTO.....	681
ANEXO 6.	VALIDACIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO.....	729
A6.1.	ESCENARIO 2050. PARQUE MÓVIL PÚBLICO ZARAGOZA CON HIDRÓGENO.....	731
A6.2.	DEFINICIÓN DE RUTAS Y UBICACIÓN DE HIDROGENERAS PARA LA IMPLANTACIÓN DE UNA RED INTERNA DE TRANSPORTE EN EL POLÍGONO PLAZA.....	747

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de vehículos que se prevén circulen por las carreteras en los próximos años	41
Tabla 2. Relación de los proyectos estudiados en Europa	68
Tabla 3. Relación de los proyectos estudiados en Oceanía	69
Tabla 4. Relación de los proyectos estudiados en Asia	69
Tabla 5. Relación de los proyectos estudiados en Norteamérica	69
Tabla 6. Año de aplicación y limitación de emisiones establecidas por las normativas Euro para camiones y autobuses	91
Tabla 7. Vehículos que hay actualmente en España funcionando con GN	118
Tabla 8. Número de vehículos que utilizan GLP y estaciones de servicio que lo suministran (2009).....	119
Tabla 9. Resumen de la autonomía media obtenida con las diferentes tecnologías estudiadas [km] (2009).....	121
Tabla 10. Autonomías específicas obtenidas con las diferentes tecnologías estudiadas [km/kg] (2009)	122
Tabla 11. Sistemas primarios de energía	129
Tabla 12. Sistemas secundarios de energía	130
Tabla 13. Características de los principales tipos de baterías.....	131
Tabla 14. Tiempos de descarga y rangos de potencia de los principales sistemas de almacenamiento de energía	132
Tabla 15. Propiedades del hidrógeno.....	156
Tabla 16. Comparación poder calorífico de distintos combustibles	157
Tabla 17. Alternativas de almacenamiento de hidrógeno.....	177
Tabla 18. Algunos de los hidruros metálicos empleados para el almacenamiento de hidrógeno y sus características	187
Tabla 19. Equipos principales que componen las hidrogeneras.....	206
Tabla 20. Tecnología de las pilas de combustible	208
Tabla 21. Valor medio de autonomía de los vehículos con pila de combustible de hidrógeno	210
Tabla 22. Valor medio de la capacidad del depósito de hidrógeno de los vehículos con pila de combustible de hidrógeno	210
Tabla 23. Autonomía específica de los vehículos con pila de combustible de hidrógeno	211
Tabla 24. Valor medio de autonomía de los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno	213
Tabla 25. Valor medio de la capacidad del depósito de hidrógeno de los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno.	214
Tabla 26. Autonomía específica de los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno.	214
Tabla 27. Principales características de las hidrogeneras de los proyectos analizados.....	227
Tabla 28. Resumen de las conclusiones obtenidas tras el análisis de los proyectos	228
Tabla 29. Relación de electrolizadores y reformadores seleccionados para elaborar la Herramienta de Predimensionamiento.	231
Tabla 30. Herramienta de Predimensionamiento	246

Tabla 31. Entrada de la tabla Herramienta de Predimensionamiento solución al Caso 1.....	247
Tabla 32. Entrada de la tabla Herramienta de Predimensionamiento solución al Caso 2.....	249
Tabla 33. Características del modelo de cálculo.....	259
Tabla 34. Conversión de unidades de producción de hidrógeno.....	283
Tabla 35. Rendimientos de los diferentes procesos según bibliografías estudiadas.....	292
Tabla 36. Requisitos Funcionales a satisfacer por el software.....	296
Tabla 37. Requisitos No Funcionales a satisfacer por el software.....	297
Tabla 38. Datos de uso Línea 1 Tranvía de Zaragoza.....	311
Tabla 39. Tiempos de repostaje en función del número de recorridos realizados.....	313
Tabla 40. Programa de repostaje diario.....	314
Tabla 41. Opciones de combinación de tecnologías para la configuración de la hidrogenera.....	332
Tabla 42. Resumen: número de hidrogeneras y dispensadores.....	338
Tabla 43. Resumen: equipos Opción 1.....	338
Tabla 44. Resumen: equipos Opción 2.....	338
Tabla 45. Resumen: equipos Opción 3.....	339
Tabla 46. Resumen: equipos Opción 4.....	339
Tabla 47. Resumen: equipos Opción 5.....	339
Tabla 48. Resumen: equipos Opción 6.....	340
Tabla 49. Costes de la instalación.....	341
Tabla 50. Resumen criterios de decisión y pesos asociados.....	360
Tabla 51. Valores por defecto de los pesos asociados a los diferentes criterios de decisión.....	362
Tabla 52. Previsiones de oferta y demanda para el año 2015.....	376
Tabla 53. Previsiones de oferta y demanda para el año 2030.....	378
Tabla 54. Previsiones de oferta y demanda para el año 2050.....	379
Tabla 55. Límites superior e inferior de los costes de la energía. Horizontes 2020 y 2050.....	385
Tabla 56. Previsión de precios de la energía (€ en referencia al año 2000).....	385
Tabla 57. Previsiones futuras del precio de la distribución del hidrógeno.....	390
Tabla 58. Costes para los vehículos industriales de gas comprimido.....	391
Tabla 59. Factores operativos para el transporte mediante vehículo industrial.....	391
Tabla 60. Costes para los vehículos industriales de hidrógeno líquido criogénico.....	392
Tabla 61. Factores económicos y operativos para el transporte mediante gaseoducto de hidrógeno gas.....	393
Tabla 62. Valores fijados para el precio de referencia y el factor de escala de los diferentes equipos.....	395
Tabla 63. Objetivos de volumen de mercado, coste y prestaciones para autobuses dedicados al transporte público y lanzaderas.....	401
Tabla 64. Coste del mantenimiento requerido a lo largo de su vida útil de los turismos de hidrógeno en los diferentes escenarios temporales considerados.....	406
Tabla 65. Coste del mantenimiento a lo largo de la vida útil de los autobuses de pila de combustible en los diferentes escenarios temporales considerados.....	407
Tabla 66. Prestaciones de los turismos.....	410

Tabla 67. Número de turismos en Europa en los diferentes escenarios temporales considerados.....	411
Tabla 68. Número de turismos en España en los diferentes escenarios temporales considerados.....	412
Tabla 69. Cálculo del factor de corrección a aplicar en España en el horizonte temporal 2015	413
Tabla 70. Número de turismos en España en los diferentes escenarios temporales considerados aplicando factor de corrección 2015	413
Tabla 71. Coste de los vehículos y del mantenimiento requerido a lo largo de su vida útil en los diferentes escenarios temporales considerados	414
Tabla 72. Prestaciones de los autobuses.....	415
Tabla 73. Número de autobuses en Europa en los diferentes escenarios temporales considerados.....	416
Tabla 74. Relaciones estadísticas España vs Alemania y factor de corrección para España en el año 2015	417
Tabla 75. Número de autobuses en España en los diferentes escenarios temporales	418
Tabla 76. Coste de los autobuses en los diferentes escenarios temporales considerados.....	419
Tabla 77. Evolución del precio de producción del hidrógeno 2010-2050	421
Tabla 78. Precio previsto del gas natural en el escenario base del proyecto HyWays.....	422
Tabla 79. Influencia en % del precio del gas natural sobre el precio total de producción y distribución del hidrógeno en los horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050	423
Tabla 80. Límites superior e inferior de los costes de la energía. Horizontes 2015, 2030 y 2050.....	423
Tabla 81. Influencia en % del precio de la energía eléctrica sobre el precio total de producción mediante electrolisis y distribución del hidrógeno en los horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050	424
Tabla 82. Límites superior e inferior de los costes de la energía. Horizontes 2015, 2030 y 2050.....	425
Tabla 83. Tamaño de las hidrogeneras	425
Tabla 84. Número de hidrogeneras previstas en Europa en los horizontes temporales 2015, 2030 y 2050.....	427
Tabla 85. Consumo previsto de hidrógeno en las hidrogeneras españolas en los horizontes temporales 2015, 2030 y 2050.....	427
Tabla 86. Relación entre el número de hidrogeneras de diferente tamaño en cada uno de los horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050	428
Tabla 87. Número de hidrogeneras previstas en España según el grado de penetración de los vehículos de hidrógeno en los horizontes temporales 2015, 2030 y 2050.....	428
Tabla 88. Precio de las hidrogeneras en los diferentes escenarios temporales considerados.....	429
Tabla 89. Subvenciones previstas para los vehículos eléctricos	430
Tabla 90. Subvenciones previstas para los productores de hidrógeno por parte de la administración pública.....	431
Tabla 91. Subvenciones previstas para la construcción de estaciones de repostaje de hidrógeno en los diferentes escenarios temporales considerados	431

Tabla 92. Número mínimo de empleados necesarios en las estaciones de repostaje de hidrógeno en función de su tamaño	433
Tabla 93. Resumen aspectos económicos relativos a la incorporación del sistema de hidrógeno al sector transporte	435
Tabla 94. Inversión a realizar en cada uno de los años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte.....	436
Tabla 95. Resumen cuenta resultados de la actividad económica de las hidrogeneras en cada uno de los años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte	437
Tabla 96. Inversión a realizar durante los periodos de tiempo limitados por los diferentes años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte.....	439
Tabla 97. Resumen cuenta resultados de la actividad económica de las hidrogeneras durante los periodos de tiempo limitados por los diferentes años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte	441
Tabla 98. Introducción de datos y resultados intermedios obtenidos para el caso seleccionado. Año 2015.....	443
Tabla 99. Introducción de datos y resultados intermedios obtenidos para el caso seleccionado. Año 2030.....	444
Tabla 100. Introducción de datos y resultados intermedios obtenidos para el caso seleccionado. Año 2050.....	444
Tabla 101. Inversión a realizar en cada uno de los años sometidos a estudio	445
Tabla 102. Inversión acumulada hasta cada uno de los años sometidos a estudio	446
Tabla 103. Resumen de la cuenta de resultados de la actividad económica de las hidrogeneras en un escenario con una penetración baja de las tecnologías del hidrógeno	448
Tabla 104. Resumen de la cuenta de resultados de la actividad económica acumulada de las hidrogeneras en un escenario con una penetración baja de las tecnologías del hidrógeno	449
Tabla 105. Grado de influencia de las variables que influyen en los resultados finales de inversión necesaria en vehículos e infraestructuras.....	452
Tabla 106. Grado de influencia de las variables que influyen en beneficio neto resultante de la actividad de compra/producción y venta del hidrógeno	453
Tabla 107. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO	459
Tabla 108. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO	460
Tabla 109. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO	461
Tabla 110. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO	461
Tabla 111. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO	462
Tabla 112. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO	463

Tabla 113. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO.....	463
Tabla 114. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO	464
Tabla 115. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO.....	465
Tabla 116. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO.....	475
Tabla 117. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO	475
Tabla 118. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO.....	476
Tabla 119. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO.....	477
Tabla 120. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO	477
Tabla 121. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO.....	478
Tabla 122. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO.....	479
Tabla 123. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO	480
Tabla 124. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO.....	481
Tabla 125. Ciclo 1. Urbano	513
Tabla 126. Ciclo 2. Urbano	513
Tabla 127. Ciclo 3. Mixto	513
Tabla 128. Ciclo 4. Suburbano	514
Tabla 129. Ciclo 5. Suburbano	514
Tabla 130. Ciclo 6. Suburbano	514
Tabla 131. Principales resultados de la primera fase de simulación	517
Tabla 132. Principales resultados de la segunda fase de simulaciones.....	518
Tabla 133. Dimensionamiento óptimo del sistema energético del vehículo.....	519
Tabla 134. Consumos en litros equivalentes de gasolina /100km del vehículo i en el ciclo j	521
Tabla 135. Consumos y rendimientos en todos los ciclos	522
Tabla 136. Características de sistemas de energía primarios	527
Tabla 137. Características de sistemas de energía secundarios	527
Tabla 138. Tipos de pila de combustible y sus principales características	529
Tabla 139. Características principales de la batería Na-S.....	533
Tabla 140. Características principales de la batería Na-NiCl	534
Tabla 141. Características principales de la batería Li-FeS	535
Tabla 142. Características principales de la batería Li-polímero sólido.....	535
Tabla 143. Características principales de la batería Zn-Br	536
Tabla 144. Características principales del motor térmico	540
Tabla 145. Características principales de los discos de inercia.....	543
Tabla 146. Características principales del supercondensador	546

Tabla 147. Características Ultracapacitores vs. Baterías.....	548
Tabla 148. Características principales del sistema neumático.....	549
Tabla 149. Características principales del sistema hidráulico.....	551
Tabla 150. Características principales de la batería de plomo-ácido convencional.....	555
Tabla 151. Características principales de la batería de plomo-ácido avanzada.....	555
Tabla 152. Características principales de la batería de plomo-ácido regulada por válvula.....	556
Tabla 153. Características principales de la batería de plomo-ácido de lámina de metal.....	557
Tabla 154. Características principales de la batería de lón-litio.....	559
Tabla 155. Características principales de la batería de níquel-metal hidruro.....	560
Tabla 156. Características principales de la batería de aluminio-aire.....	561
Tabla 157. Características principales de la batería de cinc-aire.....	561
Tabla 158. Características técnicas y prestaciones asumidas para los turismos durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	605
Tabla 159. Características técnicas y prestaciones asumidas para los autobuses durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	605
Tabla 160. Costes medios de adquisición y mantenimiento asumidos para los turismos durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	605
Tabla 161. Costes medios de adquisición y mantenimiento asumidos para los autobuses durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	605
Tabla 162. Subvenciones asumidas a la hora de adquirir un turismo durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	606
Tabla 163. Subvenciones asumidas a la hora de adquirir un autobús durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	606
Tabla 164. Precio previsto para las instalaciones de suministro de hidrógeno o hidrogenaras durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	611
Tabla 165. Características de las hidrogenaras en función de su tamaño.....	611
Tabla 166. Coste de los terrenos dedicados a albergar las hidrogenaras.....	612
Tabla 167. Número de empleados mínimo en las hidrogenaras en función del tamaño.....	612
Tabla 168. Sueldo bruto medio de un operario de estación de servicio.....	612
Tabla 169. Consumos de hidrógeno asumidos para los turismos.....	613
Tabla 170. Consumos de hidrógeno asumidos para los autobuses.....	613
Tabla 171. Subvenciones asumidas a la hora de construir una instalación de suministro de hidrógeno durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	613
Tabla 172. Precio base de producción más distribución del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	619
Tabla 173. Subvenciones previstas para la producción del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	619
Tabla 174. Impuestos previstos para el hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	619
Tabla 175. Influencia en % del precio del gas natural y la energía eléctrica en el precio de producción del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050.....	620

Tabla 176. Precio base y valores máximos y mínimos que se espera puedan tomar el gas natural y la energía eléctrica en los escenarios temporales estudiados: 2015, 2030 y 2050.....	620
Tabla 177. Precio base de venta del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050	624
Tabla 178. Impuestos previstos para el hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050	624
Tabla 179. Consumos de hidrógeno asumidos para los turismos	624
Tabla 180. Consumos de hidrógeno asumidos para los autobuses	625
Tabla 181. Introducción de datos y resultados intermedios para obtener la inversión requerida. Año 2015.....	629
Tabla 182. Resumen de la inversión requerida. Año 2015.....	629
Tabla 183. Resumen de la inversión requerida. Acumulado hasta año 2015.....	630
Tabla 184. Cuenta de resultados consecuencia de la actividad de la venta de la demanda total acumulada de hidrógeno 2015	630
Tabla 185. Introducción de datos y resultados intermedios para obtener la inversión requerida. Año 2030.....	631
Tabla 186. Resumen de la inversión requerida. Año 2030.....	631
Tabla 187. Resumen de la inversión requerida. Acumulado hasta año 2030.....	632
Tabla 188. Cuenta de resultados consecuencia de la actividad de la venta de la demanda total acumulada de hidrógeno 2030	632
Tabla 189. Introducción de datos y resultados intermedios para obtener la inversión requerida. Año 2050.....	633
Tabla 190. Resumen de la inversión requerida. Año 2050.....	633
Tabla 191. Resumen de la inversión requerida. Acumulado hasta año 2050.....	633
Tabla 192. Cuenta de resultados consecuencia de la actividad de la venta de la demanda total acumulada de hidrógeno 2050	634
Tabla 193. Cuadro de variables de financiación.....	635
Tabla 194. Grado de influencia de las variables que influyen en los resultados finales de inversión necesaria en vehículos e infraestructuras.....	649
Tabla 195. Grado de influencia de las variables que influyen en beneficio neto resultante de la actividad de compra/producción y venta de hidrógeno	650
Tabla 196. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2015.....	653
Tabla 197. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2015.....	653
Tabla 198. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2030.....	654
Tabla 199. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2030.....	655
Tabla 200. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2050.....	656
Tabla 201. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2050.....	657

Tabla 202. Análisis de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i>	659
Tabla 203. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2015	660
Tabla 204. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2015	661
Tabla 205. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2030	662
Tabla 206. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2030	662
Tabla 207. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2050	663
Tabla 208. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2050	664
Tabla 209. Análisis de la variable <i>Previsión de los Turismos</i>	666
Tabla 210. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2015	667
Tabla 211. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2015	668
Tabla 212. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2030	669
Tabla 213. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2030	669
Tabla 214. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2050	670
Tabla 215. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2050	671
Tabla 216. Análisis de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de Turismos</i>	673
Tabla 217. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> y el grado de penetración en el año 2015	674
Tabla 218. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2015	675
Tabla 219. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> y el grado de penetración en el año 2030	676
Tabla 220. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2030	676
Tabla 221. Inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> y el grado de penetración en el año 2050	677

Tabla 222. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2050	678
Tabla 223. Análisis de la variable <i>Subvención Directa a la Construcción de Hidrogeneras</i>	680
Tabla 224. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2015	681
Tabla 225. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2015	682
Tabla 226. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2030	683
Tabla 227. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2030	684
Tabla 228. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2050	685
Tabla 229. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2050	686
Tabla 230. Análisis de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i>	688
Tabla 231. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2015	689
Tabla 232. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2015	690
Tabla 233. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2030	691
Tabla 234. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2030	692
Tabla 235. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2050	693
Tabla 236. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2050	694
Tabla 237. Análisis de la variable <i>Precio Base de Producción/compra + Distribución del Hidrógeno</i>	696
Tabla 238. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2015.....	697
Tabla 239. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2015	698

Tabla 240. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2030	699
Tabla 241. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2030.....	699
Tabla 242. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2050	700
Tabla 243. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2050.....	701
Tabla 244. Análisis de la variable <i>Número de Turismos (Beneficio Bruto)</i>	703
Tabla 245. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2015.....	704
Tabla 246. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2015.....	705
Tabla 247. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2030.....	706
Tabla 248. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2030.....	707
Tabla 249. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2050.....	708
Tabla 250. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2050.....	709
Tabla 251. Análisis de la variable <i>Impuesto a la Venta de Hidrógeno</i>	711
Tabla 252. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2015	712
Tabla 253. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2015.....	713
Tabla 254. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2030	714
Tabla 255. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2030.....	715
Tabla 256. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> y el grado de penetración en el año 2050	716
Tabla 257. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2050.....	717
Tabla 258. Análisis de la variable <i>Impuesto a la Producción/Compra de Hidrógeno</i>	719
Tabla 259. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2015	720

Tabla 260. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2015	721
Tabla 261. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2030	722
Tabla 262. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2030	723
Tabla 263. Beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> y el grado de penetración en el año 2050	724
Tabla 264. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2050	725
Tabla 265. Análisis de la variable <i>Consumo Medio de los Turismos</i>	727
Tabla 266. Crecimiento poblacional en diferentes escenarios	732
Tabla 267. Flota de vehículos en Zaragoza escenario 2050	734
Tabla 268. Número de hidrogeneras, transporte público escenario año 2050	738
Tabla 269. Número de hidrogeneras, transporte público y privado escenario año 2050	738
Tabla 270. Parámetros de inversión	739
Tabla 271. Análisis económico escenario año 2050 sólo con transporte público	740
Tabla 272. Cuenta de resultados. Transporte urbano público con grado de penetración bajo	741
Tabla 273. Cuenta de resultados. Transporte urbano público con grado de penetración medio	741
Tabla 274. Tabla resumen de la Herramienta de Valoración horizonte 2050	742
Tabla 275. Análisis económico escenario año 2050 transporte público y privado	743
Tabla 276. Cuenta de resultados. Transporte privado con grado de penetración bajo	744
Tabla 277. Cuenta de resultados. Transporte privado con grado de penetración medio	744
Tabla 278. Ratio empleados por unidad de superficie de las empresas de <i>PLAZA</i> dedicadas a la actividad industrial-logística	750
Tabla 279. Ratio empleados por unidad de superficie de los parques empresariales de <i>PLAZA</i>	751
Tabla 280. Número de pasajeros por año del aeropuerto de Zaragoza. Periodo 2000-2010	752
Tabla 281. Número de trabajadores por manzana	755
Tabla 282. Número de autobuses necesarios para el caso de tres líneas	758
Tabla 283. Número de autobuses necesarios para el caso de tres líneas y llegada hasta la Feria de Muestras	758
Tabla 284. Número de autobuses necesarios para el caso de dos líneas	759
Tabla 285. Demanda total de H ₂ prevista para satisfacer las tres líneas de autobús	760

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución modal del transporte interior en España	36
Figura 2. Vehículo híbrido configuración serie	101
Figura 3. Vehículo híbrido configuración paralelo	102
Figura 4. Vehículo híbrido configuración mixta	104
Figura 5. Diagrama del flujo de energía del modo sólo eléctrico.....	105
Figura 6. Diagrama del flujo de energía del modo sólo motor térmico	106
Figura 7. Diagrama del flujo de energía del modo sólo motor térmico más recarga del sistema de almacenamiento	107
Figura 8. Diagrama del flujo de energía del modo motor térmico más motor eléctrico.....	108
Figura 9. Diagrama del flujo de energía del modo freno regenerativo.....	109
Figura 10. Diagrama del flujo de energía del modo recarga estacionaria	109
Figura 11. Esquema del <i>Mercedes B NGT</i>	110
Figura 12. Comparativa de la autonomía media proporcionada por las diferentes tecnologías (2009)	121
Figura 13. Comparativa de la autonomía específica proporcionada por las diferentes tecnologías (2009)	123
Figura 14. De izquierda a derecha, gráficas velocidad/tiempo del ciclo urbano <i>ECE</i> , mixto <i>ECE_EUDC_LOW</i> e interurbano <i>EUDC</i>	126
Figura 15. Ciclos FTP.....	127
Figura 16. Ciclo japonés.....	127
Figura 17. Producción de hidrogeno por fuente de energía primaria (2004)	158
Figura 18. Producción del hidrogeno con aporte de energía térmica	159
Figura 19. Producción de hidrogeno con aporte de energía eléctrica y fotónica.....	160
Figura 20. Evolución de la producción de hidrógeno por fuente de energía primaria.....	161
Figura 21. Algunos modos de transporte del hidrógeno.....	167
Figura 22. Camión con plataforma para la distribución de hidrógeno	168
Figura 23. Vehículo industrial que transporta hidrógeno en estado líquido.....	170
Figura 24. Métodos de distribución del hidrógeno en función del consumo	172
Figura 25. Previsiones del modo de distribución del hidrógeno en Europa.....	173
Figura 26. Suministro de hidrógeno en periodos iniciales desde centros de producción centralizados.....	174
Figura 27. Suministro de hidrógeno en periodos iniciales a partir de centros a pequeña escala.....	175
Figura 28. Opciones de suministro de hidrógeno a largo plazo	176
Figura 29. Diferentes sistemas de almacenamiento de hidrógeno: nanotubos de carbono, hidruros metálicos y tanques a presión	177
Figura 30. Tanque de gas hidrogeno comprimido	178
Figura 31. Tipos de depósitos	180
Figura 32. Esquema de un tanque de almacenamiento del hidrógeno líquido.....	183
Figura 33. Tanques criogénicos para el almacenamiento de hidrógeno licuado a - 253°C	183
Figura 34. Almacenamiento de hidrógeno bajo tierra en estado líquido. Hidrogenera de <i>Shell</i> en Washington DC	184
Figura 35. Dispositivos de almacenamiento del hidrogeno	185

Figura 36. Estructura metálica con átomos de hidrógeno en los intersticios entre los átomos del metal	186
Figura 37. Cantidad de hidrógeno almacenado de diferentes sistemas de almacenamiento por masa y por volumen	188
Figura 38. Nanotubos de carbono	189
Figura 39. Imagen al microscopio de las microesferas de cristal	191
Figura 40. Esquema general de hidrogenera con almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso	194
Figura 41. Plataforma móvil para el almacenamiento den hidrogeneras a 200bar	195
Figura 42. Esquema general de hidrogenera con almacenamiento de hidrógeno en estado líquido	196
Figura 43. Esquema de hidrogenera instalada por Linde AG	197
Figura 44. Estaciones de hidrogeno móviles	198
Figura 45. Número de hidrogeneras existentes	199
Figura 46. Hidrogeneras estudiadas localizadas por continentes	200
Figura 47. Hidrogeneras estudiadas en Europa y su distribución por países	200
Figura 48. Distribuidores de tecnología para hidrogeneras y número de proyectos en los que han participado	201
Figura 49. Procesos de obtención de hidrógeno utilizados en las hidrogeneras	202
Figura 50. Reparto del método de almacenamiento del hidrógeno a nivel mundial	203
Figura 51. Reparto del método de almacenamiento del hidrógeno a nivel europeo	203
Figura 52. Cantidad de hidrógeno almacenado por las hidrogeneras estudiadas	204
Figura 53. Presión de almacenamiento del hidrógeno almacenado en las hidrogeneras	204
Figura 54. Modos de suministro ofrecidos por las hidrogeneras a nivel mundial	205
Figura 55. Modos de suministro ofrecidos por las hidrogeneras a nivel europeo	205
Figura 56. <i>BMW Hydrogen 7</i>	213
Figura 57. Cantidades de hidrógeno repostadas por minuto en el segundo cuarto del año 2009 en el proyecto <i>Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Infrastructure Learning Demonstration</i>	232
Figura 58. Causas por las que las instalaciones de producción de hidrógeno basadas en la electrólisis del agua permanecieron inoperativas (%)	241
Figura 59. Causas por las que las instalaciones de producción de hidrógeno basadas en el reformado por vapor de agua del metano permanecieron inoperativas (%)	242
Figura 60. Porcentajes del número de operaciones y de horas dedicadas al mantenimiento de los diferentes elementos y sistemas de que consta una hidrogenera	243
Figura 61. Esquema General	263
Figura 62. <i>Cálculo Número Hidrogeneras</i>	265
Figura 63. <i>Selección Sistema de Producción de Hidrógeno</i>	266
Figura 64. <i>Definir Proceso de Simulación</i>	267
Figura 65. <i>Simulación_1.1</i>	269
Figura 66. <i>Simulación_1.2</i>	271
Figura 67. <i>Simulación_2</i>	272
Figura 68. <i>Ubicación y ajuste</i>	273
Figura 69. <i>Ubicación Hidrogenera in situ</i>	275
Figura 70. Diagrama de colaboración proceso funcional dimensionamiento	298

Figura 71. Diagrama de colaboración proceso funcional tecnología	299
Figura 72. Diagrama de colaboración proceso funcional cálculo combinatorio	300
Figura 73. Diagrama de secuencia proceso funcional.....	302
Figura 74. Ejemplo de caso de combinatoria	304
Figura 75. Diagrama de flujo de las pantallas de la aplicación web (I).....	307
Figura 76. Diagrama de flujo de las pantallas de la aplicación web (II).....	308
Figura 77. Recorrido de la Línea 1 del tranvía de Zaragoza	310
Figura 78. Pantalla <i>crear ruta</i> de la herramienta	316
Figura 79. Recorrido de la Línea 1 del tranvía de Zaragoza obtenida en la herramienta	317
Figura 80. Prestaciones del modelo URBOS III de CAF	318
Figura 81. Pantalla <i>Configuración de Parámetros</i>	320
Figura 82. Pantalla de selección de número de vehículos y de recorridos por vehículo en la opción de <i>Calcular de Demanda</i> mediante <i>Selección Ruta</i>	321
Figura 83. Pantalla <i>Ver Ruta</i>	322
Figura 84. Demanda diaria total de hidrógeno y demanda por estado y presión de almacenamiento en vehículo	323
Figura 85. Pantalla de selección entre las opciones de dispensadores existentes en la base de datos	325
Figura 86. Pantalla de parámetros que influyen en el cálculo del número de dispensadores.....	327
Figura 87. Pantalla <i>Resultados Dispensadores</i>	328
Figura 88. Pantalla <i>Dispensadores por Hidrogena</i>	329
Figura 89. Pantalla de selección de las combinaciones posibles de tecnologías.....	330
Figura 90. Pantalla <i>Restringir Tecnologia</i>	331
Figura 91. Resumen de las opciones sometidas a estudio de equipos requeridos	333
Figura 92. Pantalla <i>Calcular costes</i>	334
Figura 93. Pantalla <i>Selección de Electrolizador</i>	335
Figura 94. Pantalla <i>Resumen Combinatoria</i>	336
Figura 95. Resumen de las opciones combinadas analizadas ordenadas por coste	337
Figura 96. Capa de información general: plano general del barrio del Áctur de Zaragoza	345
Figura 97. Inserción de puntos relevantes	345
Figura 98. Representación de los principales viales con clasificación según IMD	347
Figura 99. Representación de las áreas de preferencia debidas a la existencia de los viales con IMD alto	347
Figura 100. Representación de las zonas de preferencia debido a la existencia de cruces de vías.....	348
Figura 101. Inserción de la línea de bus C2 de Zaragoza	349
Figura 102. Representación del área de preferencia debido a la existencia de un inicio o fin de línea de autobús.....	350
Figura 103. Representación de los principales centros comerciales del barrio Áctur de Zaragoza	351
Figura 104. Representación de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) motivadas por la presencia de los grandes centros comerciales	352
Figura 105. Representación de los polígonos industriales existentes en la zona de estudio	353

Figura 106. Representación de las áreas de preferencia debido a la existencia de polígonos industriales.....	354
Figura 107. PGOU de Zaragoza zona Áctur. (Suelo urbanizable en gris)	355
Figura 108. Representación del área de preferencia debido a la existencia de suelos urbanizables.....	356
Figura 109. Zonas residenciales clasificadas por densidad de población	357
Figura 110. Representación de las áreas de exclusión generadas a partir de las zonas residenciales.....	358
Figura 111. Criterios de decisión introducidas sobre el mapa base	359
Figura 112. Representación del conjunto de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) generadas por los diferentes criterios de decisión	359
Figura 113. Representación de las zonas más óptimas para la localización de las estaciones de suministro de hidrógeno	363
Figura 114. PVP del gasóleo A en Europa (Febrero 2011)	383
Figura 115. Evolución de los precios de la energía 2000-2050 en el escenario base del proyecto <i>HyWays</i>	384
Figura 116. Costes de producción del hidrógeno en función de la tecnología de producción.....	387
Figura 117. Disminución coste de hidrógeno hasta 2050	388
Figura 118. Previsión para el periodo de tiempo 2010-2050 de los métodos de abastecimiento de hidrógeno	390
Figura 119. Evolución del precio de los sistemas de pila de combustible para vehículos 2002-2009	398
Figura 120. Evolución de la vida útil de los <i>stacks</i> de las pilas de combustibles para uso en vehículos 2006-2009	399
Figura 121. Próxima generación (Gen 2) del sistema de propulsión de pila de combustible de <i>GM</i>	400
Figura 122. Previsiones de la evolución del precio del hidrógeno	420
Figura 123. Evolución de los precios de la energía 2000-2050 en el escenario base del proyecto <i>HyWays</i>	422
Figura 124. Número de hidrogeneras en Europa por tamaño	426
Figura 125. Inversión requerida para cubrir las previsiones en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones.....	437
Figura 126. Inversión acumulada requerida para cubrir las previsiones en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones.....	440
Figura 127. Inversión para grado de penetración bajo en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones.....	446
Figura 128. Inversión acumulada para grado de penetración bajo en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones.....	447
Figura 129. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO.....	460
Figura 130. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO	460
Figura 131. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO.....	461
Figura 132. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO.....	462

Figura 133. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO	462
Figura 134. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO	463
Figura 135. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO	464
Figura 136. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO	464
Figura 137. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO	465
Figura 138. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO	475
Figura 139. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO	476
Figura 140. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO	476
Figura 141. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO	477
Figura 142. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO	478
Figura 143. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO	479
Figura 144. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO	480
Figura 145. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO	481
Figura 146. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO	482
Figura 147. Energía consumida por kilómetro según ciclo recorrido.....	515
Figura 148. Evolución de la proporción “potencia baterías/potencia total” según el tipo de ciclo.....	520
Figura 149. Consumo vehículos pila de combustible vs. tradicionales.....	522
Figura 150. Eficiencia vehículos pila de combustible vs. tradicionales.....	523
Figura 151. Pila de combustible PEM	530
Figura 152. Stack de pila de combustible.....	531
Figura 153. Batería de Cinc - Bromo.....	536
Figura 154. Motor térmico	539
Figura 155. Disco de inercia.....	543
Figura 156. Esquema del proceso de Electrólisis	574
Figura 157. Ruta metabólica del hidrógeno en <i>Clostridium butyricum</i>	581
Figura 158. Ruta metabólica de <i>Klebsiella pneumoniae</i> a partir de glucosa	582
Figura 159. Métodos de producción de hidrógeno solar	587
Figura 160. Demanda de energía para la electrólisis del agua y de vapor.....	589
Figura 161- Planta de producción de hidrógeno solar por electrólisis a alta temperatura del vapor	590
Figura 162. Ciclos termoquímicos solares de dos pasos para producir hidrógeno	594

Figura 163. Producción termoquímica de hidrógeno, a partir de combustibles fósiles y agua	595
Figura 164. Sistema de producción de hidrógeno mediante aerogeneradores eólicos	597
Figura 165. Apartado SUBVENCIONES de la aplicación Excel: Herramienta de Valoración	603
Figura 166. Apartado VEHÍCULOS-Grado de penetración baja	607
Figura 167. Apartado VEHÍCULOS-Grado de penetración media	608
Figura 168. Apartado VEHÍCULOS-Grado de penetración alta	609
Figura 169. Apartado INFRAESTRUCTURAS-Grado de penetración baja	615
Figura 170. Apartado INFRAESTRUCTURAS-Grado de penetración media	616
Figura 171. Apartado INFRAESTRUCTURAS-Grado de penetración alta	617
Figura 172. Apartado COSTE H2 de la aplicación	622
Figura 173. Apartado INGRESOS H2 de la aplicación Excel: Herramienta de Análisis de Viabilidad	626
Figura 174. Cuenta de resultados y de rentabilidad correspondiente al horizonte temporal 2015	636
Figura 175. Cuadro de financiación correspondiente al horizonte temporal 2015	637
Figura 176. Cuenta de resultados y de rentabilidad correspondiente al horizonte temporal 2030	638
Figura 177. Cuenta de resultados y de rentabilidad correspondiente al horizonte temporal 2050	639
Figura 178. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2015	653
Figura 179. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2015	654
Figura 180. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2030	655
Figura 181. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2030	656
Figura 182. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2050	657
Figura 183. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2050	658
Figura 184. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2015	660
Figura 185. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2015	661
Figura 186. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2030	662
Figura 187. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2030	663
Figura 188. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2050	664
Figura 189. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2050	665
Figura 190. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2015	667

Figura 191. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2015	668
Figura 192. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2030	669
Figura 193. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2030	670
Figura 194. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Previsión Precio de Turismos</i> en el año 2050	671
Figura 195. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos</i> en el año 2050	672
Figura 196. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2015	674
Figura 197. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2015	675
Figura 198. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2030	676
Figura 199. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2030	677
Figura 200. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2050	678
Figura 201. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable <i>Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras</i> en el año 2050	679
Figura 202. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2015.....	682
Figura 203. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2015.....	683
Figura 204. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2030.....	684
Figura 205. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2030.....	685
Figura 206. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2050.....	686
Figura 207. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Venta del Hidrógeno</i> en el año 2050.....	687
Figura 208. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2015.....	690
Figura 209. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2015.....	691
Figura 210. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2030.....	692

Figura 211. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2030	693
Figura 212. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2050	694
Figura 213. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno</i> en el año 2050	695
Figura 214. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2015.....	697
Figura 215. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2015	698
Figura 216. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2030.....	699
Figura 217. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2030	700
Figura 218. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2050.....	701
Figura 219. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Previsión del Número de Turismos</i> en el año 2050	702
Figura 220. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2015	705
Figura 221. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2015	706
Figura 222. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2030	707
Figura 223. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2030	708
Figura 224. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2050	709
Figura 225. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno</i> en el año 2050	710
Figura 226. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2015	713
Figura 227. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2015	714
Figura 228. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2030	715
Figura 229. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2030	716
Figura 230. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2050	717
Figura 231. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno</i> en el año 2050	718

Figura 232. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2015.....	721
Figura 233. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2015.....	722
Figura 234. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2030.....	723
Figura 235. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2030.....	724
Figura 236. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2050.....	725
Figura 237. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable <i>Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos</i> en el año 2050.....	726
Figura 238. Parámetros de partida.....	735
Figura 239. Cálculo de la demanda de hidrógeno.....	736
Figura 240. Cálculo de hidrogeneras.....	737
Figura 241. Previsión número de pasajeros en el Aeropuerto de Zaragoza año 2015.....	752
Figura 242. Capa de información general: plano general del polígono industrial PLAZA.....	754
Figura 243. Representación de los principales viales con clasificación según IMD.....	754
Figura 244. Representación de la ocupación de trabajadores por cada manzana.....	755
Figura 245. Representación de las líneas de bus diseñadas (L1, L2 y L3).....	756
Figura 246. Representación de las líneas de bus diseñadas (L1, L2 y L3F).....	757
Figura 247. Representación de las líneas de bus diseñadas (L2 y L4).....	757
Figura 248. Representación de las áreas de preferencia debidas a la existencia de los viales con IMD alto.....	761
Figura 249. Representación de las zonas de preferencia debido a la existencia de puntos de acceso al polígono industrial.....	762
Figura 250. Representación de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) motivadas por la presencia de los grandes centros comerciales.....	763
Figura 251. Representación del área de preferencia debido a la existencia de un inicio o fin de línea de autobús.....	764
Figura 252. Representación del área de preferencia debido a la existencia de suelos urbanizables.....	765
Figura 253. Representación del conjunto de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) generadas por los diferentes criterios de decisión.....	766
Figura 254. Representación de las zonas más óptimas para la localización de las estaciones de suministro de hidrógeno.....	767
Figura 255. Representación de la parcela seleccionada para la ubicación de la hidrogenera.....	767
Figura 256. Plano de la parcela seleccionada para la ubicación de la hidrogenera.....	769

RELACIÓN DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Abreviaturas:

AFC	Pila de combustible alcalina, del inglés: <i>Alkaline Fel Cell</i>
BAIT	Beneficios Antes de Impuestos y Después de Interese
BAT	Beneficio Neto
CARB	<i>Consejo de Recursos del aire de California, California's Air Resources Board</i>
DMFC	Pila de combustible de metanol directo, del inglés: <i>Direct Metanol Fuel Cell</i>
ECE	Ciclo Urbano Europeo
EDAR	Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales
EDLC	Condensadores electroquímicos de doble capa, del inglés: <i>Electrochemical Double Layer Capacitors</i>
<i>EEV standards,</i>	normativas para vehículos ecológicos mejorados, del inglés <i>Enhanced Environmental Vehicle standards</i>
EUDC	Ciclo de conducción extra Urbano, del inglés: <i>Extra Urban Driving Cycle</i>
FCEV	Vehículo eléctrico de pila de combustible, del inglés <i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
FCH JTI	Iniciativa Tecnológica Conjunta, del inglés: <i>Joint Technology Initiative for Hydrogen and Fuel Cells</i>
FTP	Procedimiento de Ensayo Federal, del inglés <i>Federal Test Procedure</i>
FRC	Factor de Recuperación del Capital
GLP	Gas Licuado del Petróleo
GN	Gas Natural
GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas natural licuado
HRT	Tiempo de Retención Hidráulica
IMD	Intensidad Media Diaria anual; número de vehículos que pasan por un vial durante un año, dividido por 365
MCFC	Pila de combustible de Carbonatos Fundidos, del inglés: <i>Molten Carbonate Fuel Cell</i>

MCI	Motor de Combustión Interna
MEA	Membrana ensambladora de electrones, del inglés: <i>membrane electrode assembly</i>
MEP	Motor de Encendido Provocado
PAFC	Pila de combustible de ácido fosfórico, del inglés: <i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i>
PC	Pila de Combustible
PCI _{H2}	Poder calorífico inferior del hidrógeno (120 MJ/kg ó 0,11374 MMBtu/kg)
PEM	Membrana polimérica de intercambio protónico
PEMFC	Pila de combustible de membrana polimérica
PGOU	Plan General de Ordenación Urbana
SOFC	Pila de combustible de óxido sólido, del inglés: <i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
TIR	Tasa Interna de Rentabilidad
VFA	Ácidos Grasos Volátiles
VRLA	Batería de pomo-ácido regulada por válvula, del inglés: <i>Valve Regulated Lead Acid</i>

Símbolos:

C_a	Precio del sistema de almacenamiento [€]
$C_{\text{accesibilidad}}$	Factor de área asociado al nivel de accesibilidad de las parcelas
$C_{\text{comercial1}}$	Factor de área asociado a la zona de exclusión por existencia de zona comercial
$C_{\text{comercial2}}$	Factor de área asociado a la zona de preferencia por existencia de zona comercial
$C_{\text{d.población}}$	Factor de área asociado a la densidad de población
C_{IMD}	Factor de área asociado al Índice Medio de Densidad
$C_{\text{industrial}}$	Factor de área asociado a la existencia de zona industrial
C_{oa}	Precio de referencia para cada uno de los equipos presentes en las hidrogeneras. Se ha obtenido para cada uno de los diferentes tipos de equipo a partir de la media del precio por kilogramo hora de los equipos de los que se disponía precios comerciales conocidos [€/kg]

C_{ox}	Precio de referencia para cada uno de los equipos de las hidrogeneras. Se ha obtenido para cada uno de los diferentes tipos de equipo a partir de la media del precio por kilogramo hora de los equipos de los que se disponía precios comerciales conocidos [€/h/kg]
C_{PGOU}	Factor de área asociado al plan general de ordenación urbana
C_{rutas}	Factor de área asociado a las rutas
C_x	Precio de cada equipo x, que forma parte de una hidrogenera [€]
$COSTE_{Equipo\ i}$	Precio de cada equipo que compone una hidrogenera [€]
$COSTE_{H_2}$	Precio del hidrógeno, según el precio fijado por el gasista [€]
$COSTE_{H_2G}$	Precio del hidrógeno suministrado mediante gasoducto, según el precio fijado por el gasista
$COSTE_{instalación}$	Coste de instalación de la tubería [€]
$COSTE_{materiales}$	Coste del material requerido para fabricar la tubería [€]
$COSTE_{reparto}$	Coste que corresponde al reparto del hidrógeno hasta que llega a la hidrogenera, es decir, el coste del transporte en vehículo industrial desde la estación de producción hasta la hidrogenera [€]
$COSTE_{tubería}$	Coste anual asociado a la instalación de la tubería y al coste de los materiales de dicha tubería [€]
D	Diámetro de la tubería, en metros [m]
$E_{licuefacción}$	Energía teórica para la licuefacción del hidrógeno es de 11.8 MJ/kg aunque si la conversión transcurre durante la licuefacción la energía necesaria se eleva hasta 14,1MJ/kg
$€_{camión}$	Coste de cada entrega de semirremolque de hidrógeno
$€_{Energía\ eléctrica}$	Precio medio de la energía eléctrica [€/MWh]
$€_{GN}$	Precio del gas natural utilizado
$€_{H_2}$	Precio del kilo de hidrógeno fijado por la empresa gasista distribuidora [€/kg]

ϵ_{H_2O}	Precio del agua [€/m ³]
$\epsilon_{instalación}$	Precio unitario de instalación por unidad de longitud [€/m]
$\epsilon_{material}$	Precio unitario del material requerido para fabricar la tubería por unidad de superficie [€/m ²]
f_{ex}	Factor de escala de cada equipo que compone la hidrogenera
f_{ea}	Factor de escala del sistema de almacenamiento
l	Longitud total de la tubería [m]
n_G	Número de años que se estima esté en uso el gaseoducto
N_{equipo_i}	Número de equipos de igual marca, modelo y precio
$N^{\circ} repartos$	Número de repartos que se producen anualmente
P_{equipo}	Potencia máxima consumida por el equipo de producción de hidrógeno [kW]
Q_{equipo}	Caudal de producción de hidrógeno particular de cada equipo [kg/hora]
Q_{H_2}	Demanda diaria de hidrógeno [kg/día]
$Q_{H_2\ electroliz\ ador}$	Cantidad de hidrógeno generado por el electrolizador [Nm ³ /día]
Q_{H_2O}	Caudal de agua requerido por el electrolizador para producir el hidrógeno demandado anualmente
$Q_{H_2O\ consumido\ electroliz\ ador}$	Cantidad de agua consumida por el electrolizador [m ³ /día]
R_{ϵ}	Valor, de 1 a n, asociado a cada una de las opciones tecnológicas consideradas en la herramienta web desarrollada, en función del coste
R_{η}	Valor, de 1 a n, asociado a cada una de las opciones tecnológicas consideradas en la herramienta web desarrollada, en función del rendimiento
$T_{aproximación}$	Tiempo que se tarda en aproximar al vehículo al dispensador de suministro desde el momento en el que se está dentro de la hidrogenera
$T_{funcionamiento}$	Tiempo diario que debe permanecer en funcionamiento el equipo para producir el hidrógeno diario demandado [h/día]
$T_{preparación}$	Tiempo que se tarda en preparar la operación de repostaje: colocación de la manguera, ajuste de boquerel

T_{salida}	Tiempo que tarda el vehículo en abandonar la zona del dispensador y dejarla lista para el siguiente vehículo. Incluye el tiempo correspondiente a la recogida de la manguera y el tiempo que tarda el vehículo en dejar libre la zona
$T_{\text{suministro}}$	Tiempo que tarda en sí la operación de dispensado, desde los depósitos de la hidrogenera al depósito del vehículo
T_{unitario}	Tiempo que cuesta el repostar un kilogramo de hidrógeno
y	Plazo, en días, que existe entre dos entregas sucesivas de hidrógeno

Letras griegas:

$\eta_{\text{abastecimiento H2}}$	Rendimiento del sistema de abastecimiento de hidrógeno
η_{bomba}	Rendimiento de la bomba de hidrógeno
$\eta_{\text{compresor}}$	Rendimiento del sistema de compresión de hidrógeno
$\eta_{\text{dispensador}}$	Rendimiento del sistema de dispensado de hidrógeno
$\eta_{\text{electrolizador}}$	Rendimiento de conversión agua/hidrógeno del electrolizador. Dependerá del modelo seleccionado.
$\eta_{\text{evaporador}}$	Rendimiento del evaporador de hidrógeno
$\eta_{\text{licuefactor}}$	Rendimiento del sistema de licuefacción del hidrógeno $\eta_{\text{pretrat H2}}$ Rendimiento del sistema de pretratamiento de agua
η_{procesos}	Rendimiento de los procesos que tienen lugar en el funcionamiento normal de una hidrogenera
$\eta_{\text{producción H2}}$	Rendimiento del sistema de producción de hidrógeno
$\eta_{\text{purificador}}$	Rendimiento del sistema de purificación
$\eta_{\text{reformador}}$	Eficiencia del proceso de producción de hidrógeno mediante reformado
$\eta_{\text{tubería}}$	Rendimiento del sistema de distribución de hidrógeno mediante tubería
$\eta_{\text{vehículo H2G}}$	Rendimiento del sistema de distribución de hidrógeno mediante remolque con depósitos de hidrógeno gas comprimido
$\eta_{\text{vehículo H2L}}$	Rendimiento del sistema de distribución de hidrógeno mediante vehículo industrial criogénico
$\xi_{\text{accesibilidad}}$	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado a la accesibilidad de las parcelas

$\xi_{\text{comercial1}}$	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado a la zona de exclusión debido a la existencia de zona comercial
$\xi_{\text{comercial2}}$	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado a la zona de preferencia debido a la existencia de zona comercial
$\xi_{\text{d.población}}$	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado a la densidad de población
ξ_{IMD}	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado al IMD de las vías
$\xi_{\text{industrial}}$	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado a la existencia de zona industrial
ξ_{PGOU}	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado al plan general de ordenación urbana
ξ_{rutas}	Peso correspondiente al criterio de decisión de localización de hidrogeneras asociado a las rutas
λ_{ϵ}	Peso en función del coste, asociado a cada una de las opciones tecnológicas consideradas en la herramienta web desarrollada
λ_{η}	Peso en función del rendimiento, asociado a cada una de las opciones tecnológicas consideradas en la herramienta web desarrollada

"El hombre nunca sabe de lo que es capaz, hasta que lo intenta"

Charles Dickens

CAPÍTULO 1.

Introducción

1.1. Motivación

La elaboración de la presente tesis viene motivada por la necesidad de desarrollar una metodología que permita la parametrización de la infraestructura de suministro de combustible necesaria para los nuevos conceptos de tracción en un sistema de transporte basado en automóviles eléctricos. Esta metodología se ha desarrollado a partir de los trabajos realizados dentro del contexto del proyecto EcoTrans “Tecnologías Ecológicas para el Transporte Urbano”, encuadrado dentro del proyecto CENIT 2008/0712 del Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial del Ministerio español de Ciencia y Tecnología, cuyo líder es CAF y en el que ha participado un consorcio de más de 20 empresas e instituciones.

En el contexto que nos ocupa, el sistema de transporte lo componen el conjunto de medios y equipamiento que interactuando entre sí permiten que se lleve a cabo el movimiento de pasajeros y mercancía. Cada movimiento consta de un origen, una serie de posibles puntos de paso intermedios, un destino y un entorno caracterizado por unos atributos geográficos propios. Así, el sistema de transporte constará de una infraestructura por la que discurrirá físicamente la actividad de transportar, que será diferente en función del modo de transporte utilizado: carreteras para el transporte terrestre por carretera, vías para el transporte por ferrocarril, aeropuertos para el transporte aéreo y puertos y canales para el transporte por barco; un vehículo o vehículos que permitan el traslado de las personas y/o mercancías (en el caso de transporte de peatones no se requerirá de vehículo alguno); y unos servicios que permiten que la actividad se lleve a cabo, por ejemplo las estaciones de servicio.

El sistema de transporte está tan integrado en la vida socio-económica de las instituciones, corporaciones e individuos particulares, que a menudo resulta invisible para el consumidor. Esta invisibilidad está estrechamente ligada con la eficiencia: a mayor eficiencia, más desapercibido pasa el sistema de transporte y más sostenible es el sistema.

Un sistema de transporte sostenible se cimenta en la eficiencia energética y en la ausencia de efectos perjudiciales, tanto para el medioambiente como para los seres humanos, durante el desarrollo de las actividades que engloban el proceso de transporte.

A la hora de mejorar la eficiencia energética, existen dos posibilidades: la incorporación de nuevos sistemas de tracción y la optimización de las redes de transporte.

Nuevas tecnologías aplicadas a la movilidad: eficiencia energética

El concepto de eficiencia energética en el transporte supone un cambio de mentalidad respecto a las ideas de consumo energético que el empleo de los vehículos con motor de combustión interna nos ha acostumbrado durante el último siglo.

Tradicionalmente es suficiente con llenar el tanque de combustible de un vehículo convencional; tener carburante te asegura el desplazamiento, con independencia de las características de éste, la exigencia que presente y de si el consumo de combustible del vehículo es mayor o menor. La abundancia de petróleo de la que ha disfrutado hasta ahora la sociedad (P. Almeida, 2009 [1]) y una red de estaciones de repostaje muy nutrida, han contribuido a no tener la necesidad de salir más allá de estas ideas.

Por el contrario, el marco actual está marcado por la inminente irrupción de nuevos vehículos con sistemas de tracción alternativos al sistema de tracción tradicional de combustión interna alimentado con gasolina o gasoil. Estos nuevos sistemas de tracción se dividen en térmicos (biocombustibles, gas natural o GLP), eléctricos (enchufables o pila de combustible) e híbridos (térmicos-eléctricos).

Ante esta situación, el sector transporte se ha visto avocado a un periodo de transición en el que la electrificación deberá ir sustituyendo poco a poco a los combustibles fósiles. La electricidad debe jugar un papel de gran importancia tanto en el transporte como en el aprovechamiento y la transformación de las energías renovables.

La incorporación de los nuevos sistemas de tracción llega ligada a unos sistemas de diseño eficientes, en los que conocer la energía que va a requerir el vehículo en su funcionamiento va a ser básico. Habrá que llegar al compromiso de mejores prestaciones posibles con el menor gasto energético que esto permita. Para ello se hacen imprescindibles estudios de demanda particulares en función del tipo de vehículo y el uso que se vaya a hacer de él.

Por lo tanto, el problema se centra en lograr la mayor eficiencia energética posible, es decir, lograr realizar un trabajo determinado con la mínima pérdida de energía posible, o lo que es lo mismo, que la energía que ha producido un determinado movimiento de un vehículo sea lo más próxima posible a la existente en los sistemas de almacenamiento antes de que se inicie el mismo.

Optimización de las redes de transporte

La optimización de las redes de transporte se basa en tareas de planificación de rutas, obteniéndose como resultado unos ahorros energéticos que contribuyen a la sostenibilidad del sistema de transporte.

En general, optimizar una red de transporte, ya sea terrestre, ferroviaria o aérea, consiste en planificar las rutas que conectan los punto de origen con los de destino, coincidentes o no, de forma que el consumo energético experimentado por el vehículo sea el menor posible. Idealmente la ruta que implica un menos consumo de energía coincidiría con la línea recta. No obstante, en ocasiones puede que el camino más corto no sea la opción óptima; esto vendrá determinado por el tipo de vía, la orografía del terreno y todos aquellos factores que influyan sobre el consumo del sistema de tracción del vehículo que recorrerá la ruta.

A la hora de la verdad, cuando hay que enfrentarse a la tarea de planificación, además del factor energético, entran en juego otra serie de factores de tipo económico y operativo. Por ejemplo, para el caso particular del transporte de mercancías por carretera, a la hora de planificar las rutas de la red de transporte, además de determinar la ruta óptima (menor consumo energético, supone un menor desembolso económico en combustible o energía eléctrica, pero también debe tenerse en cuenta el pago de posibles peajes en el caso de que la ruta que implicara menor consumo energético discurriera por autopistas o vías de pago, lo que llevaría a la búsqueda de posible rutas alternativas que incurrieran en menores gastos globales), deben tenerse en cuenta aspectos como la reducción de los kilómetros a realizar en vacío; la combinación de entregas; los plazos temporales de recogida y entrega marcados por el cliente, la empresa o la normativa vigente; las características y restricciones de los productos a entregar o recoger; el tipo de vehículo; o la maximización de la masa y el volumen de carga.

Potencial económico del transporte por carretera

Por otro lado, la capacidad global de transporte refleja la potencia económica de un país, ya que para que sea desarrollado económicamente no basta con tener una gran producción, sino también tener la capacidad de poder transportar a cualquier lugar del mundo para ampliar los mercados consumidores.

En este aspecto, el transporte por carretera interurbano es el más habitual en todo el mundo. Da acceso, a personas y mercancías, a la mayoría de puntos del territorio. Conecta ciudades y pueblos, y es fundamental para el transporte de grandes mercancías y grupos numerosos de personas, aunque la mayoría de los vehículos que se desplazan por estas carreteras son pequeños vehículos privados. En el caso particular de España, el transporte por carretera es el más utilizado tanto en el transporte de viajeros como en el de mercancías, representando en torno al 90-80% del total de los desplazamientos.

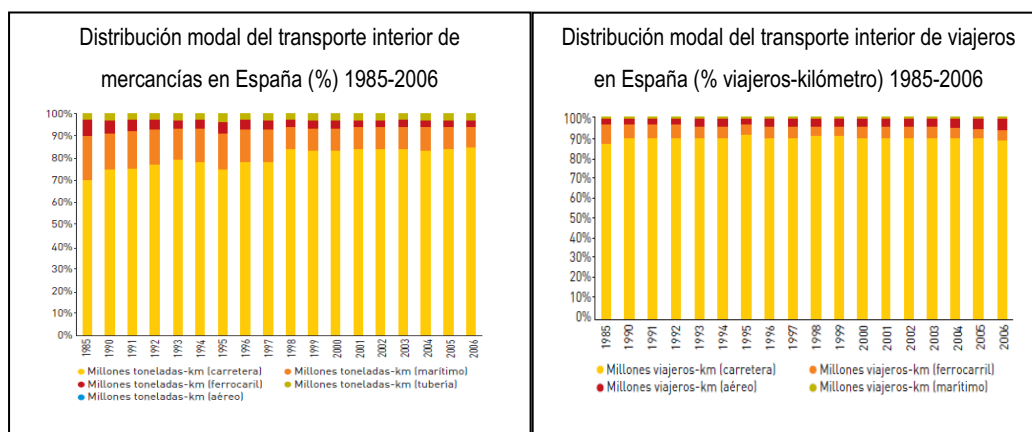


Figura 1. Distribución modal del transporte interior en España

Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España, OSE (2007)

La relevancia y actualidad de todo lo aquí expuesto hasta el momento es lo que ha motivado la elaboración de los trabajos que constituyen esta tesis doctoral, que lleva como título: “*Parametrización de un sistema de transporte sostenible por carretera en función del análisis de los factores determinantes en los nuevos sistemas de tracción de vehículos eléctricos.*”

Los trabajos desarrollados en esta tesis se centran en la eficiencia energética y las nuevas tecnologías de tracción en los vehículos eléctricos como instrumento de búsqueda de la sostenibilidad en el transporte. Por otro lado, el estudio de la planificación de rutas se deja fuera de los contenidos principales de la presente tesis debido a su amplitud y complejidad, al hacer imposible abarcar simultáneamente y de una forma apropiada estos dos criterios propuestos de sostenibilidad en el transporte. Por todo esto, se propone el estudio de la planificación y optimización de rutas como una nueva línea de estudios de investigación y trabajos doctorales.

A su vez, de entre los diferentes sistemas de tracción eléctricos, la presente tesis se centra en la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible debido a las grandes expectativas que se tienen en este vector energético como sustituto, en un futuro a medio-largo plazo, de los combustibles fósiles. No obstante, este amplio margen temporal y la complejidad de esta tecnología, dará lugar en un escenario más cercano a un periodo de transición que justifica el análisis realizado al resto de tecnologías recogidas en la presente tesis.

Paralelamente a la irrupción de nuevos vehículos con sistemas de tracción basados en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible, se hace necesaria la implantación de nuevas infraestructuras que aseguren el suministro de este nuevo “combustible”. Por lo tanto, un importante apartado de la tesis está dedicado a preparar la llegada de estas nuevas infraestructuras al sistema de transporte de forma que la transición a estos nuevos sistemas de tracción, tanto en términos técnicos como económicos, sea lo menos traumática posible.

En este sentido, la situación en Europa será revisada con mayor profundidad, ya que se trata del área de influencia en la que se encuentra España, y la que finalmente determinará en mayor medida el posible crecimiento que se produzca de las tecnologías del hidrógeno. Sin embargo, para hacer un estudio general y poder tener una buena visión global no se pueden obviar otras zonas muy importantes de crecimiento.

1.2. Objetivos

Para dar respuesta a las carencias detectadas en el proceso de implantación de las nuevas tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible como instrumento en la búsqueda de la sostenibilidad en el transporte, en la presente tesis se plantean los siguientes objetivos principales:

- Análisis de los factores que influyen en el dimensionamiento de instalaciones de reabastecimiento en función de la demanda.

El tipo de instalación variará en función de la tecnología a implantar: vehículos eléctricos enchufables a red: puntos de recarga; o vehículos con pila de combustible de hidrógeno. Esta tesis se centra en este tipo de instalaciones y se marca el objetivo de, a partir de los factores más determinantes, obtener una metodología para optimizar el dimensionamiento de las estaciones de suministro de hidrógeno.

El factor más determinante a la hora de dimensionar una instalación de reabastecimiento de hidrógeno será la demanda de hidrógeno existente. La demanda viene determinada por el tamaño de la flota y el uso que se haga de esta. Por lo tanto, otro de los objetivos planteados en la tesis es del cálculo de esta demanda de hidrógeno, previo paso al dimensionamiento completo de la instalación.

- Análisis de las variables económicas más influyentes a la hora de establecer una infraestructura de recarga para vehículos de hidrógeno. Análisis de sensibilidad.

Con el trabajo desarrollado en esta tesis, se pretende identificar las variables más críticas a la hora de maximizar la rentabilidad de los nuevos sistemas de transporte basados en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible.

Con el fin de alcanzar de forma satisfactoria estos objetivos propuestos, ha sido necesario plantearse una serie de objetivos secundarios que se resumen a continuación:

- Estudio de las diferentes alternativas existentes a los vehículos con sistemas de tracción con motorización convencionales. Comparación de prestaciones entre los diferentes sistemas de tracción.
- Análisis de los factores que influyen en el diseño de los vehículos de las flotas de transporte, optimización de la arquitectura de los vehículos.

Las rutas a recorrer, así como las ventanas temporales que deberán cumplirse, definirán el ciclo de funcionamiento a cumplir por el vehículo y determinarán la autonomía que deberán tener los vehículos. Esta autonomía, junto a los consumos de combustible o energía que experimentarán los vehículos, factor variable en función, por ejemplo, de la carga a transportar por los vehículos, el peso propio del vehículo o la orografía del terreno en el que se produzca el desplazamiento, definirá las prestaciones del vehículo. La solución de este problema alcanza una mayor efectividad cuando se trata de flotas cautivas o rutas de transporte público o de reparto cuyos recorridos son conocidos y están predeterminados.

- Análisis del estado de las tecnologías de producción, transporte y almacenamiento del hidrógeno. Adquisición de conocimientos sobre las tecnologías existentes y el grado de desarrollo de las mismas

1.3. Antecedentes y Estado Actual

Si se analizan los tipos de vehículos que se prevé circulen por las carreteras en los próximos años, Tabla 1, se observa que los vehículos de pila de combustible de hidrógeno serán unos de ellos. Esto es debido a que este elemento, que es el más abundante en el planeta, puede utilizarse como combustible limpio y eficiente, alcanzando unas prestaciones de autonomía y servicio comparables a las proporcionadas por los combustibles fósiles convencionales.

Se prevé que en un periodo de 10-20 años, el número de vehículos que requieran hidrógeno para su propulsión se incremente notablemente, desde los primeros años, en los que la demanda será reducida y destinada predominantemente a flotas cautivas y de demostración, hasta la llegada de épocas más avanzadas, en las que la demanda será elevada debido a que se prevé que se extienda el uso de este tipo de vehículos al consumidor a nivel global.

En la actualidad, no se sigue ningún criterio de optimización para ubicar este tipo de instalaciones. Al tratarse de flotas localizadas, su ubicación atiende a criterios de proximidad, y en muchos casos se trata de instalaciones de uso privado. Es por ello que si se generalizara la utilización del hidrógeno para el uso en el transporte y se abrieran al público estas instalaciones, resultarían insuficientes y su explotación presentaría graves problemas logísticos, tanto a la hora de abastecer a la propia instalación del hidrógeno demandado, como de acceso a las estaciones por parte de los usuarios.

A este respecto, como se verá en el CAPÍTULO 2, en la bibliografía especializada existe un gran número de artículos dedicados a las tecnologías del hidrógeno y su incorporación al sector transporte, en los que se analiza, por ejemplo, las bases en las que sustentar una economía del hidrógeno (A. H. Hajimiragha, 2011 [2]), la infraestructura del hidrógeno necesaria para el sector transporte (P. Agnolucci, 2007 [3]) o las estrategias de inversión más aconsejables para lograr que la transición de las estaciones de repostaje de gasolina a las de hidrógeno sea lo más óptima posible (P. Forsberg, 2007 [4]). El problema surge cuando se buscan referencias concretas al problema del dimensionamiento óptimo de la infraestructura

necesaria y la ubicación de las instalaciones bajo unas condiciones de operación determinadas de accesibilidad, disponibilidad y viabilidad.

Tabla 1. Tipos de vehículos que se prevén circulen por las carreteras en los próximos años

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación consultada**

	Sistema de tracción	Sistema de energía	Fuente de energía / infraestructura	Características
Vehículo de Motor de Combustión Interna	Motor de combustión interna	Unidad de generación de combustión interna	Gasolineras	<ul style="list-style-type: none"> - Emisiones elevadas - Consumo de combustible elevado - Eficiencia energética baja - Dependiente del petróleo - Autonomía elevada - Coste reducido - Tecnología madura - Emisiones reducidas
Vehículo Eléctrico Híbrido	Motor de combustión interna Motor eléctrico	Batería Supercondensadores Unidad de generación de combustión interna	Instalaciones de recarga a la red eléctrica (híbridos <i>plug-in</i>) Gasolineras	<ul style="list-style-type: none"> - Consumos de combustible bajo en comparación con los vehículos de combustión interna convencionales - Dependiente del petróleo (excepto en los híbridos <i>plug-in</i>) - Autonomía elevada - Coste mayor que el de los vehículos de combustión interna convencionales - Reducción de emisiones y de consumos dependen del ciclo de funcionamiento - Tecnología disponible comercialmente
Vehículo Eléctrico de Pila de Combustible	Motor eléctrico	Pila de combustible Batería / Supercondensadores de arranque	Infraestructura de producción y transporte de hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> - Emisiones cero o casi nulas - Eficiencia energética alta - Independencia del petróleo (siempre que no se utilice para producir hidrógeno) - Autonomía algo inferior a la que proporcionan los vehículos de combustión interna convencionales - Coste elevado - Tecnología en desarrollo
Vehículo Eléctrico	Motor eléctrico	Batería Supercondensadores	Instalaciones de recarga a la red eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> - Emisiones cero - Eficiencia energética alta - Independencia del petróleo - Baja autonomía - Coste inicial elevado - Tecnología disponible comercialmente

A la hora de enfrentarse a la búsqueda de los parámetros principales en el proceso de implantación de un sistema de transporte sostenible basado en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible y llevar a cabo el dimensionamiento de la infraestructura necesaria y su ubicación en el territorio, no se ha detectado ningún modelo de cálculo que satisfaga en su conjunto las necesidades planteadas. Por lo tanto, de esta carencia surge una oportunidad que, debido a la inminente proliferación de este tipo de instalaciones, se revela de un gran interés general.

El desarrollo de esta metodología y herramientas, ayudarán a localizar de la manera más eficiente posible el número y la ubicación de las estaciones de suministro de hidrógeno, así como la dimensión de las mismas, atendiendo a las diferentes demandas que se produzcan en las diferentes épocas de implementación. Esta elección de la ubicación óptima, que atiende tanto a criterios logísticos como técnicos, es de gran importancia debido al elevado coste que supone la construcción de este tipo de instalaciones.

En resumen, se pretende crear una metodología y una serie de herramientas de cálculo que faciliten la tarea de toma de decisiones a todo responsable del proceso de gestión de las futuras redes de hidrógeno. Esto se logrará dando solución: primero al problema del dimensionamiento de las instalaciones de suministro de hidrógeno necesarias; después al número de instalaciones requeridas; y finalmente, al análisis económico y de viabilidad, el cual permitirá determinar cuáles son los parámetros más influyentes a la hora de diseñar un sistema de transporte basado en el hidrógeno.

1.4. Estructura de la Tesis

En el Capítulo 1 se recoge una introducción general al trabajo desarrollado en la presente tesis. En esta introducción se analizan las razones que han motivado el inicio de esta investigación, se indican los objetivos perseguidos, el punto de partida desde el que se han iniciado las actividades y se explica el esquema seguido en la elaboración de la tesis.

El Capítulo 2 muestra un resumen de la revisión bibliográfica realizada, indicando el estado del arte de los diferentes aspectos considerados en la elaboración de esta tesis, como por ejemplo el dimensionamiento y análisis de costes de hidrogeneras, o el análisis de los sistemas de almacenamiento de energía que forman parte del sistema de tracción de vehículos los vehículos. También se recoge un análisis de los proyectos presentes o pasados a nivel mundial en materia de hidrógeno y sus infraestructuras asociadas.

En el Capítulo 3, tras analizar la situación del transporte actual y llevar a cabo una revisión del estado del arte sobre los vehículos y las tecnologías de tracción alternativas a los sistemas de tracción convencionales, se estudia el proceso de incorporación de los nuevos sistemas de tracción eléctricos al sector transporte. Estos nuevos vehículos llegan ligados a unos sistemas de diseño flexibles y eficientes, basados en la optimización del sistema de tracción y energético del vehículo. Por esta razón, en este capítulo también se hace referencia a la caracterización de los diferentes sistemas de acumulación de energía y se plantea una metodología que permite el dimensionamiento de los sistemas energéticos de los vehículos.

La incorporación del hidrógeno a los sistemas de transporte supone, no sólo la incorporación de vehículos con unas nuevas tecnologías, sino la creación de una nueva infraestructura que englobe la producción, almacenamiento, transporte y distribución, cuya punta de lanza son las estaciones de repostaje de hidrógeno, también denominadas hidrogeneras. Por esta razón, en el Capítulo 4 se realiza una introducción del estado de desarrollo de estas nuevas tecnologías.

En el Capítulo 5, una vez analizados los elementos que rodean e influyen a estos nuevos sistemas basados en el hidrógeno, se plantea el desarrollo de una metodología de selección y dimensionamiento de la logística asociada a los sistemas de hidrógeno a dos niveles. Así, se desarrolla una herramienta más básica que, de forma automática, sencilla y ágil, define las características básicas de unas hidrogeneras tipo a partir de unos datos de entrada mínimos, y un modelo de cálculo completo que tiene como objetivo el dimensionamiento detallado de las hidrogeneras en función de sus particularidades, y cuyas bases funcionales quedan plasmadas en la tesis. También se recoge la implantación de esta herramienta en una aplicación web, junto con su funcionamiento y se plantea una metodología para determinar la ubicación óptima de las hidrogeneras mediante un sistema GIS.

Tomando como punto de partida el capítulo anterior y a la espera de la irrupción definitiva de los vehículos de hidrógeno en los mercados, en el Capítulo 6 se estudia la forma más óptima de adaptar las nuevas tipologías de transporte basadas en la energía procedente del hidrógeno al sistema de transporte actual. Se ha diseñado una herramienta que permite el análisis de las variables más influyentes en el proceso de implantación de estas tecnologías. Para ello se fijan unos escenarios temporales, se analizan los costes bajo unas hipótesis de partida y se establece el modelo económico a seguir. Tras aplicar este modelo al caso particular de España, se realiza un análisis de sensibilidad y se obtienen las variables de mayor influencia respecto a la inversión total a realizar y sobre el beneficio a obtener

En el Capítulo 7 se resumen los resultados obtenidos más relevantes y se extraen las principales conclusiones. Además, se plantea una serie de futuras líneas de investigación a desarrollar como continuación a los trabajos desarrollados.

Finalmente se recogen 6 anexos que sirven de complemento a la información facilitada a lo largo de los siete capítulos que componen esta tesis. Los títulos de estos anexos son:

- ANEXO 1. Optimización del Sistema de Tracción de Vehículos no Contaminantes
- ANEXO 2. Sistemas de Almacenamiento de Energía
- ANEXO 3. Sistemas de Producción de Hidrógeno
- ANEXO 4. Herramienta de Valoración

- ANEXO 5. Análisis de Sensibilidad
- ANEXO 6. Validación del Modelo de Cálculo

Los anexos 1 y 2 hacen referencia directa al Capítulo 3, el anexo 3 al Capítulo 4, los anexos 4 y 5 al Capítulo 6 y el anexo 6 al Capítulo 5.

*"Es de importancia para quien desee alcanzar una certeza en su investigación,
el saber dudar a tiempo"*

Aristóteles

CAPÍTULO 2.

Revisión bibliográfica

2.1. Bibliografía Científica Especializada

Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre los diferentes aspectos que se tratan en la presente tesis: métodos aproximados, consumo de energía en el sector transporte, sistemas de tracción con motorización alternativos, ciclos de funcionamiento, optimización de los sistemas de energía, vehículos de hidrógeno, la incorporación del hidrógeno al sector transporte, el dimensionamiento de hidrogeneras y la operativa de hidrogeneras.

2.1.1. Métodos aproximados

Ante la complejidad que supone hacer frente a cada problema de transporte, debido a que a menudo hay que enfrentarse a casos en los que las alternativas son muy numerosas, cuando llega el momento de planificar las redes de transporte se cuenta con la ayuda de los denominados optimizadores de rutas. Un optimizador de rutas es una herramienta de ayuda que utiliza métodos o técnicas cuantitativas apoyadas en modelos matemáticos, para automatizar el proceso de planificación de rutas y optimizar los recursos disponibles. Uno de los métodos matemáticos más utilizados para este fin son los algoritmos genéticos.

Un algoritmo genético es un método aproximado de búsqueda y optimización basado en el proceso genético de los organismos vivos, de acuerdo a los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes propuestos por Darwin. Por imitación de este proceso, los algoritmos genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real (Holland, 1975 [5]). Más estrictamente, y siguiendo la definición propuesta por Goldberg, *“los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado para construir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas”*. La utilización de los algoritmos genéticos no garantiza la obtención de la solución más óptima, no obstante, se llegan a soluciones de un nivel muy alto en un tiempo muy competitivo respecto al resto de algoritmos de optimización (Goldberg, 1989 [6]).

Estos optimizadores de rutas basados en los algoritmos genéticos se han implantado con éxito para determinar rutas de transporte en diferentes sectores, entre los que destacan entre otros: la distribución de hidrocarburos, el traslado de turistas, el transporte regular y discrecional de viajeros, el reparto de mercancías a grandes y pequeños comercios o la recogida de residuos urbanos. Además, estos algoritmos se han aplicado durante los últimos años a problemas de estadística (S. Chatterjee, 1996 [7]), a problemas de obtención de criterios de diseño en los campos de la ingeniería civil, ingeniería eléctrica e ingeniería mecánica, para campos tan diversos como construcciones, componentes, filtros digitales o turbinas de gas (G.N. Bullock, 1995 [8]; A.M. Brintrup, 2007 [9]), y a problemas de desarrollo de materiales compuestos adaptados (D. Sadagopan, 1998 [10]).

Otro método también utilizado son las heurísticas. Las heurísticas constituyen técnicas de búsqueda de la mejor solución para aquellos casos en los que las alternativas son numerosas. Son elementos operativos que resultan de agregarles conocimiento a los métodos de búsqueda, para así hacerlos más eficientes.

Las heurísticas se han empleado a lo largo del tiempo en la solucionar una gran variedad de problemas multiobjetivo, como por ejemplo los problemas de rutas de vehículos de reparto con ventanas temporales (VRPTW), en los que se pretende servir a un determinado número de clientes dentro de unas ventanas temporales al menor coste posible, cumpliendo las taras máximas del vehículo y las limitaciones temporales y de autonomía derivadas de las jornadas laborales del conductor (K. C. Tan, 2001 [11]). Otros usos son la elección de proyectos, en los que se debe maximizar el beneficio a obtener minimizando los recursos a dedicados (S. Ghorbani, 2009 [12]), la estimación y el modelado de problemas (P. Winker, 2004 [13]), designación del mejor candidato al que asignar determinada tareas entre varias posibles (J. W. Fowler, 2008 [14]), o la detección de entre un conjunto de posibilidades, todos los casos que cumplen una cierta característica.

2.1.2. Consumo de energía en el sector transporte

En las últimas décadas, la cantidad de energía consumida en el sector transporte ha aumentado de forma considerable. En Italia, por ejemplo, el porcentaje de energía consumida en el sector transporte con respecto al total de la energía consumida aumentó del 16% en 1970 hasta el 32% en el año 2000. Observando esta tendencia se concluye que la problemática de la contaminación atmosférica generada por la automoción va en aumento, teniendo especial relevancia en las zonas urbanas donde la concentración de vehículos es mayor (M.G.L. Santarelli, 2003 [15]).

Así pues, se puede afirmar que en las áreas urbanas la principal causa de contaminación se debe al sector del transporte. En ciudades como Atenas, México, Los Ángeles o Sao Paulo, cerca del 100% de las emisiones de CO se debe a los coches, y su contribución a las emisiones de NOx se sitúa entre un 75% y un 85%. Algunos investigadores advierten que 1.100 millones de personas en el mundo están amenazados por la baja calidad del aire que respiran, y el Banco Mundial cuantifica que se producen 700.000 muertes al año debidas a la contaminación generada por el sector transporte. Por otro lado, el número de personas que viven en zonas urbanas se incrementará en los próximos años. Algunas evaluaciones indican que en el año 2015 el número de ciudades en el mundo con más de 1 millón de habitantes superará las 500, y en el 2015, más de 2/3 de la población mundial vivirá en zonas urbanas (M.G.L. Santarelli, 2003 [15]).

2.1.3. Ciclos de funcionamiento

Los ciclos de funcionamiento estándar tienen un gran número de aplicaciones. Los fabricantes de vehículos utilizan estos ciclos como base para sus tareas de diseño, utillajes y marketing, tanto del vehículo, como de sus componentes, como por ejemplo las baterías (B. Y. Liaw, 2007 [16]). Los ingenieros de tráfico utilizan los ciclos de funcionamiento para diseñar sistemas de control de tráfico y realizar simulaciones de flujo y retenciones de tráfico. Los técnicos de medioambiente, preocupados por las prestaciones de los vehículos en términos

de contaminación, utilizan los ciclos mientras negocian los modelos específicos de conducción. Además las gráficas velocidad-tiempo pueden proporcionar unos resultados a escala de laboratorio que permitan estimar el consumo de combustible y las emisiones generadas por los vehículos en áreas urbanas concretas (J. H. Tsai, 2005 [17]; G. Fontaras, 2008 [18]; L. Int Panis, 2008 [19]), variables que cambiarán en función, no sólo del ciclo, sino también de la conducta de conducción y las condiciones del tráfico (E. Ericsson, 2000 [20]).

No obstante estos ciclos no se adaptan a las condiciones de conducción específicas de todo el mundo, por lo que existen numerosos estudios en los que se han desarrollado ciclos concretos para unos entornos y unas circunstancias específicas(H.Y. Tong, 1999 [21]; M. Andre, 2004 [22]; J. Lin, 2003 [23]; W. T. Hung, 2004 [24]; M. Andre, 2006 [25]; Q. Wang, 2008 [26]; W. Saleh, 2009 [27]).

2.1.4. Sistemas de tracción con motorización alternativos

Existe una extensa bibliografía dedicada a la reducción de las emisiones y el consumo de los vehículos. La presente tesis no está dedicada a esta materia, pero parece interesante nombrar algunos artículos a modo de ejemplo que justifique la transición hacia vehículos con sistemas de tracción y motorización más eficientes desde los vehículos diesel y gasolina tradicionales. Así, por ejemplo, M. Cea, 2008 [28] establece, una comparativa en cuanto a emisiones y consumo entre camiones con motorización diesel y camiones que utilizan gas natural licuado como combustible. El estudio se realiza para camiones diseñados para funcionar en su modo más óptimo en los diferentes escenarios planteados: uso urbano, e interurbano. Los resultados obtenidos revelan unas reducciones significativas tanto en términos de consumo como de emisiones del camión de gas natural licuado respecto al diesel, especialmente en uso urbano.

En F. Ortenzi, 2008 [29], se analiza como acelerar mediante la utilización de tecnologías puente, la llegada definitiva del vehículo de pila de combustible de hidrógeno al sector transporte, a la vez que se construye una infraestructura apta para ser utilizada con

hidrógeno. Concretamente, el artículo estudia experimentalmente mezclas de hidrógeno con gas natural, que pese a poder ser utilizadas en motores de combustión interna, implican una reducción significativa de las emisiones a la atmósfera a un corto-medio plazo. Para un camión dado y un ciclo de funcionamiento constante ECE15, se ha realizado la comparativa de emisiones utilizando únicamente gas natural comprimido y diferentes porcentajes de hidrógeno en el gas natural. Los resultados reflejan niveles de emisión inferiores, especialmente en el caso del NO_x, mientras que para CO e hidrocarburos hay mejoras debido a que se obtiene una mejor calidad de combustión (hidrocarburos) y una presencia de carbono en el combustible, que conlleva una reducción del CO. Con mezclas del 10% de hidrógeno es con los que se han obtenido unos niveles de emisión más bajos.

J. Barkenbus, 2009 [30], analiza el proceso de transición que ha de experimentar el transporte desde el uso de combustibles fósiles a la electricidad. Esta transición es dependiente tanto de aspectos técnicos como institucionales y el modo más o menos traumático en que se realice dependerá más de aspectos de reglamentación y legislación que por problemas de infraestructura. Ante esta situación, la electricidad tiene la oportunidad de jugar un papel determinante en el transporte, y en la promoción de las energías renovables, en busca de un transporte más sostenible que mitigue el cambio climático. El autor también destaca que a su vez deben surgir nuevos modelos de negocio que integren a la industria del automóvil con el sector eléctrico.

En O. P. R. van Vliet, 2010 [31], se examina la competitividad de un vehículo híbrido configuración serie en comparación con vehículos de pila de combustible, híbridos configuración paralelo o vehículos convencionales (se analizan cuatro modelos de cada uno de estos tres tipos de vehículos). Se comparan en términos de eficiencia, consumo de combustible, costes y emisiones y se obtiene que los coches híbridos configuración serie son capaces de lograr una reducción del consumo entre el 34% y el 47%, pero a costa de un aumento del coste de entre 5.000 y 12.000 dólares. Por su parte, las emisiones pueden reducirse hasta los 89–103 g CO₂/km en comparación con los vehículos de referencia de gasolina que alcanzan los 163 g CO₂/km) y los diesel (156 g CO₂/km). Los coches híbridos configuración serie que montan motor rueda presentan un peso menor y un consumo entre el 7-21% menor que aquellos coches que cuentan con motores eléctricos centrales. G. J. Offer,

2010 [32], también establece una comparativa entre estos tipos de vehículos, pero en un escenario 2030. En este horizonte temporal se prevé que los vehículos de pila de combustible alcancen unos costes de ciclo de vida a equivalentes a los vehículos de gasolina, Sin embargo, tanto los híbridos como los eléctricos presentarán un coste menor. Todas las plataformas analizadas presentarán una sensibilidad significativa al precio que presente su cadena de tracción. No es posible establecer con precisión para el año 2030 el precio del combustible, sin embargo, se puede afirmar que los vehículos eléctricos e híbridos no se verán excesivamente afectados ante posibles variaciones del precio de la electricidad, todo lo contrario que le ocurrirá a los vehículos de pila de combustible ante variaciones del coste del hidrógeno.

2.1.5. Optimización de los sistemas de energía

La incorporación de los nuevos sistemas de tracción eléctricos llegan ligados a unos sistemas de diseño flexibles y eficientes. Conocer la curva de demanda energética ayudará a gestionar de manera más eficiente los consumos energéticos. También permitirá combinar sistemas de generación y almacenamiento de energía que se complementen de forma que sea posible utilizarlos de forma óptima y alcanzar el máximo de eficiencia de cada sistema por separado.

A este respecto, K.T. Chau, 2001 [33] propone utilizar dos sistemas de energía en un vehículo eléctrico puro, uno de alta densidad de energía y otro de alta densidad de potencia dimensionados bajo la premisa de la búsqueda de un compromiso entre consumo y autonomía.

El objetivo del desarrollo de las tecnologías híbridas es combinar dos fuentes de energía, de manera que las cualidades de cada sistema sean utilizadas bajo condiciones de generación variables, de tal forma que las ventajas globales del desarrollo del sistema híbrido pesen más que el costo de su configuración. La tecnología híbrida fue diseñada para operar en zonas urbanas, donde existan problemas de polución ambiental, por lo que el sistema híbrido es muy adecuado para cumplir con el objetivo de reducción de emisiones contaminantes

atmosféricas, especialmente en buses de transporte público. A este respecto, J. Gallego, 2008 [34], muestra los resultados del análisis de las prestaciones de autobuses híbridos que demuestran la viabilidad y beneficios que éstos conllevan. Para ello se analizan una serie de vehículos híbridos de cerca de 300 CV de potencia sometidos a unos ciclos de funcionamiento que simulan comportamientos urbanos, mixtos e interurbanos; unos preestablecidos, como el ECE, ECE-EUDC-LOW o el EUDC, y otros que se han definido de forma que permitan un mejor ajuste a los escenarios reales, y así se obtienen resultados de eficiencia, emisiones, consumo y potencia. Con todo esto se logra determinar la configuración más adecuada: sistema propulsor térmico/ sistema eléctrico, para cada comportamiento (urbano, mixto e interurbano), consiguiendo, sin que exista pérdida alguna de las prestaciones, una reducción de costes de operación, en torno al 5%, consumo y emisiones contaminantes (sobre todo de NO_x, CO y PM, y en menor medida, de CO₂).

Con el objetivo de comprobar la influencia de las diferentes estructuras de cadena de tracción y estrategias de gestión de energía en las prestaciones de los autobuses de pila de combustible, en M. Ouyang, 2006 [35], se diseñan dos autobuses, uno con una estructura híbrida en el sistema de energía, y otro con una estructura híbrida en el sistema de potencia. Debido al sistema híbrido energético, la pila de combustible polimérica del primer autobús trabaja siempre en el rango de eficiencia óptimo, por lo que presenta menores consumos: 7,9 kg/100km y 3,3 kg/100km para ciclos urbanos y velocidad constante igual a 40 km/h, frente a los 9,8 kg/100km y 4,0 kg/100km para ciclos urbanos y velocidad constante igual a 40 km/h en el caso del segundo autobús. Además se comprueba que tras 7.000 km de operación, la potencia de salida en el segundo autobús disminuye en un 10%, frente al 2,4% del primer autobús. Un algoritmo de control avanzado contribuye a incrementar la durabilidad y a mejorar los consumos. La estrategia de gestión de la energía ayuda a minimizar el consumo de combustible, a mantener la salida de potencia de la pila en unos valores apropiados, a limitar los cambios de potencia de la pila y a mantener el estado de carga del sistema de almacenamiento de energía. Además, si se incorpora un sistema de recuperación de energía de frenado, los consumos mejoran, aumentando la eficiencia en el caso de estudio del 57,5% al 74,6%.

Ante la irrupción de los vehículos eléctricos, E. Larrodé, 2010 [36] propone un estudio de esta nueva tecnología y justifica la necesidad de diseños energéticos eficientes para este tipo de vehículos, el objetivo es lograr unas prestaciones lo más altas posibles, con unos consumos energéticos lo menos elevados posible. Ante esta necesidad, se hace indispensable el desarrollar estudios de demanda de energía en función del tipo de vehículo a al uso al que se va a destinar el vehículo. Para ser conscientes de la magnitud de los resultados obtenidos, también se realiza una comparación de las prestaciones respecto a un vehículo de tracción convencional diesel, dimensionado bajo los mismos condicionantes. Se obtienen mayores demandas de energía en los vehículos eléctricos, debido al mayor peso de estos, pero el consumo en litros equivalentes de gasolina resulta inferior.

Por otra parte, S. Sánchez, 2008 [37] obtiene la configuración óptima de autobuses con sistemas de propulsión basados en la tecnología de las pilas de combustible, configuración híbrida pila de combustible-motor eléctrico, en tres condiciones de funcionamiento diferentes: urbano, suburbano e interurbano, y analizar sus prestaciones. Así como compararlas con las de autobuses térmicos, híbridos térmico-eléctrico ó eléctricos puros, que cuentan con otras tecnologías de propulsión. Para ello se ha utilizado una aplicación informática de simulación y modelado de vehículos: ADVISOR. Los sistemas propulsores basados en una única fuente de energía, requieren un motor o pila de combustible diseñados para responder a los picos de demanda, no obstante, por lo general, el vehículo opera a regímenes significativamente inferiores al de diseño, lo que implica que los motores sean mayores de lo necesario para la mayor parte del tiempo de funcionamiento, consumiendo por lo tanto más combustible y, en el caso de los térmicos, generando mayores emisiones. En los sistemas híbridos, los picos de demanda pueden ser satisfechos por la potencia del sistema auxiliar, las baterías, en combinación con el sistema principal de energía, lo que implica una reducción lógica del consumo y las emisiones en su caso. Como contrapartida, la presencia de estos sistemas de almacenamiento auxiliares, las baterías, implican un aumento del peso del sistema propulsor, con su correspondiente disminución de la capacidad de carga del autobús, factor muy a tener en cuenta tratándose de un medio de transporte destinado a personas y sus equipajes. Por lo tanto, se concluye que en el estado actual de la tecnología, habrá que llegar a un compromiso que permita una capacidad de carga aceptable junto a una disminución del consumo y las emisiones.

En S. Sánchez, 2010 [38], se buscan soluciones al excesivo consumo energético de los vehículos térmicos y a sus elevadas emisiones. Este artículo se basa en el diseño de vehículos ligeros, cuyo sistema de propulsión se basa en una pila de combustible y un motor eléctrico. Se han diseñado tres tipos de vehículos: turismos de uso particular, turismos destinados al servicio público (reflejando la situación de los taxis) y por último, vehículos ligeros destinados al transporte de mercancías. Se presenta un análisis comparativo de prestaciones, consumos energéticos y emisiones evitadas al medio ambiente de los vehículos con pilas de combustible con respecto a los vehículos térmicos. Como resultado se obtiene la confirmación de que las pilas de combustible tiene mayor eficiencia que los motores térmicos, por lo que los vehículos basados en pila de combustible, pese al aumento de peso que implica la incorporación de baterías como sistema de almacenamiento, presentan un ahorro energético que se cuantifica en el consumo de combustible medido en litros equivalentes de gasolina consumidos.

La optimización del sistema de propulsión también es el objetivo del artículo propuesto por S. Sánchez, 2012 [39]; en este, se realiza un análisis de factores presentes en el diseño de vehículos ligeros híbridos propulsados por pila de combustible destinados a un sistema de distribución urbana de mercancías con la finalidad de obtener un ahorro energético y una mejora en las prestaciones finales de los vehículos. Para ello se han diseñado dos configuraciones óptimas de vehículo, un vehículo grande capaz de distribuir la mercancía demandada por sí mismo, y cuatro vehículos de menor tamaño que realizan la distribución de la mercancía demandada pero repartida entre los cuatro vehículos. De este modo se logra determinar, por un lado, la ruta de reparto más eficiente, y por otro analizar la influencia del tipo del ciclo de funcionamiento que realizan los vehículos y las resistencias a la rodadura a la que tienen que vencer los vehículos en función de la configuración óptima de los vehículos.

Estos conceptos también se emplean en el dimensionamiento energético de plantas de producción de energía. Aunque la aplicación es distinta que en los vehículos, se pueden observar tendencias similares en cuanto al efecto que tiene la variación de tamaño de los sistemas de generación y almacenamiento.

Si se desarrolla un sistema híbrido basado en el hidrógeno, en el que se integran un sistema de generación de energía renovable compuesto por una planta fotovoltaica y un aerogenerador, y un sistema de hidrógeno compuesto por pila de combustible, electrolizador, compresor y tanque de almacenamiento, será posible generar hidrógeno en momentos de exceso de generación eléctrica y utilizarlo en la pila de combustible para generar electricidad en momentos de alta demanda en los que el sistema renovable resulta insuficiente. A. Mills, 2004 [40] para probar la viabilidad del sistema, simula un sistema de estas características utilizando *Hybrid2*, obteniendo resultados muy positivos. Por su parte, J.K. Kaldellis, 2006 [41] plantea la posibilidad de añadir un motor diesel en un sistema autónomo de generación compuesto por baterías y aerogeneradores. El objetivo es minimizar el coste total, que variará según el número de baterías y la existencia o no del motor diesel y su consumo. De este modo, aumentando el grado de hibridación del sistema se aprovechan las mejores características de cada uno de los sistemas de generación. En M.A. Elhadidy, 1999 [42] se estudia una planta de aerogeneradores y motor diesel. Se plantea introducir acumuladores, y en tal caso optimizar su capacidad. De forma que el sistema de acumulación reduce la necesidad de uso del motor diesel, ya que éste atenúa las fluctuaciones de demanda. Definen un tamaño óptimo, a partir del cual el aumento del tamaño del sistema de almacenamiento provoca más costes que beneficios en cuanto a ahorro de gasoil.

2.1.6. Vehículos de hidrógeno

Los vehículos de hidrógeno están emergiendo como una de las únicas tecnologías que pueden alcanzar los límites, cada vez menores, de emisión de gases de efecto invernadero y de contaminantes, a la vez que reducir la dependencia en la energía de terceros países, habitualmente de origen fósil. Una de las principales barreras que se deben superar son los altos precios de estas tecnologías. En J. Ally, 2009 [43], con el fin de reducir los costes de los autobuses que monten tecnología de pila de combustible de hidrógeno, propone la utilización de la infraestructura del mercado de los autobuses con chasis buggy para conducir a la tecnología del hidrógeno a una producción en masa. Esta configuración de chasis es muy flexible y permite establecer configuraciones híbridas. De entre las posibles, este autor se

decanta por configuraciones serie motor de combustión interna – pila de combustible, con la incorporación de otros sistemas auxiliares de acumulación de energía, como baterías o ultracapacitores.

La utilización de las pilas de combustible en los autobuses va a jugar un papel de suma importancia para que la implantación de esta tecnología tenga éxito. No obstante, el desarrollo de las pilas de combustible para automoción debe seguir desarrollándose paralelamente a las infraestructuras del hidrógeno. Hasta que las pilas de combustible no se produzcan en masa, no podrán competir en precio con los motores de combustión interna. Un sistema de tracción híbrido también respalda la futura adopción de las pilas de combustible porque los sistemas híbridos proporcionan la posibilidad de utilizar plataformas completamente eléctricas, que proporcionan niveles de eficiencia y emisiones mucho mejores (J. van Dokkum, 2008 [44]).

En P. Corbo, 2010 [45], se analiza la utilización de baterías de ión litio polímero como sistemas de almacenamiento de energía eléctrica para sistemas propulsores de pila de combustible de hidrógeno. El experimento dinámico realizado con una configuración que consta de una pila de combustible polimérica (2 kW) y baterías de litio (47,5 V, 40 Ah) y sometido a un ciclo *European R47*, permite cumplir el ciclo y reducir el consumo de hidrógeno en un 6%, considerando como punto de partida un sistema con baterías de plomo ácido.

El sistema de litio muestra una alta capacidad de descarga, en particular a 2,5 C proporciona en torno al 92% de su capacidad, con un radio de descarga de energía respecto al total de energía cargada igual al 80%. Estas prestaciones resultan bastante mejores que las ofrecidas por los sistemas de plomo ácido convencionales, para los que para 2 C sólo se proporciona el 62% de la capacidad inicial. Además, en el modo de recarga, las prestaciones de las baterías de litio resultan más compatibles con la automoción, gracias a su menor resistencia interna.

S. Campanari, 2009 [46], presenta un estudio del balance de energía y medioambiental de vehículos eléctricos que utilizan pilas de combustible poliméricas, a través de la metodología del análisis del pozo a la rueda, aplicada a la simulación de ciclos de conducción ECE-EUCD. Se analiza la posibilidad, por un lado, de que el hidrógeno sea almacenado directamente en el vehículo tras haber sido producido mediante electrolisis, usando energías renovables, o

mediante gasificación o reformado, utilizando carbón o gas natural respectivamente; y por otro lado, que el hidrógeno se genere a bordo del vehículo a partir de gasolina, gas natural, etanol o metanol, obteniendo mejores resultados par el primero de los casos. Las prestaciones de estos vehículos resultan ventajosas frente a vehículo eléctricos de batería cuando las distancia a recorrer empiezan a ser importantes, aunque los mejores resultados se obtienen cuando se incorporan a los vehículos de pila de combustible pequeñas baterías, dando lugar a soluciones híbridas que permiten la recuperación de energía durante las deceleraciones y la mejora de la eficiencia del sistema de energía.

2.1.7. Incorporación del hidrógeno al sector transporte

Paralelamente a la irrupción de nuevos vehículos de pila de combustible, se hace necesaria la implantación de nuevas infraestructuras que aseguren el suministro de este nuevo “combustible”. Las diferentes alternativas de producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno han sido analizadas por diferentes autores y para diferentes áreas de todo el planeta. Por ejemplo J. M. Ogden, 1999 [47], lo hace para el caso de California en función del número de vehículos cero emisiones se prevé recorran las carreteras de la zona, y calcula el coste capital de las infraestructuras y el transporte del hidrógeno para cada una de las opciones estudiadas; en F. Markert, 2007 [48] se analizan y comparan cualitativamente los sistemas de producción y distribución para diferentes escenarios de demanda y temporales en el área de Greater Copenhagen. Este autor también analiza los riesgos que suponen el manejo y utilización del hidrógeno en cada una de estas operaciones. En el horizonte 2050, se prevén dos escenarios de producción y transporte principales, cada uno con sus ventajas e inconvenientes, uno basado en un sistema centralizado y otro en la generación *in situ*. M. Wietschel, 2006 [49], realiza este análisis para el caso de Europa y en un horizonte temporal 2030, con la particularidad de que lo hace sobre la base de la capacidad que presentan estos sistemas para lograr la reducción de las emisiones de CO₂ y bajo la premisa de reducir el impacto en inversión que supone construir la infraestructura necesaria. Los resultados obtenidos par esta primera fase de implantación de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte muestran que las opciones para la producción de hidrógeno de mayor potencial

son el reformado de vapor de gas, la gasificación del carbón y la electrolisis a partir de energías renovables. No obstante, se pone de manifiesto, que, los beneficios que proporcionan un sistema de hidrógeno sólo son consistentes si se aplican técnicas de secuestro y almacenamiento de CO₂, si se utiliza energía nuclear o si se produce el hidrógeno a partir de energías renovables.

En P. Agnolucci, 2007 [3], se hace una revisión de los factores que intervienen en la introducción del hidrógeno en el sector transporte y se identifican el precio del hidrógeno, los costes capitales de la infraestructura, el papel de las administraciones y los factores de capacidad (modos de producción y transporte del hidrógeno en función de los ratios de penetración de estas tecnologías) como los más determinantes.

La transición del sistema actual al de hidrógeno debe hacerse de la forma menos traumática posible; con este objetivo en A. H. Hajimiragha, 2011 [2] se determina el potencial de la red eléctrica para acoger a este tipo de vehículo alternativo. Para ello se establece un modelo de planificación que engloba las redes eléctricas y las de hidrógeno con el fin de obtener el dimensionamiento óptimo, tanto de las plantas de producción, como del modelo de transporte de hidrógeno. La función objetivo de esta metodología es minimizar los costes: eléctrico, de las emisiones y del transporte de hidrógeno, a partir de las variables: precio de la electricidad, créditos medioambientales, costes de emisión y generación y los costes asociados al transporte de hidrógeno. Por su parte, en P. Forsberg, 2007 [4], también se analiza este proceso de transición, pero concretamente se desarrolla un método para optimizar la transición desde las estaciones de repostaje de combustibles tradicionales a las estaciones de uso combinado de metano e hidrógeno que cuentan con un reformador a pequeña escala de metano y se calculan las estrategias de inversión óptimas en base a escenarios futuros con mayores demandas de hidrógeno. Se minimizan los costes de los equipos, metano y electricidad a partir del análisis de las partes que componen la hidrogenera, sus características costes unitarios y datos variables relacionados con la demanda y la inversión.

2.1.8. Dimensionamiento de hidrogeneras

Debido al alto coste de estas nuevas tecnologías, el dimensionamiento de las instalaciones de reabastecimiento de hidrógeno debe realizarse con sumo cuidado, especialmente si se pretende utilizar un sistema de producción descentralizado de hidrógeno basado en las energías renovables. N. Briguglio, 2008 [50] diseña una herramienta de simulación específica con la que diseñar estaciones de repostaje de hidrógeno con un sistema renovable de suministro de energía eléctrica proveniente de parques eólicos ubicados en localizaciones determinadas. La herramienta permite optimizar el sistema, obteniendo el tamaño óptimo de depósito de hidrógeno, electrolizador y turbinas eólicas. El electrolizador óptimo es aquel que minimiza tanto la capacidad necesaria de almacenamiento de hidrógeno como el propio tamaño del electrolizador. La herramienta requiere como entradas las características de los aerogeneradores, sistemas de producción y almacenamiento de hidrógeno, precio de la energía eléctrica y el perfil de consumo previsto de hidrógeno. Una de las salidas que proporciona la herramienta, a través de un análisis económico es el precio del hidrógeno resultante. El estudio concluye indicando que tanto desde el punto de vista técnico como el económico, la mejor solución es instalar un gran número de aerogeneradores que vendan a la red la electricidad que generen, de forma que se produzca hidrógeno como sub producto.

Analizando el problema de la ubicación de la red de estaciones de hidrógeno, es posible encontrar ciertas publicaciones técnicas que se enfrentan a este problema, aunque habitualmente se trata como un simple problema de localización de instalaciones en una red de carreteras o como si se tratara de un subconjunto de la red de gasolineras existentes. Por ejemplo, M. Kuby, 2005 [51], YW. Wang, 2009 [52], YW. Wang, 2010 [53], establecen modelos de localización de puntos de reabastecimiento para vehículos alternativos en base a los flujos de origen-destino de los vehículos; y YW. Wang, 2007 [54], 2008 [55] analiza el caso particular de la localización en la red de carreteras de puntos de recarga y estaciones de recambio de baterías para motos eléctricas en Taiwan. J. Gallego, 2011 [56] propone una metodología optimizada basada en algoritmos de cálculo combinatorios para determinar la red de estaciones de recarga para vehículos eléctricos en un entorno urbano en base a criterios de minimización de costes. El conocimiento de las características de los vehículo y

de las condiciones del entorno en el que van a circular son aspectos críticos a tener en cuenta.

Otros autores proponen otras alternativas; Z. Lin, 2008 [57], ha desarrollado un nuevo enfoque tratando la ubicación de las hidrogeneras como un problema de “*fuel travel back*” basado en la premisa de que por donde más se conduce es donde va a surgir la necesidad de repostar, y en el que lo único que es necesario conocer es la distribución de los kilómetros recorridos por los vehículos. C. Bersani, 2009 [58] utiliza el problema de ubicación de instalaciones múltiples (*Multiple facility location problema*, MFLP), añadiendo la condición de que la demanda de hidrógeno debe ser conocida. El objetivo es minimizar la suma de los costes debidos, por un lado al establecimiento y mantenimiento de las instalaciones, y por otro al transporte del hidrógeno desde centros de producción centralizada. Para las primeras etapas de penetración del hidrógeno en el transporte, se asume que, por razones de seguridad, las únicas ubicaciones posibles para las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno serán las gasolineras. El modelo se valida par el área del norte de Italia mediante la construcción de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones compuesta por un Sistema de información Geográfica, una base de datos y el módulo de optimización.

J. Kim, 2008 [59] introduce una nueva variable al problema: la seguridad de abastecimiento, ante los riesgos de averías y contratiempos posibles. Este artículo propone un modelo para diseñar la cadena de suministro de hidrógeno bajo demandas no conocidas. Para ello se utiliza una técnica de optimización multiobjetivo que resulta de considerar simultáneamente ahorro en costes y seguridad, dos objetivos que por su naturaleza se contraponen. La validación del modelo se realiza para el caso concreto de Korea, y se obtiene la identificación de la cadena de suministro de hidrógeno óptima, incluyendo el tipo de instalación, las cantidades de hidrógeno necesarias, las ubicaciones de los centros de actividad y los riesgos relativos relacionados. Mediante el análisis de las plantas de producción y los modos de transporte, se llega a la conclusión de que un cambio del tipo de instalación o el modo de transporte, no se asegura beneficios económicos, los costes totales no reflejan cambios significativos entre las diferentes opciones consideradas, ni unas mayores garantías de seguridad.

Por otro lado, también es posible encontrar literatura especializada referente al número de instalaciones de hidrógeno que deben conformar la red de infraestructuras y dimensionamiento de las mismas: en M.W. Melaina, 2003 [60], la estimación del número y tamaño de hidrogeneras para la región de California se hace en base al número de gasolineras existentes, número de aéreas urbanas y densidad de vías urbanas e interurbanas. Las soluciones así aportadas son susceptibles de ser mejoradas utilizando algoritmos multiobjetivo. A. Hugo, 2005 [61] utiliza técnicas de programación lineal entera-mixta basadas en los algoritmos multiobjetivo, bajo criterios tanto económicos como medioambientales, para analizar las alternativas posibles en cuanto a producción, distribución y tecnología que presenta una mayor viabilidad y proporcionar la solución óptima en función de las previsiones de demanda. Esta metodología no sólo facilita la identificación las opciones de mayor potencial, sino que además elimina las peores. N. H. Afgan, 2007 [62] utiliza un procedimiento multi-criterio para valorar el sistema de hidrógeno. Evalúa un sistema de pila de combustible que cuenta con tres opciones posibles como sistema de generación de energía: eólico, fotovoltaico o reformado de gas natural, en base a una serie de indicadores a los que se asocia unos pesos. Estos indicadores están relacionados con las prestaciones de los diferentes sistemas, la situación del mercado, el apartado medioambiental y el entorno social.

Mediante el desarrollo de una herramienta de decisión espacial que combine un Sistemas de Información Geográfica y los algoritmos genéticos, es posible tratar datos, analizar escenarios, introducir supuestos y obtener resultados en un mapa. M. Kuby, 2009 [63], ha utilizado este modelo para diseñar una red de infraestructuras de hidrógeno en Florida. Introduciendo una red de carreteras con sus límites de velocidad, los volúmenes de flujo entre cada origen y destino, la máxima distancia posible entre hidrogeneras y el número de instalaciones a construir, se obtiene en un mapa la distribución de las hidrogeneras que permiten el repostaje de un mayor número de vehículos. La distancia entre hidrogeneras es el aspecto más crítico y hay que elegirlo con cautela: si esta distancia es muy grande, puede llevar a situaciones en las que el vehículo se quede sin combustible, dando lugar a problemas de seguridad y a mala publicidad; si las estaciones de servicio están muy cerca unas de otras, implica cubrir menos territorio con el mismo número de instalaciones y puede conducir a situaciones de subutilización de las capacidades. El modelo es válido tanto para entornos

urbanos como interurbanos, constituyendo una herramienta de ayuda a la toma de decisiones muy interesante.

2.1.9. Operativa de hidrogeneras

La tecnología necesaria utilizada en las estaciones de reabastecimiento de hidrógeno es muy reciente y no existe mucha experiencia en cuanto a la operación y funcionamiento de estas instalaciones, no obstante, en los últimos años se han desarrollado proyectos demostrativos de los que ha sido posible extraer algunas conclusiones. K. Stolzenburg, 2009 [64] presenta las lecciones aprendidas en la operación de las de las infraestructuras de hidrógeno asociadas al desarrollo del proyecto CUTE (*Clean Urban Transport for Europe*). Hace especial hincapié en los problemas a los que se tuvo que hacer frente durante el funcionamiento de las instalaciones, que en su mayoría contaban con plantas de generación de hidrógeno *in situ*. Se destacan el grado de disponibilidad de los equipos debido a las averías y las pérdidas de hidrógeno producidas como las principales razones que motivaban la alteración del normal funcionamiento de las instalaciones. A partir de las prestaciones de las diferentes tecnologías empleadas en las instalaciones de repostaje y el histórico de actividades de las mismas, concluye que los sistemas de generación mediante electrolisis son más fiables que los basados en el reformado y que los equipos más críticos son los compresores de hidrógeno y los sistemas de dispensado de hidrógeno.

Con el objetivo de mejorar la operativa y reducir los costes de operación de las hidrogeneras, hay numerosos estudios que buscan optimizar las diferentes actividades que se llevan a cabo en estas instalaciones. En J. Zheng, 2009 [65], se diseña un sistema de control que busca optimizar el proceso de repostaje, minimizando tanto el tiempo necesario para el repostaje, como los costes asociados. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo que permite aumentar la velocidad de dispensado e incrementar el ratio de hidrógeno (relación entre la cantidad de hidrógeno que puede fluir desde los depósitos de almacenamiento al depósito de los vehículos y la cantidad total de hidrógeno almacenado) mediante la utilización de un modelo de optimización iterativo multi-objetivo. Este trabajo contribuye a dar respuesta al hecho de



que la mayoría de los fabricantes de coches con tecnología de pila de combustible montan en sus modelos depósitos de almacenamiento de hidrógeno de entre 2 y 10 kg de capacidad, y recomiendan que el tiempo de repostaje no sea superior a 3 min (S. Maus, 2008 [66]);

2.2. Proyectos a nivel Internacional

Paralelamente a la bibliografía científica, también se han analizado los proyectos existentes a nivel global en materia de hidrógeno y pilas de combustible y su relación con las tecnologías del hidrógeno. Este análisis se ha realizado con el objetivo de adquirir un mayor conocimiento que facilite la toma de decisiones sobre la ubicación y las tecnologías a emplear en las estaciones de servicio de hidrógeno, o hidrogeneras, necesarias para dar servicio a los futuros usuarios de los vehículos de pila de combustible.

Se ha buscado conocer cuáles son las diferentes alternativas de almacenamiento y sistemas de distribución más extendidos para el hidrógeno, y se han buscado los problemas que se han tenido que resolver para llevar a buen término cada uno de los proyectos, con el fin de no caer en los mismos errores en los planteamientos propuestos en la presente tesis.

Se han analizado los proyectos relacionados en las Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5:

Tabla 2. Relación de los proyectos estudiados en Europa

Fuente: **Elaboración propia**

Proyectos europeos	
1	HyLighs
2	CUTE
3	ECTOS
4	HyFLEET:CUTE
5	CEP
6	Munich Airport Hydrogen Infrastructure Project
7	SMART H2
8	FUEVA
9	STORHY
10	SHHP
11	HyNor
12	Hydrogen Sweden
13	The Hydrogen Link
14	ZeroRegio
15	HyApproval
16	SWB - Solar Hydrogen Project in Bavaria
17	Hy-Park Project
18	HyWays
19	HyWays-IPHE
20	ROADS2hYcom
21	HyNet
22	HySolutions Hamburg
23	RES2H2
24	Hy-CO
25	NEEDS
26	FEBUSS
27	HyCHAIN-Minitrans
28	Su:GRE
29	ITHER
30	Euro Hyport
31	HySAFE
32	EIHP
33	HarmonHy

Tabla 3. Relación de los proyectos estudiados en Oceanía

Fuente: **Elaboración propia**

Proyectos de Oceanía	
34	STEP

Tabla 4. Relación de los proyectos estudiados en Asia

Fuente: **Elaboración propia**

Proyectos asiáticos	
35	JHFC
36	SINERGY

Tabla 5. Relación de los proyectos estudiados en Norteamérica

Fuente: **Elaboración propia**

Proyectos norteamericanos	
37	BC Hydrogen Highway
38	Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Demonstration and Validation Project
39	HyRoad Program
40	CaH2Net
41	Hydrogen Village
42	SCAQMD's '5 Cities Project' stations
43	CaFCP

A continuación se realiza una pequeña descripción de cada uno de estos proyectos:

1)	HyLights	www.hylights.eu
Resumen:	Particularidad:	
El proyecto cumple las funciones de coordinación y aceleración de las futuras actividades de investigación y demostración de las tecnologías del hidrógeno en la Unión Europea, centrándose en las aplicaciones al transporte.	Tiene la misión de preparar la transición al hidrógeno como combustible y vector energético renovable.	
HyLights proporciona información de los proyectos de demostración en curso, los ya concluidos o los regionales, asesoramiento profesional sobre temas financieros y legales, y experiencia, a todo ente, público o privado, a nivel internacional que se muestre interesado en esta tecnología.		

2)	CUTE	www.fuel-cell-bus-club.com
Resumen:	Particularidad:	
<i>The Clean Urban Transport for Europe (CUTE)</i> , proyecto de la Unión Europea que contemplaba el desarrollo y prueba de 27 autobuses Citaro con tecnología de pila de combustible, tres en cada una de las nueve ciudades europeas seleccionadas.	Aporta una relación de los problemas de mantenimiento sufridos.	
El proyecto tenía como objetivo demostrar la viabilidad de un sistema de transporte público urbano limpio, de gran eficiencia energética e innovador.		
En cada una de las ciudades se instalaron diferentes infraestructuras de repostaje y de producción de hidrógeno. El proyecto buscaba las aplicaciones prácticas de las fuentes de energía renovables al sistema de transporte.		

3)	ECTOS	www.global-hydrogen-bus-platform.com/About/History/ECTOS
Resumen:		Particularidad:
<p><i>Ecological City TranspOrt System</i> (ECTOS) era una iniciativa financiada por la Unión Europea, cuya misión era probar tres autobuses de pila de combustible <i>Citaro</i> en Reykjavik, Islandia. El objetivo global del ECTOS era implementar una fase de demostración del estado del arte de la tecnología del hidrógeno mediante su incorporación al sistema de transporte público en forma de autobuses de pila de combustible en Reykjavik. La energía obtenida estaba prácticamente libre de emisiones de CO₂, ya que la producción del hidrógeno se realizaba por electrólisis, a partir de la energía eléctrica generada mediante energía geotérmica e hidráulica.</p>		<p>Determinación de los factores socio-económicos determinantes en el cambio de la base energética de una sociedad urbana moderna.</p>

4)	HyFLEET:CUTE	http://www.global-hydrogen-bus-platform.com/
Resumen:		Particularidad:
<p>HyFLEET:CUTE es una iniciativa financiada mediante el 6º Programa Marco de la Unión Europea y cuenta con 47 autobuses propulsados con hidrógeno en líneas regulares del servicio público de transporte de 10 ciudades en tres continentes diferentes. Ésta iniciativa está probando un gran número de innovaciones con el fin de explorar un amplio rango de opciones para la producción, repostaje, distribución y dispensado de hidrógeno de la forma más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.</p>		<p>Incluye 14 autobuses de combustión interna alimentados con hidrógeno.</p>

5)	CEP	www.cleanenergypartnership.de/
Resumen:		Particularidad:
<p>Clean Energy Partnership (CEP) es un proyecto desarrollado durante los años 2002 al 2007 en Berlín, Alemania y que contaba con 17 vehículos y 2 estaciones de servicio.</p> <p>El objetivo global era probar el potencial tecnológico del hidrógeno como vector energético para las aplicaciones del transporte, llevando a cabo pruebas encaminadas a la demostración de la capacidad del sistema y de su idoneidad para el uso regular.</p>		<p>Desarrollo del proceso de re-licuefacción.</p>

6)	Munich Airport Hydrogen Infrastructure Project	http://www.ieahia.org/page.php?s=d&p=casestudies
Resumen:	Proyecto de demostración de la tecnología del hidrógeno bajo los estrictos requerimientos de un aeropuerto. El tráfico rodado de un aeropuerto cuenta con una serie de particularidades: se trata de flotas cautivas que cuentan con una estación se repostaje propia, que facilitan este tipo de estudios. Los principales objetivos del proyecto son la aplicación de la tecnología del hidrógeno y la búsqueda de la rentabilidad de su utilización.	Particularidad: Empleo de un robot automático para el repostaje. Seguridad específica para aeropuertos.
7)	SMART H2	http://www.newenergy.is/en/projects/current_projects/smart_h2/
Resumen:	SMART H2 es un proyecto de demostración destinado a probar vehículos propulsados por hidrógeno y depósitos de hidrógeno. Comenzó en marzo del año 2007 y continuará hasta el año 2010. Proporcionará datos sobre vehículos de hidrógeno de diferentes compañías. El proyecto también pretende probar la infraestructura preparada para hidrógeno comprimido, como una estación autoservicio, y desarrollar el sistema de distribución.	Particularidad: Gran énfasis en la obtención de datos, para su comparación con vehículos que cuentan con otras tecnologías.
8)	FUEVA	http://www.ika.rwth-aachen.de/fueva/
Resumen:	<i>European Fuel Cell vehicles technologies validation</i> (FUEVA) tiene el objetivo de obtener experiencia del funcionamiento de vehículos con tecnología de pila de combustible y obtener una valoración de estos vehículos de diferentes fabricantes. También se estudia la infraestructura requerida por estos vehículos.	Particularidad: Proposición de especificaciones y requerimientos para la elaboración de normativas.

9)	STORHY	http://www.storhy.net/
Resumen:		Particularidad:
<p><i>Hydrogen Storage Systems for Automotive Application (StorHy)</i> es un proyecto integrado en el 6ª Programa Marco. El consorcio que integra el proyecto desarrolla I+D concreta sobre todo el espectro de las técnicas de almacenamiento de hidrógeno (gas comprimido, líquido criogénico y materiales sólidos), enfocada en las aplicaciones del transporte.</p>		<p>Gran énfasis en los diferentes métodos de almacenamientos posibles.</p>

10)	SHHP	www.scandinavianhydrogen.org/
Resumen:		Particularidad:
<p>El SHHP constituye una plataforma de trabajo que aglutina y coordina la colaboración de tres entidades nacionales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>HyNor</i> - <i>Hydrogen Sweden</i> - <i>The Hydrogen Link</i> 		<p>Busca la armonización entre los tres estados europeos implicados.</p>

11)	HyNor	www.hynor.no/english
Resumen:		Particularidad:
<p>Iniciativa compartida de la industria para la demostración de la implementación real de la infraestructura del hidrógeno a lo largo de una ruta de 580 kilómetros, desde Oslo hasta Stavanger, durante los años 2005-2008.</p>		<p>Cuenta con 8 estaciones de servicio, cada una con una tecnología diferente de producción de hidrógeno.</p>

12)	Hydrogen Sweden	www.vatgas.se/
Resumen:		Particularidad:
<p>La misión de esta iniciativa, iniciada en el año 2007, es facilitar la introducción del hidrógeno como vector energético en Suecia. Para ello, se han iniciado una serie de proyectos de demostración entre los que se encuentran varias estaciones de servicio.</p>		<p>Existencia de aplicaciones prácticas y de demostración de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible.</p>

13)	The Hydrogen Link	www.hydrogenlink.net/eng/westdenmark.asp
Resumen:		Particularidad:
Proyecto público-privado para el desarrollo y la prueba de piloto de estaciones de repostaje de hidrógeno y vehículos híbridos de pila de combustible en Dinamarca.		Existencia de cinco estaciones de servicio para flotas cautivas privadas.

14)	ZeroRegio	www.zeroregio.com
Resumen:		Particularidad:
Proyecto iniciado en el año 2004 y con un plazo de ejecución de cinco años, integrado en el 6º Programa Marco y co-financiado por la Comisión Europea que pretende el desarrollo y demostración de una infraestructura del hidrógeno para vehículos.		Empleo de tubería par el suministro de hidrógeno desde una planta de producción.
El proyecto comprende la construcción y la demostración de una infraestructura para el hidrógeno en dos regiones europeas, que permitan el suministro de hidrógeno a vehículos de pila de combustible de pasajeros. El proyecto pretende el desarrollo y demostración de un sistema de transporte rodado de emisiones cero para su uso habitual en las ciudades europeas.		

15)	HyApproval	www.hyapproval.org
Resumen:		Particularidad:
Proyecto integrado en el 6ª Programa Marco, que tiene como objetivo el elaborar una guía técnica basada en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible, las regulaciones medioambientales actuales, y la introducción de estas tecnologías e ingenierías en el mercado futuro: " <i>handbook for approval of Hydrogen refuelling stations</i> ", para que pueda ser utilizada para certificar estaciones de servicio de hidrógeno públicas en Europa.		Análisis de las normativas europeas y determinación de las carencias existentes.

16)	SWB - Solar Hydrogen Project in Bavaria	www.h2stations.org
Resumen:		Particularidad:
<p>Proyecto de demostración: como parte del proyecto SWB se construyó una estación de servicio para el ensayo de repostaje de vehículos sedan con hidrógeno líquido.</p> <p>La estación se puede considerar como una semi-automática. Consiste en una cabina para el operario con una pantalla y un panel de control que permiten, bien el repostaje automático, bien un repostaje manual.</p>		<p>Obtención de hidrógeno in situ a partir de energía solar.</p>

17)	Hy-Park Project	www.h2stations.org
Resumen:		Particularidad:
<p>"Hydrogen Energy Park" es una de las partes del proyecto turco HY-PARK. Tiene el objetivo de demostrar la integración de las energías renovables y la producción de hidrógeno en gran número de aplicaciones.</p>		<p>Cuentan con producción de hidrógeno in situ a partir de diferentes fuentes renovables: eólica, solar fotovoltaica.</p>

18)	HyWays	www.hyways.de
Resumen:		Particularidad:
<p>HyWays es un proyecto cofinanciado por institutos de investigación, la industria y la Comisión Europea, integrado en el 6º Programa Marco.</p> <p>El proyecto combina bases de datos con análisis socio-técnico-económicos con el fin de evaluar en los escenarios seleccionados los sistemas energéticos sostenibles de hidrógeno. Se proporcionaran recomendaciones para la instauración de un <i>European Hydrogen Energy Roadmap</i>, que refleje las realidades específicas de cada uno de los países europeos participantes en el proyecto. La principal característica este <i>Roadmap</i>, es que refleja tanto las condiciones reales de vida, teniendo en cuenta, no sólo las barreras tecnológicas, sino que también las institucionales, geográficas y socio-económicas, como las oportunidades existentes en los diferentes estados participantes.</p> <p>Este mapa de ruta describe sistemáticamente los futuros pasos a seguir para llevar a cabo la introducción a gran escala del hidrógeno como vector energético en el transporte y mercado de la energía como medio de almacenamiento para las energías renovables.</p>		<p>Localiza las regiones donde se iniciará el empleo de la tecnología del hidrógeno en su aplicación al transporte.</p>

19)	HyWays-IPHE	www.hyways-iphe.org
Resumen:		Particularidad:
Esta iniciativa tiene el objetivo de impulsar y comparar los esfuerzos realizados por el Hyways europeo con el mapa de ruta y actividades realizadas por otros países no europeos.		Localiza las regiones donde se iniciará el empleo de la tecnología del hidrógeno en su aplicación al transporte.

20)	ROADS2Hycom	www.roads2hy.com
Resumen:		Particularidad:
Proyecto de la Comisión Europea integrado en el 6º Programa Marco. Tiene la misión de coordinar, evaluar y supervisar la investigación relativa al hidrógeno y las pilas de combustible en Europa y las medidas a adoptar por las comunidades y actores involucrados.		Proporciona datos económicos de las infraestructuras necesarias.

21)	HyNet	www.hynet.info
Resumen:		Particularidad:
Iniciativa compartida de la industria para la demostración de la implementación real de la infraestructura del hidrógeno a lo largo de una ruta de 580 kilómetros, desde Oslo hasta Stavanger, durante los años 2005-2008. HyNet, una red temática europea sobre la energía del hidrógeno, se desarrolló desde diciembre del año 2001 hasta diciembre del 2004, y estuvo financiado por el 5º Programa Marco de la Comisión Europea. Los principales logros del proyecto han sido el desarrollo de un mapa equilibrado para la infraestructura del hidrógeno europea y la evaluación de los aspectos socio-económicos y políticos asociados a la transición hacia un futuro de la energía basado en el hidrógeno.		Localiza las regiones donde se iniciará el empleo de la tecnología del hidrógeno en su aplicación al transporte.

22)	HySolutions Hamburg	www.hysolutions-hamburg.de/
Resumen:		Particularidad:
<p>Los logros del HySolutions son: incrementar el número y la escala de las aplicaciones del hidrógeno y las pilas de combustible en Hamburgo y conseguir que la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible sea viable económicamente.</p>		<p>Localización regional. Ámbito de aplicación acotado.</p>

23)	RES2H2	www.res2h2.com
Resumen:		Particularidad:
<p>Proyecto basado en la integración, mediante el uso del hidrógeno, de sistemas de energía renovables en el sector energético europeo.</p>		<p>Empleo de diferentes energías renovables para obtener hidrógeno.</p>

24)	Hy-CO	www.hy-co-era.net
Resumen:		Particularidad:
<p>La meta del proyecto Hy-CO es crear una red e integrar las actividades nacionales de I+D mediante el establecimiento de un Área de Investigación Europea duradera (ERA-NET) en el área del hidrógeno y las pilas de combustible.</p> <p>Entre los principales objetivos se encuentra el de fortalecer la I+D europea y la infraestructura de demostración del hidrógeno y las pilas de combustible.</p>		<p>Unifica criterios y recoge resultados a nivel europeo.</p>

25)	NEEDS	http://www.needs-project.org/
Resumen:		Particularidad:
<p><i>New Energy Externalities Development for Sustainability (NEEDS)</i> es un proyecto financiado por la Comisión Europea que tiene el objetivo de estimar todos los costes (medioambientales y sociales, así como los directos) de varios sistemas de energía para el futuro. Entre las tecnologías que son consideradas se encuentran la energía eólica, la solar, los combustibles fósiles avanzados y las tecnologías del hidrógeno.</p>		<p>Proporciona datos económicos de las infraestructuras necesarias.</p>

26)	FEBUSS	http://cordis.europa.eu/data/PROJ_FP5/ACTIONeqDndSESSIONeq112362005919ndDOCe9866ndTBLeqEN_PROJ.htm
Resumen:		Particularidad:
Proyecto integrado en el 5º Programa Marco, que inició su actividad en el año 2002 y tenía una duración de 5 años. El proyecto tenía el objetivo de crear sistemas estandarizados de energía con pila de combustible para aplicaciones en transporte (autobuses) y aplicaciones estacionarias.		Proporciona datos sobre autobuses a tener en cuenta en las infraestructuras.

27)	HYCHAIN-MINTRANS	www.hychain.org
Resumen:		Particularidad:
Despliegue de una flota de vehículos de tecnología de pila de combustible de baja potencia como inicio de un mercado incipiente del hidrógeno como combustible alternativo en Europa. Implantación a pequeña escala de la economía del hidrógeno, creando las bases para demostración en masa.		Uso de diferentes vehículos utilizados en espacios acotados.

28)	Su:GRE	http://www.sugre.info/tools.phtml?id=665&sprache=en
Resumen:		Particularidad:
<i>Sustainable Green Fleets</i> (SUGRE) es una iniciativa conjunta integrada en el 6º Programa Marco de la Comunidad Europea que promociona la propulsión alternativa, principalmente se centra en las flotas cautivas. El objetivo principal es promocionar y apoyar la transformación de flotas, para que así cuenten con sistemas de propulsión alternativos, así como su uso eficiente.		Utilización de flotas cautivas de demostración.

29)	ITHER	http://task24.hidrogenoaragon.org/docs/ITHER.pdf
Resumen:		Particularidad:
Infraestructura y Tecnología del Hidrógeno y Energías Renovables (ITHER) es un proyecto impulsado por la Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón. El proyecto consiste en la generación de hidrógeno a partir de energías renovables a través de una instalación compuesta por un parque eólico de 635 kilovatios con tres aerogeneradores, una instalación solar fotovoltaica de 100 kilovatios con cinco tecnologías distintas, un electrolizador de tecnología PEM, preinstalación de otro alcalino y los correspondientes sistemas de gestión de energía, interconexión a la red eléctrica, almacenamiento de hidrógeno y uso final en pilas de combustible.		Empleo de diferentes energías renovables para obtener hidrógeno.

30)	Euro Hyport	http://www.newenergy.is/en/projects/finished_projects/euro-hyport/
Resumen:		Particularidad:
El objetivo del proyecto Euro-Hyport era estudiar la viabilidad de exportar hidrógeno desde Islandia al continente europeo.		Estudio de viabilidad de gaseoducto de hidrógeno.

31)	HySAFE	www.hysafe.net
Resumen:		Particularidad:
<i>Safety of Hydrogen as an Energy Carrier</i> (HySAFE): busca el desarrollo de un marco europeo normativo unificado para facilitar la introducción de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible.		Análisis de las normativas europeas y determinación de las carencias existentes.

32)	EIHP	www.eihp.org
Resumen:		Particularidad:
Desarrollo de normativa para utilización de hidrógeno como combustible en vehículos.		Análisis de las normativas europeas y determinación de las carencias existentes.

33)	HarmonHy	http://www.harmonhy.com/final.php
Resumen:		Particularidad:
Proyecto que pretende evaluar las actividades desarrolladas en relación con la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible a nivel mundial, con el objetivo de armonizar las normativas existentes y así resolver los conflictos existentes.		Análisis de las normativas europeas y determinación de las carencias existentes.

34)	STEP	http://www.newenergy.is/en/projects/finished_projects/euro-hyport/
Resumen:		Particularidad:
<p>Sustainable Transport Energy Project (STEP) es un proyecto que forma parte del trabajo del gobierno australiano dirigido a lograr un transporte sostenible y sin emisiones. Se encuentra entre las numerosas iniciativas dirigidas a desarrollar combustibles limpios y respetuosos con el medioambiente.</p> <p>Se han probado durante dos años, 2004-2006, tres autobuses con tecnología de pila de combustible en rutas del servicio de transporte público de Perth, con sus correspondientes estaciones de servicio. El objetivo de esta prueba es determinar los factores técnicos, medioambientales, económicos y sociales, críticos, que tienen que ser tenidos en cuenta en la introducción de los autobuses de pila de combustible de hidrógeno.</p>		<p>Aporta una relación de los problemas de mantenimiento sufridos.</p>

35)	JHFC	¡Error! Referencia de hipervínculo no válida. www.jhfc.jp
Resumen:		Particularidad:
<p>El objetivo del proyecto Euro-Hyport era estudiar la viabilidad de exportar hidrógeno desde Islandia al continente europeo. El Japan hydrogen & fuel cell demonstration project (JHFC) consiste en un programa de demostración de pilas de combustible y de un estudio de demostración de las instalaciones de repostaje de hidrógeno. Ambos proyectos están entre las iniciativas tomadas por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria japonés (METI), a favor de las pilas de combustible poliméricas.</p> <p>Entre los objetivos que se han marcado, nos encontramos la determinación de los efectos causados por el ahorro de energía de las hidrogenas y la reducción de emisiones, así como la determinación de normas de seguridad para las hidrogenas o la solución de los problemas para la localización óptima de estas instalaciones.</p>		<p>12 hidrogenas que cuentan con diferentes tecnologías y 59 vehículos operativos.</p>

36)	SINERGY	http://energy.a-star.edu.sg/cos/o.x?c=/wbn/pagetree&func=view&rid=10123
<p>Resumen: <i>Singapore initiative in energy technology</i> (SINERGY), iniciativa lanzada en el año 2001 por el gobierno de Singapore. Su objetivo es el desarrollo de soluciones y la realización de proyectos de demostración que integren energías limpias alternativas y tecnologías de las energías renovables. Entre estos proyectos están incluidos los que implican la puesta en marcha de hidrogeneras y la prueba de vehículos de pila de combustible.</p>		<p>Particularidad: 2 hidrogeneras que cuentan con diferentes tecnologías y 6 vehículos operativos.</p>

37)	BC Hydrogen Highway	http://www.hydrogenhighway.ca/
<p>Resumen: El desarrollo de la autopista de hidrógeno de Canadá no implica solamente la fabricación de estaciones de repostaje de hidrógeno, sino que incluye aplicaciones móviles, estacionarias, portátiles y de micro pilas de combustible a lo largo de toda la Columbia Británica canadiense. La misión de esta autopista de hidrógeno es permitir el avance de la utilización del hidrógeno producido y de las tecnologías del hidrógeno generados en Canadá. Las siguientes hidrogeneras han sido el resultado de este proyecto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Northlands Station - Heavy-Duty Fuelling Station - Powertech Station (CH2IP) - Victoria Station - Pacific Spirit Station (PSS) 		<p>Particularidad: Demostración a escala real de la implantación de la tecnología del hidrógeno.</p>

38)	Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Demonstration and Validation Project	¡Error! Referencia de hipervínculo no válida. www.nrel.gov
Resumen:		Particularidad:
<p>El objetivo del proyecto Euro-Hyport era estudiar la viabilidad de exportar hidrógeno desde Islandia al continente europeo. Este proyecto, iniciativa del departamento de energía (DoE) norteamericano, y que tiene su origen en el año 2003, es el mayor proyecto de su tipo. Su objetivo es validar en condiciones de operación reales vehículos de pila de combustible a la vez que se prueba de forma paralela la infraestructura de repostaje correspondiente.</p> <p>El proyecto cubre múltiples localizaciones geográficas y la operación bajo diversas condiciones climáticas, así como una gran variedad de fuentes de energía para la obtención del hidrógeno, incluyendo las energías renovables.</p>		<p>Cuentan con 59 vehículos y 9 estaciones de servicio de hidrógeno.</p>

39)	HyRoad Program	www.actransit.org/environment/hyroad_main.wu
Resumen:		Particularidad:
<p>Este proyecto pretende demostrar la viabilidad de un sistema de transporte público libre de emisiones.</p> <p>Incluye al programa <i>AC Transit</i>, caracterizado por contar con autobuses híbridos con tecnología de pila de combustible, una flota de vehículos de pila de combustible, producción <i>in situ</i> de hidrógeno y su repostaje, o el mantenimiento de la flota <i>in situ</i>.</p>		<p>Comparación de datos respecto a otras tecnologías empleadas para el mismo uso.</p>

40)	CaH2Net	http://www.hydrogenhighway.ca.gov/about/about.htm
Resumen:		Particularidad:
<p>La California Hydrogen Highway Network (CaH2Net) es una iniciativa conjunta público-privada, dirigida por la California Air Resources Board (ARB), utilizando el California Hydrogen Highway Blueprint Plan (Blueprint Plan, Mayo 2005) como documento de referencia.</p> <p>Pretende la creación de una autopista de hidrógeno, para lo cual se potencia la creación de hidrogeneras y el acercamiento de los vehículos con tecnología de pila de combustible a California.</p>		<p>Implantación de la tecnología del hidrógeno a escala real.</p>

41)	Hydrogen Village	www.hydrogenvillage.ca
Resumen:		Particularidad:
Este proyecto consiste en la creación de una población cuya única fuente de energía sea el hidrógeno. Pretende demostrar la viabilidad técnica de la tecnología del hidrógeno en todos los campos: estacionario, móvil y portátil. Incluye, entre otras aplicaciones e instalaciones, hidrogeneras, tanto para flotas cautivas, como para uso general.		Uso exclusivo del hidrógeno como fuente de energía.

42)	SCAQMD's '5 Cities Project' stations	www.aqmd.gov
Resumen:		Particularidad:
Desarrollo de proyectos de infraestructura de hidrogeneras.		Cubre las necesidades a nivel local.

43)	CaFCP	www.fuelcellpartnership.org
Resumen:		Particularidad:
La <i>California Fuel Cell Partnership</i> (CaFCP) es una organización que coordina a sus miembros con el fin de lograr el desarrollo de estaciones de hidrógeno y vehículos de pila de combustible. Desde el año 2008 hasta el 2012 estará centrada en lograr los cimientos del futuro mercado del hidrógeno.		Identifica las necesidades del hidrógeno ara su aplicación a los vehículos.

*"La civilización es el progreso desde una homogeneidad indefinida e incoherente
hacia una definida y coherente heterogeneidad"*

Herbert Spencer

CAPÍTULO 3.

El vehículo eléctrico. Alternativas a los
vehículos con sistemas de tracción con
motorización tradicional

3.1. Introducción

La humanidad, y por extensión el planeta, como sistema destinado a asumir sus acciones, se encuentra en un momento clave de su historia. Envuelta en una crisis energética, debida por un lado a los excesos del pasado y la falta de previsión, y por otro, al aumento de la demanda originada por el crecimiento económico de nuevas potencias como China, India o Brasil (K.Chaitanya, 2007 [67]); debe afrontar el fin de los recursos energéticos fósiles baratos, cuyo máximo de producción ya se ha superado (M. Tsoskounoglu, 2008 [68]). Además, el aumento en los últimos años de la concienciación social hacia la conservación del medio ambiente ha supuesto un giro en las políticas energéticas mundiales, tomando como punto de partida el protocolo de Kioto suscrito por los países industrializados en el año 1997, por el que se comprometían a tomar medidas que redujeran las emisiones de gases de efecto invernadero que previnieran el cambio climático.

Estos problemas afectan en gran medida al sector transporte, ya que, en Europa, es el responsable del 28% de las emisiones de CO₂ totales, a cuya cantidad el transporte por carretera contribuye en un 84% (European Commission 2003 [69]).

El transporte privado es un 95% dependiente de los combustibles fósiles y en 2005 suponía el 47% del consumo mundial de petróleo, el cual aumentará hasta el 52% en el año 2030 (European Commission 2003 [69]), y tanto esta dependencia como la cantidad total de petróleo consumido mantiene una tendencia creciente.

En el caso particular de España, actualmente el 40% de la energía que se consume está dedicada al para transporte. Esta energía procede completamente de la combustión de hidrocarburos (petróleo y gas); por tanto no se trata de un sistema sostenible.

Ante esta situación, el sector transporte se ha visto avocado a un periodo de transición en el que la electrificación deberá ir sustituyendo poco a poco a los combustibles fósiles. No obstante, esta sustitución se antoja lenta y costosa y las previsiones apuntan a que en el año

2015 el transporte todavía dependerá en un 92% del petróleo y en un 89% en 2030 (IEA, 2007 [70]).

La electricidad debe jugar un papel de gran importancia tanto en el transporte como en el aprovechamiento y la transformación de las energías renovables, ya que su empleo contribuirá a moderar el cambio climático. Numerosos autores ya han dejado patente que el futuro del transporte particular se encuentra en la electricidad (AllianceBersteis, 2006 [71]; Romm & Fox-Penner, 2007 [72]; IBM, 2009 [73]; Sperling & Gordon, 2008 [74]). La magnitud del beneficio medioambiental obtenido dependerá no sólo de la penetración de los vehículos eléctricos, sino del uso de las energías renovables.

El elemento eléctrico imprescindible para lograr unas ciertas garantías en el aprovechamiento de las energías renovables y en torno al cual se estructuran los sistemas de tracción de los vehículos eléctricos es la batería eléctrica. Es una realidad, que la electrificación de los vehículos se ha visto impulsada precisamente por los avances que han experimentado las baterías. Hasta ahora, las mejoras han sido más visibles en las baterías de ácido plomo y níquel metal hidruro (utilizadas en la mayoría de los vehículos eléctricos híbridos actuales), no obstante, es compartido que el futuro de los vehículos eléctricos está en las baterías de ión-litio.

Los fabricantes de automóviles ven en los vehículos eléctricos, incluidos los de hidrógeno, un valor seguro que les garantizará en parte su futuro y han ideado diferentes estrategias para integrarlos en sus gamas. Sin embargo, a día de hoy es imposible saber cuál será la acertada, ya que aún no se ha demostrado viable ninguna de ellas.

Si se pretende que llegue a buen puerto esta nueva tentativa del sector transporte, se presenta inevitable plantear un nuevo plan de negocios que integre, por un lado, a la industria del automóvil, actualmente sumida en crisis, y por otro, al cambiante sector eléctrico. Esto implica cambios, no sólo en los servicios institucionales dedicados a la creación, conservación y mantenimiento de las redes eléctricas, sino también en las instituciones existentes e infraestructuras. Uno de los aspectos a tener muy en cuenta es que cuanto

mayor es el grado de electrificación del vehículo, más costosa es la infraestructura eléctrica necesaria. En el futuro, los propietarios podrán recargar las baterías de sus vehículos con un simple cable, es por ello que pese a que la mayoría de las infraestructuras e instalaciones requeridas por los vehículos eléctricos ya se encuentran disponibles, al contrario que pasa con otras alternativas al petróleo, como el etanol, biodiesel, gas natural o hidrógeno, deberán disponerse nuevos sistemas de recarga más robustos capaces de disponer la capacidad suficiente para suministrar la energía requerida por estos vehículos eléctricos. La administración pública debe crear un sistema que desanime a los ciudadanos y prevenga de que recarguen sus vehículos durante las horas punta.

Las energías renovables proporcionar grandes cantidades de energía, pero no de forma predecible ni constante. Los vehículos eléctricos jugarán un papel esencial para acelerar la llegada de un sistema de energía renovable y sin emisiones de carbono. Los vehículos, de media, permanecen entre el 90 y el 95% del tiempo en parado, funcionando una hora al día. En estos momentos de inactividad podrían, por medio de un cargador bidireccional ceder electricidad a la red que ayude a regular las variaciones de generación y consumo de energía que se producen.

La construcción de una nueva red de recarga implica una inversión de capital, y no el desmantelamiento de ninguna red existente; lo que atraerá a nuevos jugadores al sector energético, los cuales pueden traer consigo nuevas iniciativas y ofrecer nuevas colaboraciones mediante la asociación con las empresas involucradas clave como los fabricantes de vehículos y baterías. Así, por ejemplo, existen el modelo *Better Place/Renault-Nissan* de alquiler de baterías, el cual proporciona la infraestructura necesaria para poder utilizar un vehículo eléctrico (P. H. Andersen, 2009 [75]), o un modelo similar existente en Francia, en el que el operador eléctrico francés *EDR*, *Toyota* y *Elektromotive Ltd.*, tienen previsto construir una red de puntos de recarga en Francia y Reino Unido (P. H. Andersen, 2009 [75]).

Ante la creciente preocupación por el calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero, en los años 90, la asociación de fabricante de automóviles europeos contrajo un acuerdo voluntario con la Comisión Europea para limitar las emisiones de CO₂ a

140 gCO₂/km en el año 2008, reduciendo así los 187 gCO₂/km emitidos en el año 1995. En el año 2005 los objetivos todavía estaban muy lejos de conseguirse, por lo que la Comisión Europea y los fabricantes llegaron al acuerdo de posponer hasta año 2012 la fecha límite para reducir las emisiones, pero reduciendo los gCO₂/km a 130.

Los créditos de carbono tienen el potencial de jugar un importante papel en la incorporación y uso masivo de las energías renovables y los vehículos eléctricos en particular.

En este sentido, los vehículos eléctricos no emiten CO₂, aunque este dato ignora las emisiones producidas en el proceso de generación de la electricidad. Para realizar una comparación fiable entre un vehículo convencional con motor de combustión interna y un vehículo eléctrico, hay que calcular y tener en cuenta los kwh utilizados durante el desplazamiento del vehículo eléctrico para así atribuirles las emisiones de CO₂ derivadas por la generación de los mismos en la planta de energía, siempre y cuando no se trate de electricidad proveniente de las energías renovables. De todas las maneras, la electrificación de los vehículos siempre conseguirá reducir las emisiones porque un motor eléctrico es más eficiente que uno de combustión interna. Mientras que un motor de combustión interna permite aprovechar entre el 25 y el 30% de la energía primaria empleada, rendimiento limitado por el ciclo de Carnot, y el resto lo pierde en forma de calor, el motor eléctrico alcanza un rendimiento del 90%, lo que permite compensar las pérdidas típicas que pueden producirse en las plantas de energía encargadas de transformar la energía primaria en electricidad.

Paralelamente a las emisiones de CO₂, desde 1993, año en que entró en vigor la normativa Euro 1, los valores de emisiones contaminantes de los vehículos industriales se han ido restringiendo paulatinamente en su camino de contribuir al cumplimiento de los acuerdos del protocolo de Kioto, adquiridos en el año 1997.

Hasta la llegada del la Euro 4, conseguir los índices de emisiones contaminantes marcados por las directrices de la Unión Europea no entrañaba una gran dificultad. Resultaba suficiente optimizar la combustión por medio de la electrónica y un continuo aumento del consumo de combustible. Pero actualmente, los constructores se encuentran con la necesidad de cumplir

la normativa EEV (*Enhanced Environmental Vehicle standards*) [76] y la reducción drástica en las emisiones de partículas y gases contaminantes que a partir de octubre del 2009 supone la Euro 5 y a más largo plazo la Euro 6, prevista para septiembre del 2014. Como ejemplo, la evolución de las normativas Euro para el caso de camiones y autobuses se recoge en la Tabla 6.

Tabla 6. Año de aplicación y limitación de emisiones establecidas por las normativas Euro para camiones y autobuses

Fuente: **Elaboración propia a partir de *EEV standards* [76]**

CALENDARIO EURO					
Norma	Año entrada nuevas matriculaciones	CO	Hidrocarburos	NO _x	Partículas suspendidas
Euro 1	1993	4,5	1,1	8,0	0,36
Euro 2	1996	4,0	1,1	7,0	0,25
Euro 3	Octubre 1999	2,1	0,66	5,0	0,10
Euro 4	Octubre 2006	1,5	0,46	3,5	0,02
Euro 5	Octubre 2009	1,5	0,46	2	0,02
Euro 6	Septiembre 2014	1,5	0,13	0,4	0,01
Valores expresados en gr/kW/h.					

Un país puede reducir sus emisiones de gas de efecto invernadero más de un 20% cambiando la flota de vehículos de gasolina por eléctricos, y si la energía generada es de origen renovable, la reducción alcanza el 40%. Si la evolución se da en el sector del transporte privado la reducción alcanza el 60%.

No obstante, hasta llegar al vehículo eléctrico puro y al de pila de combustible, inevitablemente deberán darse una serie de estaciones intermedias en lo que se refiere a la integración tecnológica: el vehículo híbrido, el vehículo *plug-in* híbrido y finalmente el vehículo eléctrico.



La modularidad con que se conciben las nuevas arquitecturas de estos tipos de vehículos ofrece grandes posibilidades además de líneas diferentes para alcanzar la economía de escala que permita reducir costes. Un dato muy a tener en cuenta es que el precio de los vehículos eléctricos depende en gran medida del desarrollo de nuevas baterías y de mayor potencia.

Si cuentan con la confianza de usuarios, gobiernos y las multinacionales que controlan las estaciones de servicio, se prevé que en las carreteras europeas haya un máximo del 10% de vehículos de emisión cero para el año 2020. El resto de los automóviles contarán con motores de combustión interna de alta tecnología: de menores potencias, turboalimentado y con sistema parada-arranque; que convivirán con configuraciones híbridas de base modular.

3.2. Tecnologías de Tracción

El sistema de tracción de un automóvil lo constituyen el conjunto de elementos que proporcionan la potencia mecánica al eje.

Las tecnologías de tracción se pueden dividir en tres grupos principales, dependiendo de la naturaleza de la fuente de energía utilizada para proporcionar la potencia, así nos encontraremos con la tracción térmica, la tracción eléctrica y la tracción híbrida:

- Tracción térmica: el movimiento del automóvil se produce gracias a un motor térmico que transforma la energía térmica del combustible utilizado, en energía mecánica que se transmite al eje. Como combustible se puede utilizar, bien un combustible fósil, ya sea líquido o gaseoso: gasolina, diesel, gas natural o GLP, un biocombustible: biodiesel, biogás o bioetanol u otros combustibles como el hidrógeno.
- Tracción eléctrica: el movimiento del automóvil se produce gracias a un motor eléctrico que transforma energía eléctrica en energía mecánica mediante interacciones electromagnéticas. La energía eléctrica puede provenir de baterías, pilas de combustibles o placas solares que estén montadas en el vehículo.
- Tracción híbrida: el movimiento del automóvil se consigue por medio de una combinación de sistemas térmicos y eléctricos de los vistos en los casos anteriores. Según quién proporcione la potencia al eje nos encontraremos con dos tipos de hibridación diferentes, una de tracción y otra del sistema de alimentación de energía. Debido a la complejidad del término 'hibridación' aplicado a un vehículo, se analizará en el siguiente apartado.

3.3. Alternativas a los Sistemas de Tracción Tradicionales para Vehículos de Carretera

La utilización de vehículos que se propulsan con combustibles alternativos radica principalmente en dos factores: la degradación del medio ambiente producida por la contaminación, y el deseo de los gobiernos de los países no productores de reducir su dependencia del petróleo.

Son considerados vehículos alternativos aquellos que utilizan para su propulsión: baterías eléctricas, aire comprimido, hidrógeno, sistemas híbridos, gas licuado del petróleo (GLP), gas natural (almacenado como gas comprimido (GNC) ó licuado (GNL)) o biocombustibles (biodiésel, metanol, bioetanol ó biogás).

3.3.1. Vehículos de emisión cero

Se considera vehículo de emisión cero a todo vehículo que, cuando se encuentra, bien en funcionamiento, bien en régimen estacionario, no emite emisiones o contaminantes, como son las partículas en suspensión, hidrocarburos, monóxido de carbono o varios óxidos de nitrógeno.

Excepto en casos especiales, 'emisiones cero' no significa necesariamente que el ciclo energético completo tenga que ser no contaminante. En muchos casos la energía se suministra, al menos en parte, desde plantas de energía de combustible fósiles. No obstante sigue constituyendo una ventaja en zonas urbanas cuando se compara con los vehículos convencionales.

Estos casos especiales en los que un vehículo puede ser considerado de emisión cero teniendo en cuenta su ciclo energético completo son los vehículos de aire comprimido, los vehículos eléctricos o los vehículos con tecnología de pila de combustible, cuando la

electricidad que se requiere para generar la potencia para recargar las baterías o los tanques de aire comprimido, o generar el hidrógeno, proviene de fuentes de energía renovable, como la solar o la eólica.

En todo caso, para considerar un vehículo como 'emisión cero', no se considerarán las emisiones asociadas a la fabricación, tanto del vehículo como de sus componentes, ni las emisiones asociadas a la reutilización, reciclado o desmantelamiento de los componentes del vehículo obligatorios al final del ciclo de vida del vehículo.

Por ejemplo, la *California's Air Resources Board (CARB)*, define a los vehículo de emisión cero como aquellos que no emiten contaminantes por su tubo de escape, no emiten contaminantes por evaporación, no cuentan con sistemas de control de emisiones que se deterioran con el tiempo y no conllevan emisiones provenientes del refinado de gasolina.

3.3.1.1. Vehículo eléctrico

Los vehículos eléctricos puros obtienen su capacidad de movimiento por la energía eléctrica liberada por unas baterías. El sistema de generación y acumulación de la energía eléctrica constituye el sistema básico para mover un vehículo eléctrico. Generalmente, para ello se utilizan los acumuladores electroquímicos, formados por dos substancias conductoras bañadas en un líquido también conductor. El intercambio de cargas positivas y negativas entre ambos componentes mantiene una corriente eléctrica que puede ser utilizada para el funcionamiento del motor del vehículo eléctrico.

Las baterías han tenido altos costes de fabricación, peso, tiempo de recarga, y escasa vida útil y autonomía, lo que ha limitado la adopción masiva de vehículos eléctricos de batería. Los adelantos tecnológicos actuales en baterías han resuelto algunos de estos problemas.

En el vehículo eléctrico, el 46% de la energía liberada por las baterías sirve para mover el vehículo, lo que indica una eficiencia entre 10-30% superior de éste, respecto al vehículo convencional con motor de combustión.

En un vehículo eléctrico puede haber un solo motor de tracción o varios, adosados a las ruedas. Su función es transformar la energía eléctrica que llega de las baterías en movimiento. Esta energía puede ser aprovechada tal cual llega, o sea, en forma de corriente continua o bien, y gracias a un transformador, en forma de corriente alterna.

La energía eléctrica se produce en centrales que, concretamente en nuestro país en más de un 55% queman combustibles fósiles y energía nuclear. Por este motivo la electricidad sólo puede sumarse como forma ecológica si se produce con fuentes renovables tales como energía solar, eólica, hidráulica o biomasa.

3.3.1.2. Vehículo con pila de combustible de hidrógeno

Un vehículo de hidrógeno es un vehículo esencialmente eléctrico que utiliza hidrógeno diatómico como fuente primaria de energía eléctrica.

Estos vehículos utilizan el hidrógeno en pilas de combustible. La pila de combustible de hidrógeno funciona de forma muy similar a una batería; lo que hace es convertir el hidrógeno en oxígeno y agua, de ese proceso químico es que se logra la electricidad para poder mover el automóvil. La pila de combustible no mantiene la carga, por lo que se necesita un flujo constante de hidrógeno para impulsar la transmisión del vehículo, algo parecido a la combustión interna pero con electricidad.

Actualmente, las pilas de combustibles han conseguido un buen nivel de eficiencia y compacidad que permiten 2 kW por litro y por kilo con presiones variables de 1,5 y 2,7 bar. Eso se consigue conectando en serie hasta alrededor de 200 celdas simples. Un motor de

60kW (82 CV) permite alcanzar las velocidades de los vehículos con sistema de tracción tradicional modernos.

El CAPÍTULO 4. *Tecnologías del hidrógeno y su integración en un sistema de transporte sostenible* de la presente tesis está dedicado al análisis en profundidad de la tecnología del hidrógeno y las pilas de combustible aplicadas al sector transporte.

3.3.1.3. Vehículo solar

Un automóvil solar es un automóvil propulsado por un motor eléctrico alimentado por energía solar obtenida de paneles solares en la superficie del automóvil. Las celdas fotovoltaicas convierten la energía del sol directamente a energía eléctrica, que puede o bien ser almacenada en baterías eléctricas, bien ser utilizada directamente por el motor.

Los automóviles solares no son actualmente una forma de transporte práctica. Aunque pueden operar por distancias limitadas sin el sol, las celdas son generalmente muy frágiles. Además, los equipos de desarrollo han enfocado sus esfuerzos hacia la optimización de la funcionalidad del vehículo, preocupándose poco por la comodidad del pasajero. La mayoría de automóviles solares sólo tienen espacio para una o dos personas.

El vehículo debe ser extremadamente eficiente. La utilización de materiales ligeros para la estructura, como el aluminio o algunos composites ligeros mejoran el rendimiento. Generalmente concebidos para transportar poco peso, tienen una aerodinámica muy estudiada, ya que la resistencia con el aire representa grandes pérdidas. Para aumentar más aún la eficiencia, los motores pueden actuar como generadores cuando el vehículo está frenado, acumulando energía en las baterías. Los automóviles solares usan diversas tecnologías de baterías, incluyendo plomo, níquel-cadmio, y litio.

Existen varios motivos por los que este tipo de vehículos no son viables para su comercialización: no pueden operar por un tiempo prolongado en ausencia de luz solar y

tienen un precio muy elevado, pero pese a estas limitaciones, la tecnología solar podría contribuir al desarrollo de coches eléctricos de batería o incluso híbridos que utilicen en parte energía eléctrica y en parte gasolina dependiendo de las circunstancias. En estos casos, los paneles solares ocuparían mucho menor espacio y ayudarían a alargar la autonomía de la batería, respetando el diseño y la habitabilidad interior del vehículo.

3.3.1.4. Vehículo de aire comprimido

Un vehículo de aire comprimido es un vehículo de transporte propulsado por un motor de aire, que utiliza aire comprimido, el cual es almacenado previamente en tanques de fibra de carbono, normalmente. En vez de mezclar combustible con aire y quemarlo en el motor para accionar los pistones mediante la expansión de gases calientes, en los vehículos de aire comprimido el aire empuja los pistones que son estimulados por un quemador de combustible encargado de calentar el aire para conseguir mayor presión. Estos vehículos son capaces de alcanzar un 90% de eficiencia.

La tecnología de aire comprimido reduce el costo de producción de vehículos en un 20%, porque no hay necesidad de construir un sistema de refrigeración, el depósito de combustible, bujías o silenciadores.

Los sistemas de propulsión de aire comprimido, también pueden ser incorporados en sistemas híbridos, como por ejemplo para recargar las baterías de los vehículos eléctricos. Este sistema se denomina propulsión híbrida eléctrica-neumática.

Al no existir combustión, no existe contaminación. El aire que toma del exterior (para después mezclar con aire comprimido en el cilindro) se filtra previamente.

La recarga del coche se hará, una vez esté el mercado desarrollado, en gasolineras adaptadas para suministrar aire comprimido. En 2 ó 3 minutos el coche estará listo.

Como alternativa, el vehículo lleva incorporado un pequeño compresor que permite conectarlo a la red eléctrica (220 v) y cargar completamente el depósito en 3 ó 4 horas.

3.3.2. Vehículos híbridos

La hibridación de un vehículo se puede contemplar desde dos puntos de vista, ambos compartiendo como principio básico la existencia de sistemas eléctricos y térmicos que se complementarán para dar lugar al movimiento del vehículo, y que se diferenciarán porque en una será únicamente el motor eléctrico el encargado de dar tracción al vehículo y en la otra serán el motor eléctrico y el motor térmico los que conjuntamente puedan propulsar al automóvil. De este modo tenemos:

- Hibridación del sistema de tracción: vehículos que cuentan al mismo tiempo con un sistema de tracción eléctrico y otro basado en un motor térmico, y ambos tienen la capacidad, bien independientemente, bien de forma combinada, de propulsar al vehículo.
- Hibridación del sistema de alimentación de energía: vehículos que cuentan con más de un tipo de sistema de energía, ya sea éste de producción o de almacenamiento, siendo al menos uno de ellos eléctrico. Para simplificar el caso, la tracción será proporcionada en todo caso por un motor eléctrico.

En los vehículos que cumplen la primera condición, la hibridación se utiliza para aprovechar mejor el carburante (aumentar las prestaciones, disminuir el consumo o ambas cosas), siendo el caso, por ejemplo de aquellos automóviles híbridos que cuentan con motor térmico y eléctrico, pero sólo utilizan éste último para el arranque y mantener el vehículo a muy baja velocidad durante distancias muy cortas. En los del segundo tipo, la combinación de un sistema eléctrico y un combustible sirve para aumentar la autonomía, y sería el caso, por ejemplo de un automóvil híbrido que cuente con motor térmico y eléctrico, pero que como sistema tractor sólo utilice éste último, siendo la función del motor térmico la de recargar las

baterías cuando éstas se estén agotando. Este modelo es el utilizado con las pilas de combustible.

Los vehículos híbridos eléctricos se clasifican en tres tipos diferentes, atendiendo a su principio de funcionamiento:

3.3.2.1. Híbridos configuración serie

Se caracterizan por no contar con ninguna conexión mecánica directa entre el motor de combustión interna, o pila de combustible, y las ruedas. El automóvil es propulsado únicamente por un motor eléctrico que se aprovecha de la electricidad generada por un generador, que anteriormente han accionado el motor térmico o la pila de combustible, para producir trabajo mecánico. Nótese que en los casos en los que se utiliza un motor térmico la energía mecánica del motor térmico se convierte en eléctrica en el generador, la cual se convierte de nuevo en mecánica en el motor eléctrico. Para el caso de vehículos con pila de combustible, el primer cambio de energía mecánica a eléctrica no tiene lugar, puesto que la pila proporciona directamente energía eléctrica. La batería actúa como acumulador de la electricidad (energía) sobrante y, cuando está totalmente cargada, permite la desconexión temporal del motor térmico o la pila de combustible, de forma que el vehículo puede propulsarse temporalmente de manera totalmente eléctrica. La Figura 2 muestra el esquema de funcionamiento de la configuración serie. Es el caso concreto de la hibridación del sistema de alimentación de energía.

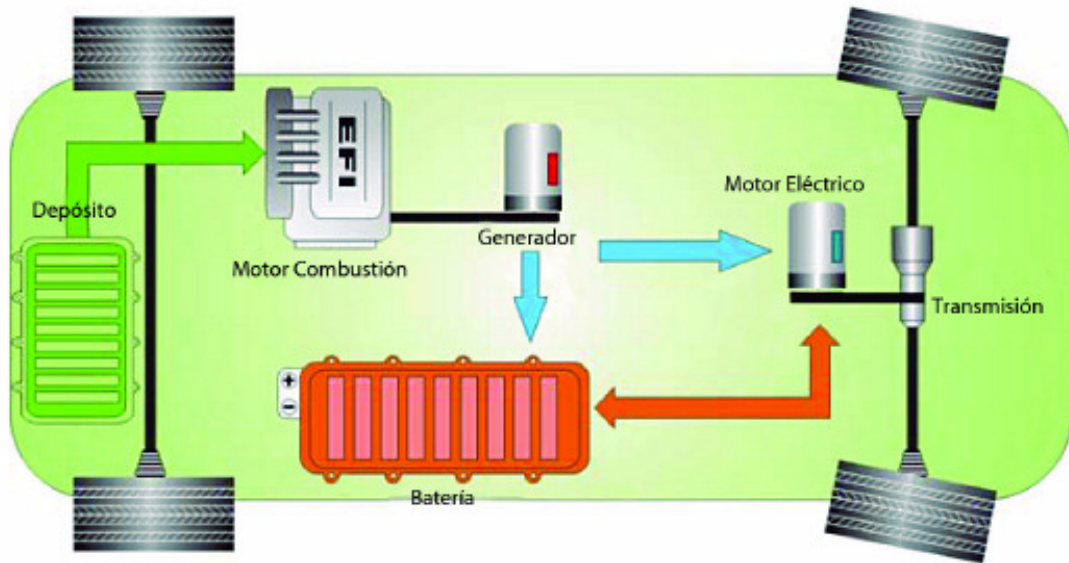


Figura 2. Vehículo híbrido configuración serie

Fuente: **Fundación FITSA**

Este tipo de configuración presenta una serie de ventajas e inconvenientes.

- **Ventajas:**

- El sistema de producción puede operar siempre en su punto de funcionamiento óptimo ya que no está directamente unido a la transmisión.
- El sistema es menos complejo que el paralelo; la libertad en el diseño es mayor al no existir acoplamiento mecánico entre elementos y según el motor eléctrico usado, se puede llegar incluso a prescindir de caja de cambios.

- **Inconvenientes:**

- Tanto motor eléctrico como baterías (en caso de incorporarlas) deben dimensionarse para satisfacer la máxima demanda de potencia, a diferencia de la configuración paralelo, con los que sus pesos y costes aumentan.
- En caso de montar un motor térmico como sistema de producción de energía, la doble conversión de energía mecánica-eléctrica-mecánica disminuye el rendimiento en comparación con un vehículo convencional en situaciones, como por ejemplo, de velocidad constante.
- Molestias del tipo acústico (en caso de montarse motor térmico), debido a su operación a velocidad de giro constante con el vehículo estacionario.

3.3.2.2. Híbridos configuración paralelo

Estos vehículos cuentan con un motor térmico o pila de combustible y un motor eléctrico que trabajan simultáneamente para impulsar al vehículo, ambos tienen la capacidad de proporcionar tracción directa mecánica con las ruedas, pudiéndose montar en el mismo eje, o en ejes diferentes. Presentan la posibilidad de que ambos sistemas de tracción trabajen simultáneamente, o que el motor eléctrico se utilice únicamente como generador. El esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 3. Se trata de una hibridación del sistema de tracción.

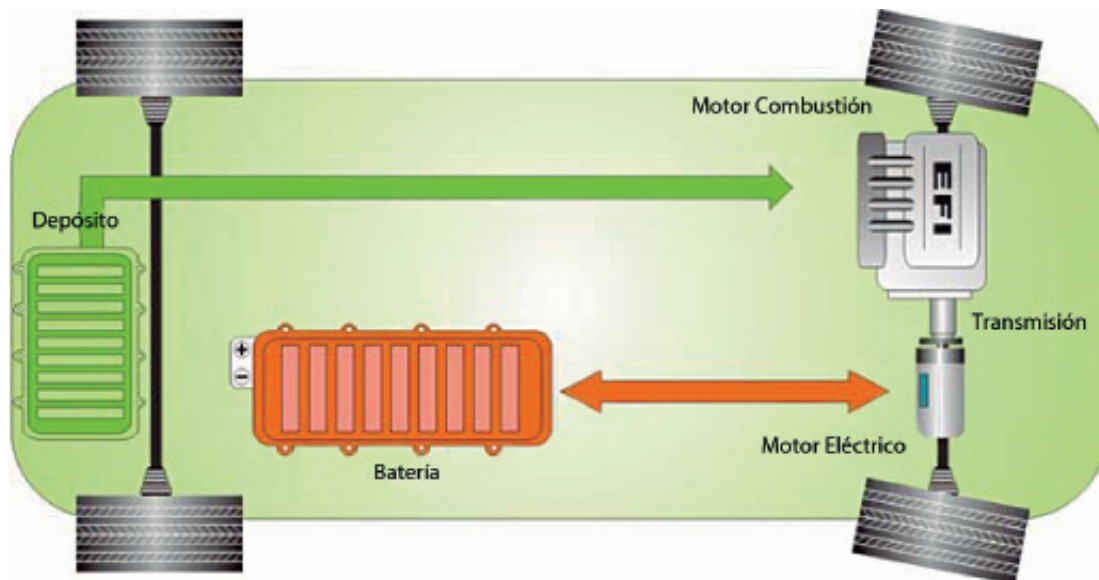


Figura 3. Vehículo híbrido configuración paralelo

Fuente: Fundación FITSA

Este tipo de configuración presenta una serie de ventajas e inconvenientes:

- Ventajas:
 - Mayor eficiencia que la configuración serie, pues sólo existe una conversión de energía mecánica-eléctrica.

- El tamaño de los componentes puede ser menor, ya que al poder sumar sus contribuciones, no tienen por qué ser capaces de satisfacer la demanda energética por sí solos.
- Inconvenientes:
 - El sistema de transmisión se puede complicar con varios embragues y reductores según la configuración. La existencia de acoplamientos mecánicos disminuye la flexibilidad en el diseño. Además es poco recomendable, a diferencia de la configuración serie, montar elementos de alta velocidad de giro, como por ejemplo turbinas, por hacerse necesario el uso de reductores poco eficientes.
 - Comparado con un vehículo convencional en carretera y a velocidad constante, apenas mejora sus resultados en cuanto a eficiencia.

3.3.2.3. Híbridos configuración mixta

Estos vehículos cuentan con un motor térmico o pila de combustible y presentan la posibilidad de cargar las baterías existentes en el vehículo y de actuar sobre las ruedas contribuyendo a su propulsión de forma simultánea. Esta configuración brinda la oportunidad de propulsar al vehículo sólo con el motor térmico o la pila de combustible, exclusivamente mediante el motor eléctrico, o mediante una combinación de ambos. Conceptualmente se trata de una configuración en serie en la que el motor térmico o pila de combustible se conectan también a las ruedas de forma directa. El esquema de este tipo de configuración se muestra en la Figura 4. Se trata de una hibridación del sistema de tracción.

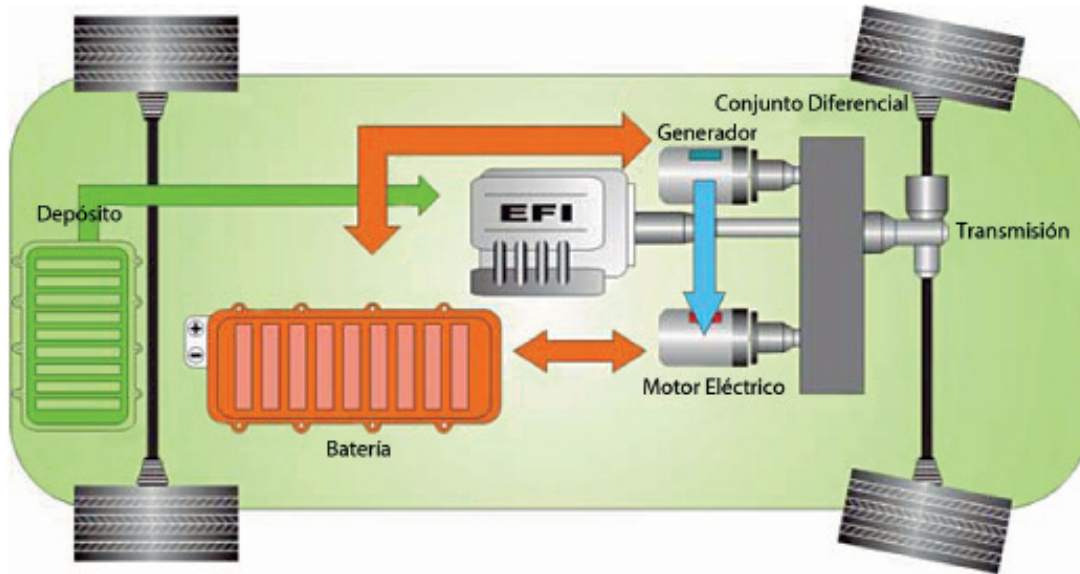


Figura 4. Vehículo híbrido configuración mixta

Fuente: **Fundación FITSA**

Esta configuración posibilita una gran libertad de operación, no obstante también presenta sus ventajas e inconvenientes:

- Ventajas:
 - Presenta gran libertad en cuanto a modos de funcionamiento, lo que conseguirá, por lo general, un funcionamiento con más alto rendimiento.
- Inconvenientes:
 - Debe existir acoplamiento mecánico entre las partes, y el diseño se vuelve más complejo, más aún si se incluye generador.

Por lo tanto, analizando estas ventajas e inconvenientes, se puede concluir que los automóviles híbridos configuración serie ofrecerán ventajas durante las operaciones de arranque y parada, mientras que los automóviles híbridos configuración paralelo presentan una eficiencia mayor durante el funcionamiento a plena carga.

3.3.2.4. Modos de funcionamiento

El funcionamiento del sistema de energía de un vehículo híbrido está intrínsecamente ligado a su configuración, puesto que ésta condiciona los modos en los que dicho sistema puede operar. Los modos de funcionamiento en que cada configuración potencialmente puede operar son los que se presentan a continuación. Para una explicación más clara se utilizará el esquema del sistema de energía de un vehículo híbrido paralelo que monte motor térmico y eléctrico con acoplamiento pilotado y batería, ya que esta configuración permite todos los modos de operación posibles en cualquier vehículo híbrido:

- Modo sólo eléctrico: se utiliza cuando las exigencias son bajas, por ejemplo en circulación urbana, con bajas velocidades. Operando en este modo, el vehículo es similar a un vehículo eléctrico puro, ya que consume la energía almacenada mientras que el motor térmico permanece desconectado. En la Figura 5 aparece el flujo de energía de este modo de funcionamiento de forma esquemática.

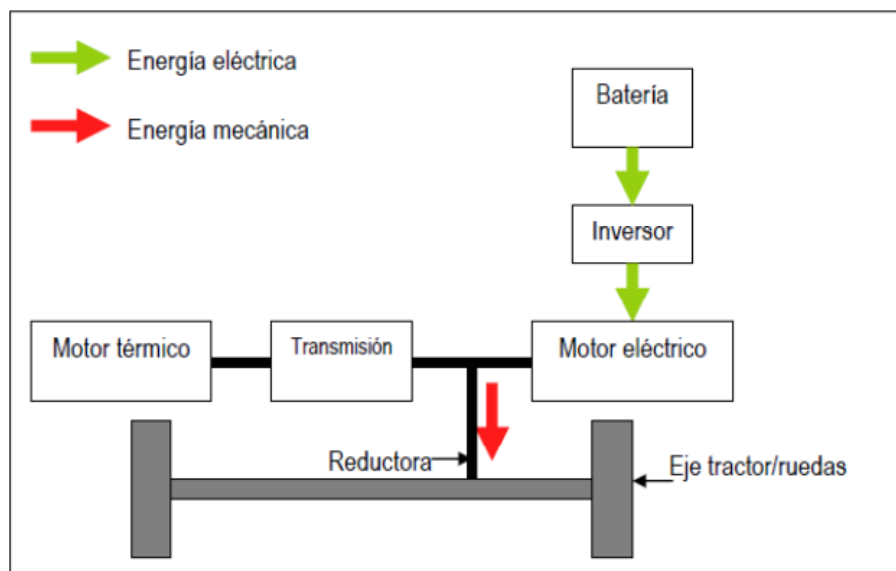


Figura 5. Diagrama del flujo de energía del modo sólo eléctrico

Fuente: **Elaboración propia**

- Modo sólo motor térmico: operando en este modo, el vehículo actúa de la misma manera que un vehículo convencional de motor de combustión. Se utiliza para altas velocidades, por ejemplo, conducción en carretera. En la Figura 6 aparece el flujo de energía de este modo de funcionamiento de forma esquemática.

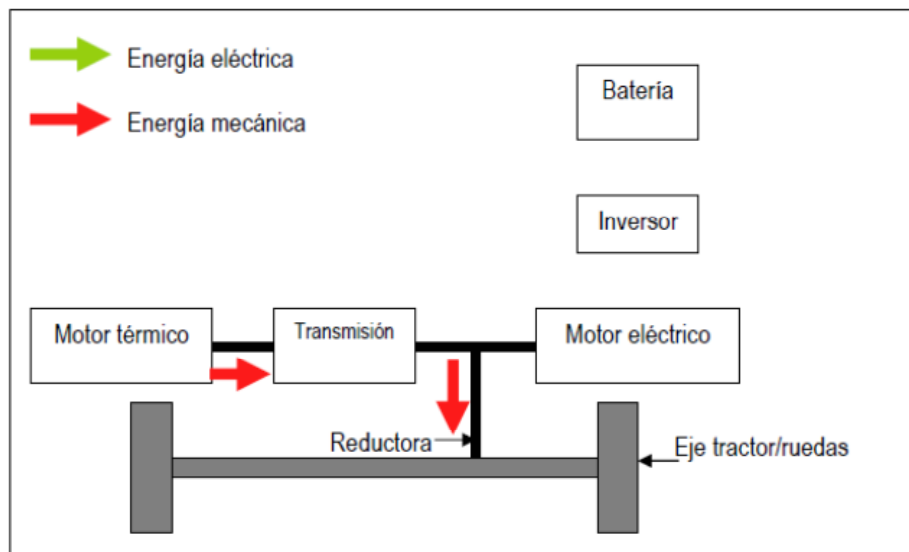


Figura 6. Diagrama del flujo de energía del modo sólo motor térmico

Fuente: **Elaboración propia**

- Modo motor térmico más recarga del sistema de almacenamiento: cuando en el modo anterior (sólo motor térmico) se produce un excedente de energía, dicha cantidad de energía se destina al sistema de almacenamiento. En la Figura 7 aparece el flujo de energía de este modo de funcionamiento de forma esquemática.

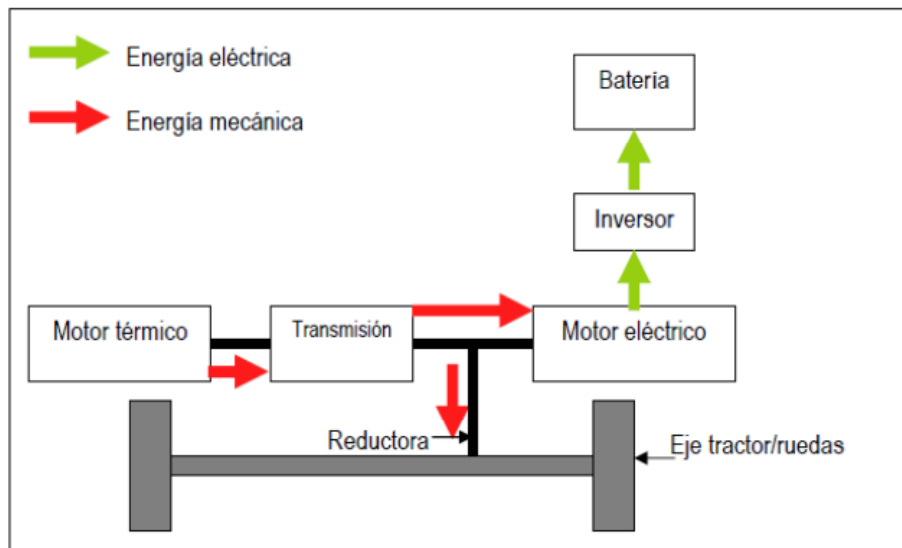


Figura 7. Diagrama del flujo de energía del modo sólo motor térmico más recarga del sistema de almacenamiento

Fuente: **Elaboración propia**

- Modo motor térmico más motor eléctrico: se opera en este modo cuando los requerimientos de potencia son máximos, por ejemplo en pendientes o aceleraciones. Ambos motores operan al mismo tiempo, sumándose su contribución para obtener las máximas prestaciones. En la Figura 8 aparece el flujo de energía de este modo de funcionamiento de forma esquemática.

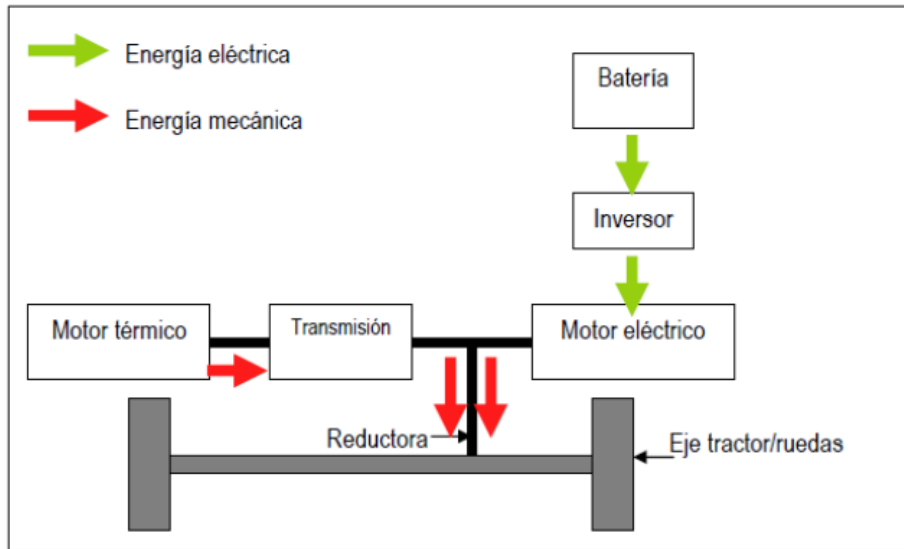


Figura 8. Diagrama del flujo de energía del modo motor térmico más motor eléctrico

Fuente: **Elaboración propia**

- Modo frenado regenerativo: durante frenadas o deceleraciones se opera en este modo, en el cual, el motor o un generador – en caso de contar con él – aprovecha la energía cinética o gravitatoria del vehículo para recargar los sistemas de almacenamiento de energía. En la Figura 9 aparece el flujo de energía de este modo de funcionamiento de forma esquemática.

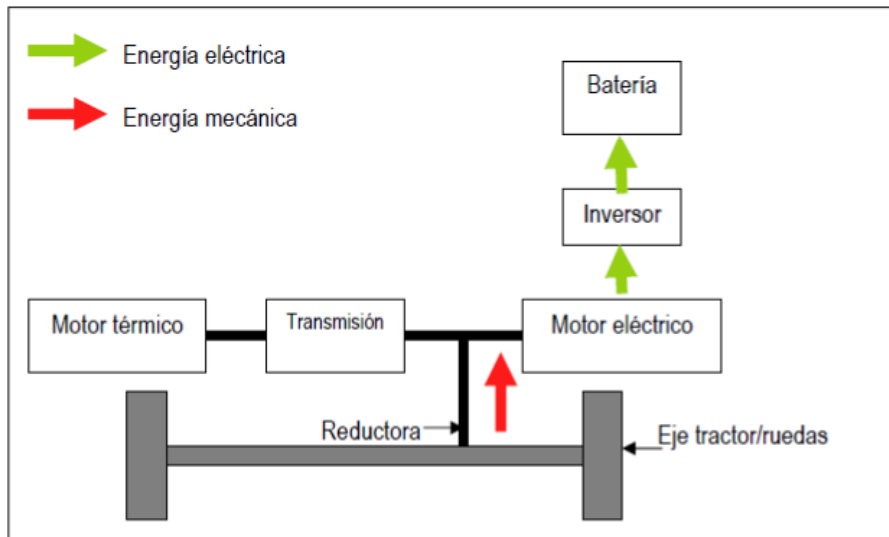


Figura 9. Diagrama del flujo de energía del modo freno regenerativo

Fuente: **Elaboración propia**

- Modo recarga estacionaria: en este estado, el vehículo no se mueve y la energía generada por el motor térmico se usa exclusivamente para recargar los sistemas de almacenamiento de energía. En la Figura 10 aparece el flujo de energía de este modo de funcionamiento de forma esquemática.

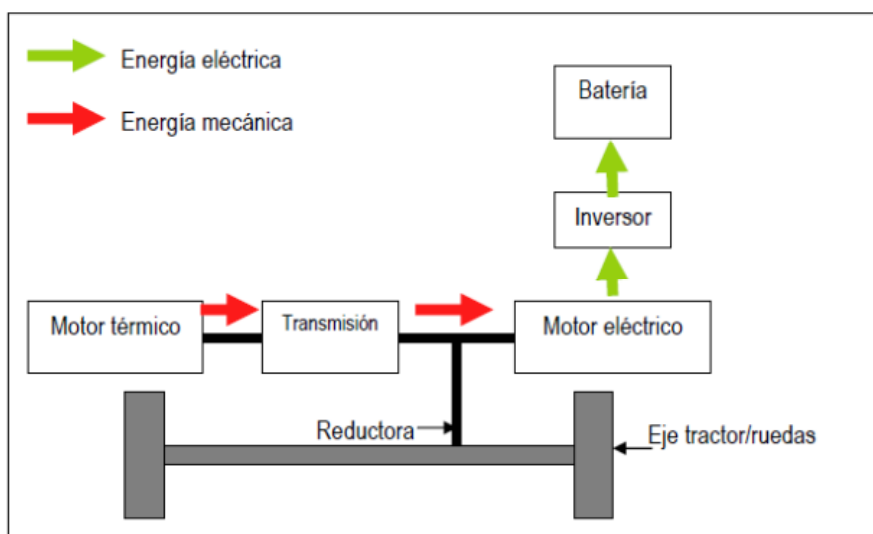


Figura 10. Diagrama del flujo de energía del modo recarga estacionaria

Fuente: **Elaboración propia**

3.3.2.5. Vehículos híbridos con motor de combustión interna

Se trata de aquél que combina un motor eléctrico, normalmente alimentado con baterías (aunque también puede alimentarse por volantes de inercia o ultra condensadores), y un motor térmico cualquiera: turbina de gas, diesel, gasolina, Stirling, y el resto de los modelos conocidos en el mercado.

Debido al estado de la tecnología resulta complicado almacenar grandes cantidades de energía eléctrica, por lo que la fuente principal será el combustible que se almacena para el motor térmico.

3.3.2.6. Vehículos híbridos de pila de combustible

Es aquél que combina un motor eléctrico, normalmente alimentado con baterías (aunque también puede alimentarse por volantes de inercia o ultra condensadores), y una pila de combustible.

La fuente principal de energía para la propulsión será la pila de combustible, mientras que la energía eléctrica proporcionada por el motor eléctrico se utiliza para conseguir que la pila de combustible, debido a sus características, trabaje constantemente en un régimen de carga lo más próximo posible al nominal, logrando así optimizar tanto su rendimiento como su vida.



Figura 11. Esquema del Mercedes B NGT

Fuente: Mercedes-Benz

3.3.3. Vehículos propulsados con combustibles alternativos

Este grupo de vehículos engloban la utilización en motores de combustión interna (MCI) de los siguientes combustibles:

3.3.3.1. Biocombustibles

El biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa, organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos, tales como el estiércol de la vaca.

Los combustibles de origen biológico pueden sustituir parte del consumo en combustibles fósiles tradicionales, como el petróleo o el carbón.

Los biocombustibles más usados y con mayor nivel de desarrollo en el campo de los transportes son:

a. Biodiésel

Biodiésel es el nombre común por el que se conoce a los ésteres metílicos. Se obtiene a partir de aceites vegetales vírgenes, pero también de aceites vegetales usados y de grasas animales.

Puede utilizarse como combustible único ó mezclarlo con gasóleo, siendo la mezcla más habitual de 5% de biodiésel y 95% de gasóleo, que supone una reducción en las emisiones de CO₂ que oscila del 2% al 2,5%.

Los motores diésel convencionales pueden funcionar perfectamente con mezclas al 5% sin necesidad de modificaciones en el motor. La mayoría de los motores diesel podrían funcionar

con mezclas de hasta el 30%, pero sin garantías por parte de los fabricantes. A partir del 30% se presentan problemas por degradación de las juntas y la obturación de los inyectores. El biodiésel está regulado por la norma europea para el gasóleo EN 590, que permite hasta un 5% de biodiésel, el cual además debe cumplir la norma de calidad europea EN 14214.

b. Bioetanol

El bioetanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como combustible.

El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina pero con una importante reducción de las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión. Se suele emplear mezclado con gasolina en una proporción de 5% de bioetanol y 95% de gasolina, según la norma de calidad europea EN 228, sin necesidad de modificación alguna del motor. Algunos fabricantes establecen el máximo de bioetanol en el 5%, mientras otros garantizan el buen funcionamiento del motor hasta el 10%. Dos mezclas comunes son E10 y E85, que contienen el etanol al 10% y al 85%, respectivamente. Si se emplea al 100% en motores de encendido provocado (MEP), se deben realizar ciertas modificaciones en los motores, además de que sus filtros deben ser cambiados con más frecuencia, ya que el bioetanol favorece la liberación de los depósitos de partículas del tanque y de los conductos del combustible.

El uso de la mezcla con bioetanol al 5%, supone una reducción en las emisiones que va del 2,5% al 3%, calculado sobre la base de su ciclo de vida útil. Si se utiliza el bioetanol puro supone una reducción, también sobre su ciclo de vida útil, del 50% al 70%, dependiendo de las materias primas empleadas.

c. Biometano (Biogás)

Se produce a partir de un proceso metabólico de descomposición de materia orgánica mediante la acción de bacterias metanogénicas en ambiente anaeróbico. Está compuesto por metano (50% - 80%) y CO_2 (20% - 50%) y otros gases como hidrógeno, CO y ácido sulfhídrico, en proporciones mucho menores. Si se eliminan el CO_2 y el sulfhídrico aumentando la concentración de metano, se puede usar en automoción como sustituto del gas natural. A nivel industrial se obtiene en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) y de vertederos de residuos sólidos urbanos.

Las emisiones que produce son muy similares a las del gas natural, pero si tenemos en cuenta el ciclo de vida completo son inferiores, ya que es un combustible renovable, que además hace que el CH_4 de los vertederos y plantas depuradoras de aguas residuales no escape a la atmósfera.

3.3.3.2. Combustibles sintéticos

Nueva generación de combustibles obtenidos mediante procesos termoquímicos del gas natural, carbón y biomasa. Atendiendo a su materia prima de origen se han desarrollado tres tipos:

- Gas a líquido (GtL)
- Carbón a líquido (CtL)
- Biomasa a líquido (BtL)

Los procesos de obtención principales de estos combustibles son los siguientes:

- Licuefacción directa del carbón.
- Producción de gas de síntesis ($\text{CO} + \text{H}_2$) seguida de síntesis *Fischer-Tropsch*.
- Producción de gas de síntesis seguida de síntesis de metanol y a continuación transformación del metanol en gasolina y/o gasóleo.

Los combustibles sintéticos obtenidos de la biomasa suelen llamarse también biocombustibles, si bien este término se presta a confusión porque incluye tanto al BtL como al bioetanol y el biodiésel, los cuales son obtenidos mediante fermentación, un proceso sustancialmente diferente de la transformación termoquímica utilizada para el BtL.

Las emisiones del GtL son similares a las de la gasolina, mientras que las que presenta el BtL son inferiores.

Estos carburantes cuentan con cuatro ventajas respecto al gas licuado de petróleo (LPG) y el gas natural comprimido (CNG):

- Despiden menos azufre a la atmósfera.
- Generan menos gases y, por tanto, ayudan a limitar el efecto invernadero.
- Su uso no requiere ninguna modificación en los motores actuales.
- Su distribución puede realizarse a través de las estaciones de servicio existentes.

3.3.3.3. Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación pueden producirse a partir de fuentes no alimentarias como residuos agrícolas (paja) y desechos de maderas, reduciendo así las grandes extensiones de cultivo de la materia prima exigidas por los biocombustibles de primera generación.

Biocombustibles de segunda generación son los siguientes combustibles: BtL, principalmente diésel sintético *Fischer-Tropsch*, bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica y biogás.

Entre los biocombustibles de segunda generación que se obtienen a partir de biomasa utilizando la tecnología del BtL, se encuentran en desarrollo:

- Bio-hidrógeno
- Bio-dimetil-eter (bio-DME)
- Biometanol

- Diesel mejorado de alta temperatura (HTU)
- Diésel sintético Fischer-Tropsch
- Mezcla de alcoholes: por ejemplo, mezcla de etanol, propanol y butanol con pequeñas proporciones de pentanol, hexanol, heptanol y octanol.

Estos biocombustibles proporcionan una mayor seguridad de abastecimiento gracias al uso de nuevas materias primas como materiales de desechos y celulósicas, una menor emisión de gases de efecto invernadero y un impacto medioambiental inferior. Estos combustibles dejarán una huella de carbono mucho menor que la de otros biocombustibles.

3.3.3.4. Gas natural

El gas natural es una mezcla combustible rica en gases, su principal componente es el metano (CH_4), se encuentra en estado natural, ya sea solo o en presencia del petróleo, es incoloro e inodoro y es más liviano que el aire, característica que contribuye a la seguridad, pues en caso de una fuga sube rápidamente a la atmósfera dispersándose. Por encontrarse en estado gaseoso se mezcla fácilmente con el aire permitiendo una buena combustión, es un combustible ecológico por su bajo contenido de carbono y la ausencia de azufre.

Los vehículos a gas natural (VGN), almacenado en forma de gas natural comprimido o licuado, utilizan motores de combustión interna adaptados a la utilización del gas natural con diversas configuraciones, pero todos ellos pueden ser englobados dentro de una de las siguientes categorías, en función de si utilizan un solo combustible o varios:

- *Dedicados, mono-combustible o monovalente* (generalmente de encendido provocado): Sólo utilizan gas natural, por lo que cuenta con la ventaja de estar optimizado para operar con este combustible, pueden trabajar con relaciones de compresión superiores a las de la gasolina o el diesel, de manera que su eficiencia es máxima, permitiendo así mismo mantener un bajo nivel de emisiones. Puede tratarse de motores originariamente de gasolina o gasoil modificados para el nuevo combustible, o motores fabricados para tal fin (OEM). La mayoría de vehículos en Europa son de este tipo.

- *Bicombustible, bi-fuel o bivalente*: Pueden funcionar tanto con gas natural como con gasolina (u otro combustible líquido de encendido provocado, como el etanol), lo que aumenta su autonomía. Los bicombustibles normalmente dependen de la gasolina para el encendido cuando el motor es arrancado, por lo que una pequeña cantidad de este combustible es requerida siempre para su funcionamiento óptimo. Se usa sobre todo en vehículos de bajas potencias (turismos y furgonetas). Sus emisiones son superiores a las de los mono-combustibles.
- *Dual-fuel*: Utilizan una mezcla de gas natural y diesel o gasolina, cuyas proporciones van cambiando en función de la carga. Se benefician de la mayor eficiencia de los motores diesel a cargas parciales. A bajas cargas, trabajan mayoritariamente ó totalmente con gasóleo, mientras a altas cargas pueden llegar a trabajar hasta con el 95% de gas natural. Generalmente, los motores dual-fuel son el resultado de la conversión de un motor diesel tradicional, con la ventaja de no ser dependientes totalmente dependientes del gas natural, lo que le permite operar sólo con gasoil si el vehículo se encuentra lejos de un punto de abastecimiento de gas. Las motivaciones para la conversión de un motor van desde los beneficios medioambientales (reducción de NO_x y de partículas), hasta las ventajas económicas de utilizar un combustible como el gas natural que es más barato que el gasoil.
- *Tri-fuel*: Estos motores combinan un vehículo flexi-fuel con uno de gas natural. Un motor flexi-fuel es aquel que puede operar con gasolina o etanol, bien de manera combinada o de manera exclusiva. Así, un motor tri-fuel puede funcionar con gasolina, etanol o gas natural.
- *Inyección Directa de Alta Presión (HPDI)*: La tecnología HPDI incluye la inyección tanto de gasoil como de gas directamente en la cámara de combustión a alta presión. De la misma manera que un motor dual, un HPDI depende del gasoil para la iniciación de la combustión. Este sistema difiere del uno dual en la manera en la que ambos combustibles son mezclados. Presenta rendimientos similares a las de un motor diesel convencional.

a. Gas Natural Comprimido (GNC)

El gas natural vehicular es el mismo gas que se utiliza en las casas, en las termoeléctricas e industria en general, lo que lo diferencia de los otros usos, son las presiones, que en el caso del uso vehicular se comprime entre 200 y 250 bar, según la normativa de cada país, con el objetivo de almacenar la máxima cantidad de volumen en los cilindros dispuestos para tal fin y de esta forma brindar la mayor autonomía posible al vehículo. Este gas natural es principalmente metano, que al tener un alto índice de hidrógeno por carbono produce menos CO₂ por unidad de energía entregada, en comparación con otros hidrocarburos más pesados (con más átomos de carbono y un menor ratio H/C).

Se puede utilizar en la mayoría de los tipos de vehículos, pero como requiere habitualmente de un repostaje frecuente, su utilización se suele limitar a vehículos pertenecientes a flotas cautivas con retorno a centros bases o con acceso fácil a estaciones de repostaje.

d. Gas Natural Licuado (GNL)

El GNL es un líquido formado por metano al 85 - 99,9%, transparente, inodoro, no tóxico, no corrosivo y no cancerígeno. Ocupa un volumen 600 veces inferior al volumen del gas natural en su forma gaseosa. Se obtiene a través de un proceso de licuefacción del gas natural gaseoso.

En primer lugar se somete al gas a un proceso de purificación en el que es refrigerado en distintas etapas bajo presión, de forma que se elimina el dióxido de carbono, el agua y otros componentes que podrían solidificar durante el proceso de licuefacción. Después se lleva a cabo dicho proceso de criogenización y/o despresurización en el que se somete al gas a temperaturas de -162°C y presiones que van desde 3,5 bar a 10,5 bar. Para poderlo almacenar se requieren de depósitos criogénicos especiales con fuertes aislamientos térmicos que consigan mantener esta temperatura. Desde el punto de vista del motor, no hay diferencia entre utilizar GNC ó GNL. Puede utilizarse en cualquier clase de vehículos, aunque su uso principal es en vehículos pesados.

El GNL tiene una densidad energética menor que el diesel o que la gasolina. Se necesitan 1,7 litros (en promedio) de GNL para obtener la misma energía que se obtendría de 1 litro de diesel, y 1,55 litros de GNL para 1 litro de gasolina.

A nivel nacional, casi la totalidad de vehículos que funcionan con GN son vehículos a GNC, no a GNL, exceptuando algunos prototipos y algunos vehículos utilizados en limpieza urbana, como se aprecia en la siguiente tabla elaborada a partir de los datos del Teatrise e Institut Catalá d'energia.

Tabla 7. Vehículos que hay actualmente en España funcionando con GN

Fuente: **Elaboración propia a partir de datos del *Treatise e Institut Catalá d'energia* (2009)**

Tipo de vehículo	Unidades y combustible
Autobuses urbanos	344 GNC
Camiones de limpieza urbana	483 GNC y 26 GNL
Camiones de transporte de mercancías	11 GNL
Carretillas elevadoras y vehículos ligeros	39 GNC
Estaciones de carga Autobuses	25 GNC y 3 GNL

3.3.3.5. Gas licuado del petróleo

El gas licuado del petróleo (GLP) es una mezcla de propano (C_3H_8) y de butano (C_4H_{10}), de distinta proporción en función del país y del tipo de vehículo. Se extrae a partir de procesos de refinado, y de los yacimientos de gas natural húmedo. En condiciones normales de presión está en estado gaseoso, pero se licua al someterlo a una presión de unos 10 bar.

Los vehículos a GLP son muy similares a sus equivalentes de gasolina, radicando las diferencias fundamentales en los sistemas de almacenamiento (en estado líquido) y alimentación de combustible al motor (combustión en el motor en estado gaseoso).

Existen dos tipos de vehículos a GLP: los bi-combustibles y los mono-combustibles. Los bi-combustibles presentan la ventaja de poder cambiar de GLP a gasolina con una simple acción del conductor, salvando así el inconveniente que supone la baja autonomía. Sin embargo, los vehículos mono-combustible presentan mejores rendimientos y menores emisiones contaminantes.

La capacidad de los depósitos instalados en los vehículos es de 40 - 70 litros para los turismos, y para furgonetas se llegan a superar los 80 litros. En el caso de los autobuses los depósitos tienen mucha más capacidad y van alojados en el techo.

La siguiente tabla resume los números de vehículos propulsados por GLP y estaciones de servicio que suministran esta carburante.

Tabla 8. Número de vehículos que utilizan GLP y estaciones de servicio que lo suministran (2009)

Fuente: **Elaboración propia a partir de fuentes consultadas**

	Mundo	Europa	España
Nº vehículos	13,5 millones	6 millones	10.000
Estaciones de servicio	-	< 11.000	36

3.3.3.6. Hidrógeno como combustible para motor de combustión interna

Un vehículo de hidrógeno es un vehículo de combustible alternativo que utiliza hidrógeno diatómico como su fuente primaria de energía para propulsarse.

Estos vehículos logran la fuerza motriz gracias a la ignición del hidrógeno dentro de la cámara de combustión. El motor de combustión interna de hidrógeno se parece mucho a los motores de gasolina, exceptuando que el combustible es gaseoso en lugar de líquido.

Un automóvil de hidrógeno no requiere el tratamiento de los gases de escape, cuando opera correctamente. La alta velocidad de combustión del hidrógeno ofrece la oportunidad de aumentar el rendimiento de potencia sin incrementar el tamaño del motor. Usando la inyección directa del hidrógeno, la densidad de potencia es aproximadamente un 117% superior con respecto a un motor de gasolina equivalente, y los motores de combustión interna de hidrógeno pueden arrancar fácilmente aún con muy bajas temperaturas de ambiente. Sin embargo, a diferencia de los combustibles líquidos, el hidrógeno tiene una baja densidad de energía por unidad de volumen, lo que significa que el vehículo estará un poco limitado en su autonomía en comparación con los actuales.

3.3.4. Comparativa entre tecnologías de tracción alternativas

A partir del análisis de las prestaciones de los vehículos que cuentan con estas tecnologías, es posible extraer algunas conclusiones.

En primer lugar se ha realizado una comparación de la autonomía media alcanzada por los vehículos que montan las diferentes tecnologías, ver Tabla 9 y Figura 12, de la que es posible extraer las siguientes conclusiones:

- Los vehículos con sistemas propulsores alimentados con biocombustibles son los que mayor autonomía proporcionan, debido, sobre todo, a su mayor madurez tecnológica, asociada a su similitud con los sistemas propulsores tradicionales.
- Los sistemas que utilizan hidrógeno, ya sea en pilas de combustible o en motores de combustión interna, empiezan a lograr valores competitivos, en especial cuando esta

tecnología se emplea en autobuses, pero aún se encuentra por debajo de los niveles de los biocombustibles o el GLP.

Tabla 9. Resumen de la autonomía media obtenida con las diferentes tecnologías estudiadas [km] (2009)

Fuente: **Elaboración propia a partir de fuentes consultadas**

	Eléctrico	PC	Híbrido	Biodiesel	Bioetanol	Biometano	GN	GLP	H ₂ -MCI
Turismos	86,67	422,58	636,6	960	888,86	1000	337,5	546,67	255
Autobuses	100	274,72	300		450		327,5	600	325
Vehículos industriales	75						450		

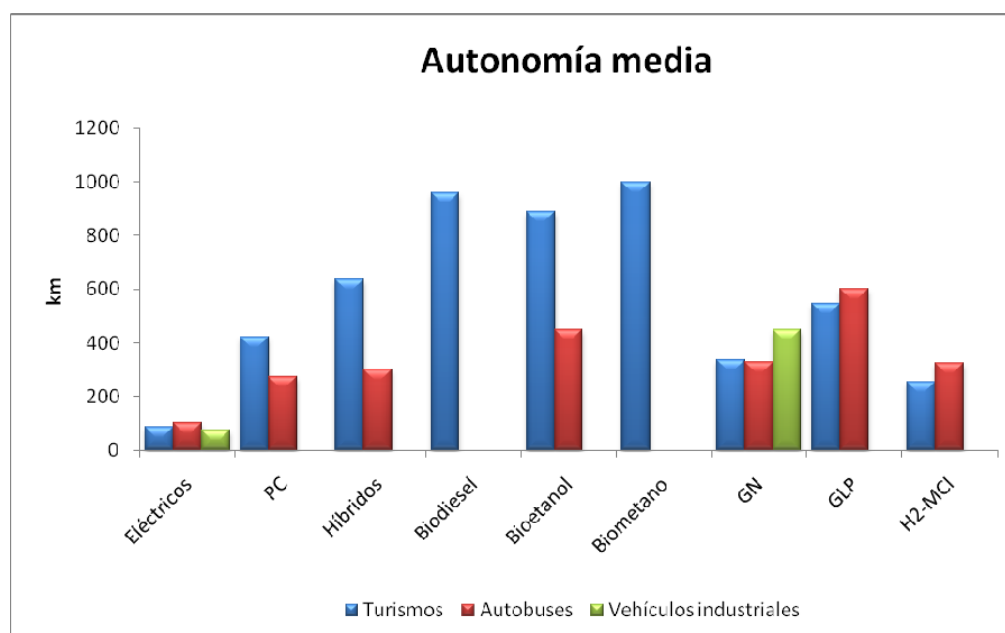


Figura 12. Comparativa de la autonomía media proporcionada por las diferentes tecnologías (2009)

Fuente: **Elaboración propia a partir de fuentes consultadas**

Realizando para las mismas tecnologías y mismos casos la comparación de la autonomía específica, es decir, los kilómetros que pueden recorrer los vehículos, por cada kilogramo de

combustible que almacenen a bordo, ver tabla y gráfica siguientes, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los datos de autonomía específica ratifican las mayores prestaciones de los biocombustibles y que los vehículos con tecnología de pila de combustible empiezan a ser competitivos.
- Los vehículos eléctricos, debido a su baja autonomía, tanto media como específica, hace que su utilización se reduzca a aplicaciones donde las distancias a recorrer no sean muy elevadas. Una aplicación apropiada sería para flotas cautivas, con un radio de actividad acotado.

Tabla 10. Autonomías específicas obtenidas con las diferentes tecnologías estudiadas [km/kg] (2009)

Fuente: **Elaboración propia a partir de fuentes consultadas**

	Eléctrico	PC	Híbrido	Biodiesel	Bioetanol	Biometano	GN	GLP	H ₂ -MCI
Turismos	0,085	0,273	0,435	0,647	0,565	0,833	0,248	0,397	0,153
Autobuses	0,035	0,018			0,037	0,0128	0,02		0,02
Vehículos industriales	0,096						0,22		

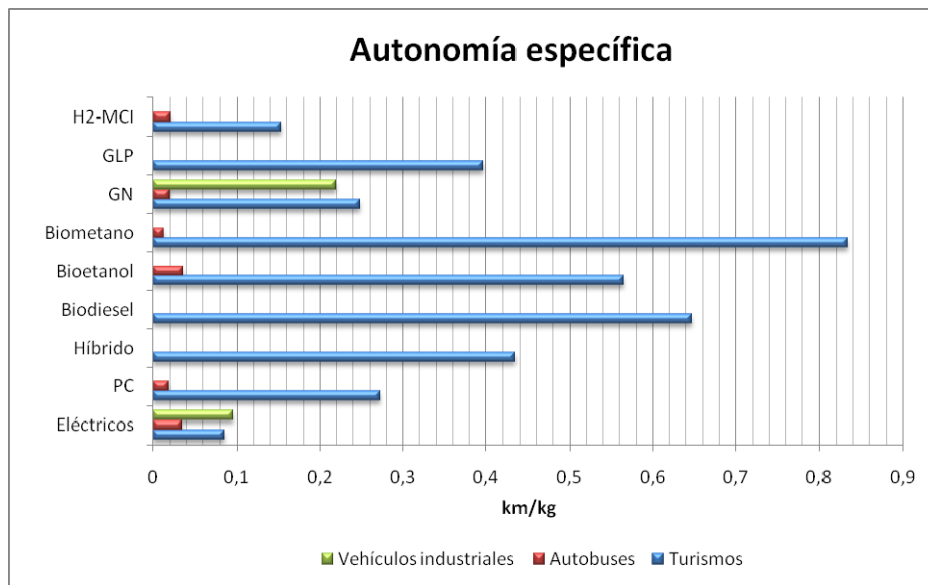


Figura 13. Comparativa de la autonomía específica proporcionada por las diferentes tecnologías (2009)

Fuente: **Elaboración propia a partir de fuentes consultadas**

3.4. Arquitecturas Flexibles y Eficiencia Energética

El concepto de eficiencia energética en el transporte supone un cambio de mentalidad respecto a las ideas de consumo energético que el empleo de los vehículos con motor de combustión interna nos ha acostumbrado durante el último siglo.

Tradicionalmente es suficiente con llenar el tanque de combustible de un vehículo convencional; tener carburante te asegura el desplazamiento, con independencia de las características de éste, la exigencia que presente y de si el consumo de combustible del vehículo es mayor o menor. La abundancia de petróleo de la que ha disfrutado hasta ahora la sociedad y una red de estaciones de repostaje muy nutrida, han contribuido a no tener la necesidad de salir más allá de estas ideas.

La incorporación de los nuevos sistemas de tracción eléctricos llegan ligados a unos sistemas de diseño flexibles y eficientes, en los que conocer la energía que va a requerir el vehículo en su funcionamiento va a resultar un factor fundamental. Estos nuevos sistemas eléctricos llevan implícitos un peso extra correspondiente a los bancos de baterías que deben incorporar, y que será directamente proporcional a la energía demandada al vehículo; es decir, mayor energía demandada, implica mayor peso del vehículo, con la pérdida de prestaciones que ello conlleva. Habrá que llegar al compromiso de mejores prestaciones posibles con el menor gasto energético que esto permita. Para ello se hacen imprescindibles estudios de demanda particulares en función del tipo de vehículo y el uso que se vaya a hacer de él.

Por lo tanto, el problema se centra en lograr la mayor eficiencia energética posible, es decir, lograr realizar un trabajo determinado con la mínima pérdida de energía posible, o lo que es lo mismo, que la energía que ha producido un determinado movimiento de un vehículo sea lo más próxima posible a la existente en los sistemas de almacenamiento antes de que se inicie el mismo. El concepto de eficiencia energética se incorpora a la ecuación del transporte.

La modularidad con que se conciben las nuevas arquitecturas de estos tipos de vehículos ofrece grandes posibilidades además de líneas diferentes para alcanzar la economía de escala que permita la reducción de costes. Un dato muy a tener en cuenta es que el precio de los vehículos eléctricos depende en gran medida del desarrollo de nuevas baterías y de mayor potencia.

El concepto de arquitectura de un vehículo se refiere a la configuración del conjunto de componentes encargados de la propulsión y sus dimensiones. Se cuentan hasta tres criterios diferentes a la hora de definir la arquitectura de un vehículo:

- Criterio meramente estructural. Consiste en determinar la configuración de la cadena de tracción que permite lograr la distribución de volúmenes y pesos más adecuada para obtener unas mejores prestaciones.
- Criterio basado en la selección del tipo de cadena de tracción que dará mejores prestaciones ante unas demandas energéticas determinadas.
- Criterio referido a la elección de los diferentes sistemas energéticos de que dispondrá el vehículo y a la administración de la energía proporcionada o almacenada por cada uno de estos dispositivos.

Para optimizar la arquitectura de un vehículo eléctrico es posible atender a cualquiera de los tres criterios definidos anteriormente, pero siempre habrá que tener en cuenta el entorno en el que se deberá desenvolver el vehículo, es decir, el ciclo de funcionamiento que deberá cumplir. Un vehículo con la misma carrocería exterior podrá ver modificada su arquitectura interior en función de, si por ejemplo, se usa en un entorno urbano o interurbano, o de si se destina a uso particular o privado. De este modo, la incorporación del concepto de eficiencia energética también supone la incorporación de una nueva variable a la ecuación del transporte: los ciclos de funcionamiento.

En resumen, para realizar el dimensionamiento eficiente del sistema energético y de tracción de un vehículo eléctrico, una vez se conozca el uso al que está destinado el vehículo, en primer lugar se deberá determinar el ciclo de funcionamiento que lo caracteriza, para

posteriormente determinar la cantidad de energía que demandará y el sistema de suministro de energía más apropiado.

En el ANEXO 1. *Optimización del Sistema de Tracción de Vehículos no Contaminantes*, como ejemplo del proceso a seguir para realizar el dimensionamiento eficiente del sistema de energía y tracción de un vehículo, se recoge el resumen de un trabajo de investigación complementario a esta tesis y desarrollado en el marco de la optimización de sistemas de tracción para vehículos no contaminantes.

3.4.1. Ciclos de funcionamiento

Un ciclo de funcionamiento es una secuencia en el tiempo de las velocidades desarrolladas por un vehículo, el cual estará sometido a un determinado entorno de conducción. Por lo tanto, representa el recorrido de dicho vehículo; un vehículo debe cubrir una determinada distancia manteniendo en todo momento unas velocidades fijadas previamente. La gráfica más representativa de un ciclo de funcionamiento es la de velocidad/tiempo. En la Figura 14 aparecen, de izquierda a derecha, gráficas velocidad/tiempo de los ciclos más característicos de los tres escenarios principales: urbano, mixto e interurbano.

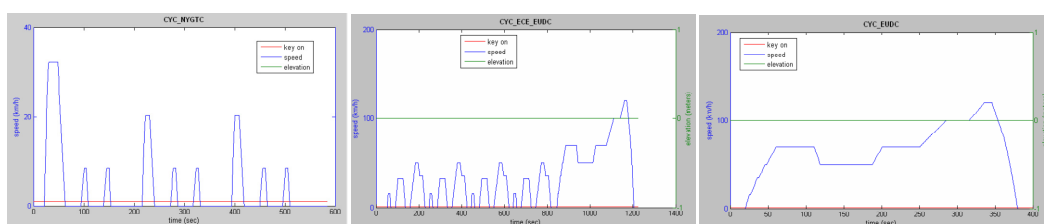


Figura 14. De izquierda a derecha, gráficas velocidad/tiempo del ciclo urbano ECE, mixto ECE_EUDC_LOW e interurbano EUDC

Existen diferentes ciclos de funcionamiento oficiales que se han desarrollado simulando los hábitos de conducción de las diferentes partes del planeta y se toman como referencia para modelar el comportamiento de los vehículos. Así se cuenta con los Procedimiento de Ensayo

Federal (*Federal Test Procedure, FTP*) en Estados Unidos, de carácter transitorio y caracterizados por representar un tipo de conducción agresiva y de alta velocidad típica de transporte urbano del centro de Manhattan, New York (Figura 15); los ciclos *ECE* en Europa, caracterizados por presentar pequeños espacios de tiempo en los que la velocidad se mantiene constante y que reflejan las condiciones de conducción en ciudades europeas tales como París o Roma (Figura 14); o los ciclos 10-15 en Japón, que representan un tráfico más congestionado, con mayor número de aceleraciones y desaceleraciones que en los europeos y que está basado en la dinámica de conducción de Tokio (Figura 16).

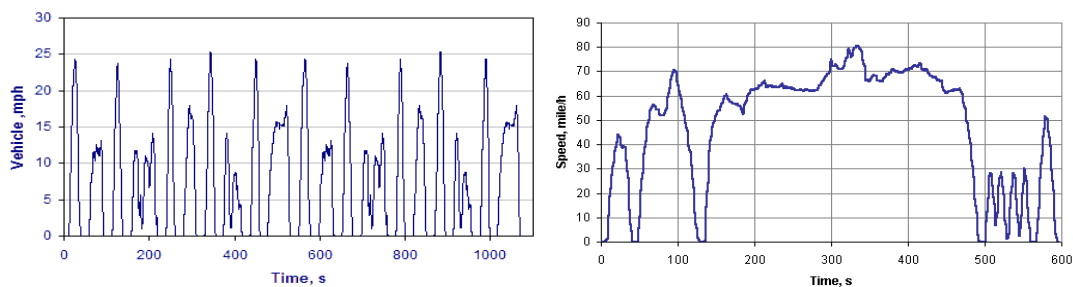


Figura 15. Ciclos FTP

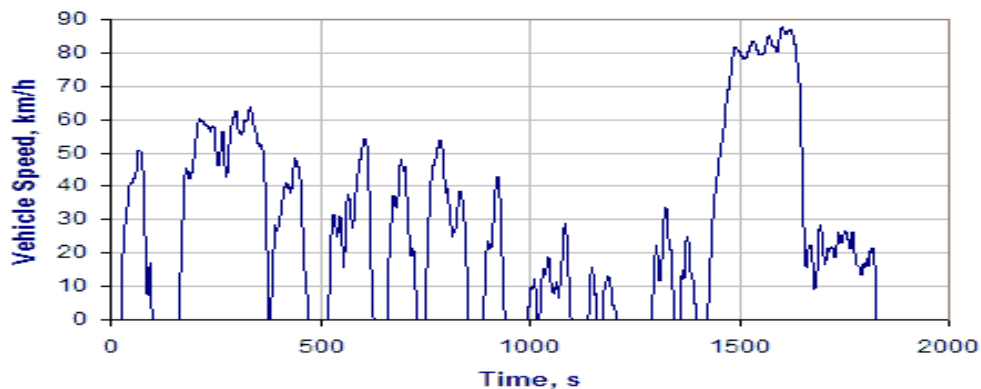


Figura 16. Ciclo japonés

A la hora de desarrollar los ciclos de funcionamiento existen dos enfoques diferentes. Uno se basa en el registro de datos de conducción, y es el utilizado en los ciclos FTP norteamericanos. A lo largo de los años se han utilizado diferentes métodos para registrar los datos generados durante el funcionamiento de los vehículos y plasmarlos en los diferentes

ciclos (H.Y. Tong, 1999 [21]). Y el otro se basa en ciclos modales o poligonales. Éste segundo es el caso de los ciclos japoneses o el ciclo ECE europeo, que se construyen a partir de diferentes modos de conducción caracterizados por aceleraciones y velocidades representativas. El primero de los enfoques se basa en datos experimentales, por lo que en un principio, y atendiendo a motivos meramente racionales, se puede considerar como un método más representativo ante una situación de conducción real.

Para que el vehículo sea capaz de recorrer cada uno de los ciclos previstos necesita una cantidad determinada de energía. Dicha energía variará en función de factores como el peso del vehículo o su eficiencia.

3.4.2. Sistemas de almacenamiento de energía

Conocido el perfil de demanda energética requerido por un vehículo de unas características determinadas, para cumplir el ciclo de funcionamiento impuesto por el uso final para el que está diseñado; si se toma como criterio principal a la hora de determinar la configuración óptima de la arquitectura de un vehículo eléctrico la elección del sistema energético y su dimensionamiento, se obtendrá como resultado la cadena de tracción a utilizar por el vehículo, junto a los sistemas de almacenamiento de energía óptimos y sus dimensiones.

A la hora de diseñar el sistema energético de un vehículo, se deben tener en cuenta los diferentes sistemas de almacenamiento energético existentes, así como sus principales características: densidad de energía, densidad de potencia, vida útil y si se trata de dispositivos inductivos o capacitivos.

Existen dos tipos de sistemas de almacenamiento de energía: los sistemas primarios de energía y los sistemas secundarios. En el ANEXO 2. *Sistemas de Almacenamiento de Energía* aparece una descripción detallada de estos sistemas, no obstante, en el presente apartado se recoge un pequeño resumen de las principales características de los mismos.

Los sistemas primarios o activos de energía son aquellos que proporcionan energía por sí mismos, a partir de un proceso termoquímico, electroquímico, físico o mecánico (P. Corbo, 2005 [77], 2009 [78], 2010 [45]). En la Tabla 11 se recogen los principales sistemas primarios de energía con alguna de sus principales características.

Tabla 11. Sistemas primarios de energía

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada (P. Corbo, 2005 [77], 2009 [78], 2010 [45])**

Sistema	Densidad de energía	Densidad de potencia	Rendimiento
Motor térmico	Depende del combustible almacenado	1 kW/kg (según tipo)	≈ 15%
Pila de combustible	Depende del combustible almacenado	1,4 kW/litro	≈ 60%
Batería máquina	110 Wh/kg	150 W/kg	75%

La función de estos sistema en el vehículo es la de proporcionar la energía suficiente para propulsarlo, así como para alimentar sus sistemas auxiliares.

Los sistemas secundarios o pasivos de energía son aquellos que se limitan a almacenar energía en forma determinada y cederla en otro momento en esa misma forma. Es decir, toman y ceden cantidades de energía a modo de reserva. En la Tabla 12 se recogen los principales sistemas secundarios de energía con alguna de sus principales características (I. Kuribayashi, 1995 [79]; Y. Nishi, 2001 [80]; B. Scrosati, 2001 [81]; E. karden, 2006 [82]; A. Cooper, 2009 [83]).

Tabla 12. Sistemas secundarios de energía

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada (I. Kuribayashi, 1995 [79]; Y. Nishi, 2001 [80]; B. Scrosati, 2001 [81]; E. karden, 2006 [82]; A. Cooper, 2009 [83])**

Sistema	Densidad de energía	Densidad de potencia	Vida útil (nº ciclos)
Disco inercia (flywheel)	< 150 Wh/kg	2 kW/kg	ilimitado
Supercondensador	1 - 10 Wh/kg	10 kW/kg	> 500.000
Sistema neumático	60 Wh/kg	Elevado	Ilimitado
Sistema hidráulico	10 Wh/kg	1,5 kW/kg	Ilimitado
Baterías de plomo-ácido	35 - 50 Wh/kg	150 - 900 W/kg	1000
Baterías otros pares	50 - 220 Wh/kg	30 - 200 W/kg	200 - 2000

El papel que juegan estos sistemas de almacenamiento, salvo excepciones, es el de funcionar como sistema de almacenamiento auxiliar de energía. Por ejemplo, la función principal de los supercondensadores es la de satisfacer con muchísima velocidad demandas puntuales y elevadas de potencia, ya que su limitada densidad de energía los hace inviables, al menos a corto plazo, como dispositivos de almacenamiento para suplir todas las necesidades energéticas del vehículo.

No obstante, ciertos sistemas secundarios de energía, como los sistemas neumáticos o las baterías, son utilizados como fuente principal de energía en los vehículos eléctricos (o híbridos enchufables) o de aire comprimido respectivamente.

En la Tabla 13 se recogen las características de los principales tipos de baterías, incluyendo tanto las primarias como las secundarias.

Tabla 13. Características de los principales tipos de baterías

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada (I. Kuribayashi, 1995 [79]; Y. Nishi, 2001 [80]; B. Scrosati, 2001 [81]; E. karden, 2006 [82]; A. Cooper, 2009 [83])**

TIPO		Densidad de energía [kW/kg]	Densidad de potencia [W/kg]	Nº ciclos al 80% de descarga (ciclos)	Tensión de salida (V/acumulador)	Coste mínimo aprox. [€/kWh]
PASIVAS	Pb-ácido convencionales	35	150	1000	2,1	50
	Pb-ácido avanzadas	45	250	1500	2,1	170
	Pb-ácido reguladas con válvula	50	>150	>700	2,1	130
	Pb-ácido de lámina de metal	30	900	>500	2,1	120
	Ni- Metal hidruro	80	200	>2000	1,3	150
	Ión-Li	50-150	120-150	>1000	3,6	200
	Zn-aire	200	80-140	200	1,65	90
	Al-aire	220	30	200	1,5	100
ACTIVAS	Na-S	110	150	1000	2,1	125
	Na-NiCl	100	150	1000	2,1	200
	Li-FeS	150	300	1000	1,75 - 2,1	160
	Li-Polímero Sólido	200	350	1000	1,75 - 2,2	125
	Zn-Br	80	150	3000	1,8	200

La idoneidad de un sistema de almacenamiento de energía vendrá determinada por la magnitud y tipo de demanda energética que se produzca; por ejemplo, demandas de potencia constantes en el tiempo marcarán la necesidad de contar con baterías, mientras que para picos de demanda en periodos cortos de tiempo se presentarán más adecuadas otras alternativas, como pueden ser los supercondensadores o los discos de inercia (H. Winzla, 2005 [84]). En la Tabla 14 se muestran los tiempos de descarga y rangos de potencia de los principales sistemas de almacenamiento de energía.

Tabla 14. Tiempos de descarga y rangos de potencia de los principales sistemas de almacenamiento de energía.

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada (H. Winzla, 2005 [84])**

Tecnología	Tiempo de descarga	Banda de potencias
Acumulador hidráulico	horas - días	100 MW - 1.000 MW
Disco de inercia	segundos - minutos	10 kW - 100 kW
Aire comprimido	horas - días	100 MW - 1.000 MW
Batería plomo-ácido	minutos - horas	1 kW - 40 MW
Batería níquel-cadmio	segundos - horas	1 kW - 40 MW
Batería sodio-azufre	horas - días	50 kW - 10 MW
Bobinas superconductoras	segundos	1 MW - 100 MW
Supercondensadores	segundos	10 kW - 1 MW

El consumo energético de los vehículos eléctricos es posible disminuirlo si se selecciona correctamente la arquitectura de la cadena de tracción, se gestiona la energía y si el uso del vehículo coincide con aquel para el que ha sido diseñado. Tecnologías ya habituales son el sistema *star-stop*, que permite ahorrar energía cuando el vehículo no está en movimiento, o el freno regenerativo, que permiten recuperar la energía perdida durante el movimiento del vehículo (E. karden, 2007 [85]).

Al final, lo que se pretende lograr un sistema de tracción lo más eficiente posible, con una proporción óptima entre fuente de energía primaria y secundaria. Se busca que éstos sistemas de energía sean lo más pequeños posibles, pero de una dimensión suficiente como para, de forma conjunta, proporcionar energía requerida para cubrir el perfil de demanda que presente el vehículo.

Por lo tanto, con este criterio de diseño se debe poder definir los diferentes sistemas de almacenamiento de energía que deberán estar presentes en el vehículo y qué porcentaje de energía proporcionará cada uno sobre el total y en qué momentos para cubrir el perfil de demanda de un vehículo en concreto concebido para un uso definido.

3.5. Oportunidades Resultado del Proceso de Electrificación del Sector Transporte

Pese a que esta tesis se va a centrar a partir del capítulo siguiente en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible y se van a analizar de forma más exhaustiva las consecuencias técnicas y económicas del proceso de implantación de las infraestructuras asociadas necesarias, debido, por un lado, al protagonismo que van a tomar a más corto plazo los vehículos eléctricos de batería y enchufables. Numerosos autores ya han dejado patente que el futuro del transporte particular se encuentra en la electricidad (AllianceBersteis, 2006 [71]; Romm & Fox-Penner, 2007 [72]; IBM, 2009 [73]; Sperling & Gordon, 2008 [74]); y por otro lado a que como ya se ha comentado anteriormente, el vehículo de pila de combustible es esencialmente un vehículo eléctrico, en este apartado de la tesis se considera interesante analizar, aunque de una forma somera y genérica, el proceso de electrificación del sector transporte, y las oportunidades que este proceso va a generar.

La electrificación del sector transporte supone una profunda reforma en la red eléctrica, no por el hecho de tener que crearla, ya que la mayoría de las infraestructuras e instalaciones ya se encuentran disponibles en la actualidad, sin ir más lejos, el sistema de distribución eléctrica en España comprende más de 900.000 kilómetros de líneas y más de 300.000 transformadores, ni porque haya dismantelar ninguna red existente, sino porque deberán disponerse nuevos sistemas de recarga más robustos capaces de disponer la capacidad suficiente para suministrar la energía requerida por estos vehículos eléctricos. Y es que en un futuro, los propietarios podrán recargar las baterías de sus vehículos con un simple cable, ya sea desde su propia vivienda, ya sea desde postes de recarga públicos. Por esta razón, la administración pública debe crear un sistema que desanime a los ciudadanos y prevenga de que recarguen sus vehículos durante las horas punta.

El refuerzo de las redes eléctricas implica una fuerte inversión de capital, proporcional al grado de electrificación de los vehículos, pero también ofrece nuevas oportunidades. Los vehículos, de media, permanecen entre el 90 y el 95% de su vida parados, funcionando una

hora al día, así que en estos momentos de inactividad podrían, por medio de un cargador bidireccional, ceder electricidad a la red eléctrica, ayudando así a regular las variaciones de generación y consumo de energía que se producen. Así pues, los vehículos eléctricos contribuirán al logro de un sistema de energía renovable y sin emisiones de carbono, y es que las energías renovables proporcionan grandes cantidades de energía, pero no de forma predecible ni constante. La magnitud del beneficio medioambiental obtenido dependerá no sólo de la penetración de los vehículos eléctricos, sino del uso de las energías renovables.

El proceso de electrificación de los vehículos se antoja largo, y el grado de refuerzo de las líneas eléctricas, así como el número de puntos de recarga deberá hacerse de forma proporcional a la demanda, de lo contrario se puede llegar a sobrecargar las líneas de tensión.

Actualmente existen tres tipos diferentes de cargadores para vehículos eléctricos:

- Cargador de inducción. Parte del cargador se encuentra dentro del vehículo y otra fuera.
- Cargador de abordó. Dispuesto dentro del vehículo. En este tipo de tecnología sólo es necesario un cable y una toma de corriente doméstica.
- Cargador externo. Dispuesto fuera del vehículo, por lo que es necesario disponer de las adecuadas instalaciones que dispongan de este servicio.

En un futuro, la red de recarga para los automóviles deberá ser tan eficaz como la red de infraestructuras de repostaje de combustibles fósiles que disponemos en la actualidad; aún pasará un tiempo antes de que los vehículos convencionales y los vehículos híbridos dejen de circular por las carreteras. Cuando eso suceda, las redes eléctricas tendrán que ser capaces de proporcionar la energía que ahora dan las gasolineras. En el caso particular de España, la red eléctrica deberá proporcionar adicionalmente la energía suministrada por las 9.046 gasolineras que a principios de 2.009 existían en nuestro país, lo que supone una gasolinera por cada 18 kilómetros, ó una gasolinera por cada 3.200 vehículos aproximadamente (en España hay circulando en torno a los 29 millones de vehículos).

La localización de los puntos de consumo eléctrico para la recarga dependerán del tipo de vehículo y flota que estudiemos. Para los vehículos industriales, los puntos de recarga deberán estar ubicados en los polígonos industriales, y la recarga se realizará esencialmente por la noche. En el caso de flotas cautivas públicas o privadas, el punto de recarga deberá situarse en las cocheras y las recargas también se realizarán predominantemente por la noche. En el caso de vehículos particulares, la carga se realizará en garajes privados, no a una hora concreta, aunque los gobiernos deberían tomar medidas incentivadoras para que fuera por la noche. Se trata así de sistemas de recarga localizados para los vehículos industriales y las flotas cautivas y un sistema de recarga distribuido cuando se trata de vehículos particulares. Por lo tanto, habrá que habilitar las líneas a las características de cada caso en particular.

En el caso de los vehículos eléctricos que cuentan con pila de combustible en su sistema de tracción existen ciertas peculiaridades respecto a las infraestructuras necesarias, ya que aunque la mayoría cuentan con baterías que pueden recargarse con electricidad, las pilas de combustible necesitan un aporte continuo de hidrógeno y oxígeno. El oxígeno se obtiene del aire, pero el hidrógeno requiere de una infraestructura de producción, transporte y distribución propia.

Como se verá en el **CAPÍTULO 4, *Tecnologías del hidrógeno y su integración en un sistema de transporte sostenible***, el hidrógeno no es una fuente de energía primaria, como el carbón, el gas natural, o el petróleo sino un vector energético. Es decir, que hay que producirlo extrayéndolo por ejemplo del agua o de los hidrocarburos mediante diferentes sistemas, siendo los más importantes el reformado de gas natural o la electrólisis del agua mediante electrolizador, sistema utilizado para obtener hidrógeno de forma limpia mediante el aprovechamiento de las energías renovables.

El hidrógeno debe ser transportado desde el lugar donde se genera al punto de utilización, debiendo ser manipulado y puesto a disposición de los consumidores en las estaciones de repostaje de hidrógeno ó hidrogeneras para su utilización como combustible de transporte.

El hidrogeno puede ser transportado en estado gaseoso (a presión) o líquido (criogénico), pudiendo distribuirse a través de tuberías o mediante camiones, barcos o trenes, de una forma muy similar a como se transporta los combustibles fósiles.

Los modos de transporte comercialmente disponibles en la actualidad son los siguientes:

- vehículos industriales con hidrógeno almacenado en tanques de gas comprimido, entre 200 y 1000 bar,
- vehículos industriales con hidrógeno almacenado como un líquido criogénico, a -253°C,
- gaseoductos que transportan gas hidrógeno comprimido a presiones que oscilan entre los 10 y los 30 bar.

El suministro de hidrógeno a los automóviles se realiza en las hidrogeneras. Existen diferentes tipos de hidrogeneras desde el punto de vista del suministro de hidrógeno en lo que se refiere a la viabilidad técnica y económica.

Los surtidores de hidrógeno son similares a los que suministran gasolina, pero tienen una conexión a los tanques de almacenamiento de hidrógeno.

Al igual que ocurre con los puntos de consumo eléctrico, los puntos de recarga de hidrógeno dependerán del tipo de vehículo flota que estudiemos y la demanda. Cuando se trata de vehículos industriales, la demanda será elevada, los puntos de suministro deberán estar ubicados en los polígonos industriales, y la recarga se realizará esencialmente por la noche. En el caso de flotas cautivas públicas o privadas, la demanda será más o menos elevada dependiendo del tamaño de la flota, la hidrogenera deberá situarse en las cocheras y las recargas también se realizarán predominantemente por la noche. En el caso de vehículos particulares, las hidrogeneras deberán distribuirse en función de una serie de variables de entrada: la demanda, los tiempos de espera, los accesos existentes y la extensión geográfica a dar servicio. Las diferentes variables de entrada tendrán mayor o menor importancia dependiendo del tipo de flota a la que esté destinada. Esta importancia dependerá sobre todo

del grado de control que se tenga sobre el usuario final, es decir, si se cuenta con flotas cautivas que siguen circuitos cerrados, será mucho más fácil determinar el número exacto de vehículos y el momento del repostaje que si se trata de una instalación de uso público, en el que sólo te podrás ceñir a datos estadísticos. Por lo tanto, el dimensionamiento de una hidrogena destinada a dar servicio a una flota cautiva se podrá dimensionar de una forma mucho más óptima que la de uso público. Un aspecto crítico en este respecto es conocer el perfil de uso al que se va a someter a la instalación, es decir, conocer las demandas de hidrógeno a lo largo del tiempo.

Por otro lado, deberán crearse nuevos sistemas de mantenimiento que se adapten a esta nueva tecnología y de instalaciones de recambio de piezas y componentes que se asocien a las nuevas infraestructuras.

3.5.1. Cambio en los procesos productivos

Al igual que en otros muchos sectores e industrias, el tiempo significa dinero, y en la delicada situación a la que se enfrenta el sector, ahorrar tiempo se antoja imprescindible. Los modelos actuales de producción, basados en grandes cadenas de producción centralizadas, han llegado a un punto en el que es muy complicado reducir más los tiempos pese a la aplicación de técnicas como la subcontrata de piezas y operaciones y el *just in time*.

Por lo tanto, si se quieren reducir los costes se hace necesaria una reestructuración del proceso de fabricación y de la cadena de proveedores, cambiando a un sistema de producción que permita una fabricación más flexible, que ofrezca al cliente un servicio a la carta y en unos plazos de tiempo mucho más cortos. Actualmente, en Europa, los plazos de entrega para vehículos europeos nuevos se sitúa en 48 días, aumentándose a 63 si se trata de un modelo japonés fabricado en Europa.

En estos nuevos sistemas debe plantearse la posibilidad de cambiar la estructura resistiva monocasco, en la que chasis y carrocería actúan conjuntamente para absorber las cargas,

por una nueva arquitectura, común a todos los vehículos, en la que las cargas son soportadas por una estructura interna, y sobre la que se apoyan los módulos encargados de dar la funcionalidad al vehículo (caravan, tres puertas, cinco puertas, cabrio, etc.).

Una reducción de los plazos de entrega a los clientes como consecuencia de una fabricación más sencilla y rápida, unida a la posibilidad de encontrar proveedores más próximos a las plantas de montaje, debido a que se trata de estructuras comunes, significan beneficios, no sólo para el cliente, y que se traducen en satisfacción por la rapidez del servicio, sino también para los fabricantes, debido al ahorro económico que vendría implícito, y para el medio ambiente, ya que se verían reducidas las emisiones de CO₂ derivadas de la producción y el traslado a largas distancias de piezas y componentes.

3.5.2. Consecuencias derivadas de la electrificación del sector transporte

La entrada en el mercado de una nueva tecnología lleva asociada una serie de consecuencias:

- Desconocimiento e incertidumbre
- Desaparición de tecnologías
- Posibilidad de penetración de las tecnologías emergentes
- Posibilidad de nuevos sistemas de negocio
- Cambio en la normalización y regulación

3.5.2.1. Desconocimiento e incertidumbre

A nivel social, pese que en los últimos años se están realizando campañas para dar a conocer lo que son los vehículos eléctricos (incluidos los de pila de combustible de hidrógeno)

y cuáles son sus ventajas y beneficios, la irrupción de esta nueva tecnología causaría un ambiente de desconfianza e incertidumbre causada por el miedo que el ser humano tiene a lo desconocido. Al igual que en otras ocasiones ha ocurrido con otras tecnologías, esta sensación perdurará durante las primeras etapas de implantación, hasta que la fiabilidad quede demostrada.

Los vehículos híbridos son la mejor baza para acelerar el periodo de adaptación y confianza hacia estas nuevas tecnologías al disponer de sistema de tracción eléctrico y térmico.

3.5.2.2. Desaparición de tecnologías

La incorporación de una nueva tecnología, respecto a las tecnologías existentes puede dar lugar a dos situaciones:

- que tecnología existente y nueva coexistan,
- que la nueva tecnología sustituya a la existente, haciéndola desaparecer.

En el caso de los automóviles eléctricos, habrá una primera etapa en la que convivan con los de tracción convencional; esto ocurrirá hasta que las prestaciones y los precios de ambas tecnologías se equiparen. En su irrupción en el mercado, los vehículos eléctricos sólo tendrán protagonismo para determinadas aplicaciones debido a las prestaciones que son capaces de proporcionar.

En una segunda etapa, las nuevas tecnologías sustituirán a las convencionales, desapareciendo los sistemas de tracción térmicos tal y como los conocemos, apareciendo sistemas térmicos ya sólo en los automóviles híbridos.

3.5.2.3. Posibilidad de penetración de las tecnologías emergentes

La aparición de los automóviles eléctricos brindará la oportunidad a otras tecnologías emergentes del sector energético, eléctrico y electrónico de hacerse un hueco en el mercado

En especial será importante en el sector energético debido a que supone la sustitución de un tipo de energía de origen casi exclusivamente fósil, por energía eléctrica, que permite producirse de forma más diversificada. Obtendrán gran importancia las fuentes de energía renovables, debido al carácter no contaminante que poseen los vehículos eléctricos, con el fin de moderar el cambio climático.

Las energías renovables proporcionar grandes cantidades de energía, pero no de forma predecible ni constante. Por ejemplo, el pasado 14 de enero, la energía eólica marcó un nuevo máximo de potencia instantánea en España, según datos de Red Eléctrica de España, alcanzándose los 11.693 MW, lo que supuso el 42% de la demanda peninsular.

3.5.2.4. Posibilidad de nuevos sistemas de negocio

Para que los automóviles eléctricos logren irrumpir en el mercado se presenta imprescindible la elaboración de un nuevo plan de negocios que integre a la industria del automóvil y al sector eléctrico. Esto implica cambios, no sólo en los servicios institucionales dedicados a la creación, conservación y mantenimiento de las redes eléctricas, sino también en las instituciones existentes e infraestructuras. Uno de los aspectos a tener muy en cuenta es que cuanto mayor es el grado de electrificación del vehículo, mayor es la infraestructura eléctrica necesaria y por lo tanto, mayor la inversión en una red de recarga todavía inexistente. Esto proporcionará nuevas oportunidades al sector energético mediante nuevas iniciativas y colaboraciones con las empresas involucradas clave, como los fabricantes de vehículos y baterías.

De este modo, ya han surgido una serie de iniciativas que persiguen la integración de la movilidad eléctrica:

El modelo *Better Place* es un proyecto que se encuentra en pleno desarrollo en Israel, Dinamarca Australia, California, Hawaii y Canadá. Consiste en generar electricidad a partir de una fuente de energía tan renovable como sea posible (eólica o solar) y, posteriormente, verterla a la red eléctrica nacional para la recarga de coches eléctricos. La red de recarga cuenta con puntos de carga con salidas en forma de enchufe, pero por lo que se caracteriza, es por la existencia de estaciones para la sustitución de baterías. Luego, todo el sistema se coordina desde un centro de control del servicio, que integra y elabora las facturas.

El plan contempla unos 500.000 postes de recarga y unas 150 estaciones de servicio donde se podrán sustituir las baterías agotadas por otras con carga. La operación durará unos minutos y se podrán realizar viajes largos evitando el inconveniente de las varias horas que se necesitan para recargar el coche en un enchufe. (AllianceBersteis, 2006 [71]; Romm & Fox-Penner, 2007[72]; IBM, 2009 [73]; Sperling & Gordon, 2008 [74]; P. H. Andersen, 2009 [75])

Otros planes de formato similar también están en proceso de desarrollo, como el emprendido conjuntamente por el operador eléctrico francés *EDR*, *Toyota* y *Elektromotive Ltd.*, que tienen previsto construir una red de puntos de recarga en Francia y Reino Unido (P. H. Andersen, 2009 [75]).

3.5.2.5. Cambio en la normalización y regulación

Toda incorporación de una nueva tecnología lleva implícito el cambio y modificación de la normalización y regulación existente que permita un uso seguro de la misma, tanto para las personas, como para los animales o el medio ambiente.

En el caso de los vehículos eléctricos deberá adaptarse la normativa existente relativa a los vehículos, en especial a lo que se refiere al sistema de tracción y a la seguridad debida al uso de la electricidad como, por ejemplo, los límites de tensión, intensidad o capacidad que se puedan dar a bordo de vehículo.

También será necesario regular todo lo referente a las nuevas infraestructuras de recarga requeridas, tanto lo que se refiere al sistema de transporte de electricidad como a los puntos de recarga públicos o privados: dónde, cuándo y cómo deberán instalarse.

3.6. Conclusiones

Tras analizar la situación del transporte actual y analizar el estado del arte en lo que se refiere a las tecnologías de tracción alternativas a los sistemas de tracción convencionales (Otto y Diesel), es posible extraer las siguientes conclusiones:

- El sector transporte se encuentra en un periodo de transición a favor de la electrificación de los sistemas de tracción de los vehículos, con el fin de, por un lado, reducir su dependencia de los combustibles fósiles, y por otro, de moderar el cambio climático mediante el aprovechamiento de las energías renovables.
- Los esfuerzos importantes que hay que desplegar a favor de las fuentes de energía renovables resultarán, con todo, limitados ante el aumento de la demanda. Las energías convencionales seguirán ocupando un lugar inevitable durante mucho tiempo. El esfuerzo deberá centrarse en la orientación de la demanda energética hacia el respeto de los compromisos de Kyoto y la garantía del abastecimiento.
- Se trata de un proceso lento y costoso, no porque se requiera una infraestructura nueva, pues la mayoría de las instalaciones y redes de transporte en el caso de la electricidad ya existen, y en el caso del hidrógeno, cabría la posibilidad de poder adaptar la existente red de instalaciones y suministro de combustibles tradicionales, sino porque se trata de dos tecnologías totalmente diferentes que requieren la unión del sector energético y del automóvil. En este sentido, los vehículos híbridos contribuirán a que el periodo de transición sea más corto y menos traumático.
- Las tecnologías de tracción se pueden dividir en tres grupos principales, dependiendo de la naturaleza de la fuente de energía utilizada para proporcionar la potencia, así nos encontraremos con la tracción térmica, en la que el movimiento del automóvil se produce gracias a un motor térmico que transforma la energía térmica del combustible en energía mecánica que se transmite al eje, la tracción eléctrica, en la que el movimiento del automóvil se produce gracias a un motor eléctrico que

transforma energía eléctrica en energía mecánica, y la tracción híbrida, en la que el movimiento del automóvil se consigue por medio de una combinación de sistemas térmicos y eléctricos. Según quién proporcione la potencia al eje nos encontraremos con dos tipos de hibridación diferentes, una de tracción y otra del sistema de alimentación.

- Entre los combustibles utilizados, como alternativa al gasoil y gasolina, el hidrógeno presenta mejoras evidentes en aspectos tan importantes como la densidad de energía por masa (poder calorífico), el impacto ambiental y las emisiones. Sin embargo, otras muchas carencias, debido principalmente al estado actual de la tecnología, hacen que su uso masivo no sea posible todavía.
- El gas natural, pese a ser un combustible no renovable, presenta iguales o mejores propiedades de utilización que el gasóleo o la gasolina. Un suministro global asegurado, junto con un precio final más competitivo y una importante reducción de las emisiones contaminantes, hacen de este combustible una excelente alternativa tanto para su utilización directa en motores de combustión interna, como para su transformación en otros tipos de combustible.
- Por su parte, el uso de biocombustibles disminuye las emisiones contaminantes de los vehículos, pero el precio final, junto con la imposibilidad de ser producidos de forma masiva, convierte su presencia en el *mix* energético futuro en algo meramente circunstancial. Además, su carácter renovable debe ser matizado, ya que la producción agrícola necesaria para cubrir las necesidades energéticas del transporte mundial es totalmente inviable.
- En el diseño de este tipo de vehículos alternativos se utiliza el concepto de eficiencia energética, con el fin de obtener el dimensionamiento más eficiente posible del sistema energético y de tracción. Para ello, una vez se conozca el uso al que está destinado el vehículo, en primer lugar se deberá determinar el ciclo de

funcionamiento que lo caracteriza, para posteriormente determinar la cantidad de energía que demandará y el sistema de suministro de energía más apropiado.

- A la hora de diseñar el sistema energético de un vehículo, se deben tener en cuenta los diferentes sistemas de almacenamiento energético existentes, así como sus principales características: densidad de energía, densidad de potencia, vida útil y si se trata de dispositivos inductivos o capacitivos.
- El consumo energético de los vehículos eléctricos es posible disminuirlo si se selecciona correctamente la arquitectura de la cadena de tracción, se gestiona la energía y si el uso del vehículo coincide con aquel para el que ha sido diseñado.
- El refuerzo de las redes eléctricas implica una fuerte inversión de capital, proporcional al grado de electrificación de los vehículos, pero también ofrece nuevas oportunidades. Las baterías de los vehículos, en un futuro se podrán recargar de la red con un simple cable, y como de media, los vehículos permanecen entre el 90 y el 95% de sus vidas parados, en estos momentos de inactividad podrían, por medio de un cargador bidireccional, ceder electricidad a la red eléctrica, ayudando así a regular las variaciones de generación y consumo de energía que se producen.
- El proceso productivo que se utiliza en la actualidad en las grandes plantas de fabricación de automóviles está quedando obsoleto. Con el fin de reducir los costes se hace necesaria una reestructuración del proceso de fabricación y de la cadena de proveedores, cambiando a un sistema de producción basado en estructuras resistentes comunes, que permita una fabricación más flexible, que ofrezca al cliente un servicio a la carta y en unos plazos de tiempo mucho más cortos.
- Toda incorporación de una nueva tecnología lleva implícito el cambio y modificación de la normalización y regulación existente que permita un uso seguro de la misma, tanto para las personas, como para los animales o el medio ambiente.

Como conclusión, tras el análisis de todas las alternativas existentes a los vehículos diesel y gasolina tradicionales, y debido a las grandes expectativas que se tienen en el hidrógeno



como sustituto, en un futuro a medio-largo plazo, de los combustibles fósiles, la presente tesis se centra en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en su aplicación al sector transporte.

*"Las sociedades que más duran son aquellas que consiguen el mejor equilibrio
entre el balance de la naturaleza y de la sociedad humana, dentro de los límites
que impone inevitablemente la segunda ley"*

Jeremy Rifkin

CAPÍTULO 4.

Tecnologías del hidrógeno y su integración en un sistema de transporte sostenible

4.1. Introducción

El transporte medioambientalmente sostenible y energéticamente eficiente es uno de los objetivos principales de las políticas europeas relativas al transporte y a la energía.

Europa ha identificado las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible como sector estratégico dentro de la I+D+i, y ha potenciado acciones concretas destinadas exclusivamente a los vehículos de hidrógeno y su infraestructura de repostaje asociada.

De este modo se busca preparar la comercialización de vehículos propulsados por hidrógeno con el objetivo de llegar a una producción de 400.000 vehículos de pila de combustible y motor de combustión interna anuales en el año 2020.

El primer objetivo es el de comenzar la producción en masa de vehículos de hidrógeno sobre el año 2015 y permitir su consiguiente despliegue de mercado. Esto incluye la validación de su funcionamiento, incluyendo aspectos relacionados con la seguridad y el coste, bajo condiciones de mercado reales y competitivas.

Para que esto ocurra desde el punto de vista del suministro de hidrógeno, el objetivo consiste en desarrollar e instalar cadenas de distribución para vehículos de hidrógeno. Esto incluye la planificación y desarrollo de los principales componentes de las estaciones de servicio de hidrógeno. Resulta esencial proporcionar suficiente cantidad de hidrógeno combustible y capacidad de almacenamiento, y por ello cumplir con los requisitos de calidad, coste, facilidad de manejo y seguridad para los vehículos.

El desarrollo de flotas cautivas para transporte público (como por ejemplo autobuses) va a jugar un papel importante en la misión de “dar a conocer” la tecnología. Su uso intensivo proporciona máxima experiencia en un tiempo mínimo así como una alta exposición de cara al público en general.

4.2. Ventajas e Inconvenientes del Uso del Hidrógeno en el Sector Transporte

El uso de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en el sector transporte presenta las ventajas e inconvenientes que se enumeran a continuación:

4.2.1. Ventajas

El hidrógeno como vector energético tiene un número importante de ventajas. Una de las principales es que puede producirse a partir de una gran variedad de fuentes de energía primarias, una de las cuales, el agua, está disponible en una gran parte del planeta.

Otra ventaja importante sobre otros combustibles es que el producto mayoritario una vez llevado a cabo su proceso de combustión, o de oxidación – reducción en pilas de combustible, es vapor de agua únicamente, por lo tanto no se genera CO₂.

El hidrógeno posee unas buenas propiedades como combustible para su utilización en motores de combustión interna en automóviles. Éste puede utilizarse como combustible directamente en un motor de combustión interna que no sea muy diferente a los motores utilizados con gasolina.

El hidrógeno tiene unas propiedades muy especiales como combustible para el sector transporte, incluyendo una velocidad de quemado rápida, un octanaje muy efectivo, así como potencial tóxico y de formación de ozono nulo. Además, sus límites de inflamabilidad en aire son mucho más amplios (4 – 75% en volumen) que el metano (5,3 – 15% en volumen) y la gasolina (1 – 7,6% en volumen). Una mezcla estequiométrica hidrógeno – aire tiene una muy baja energía de ignición (0,02 mJ). Un motor de hidrógeno arranca de una manera muy sencilla en lugares con inviernos fríos ya que el hidrógeno se mantiene en estado gaseoso hasta que se alcanzan temperaturas por debajo de los 20K.

El producto de la combustión del hidrógeno es limpio, el cual consiste en agua y una pequeña cantidad de óxidos de nitrógeno (NO_x). Con las medidas adecuadas se cree que esta cantidad de NO_x puede ser reducida, incluso llegando a ser tan baja como 1/200 parte de la cantidad generada por un motor diesel.

4.2.2. Inconvenientes

La principal desventaja del uso del hidrógeno como combustible en el sector transporte, desde el punto de vista técnico, es el enorme tamaño de los depósitos de almacenamiento a bordo de los vehículos, los cuales son necesarios debido a la densidad extremadamente baja que presenta esta sustancia. El hidrógeno puede almacenarse a bordo de un vehículo como gas comprimido, como líquido en contenedores criogénicos o como gas asociado con ciertos metales en forma de hidruros metálicos. El hidrógeno puede alcanzar una densidad razonable adsorbido en estos hidruros metálicos, pero el peso de los metales hace que el sistema sea muy pesado.

En comparación con la gasolina, aunque el hidrógeno almacena aproximadamente 2,6 veces más energía por unidad de masa, su desventaja reside en que al presentar una densidad de energía por unidad de volumen tan baja, necesita un volumen 4 veces superior al de la gasolina para almacenar la misma cantidad de energía. Haciendo números, un tanque de gasolina de aproximadamente 57 litros que almacena 41 kg de gasolina tiene la energía equivalente a la de un tanque de 227 litros que sólo almacena 15,4 kg de hidrógeno (M. Balat, 2008 [86]).

El hidrógeno puede ayudar a reducir las emisiones de carbono si éste es producido a partir de fuentes de energía renovables o a partir de energía nuclear. Sin embargo, la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles causa la generación de dióxido de carbono, el cual se asume como el principal responsable del llamado efecto invernadero.

Desde un punto de vista económico, el hidrógeno y las pilas de combustible también presentan una gran desventaja con respecto a otras tecnologías más maduras en términos de costes. Por ejemplo, el coste de un motor de combustión interna convencional (no de hidrógeno) de 100 CV se sitúa en torno a 3.000 €, mientras que el coste de una pila de combustible que pueda aportar la décima parte de esa potencia (10 CV) tiene actualmente un coste aproximado de 30.000 €, lo cual quiere decir que existe una relación de costes entre ambas tecnologías de 1 a 100, lo cual hace que en estos momentos las tecnologías de hidrógeno y pilas de combustible en el sector automoción no sean competitivas.

Sin embargo, se prevé que conforme la tecnología vaya alcanzando un grado de madurez mayor y los principales fabricantes de vehículos salten del desarrollo de prototipos al inicio de producción en masa, esta diferencia de costes se reducirá de forma significativa. En este sentido, las previsiones de la *Joint Technology Initiative for Hydrogen and Fuel Cells – FCH JTI* para el horizonte temporal 2015 – 2020, momento en el que se estima que comience el despliegue de los vehículos de hidrógeno en el mercado, sitúan que el coste de una pila de combustible de 100 CV será aproximadamente de 7.500 €, por lo que la relación de costes motor de combustión interna convencional – pila de combustible habrá pasado de 1 a 100 a de 1 a 2,5 – 3 aproximadamente, reduciéndose por tanto en unas 30 - 40 veces.

Por otro lado, el coste del repostado de hidrógeno en una estación de servicio, es decir, la suma de costes de producción, distribución, almacenamiento y dispensación de hidrógeno, también es netamente superior al coste actual de la gasolina o el diesel, que son los combustibles convencionales en el sector de la automoción. Además, si el hidrógeno se produce a partir del proceso de electrolisis el coste es todavía mayor, ya que solamente el coste de la energía eléctrica necesaria tomada de la red (si el hidrógeno se produjera a partir de fuentes renovables también habría que tener en cuenta la inversión y amortización del parque eólico o la huerta fotovoltaica correspondiente) sería superior al coste actual de la gasolina o el diesel. De la misma manera que en el caso de los vehículos y las pilas de combustible, también se prevé que conforme las tecnologías de producción, almacenamiento y dispensación de hidrógeno vayan madurando y el despliegue de estaciones de servicio de hidrógeno en las ciudades y carreteras comience a ser un hecho, el precio que pagará el

futuro usuario final por el hidrógeno alimentado a su vehículo será cada vez más competitivo en comparación de si el combustible que utilizara fuera gasolina, gasoil, diesel o gas natural.

4.3. Los Sistemas de Hidrógeno

Debido a las particularidades que presenta, la aplicación del hidrógeno al transporte supone, bien la incorporación de nuevas tecnologías, bien la adaptación de tecnologías existentes a los procesos de producción, almacenamiento, distribución, transporte y dispensado del hidrógeno a los usuarios finales.

Estas tecnologías se ven condicionadas a su vez por la evolución que están experimentando los vehículos que utilizan de algún modo el hidrógeno en su cadena de propulsión. Los vehículos son en última instancia los que determinan en qué condiciones y cantidades deberá ser servido el hidrógeno.

Por todo ello, previo paso a determinar los nuevos conceptos de abastecimiento de hidrógeno a flotas, se hace imprescindible realizar un repaso y descripción de las tecnologías y procesos que intervienen en el sistema del hidrógeno.

4.3.1. Tecnologías de Producción y Almacenamiento

Como ya se ha comentado anteriormente en esta tesis, el hidrógeno es un vector energético, no una fuente de energía primaria. Por lo tanto habrá que producirlo extrayéndolo, por ejemplo del agua o de los hidrocarburos mediante diferentes sistemas, siendo los más importantes el reformado de gas natural o la electrólisis del agua mediante electrolizador, sistema utilizado para obtener hidrógeno de forma limpia mediante el aprovechamiento de las energías renovables.

El hidrógeno debe ser transportado desde el lugar donde se genera al punto de utilización, debiendo ser manipulado y puesto a disposición de los consumidores en las estaciones de repostaje de hidrógeno ó hidrogeneras para su utilización como combustible de transporte.

El hidrogeno puede ser transportado en estado gaseoso (a presión) o líquido (criogénico), pudiendo distribuirse a través de tuberías o mediante camiones, barcos o trenes, de una forma muy similar a como se transporta los combustibles fósiles.

4.3.1.1. Producción de hidrógeno

El hidrógeno se caracteriza por ser es el elemento químico más simple, de número atómico 1 (formado solamente por un protón y un electrón), y más abundante del universo, formando parte de las estrellas y de los planetas gaseosos en su mayor proporción. En las estrellas se encuentra principalmente en estado plasma (estado de agregación de la materia con características propias). El hidrógeno también aparece unido a otros elementos formando gran variedad de compuestos moleculares, como el agua (H₂O) y la mayoría de las sustancias orgánicas. Puede reaccionar con oxígeno (O₂) desprendiendo energía y formando agua.

El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, como el carbón, el gas natural o el petróleo, sino un vector energético. Es decir, que hay que producirlo extrayéndolo, por ejemplo, del agua, de los hidrocarburos o de la biomasa a partir de distintas fuentes de energía. Por tanto, el hidrógeno, al no encontrarse disponible como tal en la naturaleza, ha de producirse industrialmente, producción que se ha considerado como tecnología común en el último siglo.

Algunas de las características del hidrógeno son las siguientes:

- En estado gaseoso (GH₂) es más liviano que el aire y se difunde rápidamente ascendiendo hacia las capas altas de la atmósfera (el aire es 14,4 veces más pesado). Es el gas más ligero, con una densidad normal de 0,08987 g/litro.
- Posee un alto coeficiente de difusión = 0,61cm²/s (casi cuatro veces mayor que el metano, componente mayoritario del gas natural) y se diluye rápidamente en el aire.

- El hidrógeno es combustible en aire u oxígeno con llama casi invisible a la luz del día, de color azul pálido, con muy poco calor irradiado de la llama, formando agua.

Tabla 15. Propiedades del hidrógeno

Fuente: **Asociación Argentina del Hidrógeno**

Propiedad	Valor y unidades
Número atómico	1
Peso atómico	1,008
Peso molecular	2,016 g/mol
Presión crítica	12,8 atm
Temperatura crítica	-239,91°C
Coefficiente de difusión en el aire	0,61 cm ² /s
Calor específico a presión constante	3,4 cal/g (a 0°C)
Temperatura de autoignición	580°C
Punto de ebullición normal	-252,766°C = 20,39 K (a 0,1013 MPa)
Punto de fusión	-259,2°C = 13,95 K (a 0,1013 MPa)
Límite de inflamabilidad en el aire	4 – 75 % en volumen
Límites de detonación en el aire	18,3 – 59 % en volumen
Calor de disociación	104,2 kcal/mol (a 25°C)
Isótopos	Protio (¹ H), Deuterio (² H), Tritio (³ H)
Densidad GH	0,0853 kg/m ³ (15°C, 1 atm)
Densidad LH2	70,973 kg/m ³
Densidad relativa del GH (aire = 1)	0,0695

- Cuando se agita una mezcla de hidrógeno con aire u oxígeno, explota violentamente al encenderse.
- El hidrógeno tiene su límite de detonación en el aire significativamente próximo al límite de explosión; cuando se inflama tempranamente arde antes de alcanzar los límites de detonación.
- El hidrógeno puro es un gas incoloro, inodoro e insípido, que no es venenoso a menos que contenga impurezas.

- Si se respira mezclado con aire durante un corto período, debilita la voz y eleva el tono.
- Debido a que el hidrógeno posee la densidad energética más alta en comparación con todos los combustibles, 1 kg de hidrógeno contiene tanta energía como 2,1 kg de gas natural (GN) o tanta como 2,8 kg de petróleo. Esta cualidad es la que explica que se haya seleccionado su uso para impulsar los cohetes de los programas espaciales.
- El hidrógeno aporta el 11,2% del peso del agua.
- El hidrógeno es el mejor conductor del calor de todos los gases, aproximadamente cinco veces más que el aire y su calor específico a presión constante, $C_p = 3,4 \text{ cal/g a } 0^\circ\text{C}$ es también anormalmente elevado.
- A altas temperaturas se produce su disociación en átomos, $\text{H}_2 - 2\text{H}$, absorbiendo la reacción una gran cantidad de calor, alrededor de 100 Kcal por mol.
- Por su baja temperatura crítica ($- 239,9^\circ\text{C}$) es difícil de licuar.
- El hidrógeno líquido (LH_2) es incoloro y transparente, con una densidad muy pequeña en el punto de fusión.

Tabla 16. Comparación poder calorífico de distintos combustibles

Fuente: *Asociación Argentina del Hidrógeno*

Comparación del poder calorífico inferior de distintos combustibles		
	Volumen	Peso
Hidrógeno	3 kWh/Nm ³	33,33 kWh/kg
Petróleo crudo	1 toe/t	11,6 kWh/kg
Diésel	10 kWh/Nm ³	11,9 kWh/kg
Nafta	8,8 kWh/Nm ³	12 kWh/kg
Metanol	4,44 kWh/Nm ³	5,47 kWh/kg
Metano	9,97 kWh/Nm ³	13,9 kWh/kg
Gas Natural (82 – 93 % CH₄)	8,8 – 10,4 kWh/Nm ³	10,6 – 13,1 kWh/kg
Propano	25,89 kWh/Nm ³	12,88 kWh/kg
Butano	34,39 kWh/Nm ³	12,7 kWh/kg

Hay dos razones principales por las que es deseable sustituir los combustibles fósiles por el hidrógeno:

- La combustión del hidrógeno no contamina, sólo produce como subproducto agua, mientras que los combustibles fósiles liberan CO₂ que queda en la atmósfera y es uno de los mayores responsables de lo que se denomina "efecto invernadero".
- Las reservas de combustibles fósiles se agotarán tarde o temprano, mientras que el hidrógeno permanecerá inagotable.

En el ANEXO 3. *Sistemas de Producción de Hidrógeno* se realiza una breve descripción de las diferentes opciones existentes para la producción de hidrógeno.

No todos los métodos de producción de hidrógeno de los aquí indicados están a un mismo nivel de madurez y desarrollo tecnológico. El reformado de vapor o *steam reforming* de hidrocarburos, la gasificación del carbón y la electrolisis del agua son los métodos más extendidos.

En la actualidad, aproximadamente el 96% de la producción mundial de hidrógeno se obtiene a partir de materias primas fósiles: como se observa en la siguiente figura, el 48% de la producción de hidrógeno se produce a partir del gas natural, el 30% del petróleo, y el 18% del carbón; la electrolisis del agua representa solamente el 4%.

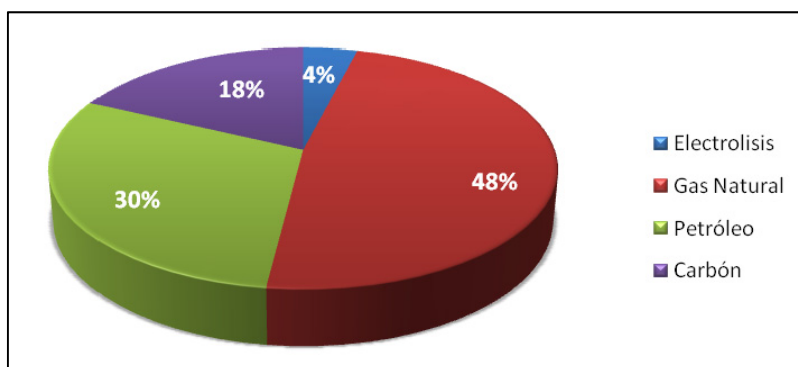


Figura 17. Producción de hidrogeno por fuente de energía primaria (2004)

Fuente: UNICAMP

Las siguientes figuras, Figura 18 y Figura 19, recogen de forma esquematizada el proceso de producción de hidrógeno a partir de alguno de los métodos que se acaban de enumerar. Se observa como la producción de hidrógeno permite almacenar energía proveniente de fuentes primarias de diversa naturaleza.

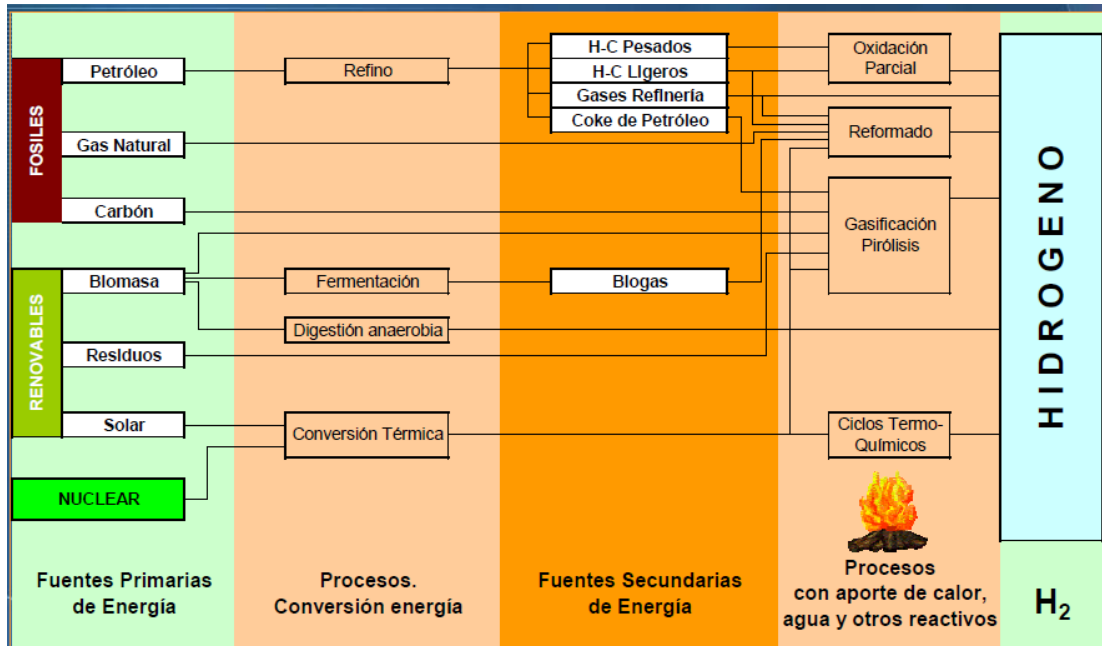


Figura 18. Producción del hidrógeno con aporte de energía térmica

Fuente: AeH2

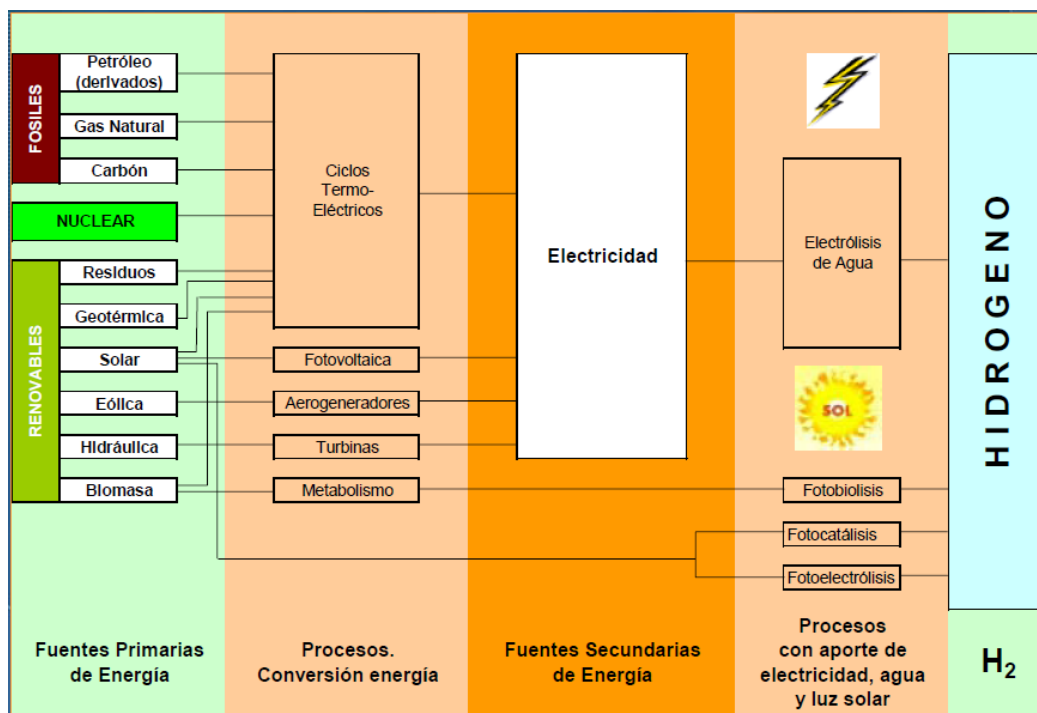


Figura 19. Producción de hidrogeno con aporte de energía eléctrica y fotónica

Fuente: AeH2

De cara a un futuro basado en un desarrollo sostenible, el vector energético hidrógeno, producido a partir de energías renovables, está adquiriendo cada vez más protagonismo. Y dentro de este campo, el hidrógeno producido con energía solar o eólica se presenta como una manera adecuada de almacenar, en forma de energía química, la energía procedente de sol y viento respectivamente. Con ello se consigue subsanar uno de los principales obstáculos para el aprovechamiento de las energías renovables, y es que una propiedad intrínseca a ellas es que se dispone de ellas únicamente en el momento en el que existe el recurso. Y que, aunque existen otros métodos de almacenamiento de dicha energía, todos ellos presentan muy bajo rendimiento.

Por último, en la Figura 20, se muestran unos gráficos con las previsiones de producción de hidrógeno destinado al sector transporte según fuente de energía primaria en tres horizontes temporales diferentes: 2030, 2040 y 2050. Del análisis de éstos destaca un crecimiento exponencial en la cantidad de hidrógeno a producir, al pasar de 75,21 PJ en el 2030 a 3109,38 PJ en el 2050, y un apreciable desplazamiento de la fuente de energía primaria a

emplear; mientras que en el horizonte temporal más cercano la fuente de energía primaria más utilizada será el gas natural, conforme nos vayamos alejando en el tiempo, las fuentes de energía renovables y el carbón irán tomando protagonismo.

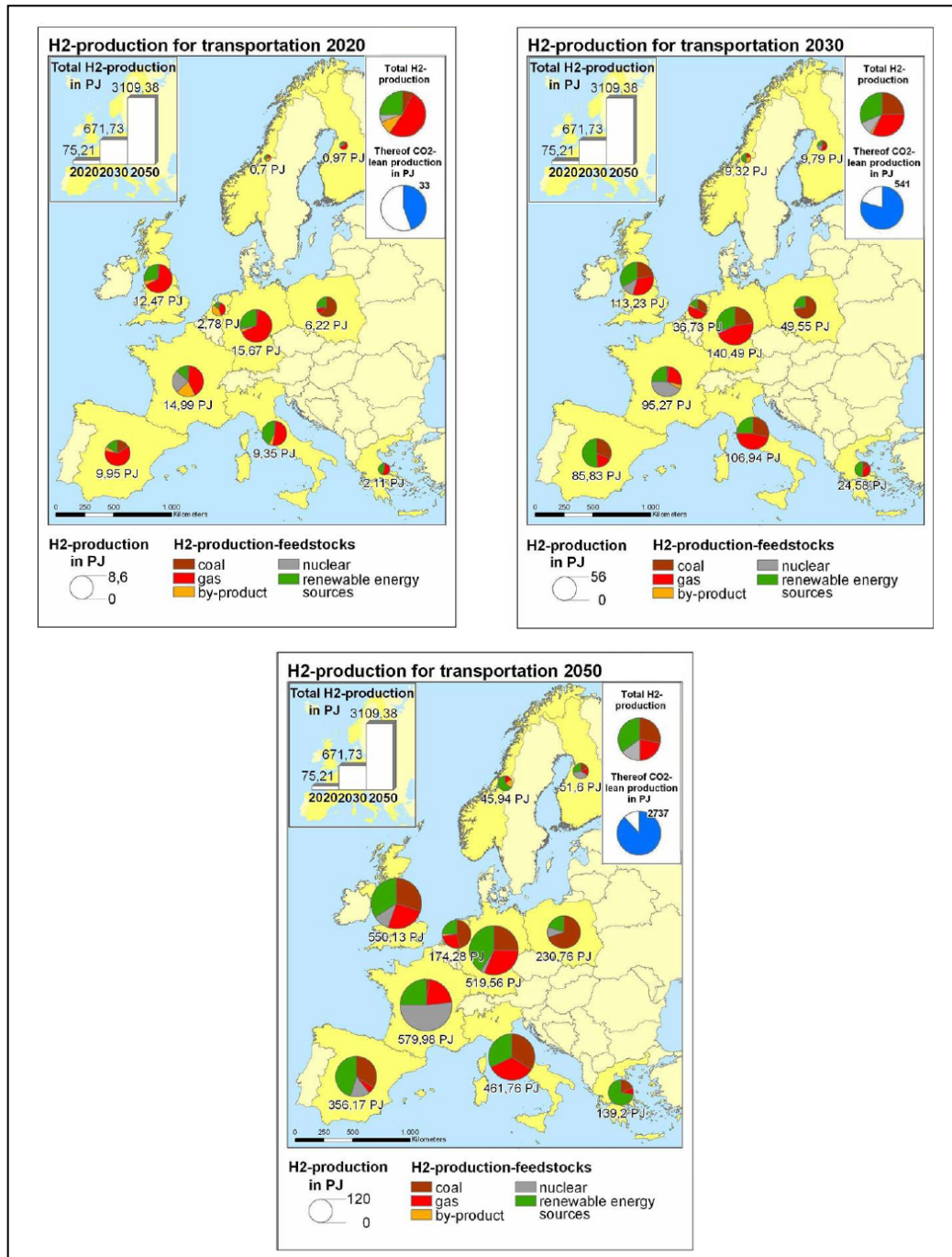


Figura 20. Evolución de la producción de hidrógeno por fuente de energía primaria
Fuente: Proyecto Hyways [89]

4.3.1.2. Estrategias de producción de hidrógeno

En función de las circunstancias específicas, el hidrógeno puede producirse localmente o distribuirse a partir de una planta central de producción a gran escala. En la actualidad se están estudiando los costes y los beneficios de esas diversas posibilidades de “conducción”.

a. Producción centralizada de hidrógeno

La producción industrial a gran escala de hidrógeno a partir de recursos de energía fósil es una tecnología comercial para propósitos industriales, pero aún sin utilidades. El potencial de la producción a gran escala es que tiene un relativo bajo coste por unidad.

El inconveniente es que las opciones de captura y almacenamiento de CO₂ no están ni técnica y ni comercialmente desarrollados. Es importante reducir el coste, incrementar la eficiencia de la planta y flexibilidad de las operaciones.

Se necesita investigación y desarrollo para lograr la purificación del hidrógeno y la separación de los gases. Esto implica el desarrollo de la catálisis, del proceso de adsorción de materiales y de membranas de separación de gases para la purificación de hidrógeno. El hidrógeno y la energía pueden ser producidos en plantas con ciclos combinados de gasificación. Estas plantas son la solución más avanzada y eficaz, donde se elimina el carbón del combustible y el hidrógeno se produce en un proceso de pre-combustión.

Para que la producción centralizada de hidrógeno llegue a ser comercialmente viable requiere un desarrollo de la infraestructura de distribución del hidrógeno. Determinados programas como el “*The Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program*” persiguen proyectos para identificar costes efectivos, energía eficiente e infraestructuras seguras para el suministro de hidrógeno ó portadores de hidrógeno desde instalaciones centralizadas de producción localizada a los puntos de uso.

El hidrógeno puede ser producido a través de diferentes caminos, utilizando un amplio rango de tecnologías, algunas de las cuales implican procesos industriales bien establecidos,

mientras otras tecnologías están en estado de desarrollo. Actualmente, la producción de hidrógeno es mayoritariamente a gran escala, pero además de equipos industriales a gran escala, serán necesarias tecnologías de producción a pequeña escala eficientes, incluyendo electrolizadores y reformadores estacionarios y *on board*, que extraigan el hidrógeno de combustibles líquidos y gaseosos como el gas natural, la gasolina y o el metanol.

El agua potable es un requerimiento vital en todas las formas de producción del hidrógeno, tanto cuando es una fuente directa de fabricación de hidrógeno (como por ejemplo en el caso de la producción de hidrógeno a partir de carbón ó de energía eólica), como cuando es un reactivo esencial (por ejemplo en la producción a partir de gas natural). Por ello es necesario, o bien instalar grandes tuberías para el transporte de agua a la fuente de energía en áreas sin acceso a este recurso, o bien el transporte de la energía generada a áreas donde sí está disponible.

b. Producción distribuida de hidrógeno

La producción distribuida de hidrógeno se basa en la electrolisis del agua y en el reformado del gas natural. El beneficio puede ser que se reduce la necesidad de transportar hidrógeno combustible y de la construcción de nuevas infraestructuras. La producción distribuida puede utilizar las infraestructuras existentes como la de gas natural o agua y energía eléctrica. El coste de producción es mayor para una pequeña capacidad y la eficacia es probablemente menor que para las plantas centralizadas.

Compañías como *BP*, *Shell* y *Exon/Mobil* están involucradas en acuerdos comerciales para el desarrollo de procesadores de combustible y demostraciones de la infraestructura de hidrógeno, tales como estaciones de reaprovisionamiento de combustible basadas en reformado de metano. Las compañías petrolíferas se están posicionando para llegar a ser suministradores de combustible de transporte de hidrógeno en el futuro.

La compacticidad (es decir área y altura) es un requisito de mercado importante. Los surtidores han reducido perceptiblemente el área y la altura. El sistema óptimo para el futuro

sería un sistema subterráneo que requiere un espacio de 10x3x3 metros para una capacidad de 500 - 700 Nm³/h. La meta está dentro de alcance con un cierto esfuerzo adicional de investigación y desarrollo. Sin embargo, el espacio requerido por la producción del hidrógeno es una desventaja para la tecnología en comparación con el convencional sistema para gasolina/diesel o el hidrógeno.

Los reformadores a pequeña escala son una clave tecnológica para los estados iniciales de una economía del hidrógeno. En los últimos años, la tendencia ha sido la de desarrollar reformadores más económicos, compactos y simples. Desde los sistemas convencionales de largos tubos hacia intercambiadores de calor más compactos del tipo de reformadores de vapor (disponibles como componentes de las pilas de combustible y para producción aislada de hidrógeno), como los reformadores tipo plato o reactores de membrana.

Para implantar una economía del hidrógeno basada en una producción distribuida del mismo primero hay que superar una serie de barreras tanto económicas como técnicas:

- Reducir los costes de las tecnologías de reformado de hidrógeno a pequeña escala para lograr precios para el hidrógeno comparables a los de los combustibles convencionales. Un elevado número de operaciones unitarias y una insuficiente integración del calor aumentan los costes de producción y el subsistema de purificación.
- Reducir los costes de de operación y mantenimiento. Optimizar los sistemas para reducir los costes de mano de obra y las necesidades de repuestos.
- La producción distribuida de hidrógeno depende de la disponibilidad local de recursos, los cuales pueden suponer limitaciones en determinadas zonas. En el caso del reformador de vapor, se requiere de tecnologías y estrategias para la depuración de agua para evitar impurezas. Son necesarios reformadores flexibles a las materias primas, para mitigar y/o aprovechar las ventajas en las fluctuaciones de los precios y localizaciones específicas de materias primas
- Reformadores distribuidos emiten gases con efecto invernadero. El secuestro de forma rentable de ese pequeño volumen de emisiones de carbono es

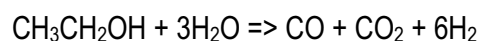
significativamente mayor desafío que en instalaciones de producción de hidrógeno centrales que emplean combustibles fósiles.

A continuación se analizan las principales posibilidades de producción de hidrógeno directamente a bordo de los vehículos:

- Producción de hidrógeno a bordo del vehículo, a partir de metanol como combustible, para su consumo in situ parece ser la alternativa más idónea. El hidrógeno puede obtenerse por tres vías catalíticas diferentes:
 - oxidación parcial con oxígeno o aire: $\text{CH}_3\text{OH} + 1/2 \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2$
 - reformado con vapor de agua: $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$
 - descomposición: $\text{CH}_3\text{OH} \Rightarrow \text{CO} + 2 \text{H}_2$

De estas tres alternativas, la oxidación parcial, ofrece algunas ventajas claras con respecto al reformado con vapor en cuanto que utiliza aire en vez de vapor y es una reacción exotérmica por lo que no requiere un aporte de energía externa durante la operación. Estas ventajas se contrarrestan con la producción de una cantidad de hidrógeno menor.

- Producción de hidrógeno a bordo del vehículo, a partir de etanol como combustible, donde se produce la siguiente reacción:



En este caso se produce monóxido de carbono, el cual es muy nocivo para la membrana de intercambio de protones de las pilas de combustible.

c. Producción distribuida frente a distribución centralizada

Hasta que se concentre la demanda de hidrógeno, la producción distribuida de hidrógeno vía reformado a pequeña escala resultará menos costosa que la producción centralizada, sobre todo debido los gastos que supone el transporte del hidrógeno hasta el centro de consumo.

La producción distribuida de hidrógeno debería ser atractiva en los estados iniciales de desarrollo de la economía de hidrógeno. El hidrógeno debería ser proporcionado bajo demanda, aumentando el volumen de suministro conforme crecieran las flotas de vehículos de hidrógeno.

Una vez que haya aumentado la demanda de hidrógeno (10 - 20% del campo automovilístico), la producción centralizada de hidrógeno llegará a tener un coste competitivo respecto a la producción distribuida. Se prevén grandes centro de producción de hidrógeno con sistemas de distribución local a través de gaseoductos similar a la del gas natural. En estos casos, el hidrógeno procedente de fuentes fósiles descarbonizadas u otras fuentes de hidrógeno bajas en carbono podrían ser introducidas progresivamente (hidrógeno producido de fuentes renovables).

En contraste con la producción distribuida de hidrógeno a pequeña escala a partir de combustibles fósiles, en la que los costes de captura, recogida y secuestro del CO₂ para pequeños reformadores dispersos son excesivos, si el hidrógeno es producido en grandes centros de producción centralizada, los costes de captura del CO₂, y la venta se reducen considerablemente.

El coste de la producción de hidrógeno a partir de biomasa o residuos resulta más viable si se hace a gran escala.

4.3.1.3. Distribución y transporte de hidrógeno

El hidrógeno debe ser transportado desde el lugar donde se genera al punto de utilización. Los requerimientos del sistema de suministro varían según el método de producción y la aplicación de uso final, debiendo ser manipulado y puesto a disposición de los consumidores en las hidrogeneras para su utilización como combustible de transporte.

En Europa existe ya un sistema restringido de transmisión de hidrógeno asociado al sector petroquímico, pero van a ser necesarias cuantiosas inversiones hasta lograr esa infraestructura generalizada de distribución de hidrógeno inexistente en la actualidad. No obstante, vale la pena resaltar que las tecnologías para producir, almacenar y distribuir hidrógeno a vehículos están ya disponibles comercialmente.

El hidrogeno puede ser transportado en estado gaseoso (a altas presiones), líquido (criogénico) o sólido (hidruro metálico), pudiendo ser posible su distribución a través de tuberías o mediante camiones, barcos o trenes.



Figura 21. Algunos modos de transporte del hidrógeno

Fuente: *Linde AG*

La viabilidad económica de los diferentes sistemas de distribución y transporte dependerá de la cantidad de hidrógeno que se quiera suministrar y la distancia. Hoy en día, debido principalmente a motivos económicos, los medios de transporte y distribución más extendidos son:

a. Vehículos industriales con hidrógeno almacenado en tanques de gas comprimido

Si el hidrógeno se transporta en estado gaseoso, debe hacerse a alta presión para optimizar la capacidad de los depósitos. Se trata de un sistema bastante ineficiente y costoso, pero resulta adecuado cuando los flujos son pequeños o se trata de un consumidor final de tipo móvil.

El transporte mediante vehículo industrial se realiza con cabinas tractoras que remontan un semirremolque que transporta botellas de acero o materiales compuestos a una presión que oscila entre los 200 bar y los 700 bar. En la actualidad existen programas de investigación para llegar hasta los 1.000 bar de presión.

El transporte por carretera podría ser viable en algunas circunstancias, por ejemplo en localizaciones remotas donde la limitada demanda dicte inversiones mínimas de capital ó donde los terrenos sean inaccesibles descartando otros métodos de suministro.



Figura 22. Camión con plataforma para la distribución de hidrógeno

Fuente: *Air Products*

b. Vehículos con hidrógeno almacenado como líquido criogénico

En estado líquido se reduce el volumen entre 15 y 30 veces. El transporte de hidrógeno líquido se realiza eficazmente en depósitos *Dewar* multicapa aislados, para prevenir los problemas de vaporización. Este sistema se utiliza actualmente para suministrar cantidades moderadas de hidrógeno a media y larga distancia. Las capacidades de transporte son:

- Camiones cisterna: de 3.500 a 70.000 l
- Trenes: de 10.000 a 100.000 l
- Buques: hasta 1.000.000

Los tanques que se emplean a bordo de los vehículos contienen una mezcla bifásica de hidrógeno que se mantiene a una presión de entre 3 y 10 bar aproximadamente. Si la presión es demasiado baja, parte del hidrógeno se vaporiza por medio de una resistencia eléctrica o permitiendo el intercambio de calor con el exterior, y si la presión es demasiado alta, se expulsa parte del hidrógeno gaseoso. Este sistema supone temperaturas criogénicas, -253°C , y un gran coste energético en el proceso de licuefacción; la energía requerida para la licuar un volumen dado de hidrógeno es equivalente del 25-30% del total de la energía almacenada en ese volumen de hidrógeno. Para el enfriamiento de 0,45 kg de hidrógeno se necesitan unos 5 kWh de energía eléctrica.

Esta penalización en la eficiencia probablemente redundará en que el suministro de hidrógeno líquido no será competitivo en la mayoría de las circunstancias.



Figura 23. Vehículo industrial que transporta hidrógeno en estado líquido

Fuente: *Air Liquide*

c. Gaseoductos que transportan gas hidrógeno comprimido

El hidrógeno, como cualquier otro producto gaseoso, puede ser transportado a cortas y largas distancias a través de gaseoductos. No obstante, el transporte de hidrogeno por gasoducto requiere 4,6 veces más energía que el transporte del gas natural (por unidad de energía transportada).

Los gaseoductos de hidrógeno operan generalmente a presiones que oscilan entre las 10 y las 30 atmósferas con caudales de entre 300 y 9.000 kg/h.

El uso comercial de gaseoductos queda justificado económicamente cuando se transportan grandes flujos de hidrógeno. Sin embargo, el alto coste inicial de construcción de nuevas tuberías impide la expansión de este modo de transporte. Existen pocos ejemplos de gaseoductos de hidrógeno que se encuentren operativos.

Estados Unidos disponen de alrededor de 1.000 kilómetros operativos de tuberías para el hidrogeno, alrededor de 400 kilómetros de tubería unen el norte de Francia con Bélgica, y en la cuenca del Ruhr, Alemania, existe desde el año 1938 una red de distribución de hidrogeno

gaseoso de más de 200 kilómetros. También en Alemania hay en marcha un proyecto que pretende la construcción de un sistema de gaseoductos para distribuir hidrogeno a través de la red de gas natural y otro para construir una red de hidrógeno que abastezca a las principales autopistas del país.

Las investigaciones que actualmente se están llevando a cabo con el objetivo de desarrollar este sistema de distribución se centran en:

- Reducir los costes de fabricación de las tuberías
- Aumentar la fiabilidad y durabilidad de las tuberías
- Eliminar los fallos por fuga que se producen en las soldaduras de las tuberías por motivos de fragilidad.

Otra opción para agilizar en el tiempo la implantación generalizada de este sistema de distribución, sería adaptar las tuberías existentes que transportan gas natural para que hagan lo mismo con el hidrogeno.

Analizando los costes que supone la adopción de cualquiera de los medios de transporte vistos hasta ahora, en función de la cantidad de hidrógeno demandada y la distancia a transportarla, ha quedado probado en numerosos estudios que la solución a adoptar dependerá de las particularidades de cada situación. Por ejemplo, tal y como que plasmado en la Figura 24:

- El uso de gaseoductos de hidrógeno quedará justificado cuando existen grandes flujos de hidrógeno a transportar.
- El transporte de hidrógeno en estado líquido será apropiado para demandas medias.
- El transporte de hidrógeno en estado gaseoso a alta presión será apropiado cuando las demandas sean bajas.

Nótese en la gráfica que existen valores de consumo en las que las opciones hidrógeno líquido e hidrógeno comprimido se solapan. En estas ocasiones, la decisión entre final habrá que tomarla en función de la distancia. Por norma general, a mayor distancia toma ventaja el transporte en tanque criogénico:

- La distribución de hidrógeno por carretera, en forma de gas comprimido, se mueve en un radio que va de los 150 a los 300 km, desde la instalación de producción o de distribución. Para mayores distancias de distribución, por encima de los 1.500 km, el hidrógeno usualmente es transportado como un líquido criogénico mediante camiones cisterna, ferrocarriles y barcos, siendo entonces vaporizado en el lugar de utilización.

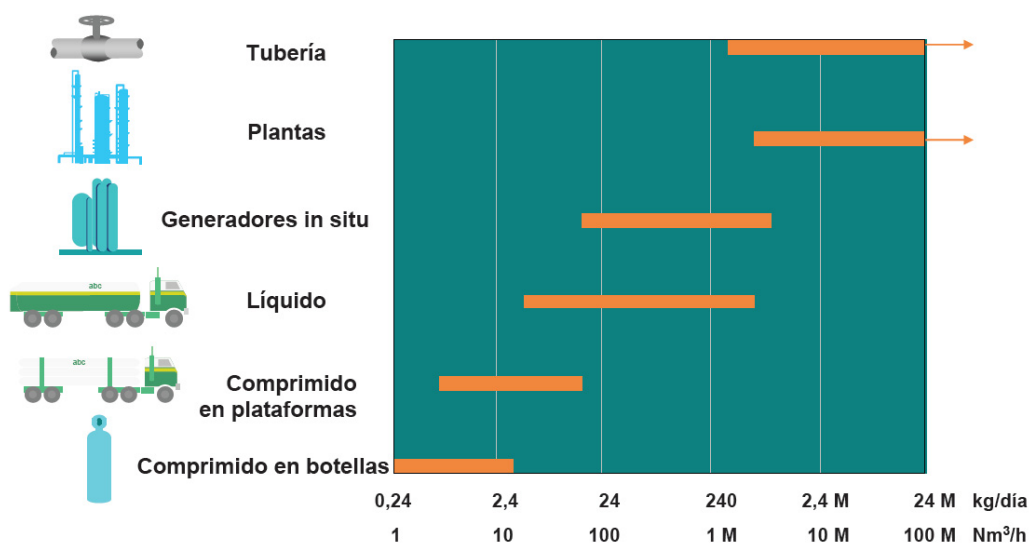


Figura 24. Métodos de distribución del hidrógeno en función del consumo

Fuente: *Air Products and Chemicals, Inc.*

Vale la pena apuntar que habrá ocasiones en las que, para distancia muy cortas de transporte, una tubería puede ser la opción más barata. Esto ocurre cuando los costes de instalación de la tubería son inferiores o similares a los de los camiones. En el transporte por tubería no hay costes ni de combustible ni de licuefacción.

El sistema que se utilizará para transportar el hidrógeno irá variando según avance el tiempo y las cantidades de hidrógeno a transportar aumenten. Así, en las previsiones a nivel europeo para los modos de transporte de hidrógeno que se presentaron en el *Proyecto Hyways* [89], y que se muestran en la siguiente gráfica, se puede apreciar cómo, en cualquiera de los escenarios presentados, pese a requerir una alta inversión en infraestructuras, el transporte mediante tubería irá ganado protagonismo con el tiempo al mismo tiempo que vaya aumentando la demanda total de hidrógeno, en detrimento, especialmente, del transporte de hidrógeno en estado gaseoso comprimido.

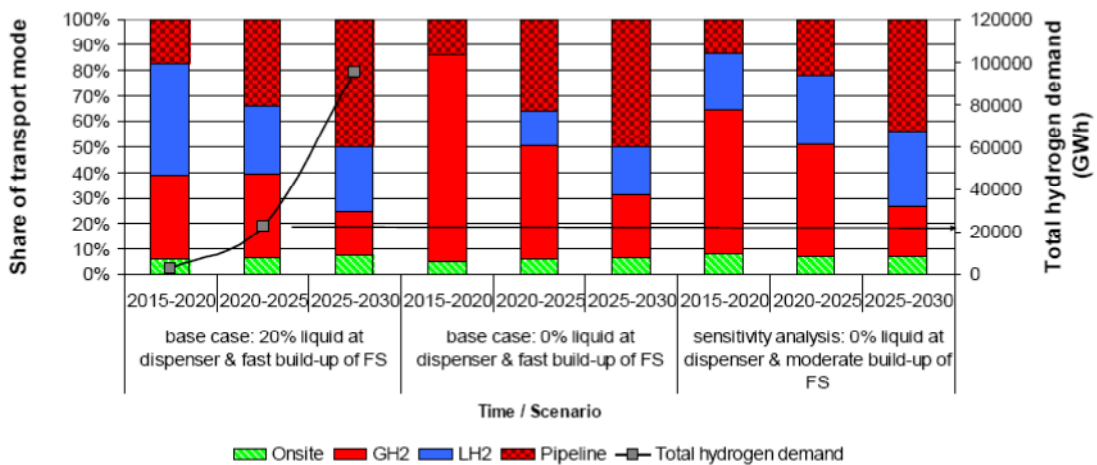


Figura 25. Previsiones del modo de distribución del hidrógeno en Europa

Fuente: **Proyecto Hyways** [89]

A continuación se indican las opciones de suministro para los periodos iniciales de penetración de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en el sector transporte:

- Hidrógeno producido a partir de gas natural en grandes plantas de reformado centralizadas, y suministrado por camión como un líquido a estaciones de servicio.
- Hidrógeno producido a partir de gas natural en grandes plantas de reformado centralizadas, y entregado vía gaseoductos de hidrógeno a pequeña escala a estaciones de servicio.

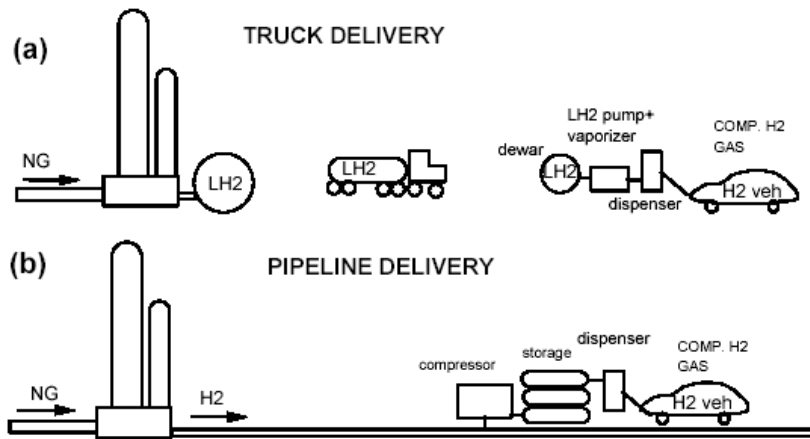


Figura 26. Suministro de hidrógeno en periodos iniciales desde centros de producción centralizados

Fuente: *Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study*, J. M. Ogden [47]

- Hidrógeno procedente de la industria química y entregado vía gaseoductos de hidrógeno a pequeña escala a estaciones de servicio.
- Hidrógeno producido en estaciones de servicio vía reformado de gas natural a pequeña escala, o por reformado de líquidos disponibles fácilmente portadores de hidrógeno como el metanol o el amoníaco.
- Hidrógeno producido vía electrolisis a pequeña escala en estaciones de servicio.

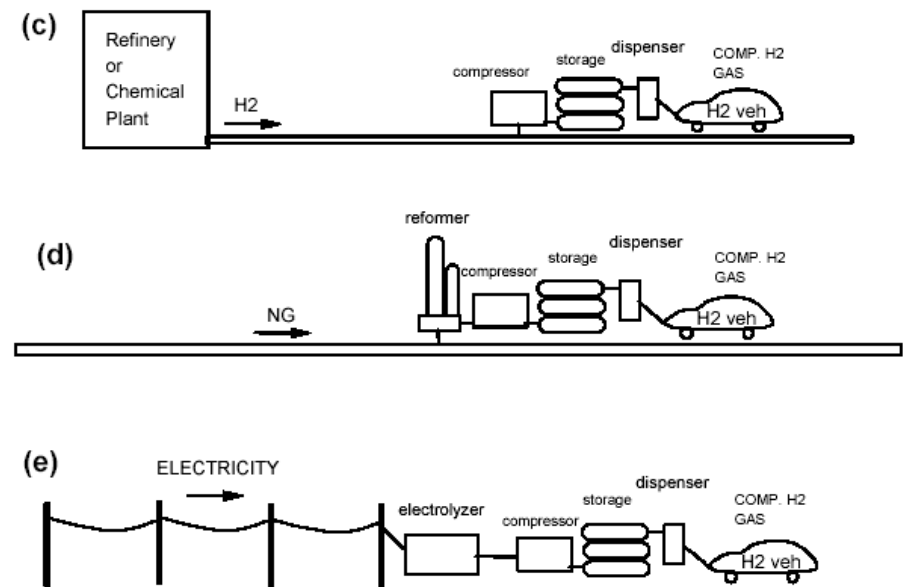


Figura 27. Suministro de hidrógeno en periodos iniciales a partir de centros a pequeña escala

Fuente: **Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study, J. M. Ogden [47]**

A más largo plazo, los sistemas de producción del hidrógeno cambiarán, utilizándose tecnologías más avanzadas y eficientes:

- Gasificación de carbón, biomasa o residuos
- Electrolisis a través de energía eólica, biomasa o residuos
- Producción termoquímica a partir de combustibles fósiles con captura y secuestro de CO₂

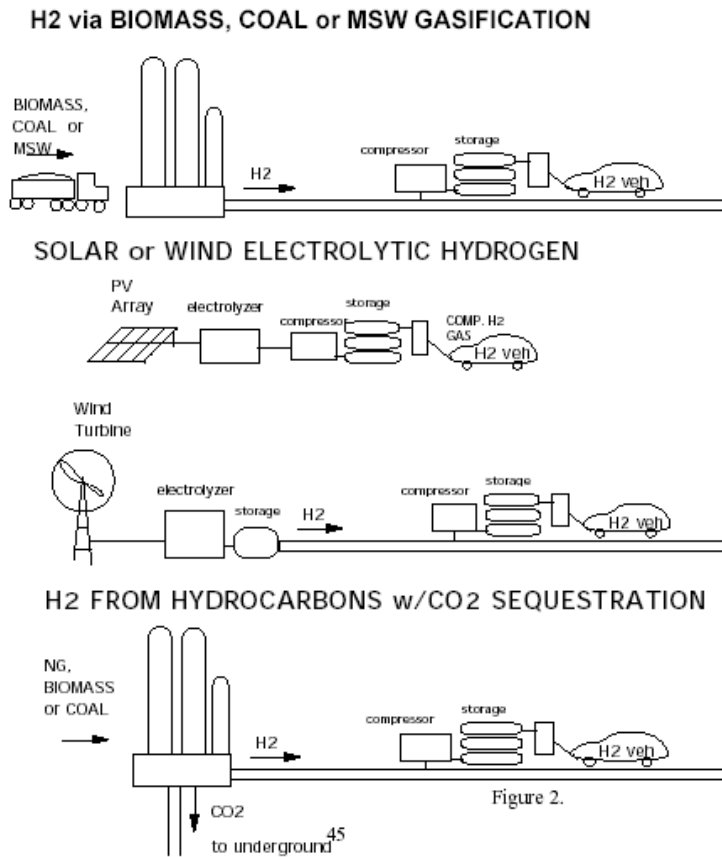


Figura 28. Opciones de suministro de hidrógeno a largo plazo

Fuente: *Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study*, J. M. Ogden [47]

En resumen, el transporte de hidrógeno en camiones, ya sea en estado gaseoso o líquido, será el sistema de transporte más utilizado hasta que los flujos de hidrógeno se hagan lo suficientemente grandes para que el suministro por gaseoducto empiece a ser competitivo.

4.3.1.4. Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno puede almacenarse en estado gaseoso (a altas presiones: 200-700 bar), en estado líquido (a bajas temperaturas: -253°C), en estado sólido (en forma de hidruros metálicos) o por medio de unas novedosas estructuras microscópicas de carbono

(nanotubos). En función de la aplicación final, principalmente si es estacionaria o móvil, un sistema de almacenamiento será más conveniente que otro.



Figura 29. Diferentes sistemas de almacenamiento de hidrógeno: nanotubos de carbono, hidruros metálicos y tanques a presión

Fuente: *Linde AG*

Existen numerosos métodos de almacenamiento que han surgido como resultado de las investigaciones y desarrollos emprendidos en la búsqueda de nuevas formas seguras y más baratas de almacenar el hidrógeno. En la Tabla 17 se muestran las nuevas tendencias en sistemas de almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 17. Alternativas de almacenamiento de hidrogeno

Fuente: *United States Department of Energy*

Alternativas para el almacenamiento de hidrógeno	
Almacenamiento en tanques a presión	Tanques cilíndricos
	Tanques adaptables
	Tanques crio-comprimidos
Almacenamiento líquido	Tanques cilíndricos
	Tanques elípticos
	Criotanques
	Tanques de líquido a alta presión
Almacenamiento sólido	Hidruros metálicos
	Adsorción

En los siguientes puntos se realiza un análisis de los principales sistemas de almacenamiento de hidrógeno.

a. Almacenamiento como gas en tanques a presión

La baja densidad del hidrógeno gaseoso, $0,0899 \text{ kg/Nm}^3$, conlleva grandes volúmenes y altas presiones para lograr un almacenamiento eficaz, ya que se puede almacenar menor energía por unidad de volumen que con otros gases, su densidad energética es de $10,8 \text{ MJ/Nm}^3$. A pequeña escala, el almacenamiento se realiza en recipientes de media-alta presión.



Figura 30. Tanque de gas hidrogeno comprimido

Fuente: *United States Department of Energy*

Debe entenderse por acumulación de gas a presión cuando se dé a presiones superiores a la atmosférica o normal. Los tanques para almacenamiento de gas a presión difieren en su construcción de acuerdo al tipo de aplicación en que sean utilizados, la cual determinará el nivel de presión requerido.

Como la cantidad de hidrógeno almacenado depende de la presión, cuanto mayor es la presión, más gas hidrógeno se almacena. La mayor parte de los tanques de uso estacionario son de baja presión porque este tipo de acumuladores son más económicos. Los requerimientos para aplicaciones móviles, por ejemplo en vehículos motorizados, son un poco diferentes a causa de la falta de disponibilidad de espacio para estos tanques. Para esos usos la presión de los tanques se puede incrementar hasta los 700 bar con el fin de acumular tanto hidrógeno como sea posible en un espacio muy reducido. Los tanques de alta presión necesitan materiales y diseños mejorados para garantizar su integridad. Actualmente se está

estudiando en el desarrollo de materiales, como la fibra de carbono o aluminio, que tengan la capacidad de soportar presiones de hasta 1.000 bar.

También hay que tener en cuenta que los costes energéticos de compresión son elevados:

- Compresión a 200 bar equivale al 7,2% de su contenido energético
- Compresión a 800 bar equivale al 13% de su contenido energético

Por lo tanto, los avances en las tecnologías de compresión son necesarios para mejorar la eficiencia y reducir los costes de producción a altas presiones.

Tradicionalmente, los acumuladores de alta presión que se usan en aplicaciones estacionarias o como sistemas de distribución y transporte de hidrógeno, se fabrican en acero al carbono o inoxidables, por lo que resultan muy pesados.

La industria que produce tanques de gas natural comprimido para esas presiones puede constituirse en un proveedor confiable de recipientes para hidrógeno gaseoso en casi todas las gamas necesarias.

Los tanques modernos son construidos en materiales compuestos (materiales de fibra y carbono), con un fino revestimiento interno de aluminio o *liner* y por lo tanto son más livianos, pero mucho más caros.

A continuación, en la se representa la evolución respecto a materiales y estructura, que han experimentado los tanques de almacenamiento de hidrógeno gas en busca de la disminución del peso total del sistema, el incremento de la presión de trabajo, la mejora de la seguridad y el aumento de la vida total del sistema.

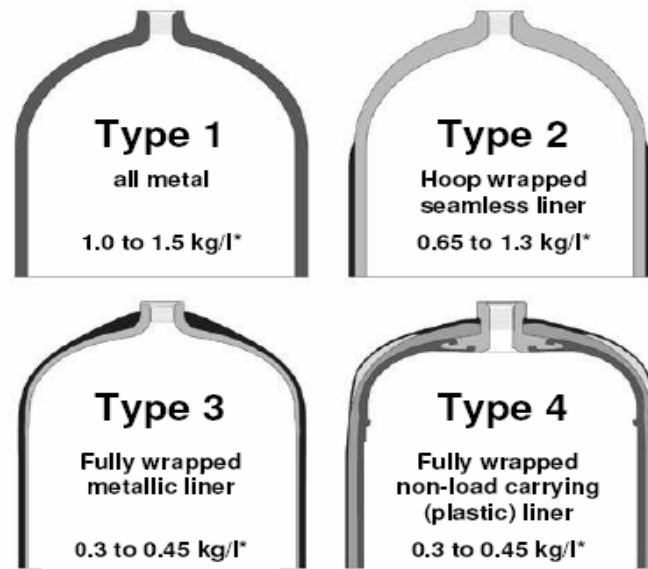


Figura 31. Tipos de depósitos

Fuente: *FHa*

- Tipo 1: estructura totalmente metálica
- Tipo 2: estructura metálica embobinada solo circunferencialmente con una resina de materiales compuestos de fibras de carbono
- Tipo 3: estructura de aluminio, *liner*, o material metálico inoxidable totalmente embobinado con una resina de materiales compuestos de fibras de carbono
- Tipo 4: estructura *liner* de polímeros de alta densidad (por ejemplo: polietileno de alta densidad) totalmente embobinado con fibra de carbono

En este respecto, las principales empresas que están desarrollando depósitos de fibras de carbono reforzadas son *Quantum Technologies*, *Lincoln Composites* y *Dynatek*. En estos depósitos, el forro interior del tanque es un polímero de alta densidad que actúa como una barrera de permeabilidad para el gas. El compuesto formado por la fibra de carbono y la resina *epoxy* está colocado sobre el polímero y constituye el soporte a la presión a la que ha sido introducido el gas comprimido. Por último, una capa exterior es colocada en el tanque para que tenga resistencia a impactos. También cuentan con sensores de temperatura para

controlar la temperatura del tanque durante el proceso de llenado del gas y de regulador de presión.

Para aumentar la capacidad de almacenamiento volumétrica de los tanques de gas comprimido se está investigando en los tanques criogénicos de compresión. Esto se basa en el hecho de que, a presión y volumen fijo, la capacidad volumétrica del tanque aumenta a medida que disminuye la temperatura del mismo. Así, para un tanque de enfriamiento de la temperatura ambiente a temperatura de nitrógeno líquido (77°K), su capacidad volumétrica aumentará por un factor de cuatro, aunque la capacidad volumétrica del sistema será inferior debido al aumento de volumen necesario para el sistema de refrigeración.

Cuando en la futura economía del hidrógeno sea necesario acumular grandes cantidades de hidrógeno, el hidrógeno podría ser comprimido en cavernas o depósitos naturales subterráneos. De esta forma es posible almacenarlo bajo presiones de hasta 50 bar. En Francia y en Estado Unidos este método está en uso actualmente. En Alemania, este método se utiliza para almacenar el gas natural a presiones de hasta 160 bar.

b. Almacenamiento como líquido en depósitos criogénicos

Los tanques de hidrogeno líquido almacenan más cantidad que los tanques de gas comprimido para el mismo volumen. La capacidad volumétrica del hidrogeno líquido es de $0,07\text{ kg/l}$, comparado con los $0,03\text{ kg/l}$ a una presión de 700 bar para el tanque del gas comprimido. No obstante, para poder almacenar hidrógeno en forma líquida, la temperatura de licuefacción requerida es de -253°C , y para que el hidrógeno alcance esta temperatura se requiere una elevada cantidad de energía.

La energía requerida para la licuefacción del hidrogeno es alta, normalmente el 30% del valor calorífico del hidrogeno es necesario para la licuefacción; por lo que nuevas mejoras son necesarias para reducir estos requerimientos de energía.

Una vez licuado y en el depósito, las pérdidas resultantes del calentamiento gradual del hidrógeno líquido en el tanque (pérdidas por vapor disipado), efecto *boil-off*, pueden mantenerse en niveles bajos (en torno al 2,5%). A menores pérdidas, el sistema será más eficiente, más seguro y por consiguiente más barato.

Los recipientes de hidrógeno líquido se componen principalmente de un depósito interior, un sistema de aislamiento intermedio y un armazón exterior:

- Depósito interior

Se utilizan materiales de baja conductividad térmica como fibras de plástico reforzadas con carbón o vidrio. Tiene que ser resistente al efecto de fragilización del hidrógeno, impermeable al hidrógeno y resistente a las temperaturas de operación. Además, a causa de los grandes cambios de temperatura cuando el depósito está lleno o vacío, hay que tener en cuenta la expansión y contracción del material.

- Aislamiento

Compuesto por hojas de aluminio o polímero de aluminio separadas por fibra de vidrio o polímeros.

Es necesario para mantener en valores bajos las pérdidas por *boil off*, provocando reducciones en la capacidad volumétrica de los tanques en los vehículos. Mejorar el aislamiento, pero sin aumentar el volumen y el peso del sistema ayudaría a disminuir el coste del tanque.

- Armazón exterior

De acero inoxidable o aleaciones de aluminio, por su alta resistencia a la corrosión del hidrógeno. y debe presentar una alta resistencia a la abrasión.

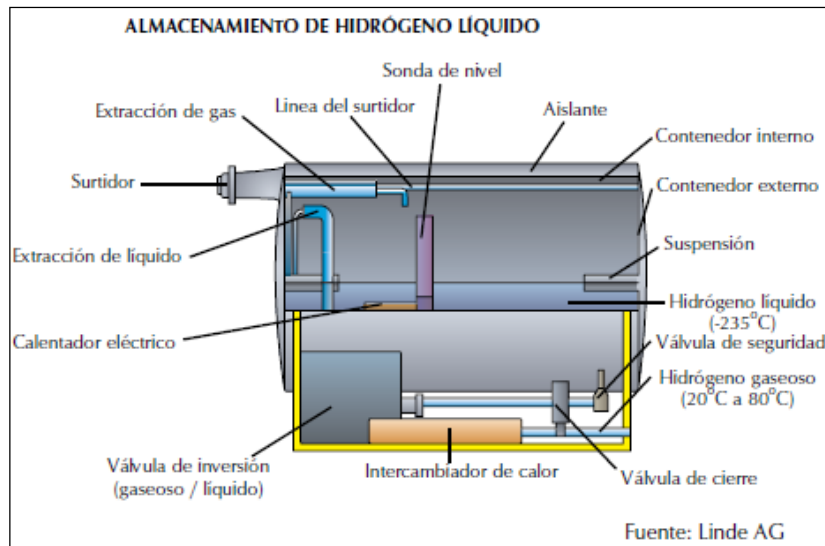


Figura 32. Esquema de un tanque de almacenamiento del hidrógeno líquido

Fuente: **Linde AG**

Su aplicación principal es en instalaciones estacionarias a gran escala, como por ejemplo en hidrogeneras, en la distribución y transporte del hidrógeno y en el transporte. El almacenamiento en depósitos criogénicos es indicado para uso en vehículos a causa del poco espacio disponible para los tanques.

El almacenamiento de líquido criogénico para aplicaciones estacionarias puede realizarse, bien en superficie, bien bajo tierra, tal y como se observa en las siguientes figuras.



Figura 33. Tanques criogénicos para el almacenamiento de hidrógeno licuado a -253°C

Fuente: **Air Products**



Figura 34. Almacenamiento de hidrógeno bajo tierra en estado líquido. Hidrogenera de Shell en Washington DC

Fuente: *Air Products*

Debido a que el hidrógeno líquido tiene un alto rango de inflamabilidad. Los métodos de almacenamiento y transporte deben seguir estrictamente los protocolos de seguridad, a fin de evitar accidentes críticos. La eliminación de las chispas de los equipos eléctricos, la electricidad estática, las llamas abiertas o los objetos muy calientes tienen que ser empleados para asegurar la seguridad.

c. Almacenamiento como sólido formando hidruros metálicos

Diversos metales reaccionan con el hidrógeno formando compuestos conocidos como hidruros. Los hidruros son pues, aleaciones metálicas con capacidad para almacenar y liberar hidrógeno con gran seguridad.

Este sistema ofrece una alta capacidad de almacenamiento, permite almacenar más hidrógeno por unidad de volumen que en forma líquida, y presenta diversas ventajas de seguridad y manipulación (almacenamiento sólido a presión y temperatura ambiente) frente a

otros sistemas. Sus principales desventajas son el elevado peso de los equipos y su alto precio.

La formación de estos compuestos es reversible, pueden cargarse y descargarse prácticamente un número ilimitado de veces, pudiendo volverse a tener el hidrógeno y el metal inicial. Sin embargo los procesos de adsorción y desorción consumen una cantidad de energía que puede llegar al 30% de la almacenada.



Figura 35. Dispositivos de almacenamiento del hidrogeno

Fuente: **Gobierno de Aragón**

El almacenamiento en hidruros metálicos se realiza mediante absorción, mediante adsorción o mediante reacción química:

- Absorción: esta tecnología de acumulación usa ciertas aleaciones metálicas o metales (Fe/Ti, Mg, Pd, La) que acumulan hidrogeno tal como una esponja se satura de agua. El hidrogeno es absorbido por el metal produciendo un hidruro metálico. Si el hidruro metálico es “rellenado” con hidrogeno entonces emite calor. Inversamente, para recuperar hidrogeno es necesario aportar calor.

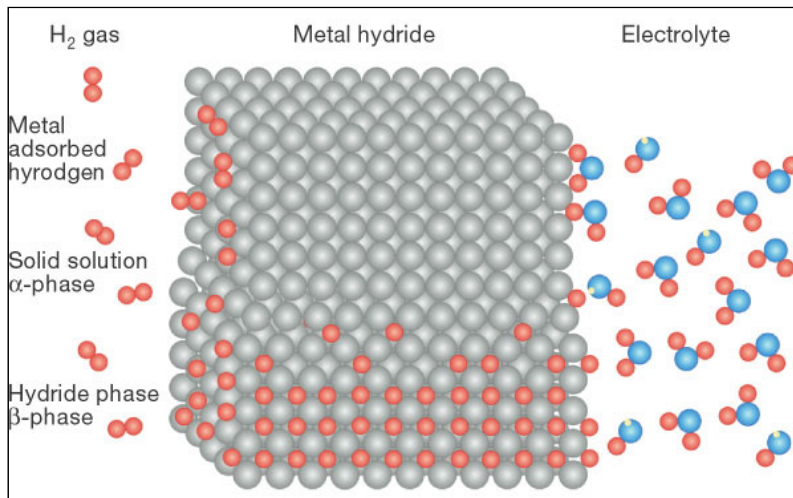


Figura 36. Estructura metálica con átomos de hidrógeno en los intersticios entre los átomos del metal

Fuente: *Nature*

- Adsorción: en este proceso, las moléculas de hidrógeno gas interactúan con las moléculas o átomos de la superficie del material. En estos sistemas, la capacidad de almacenar hidrógeno es proporcional a su superficie específica. Se trabaja con materiales que tengan una alta superficie específica.
- Reacción química: esta técnica se refiere al almacenamiento de hidrógeno basado en reacciones entre metales y agua. Las principales son la electrolisis y la hidrogenación.

Esta técnica de almacenamiento tiene rendimiento bajo, sólo es posible almacenar y recuperar una cantidad que oscila del 2 al 6% del peso del hidruro, es por ello que este tipo de acumuladores son muy pesados, tal y como se puede observar en la tabla siguiente, y por esa razón no se emplean en aplicaciones móviles livianas como automóviles o micro-minibús. Además de ello, son muy caros debido al alto costo de los materiales.

Tabla 18. Algunos de los hidruros metálicos empleados para el almacenamiento de hidrógeno y sus características

Fuente: *Nature*

Type	Metal	Hydride	Structure	mass%	p_{eq}, T
Elemental	Pd	$PdH_{0.6}$	$Fm3m$	0.56	0.020 bar, 298 K
AB_5	$LaNi_5$	$LaNi_5H_6$	$P6/mmm$	1.37	2 bar, 298 K
AB_2	ZrV_2	$ZrV_2H_{5.5}$	$Fd3m$	3.01	10^{-8} bar, 323 K
AB	FeTi	$FeTiH_2$	$Pm3m$	1.89	5 bar, 303 K
A_2B	Mg_2Ni	Mg_2NiH_4	$P6222$	3.59	1 bar, 555 K
Body-centred cubic	TiV_2	TiV_2H_4	b.c.c.	2.6	10 bar, 313 K

Esta forma de almacenamiento tiene un importante nicho de mercado en aplicaciones estacionarias de pequeña y mediana escala, especialmente en aislada. Teniendo precaución en la manipulación y seguridad, el empleo de tanques de hidruros metálicos es ventajoso ya que casi todos ellos operan a presiones normales, no existen pérdidas y purifican el hidrógeno. Además, en caso que el tanque o recipiente resulte dañado, el hidrogeno permanece incorporado al hidruro, lo que constituye una ventaja de seguridad para espacios cerrados.

En la siguiente figura, se recogen en rojo y naranja los hidruros metálicos más empleados y se comparan con el hidrógeno líquido y otros hidrocarburos líquidos, según su capacidad de almacenamiento de hidrógeno en peso y volumen.

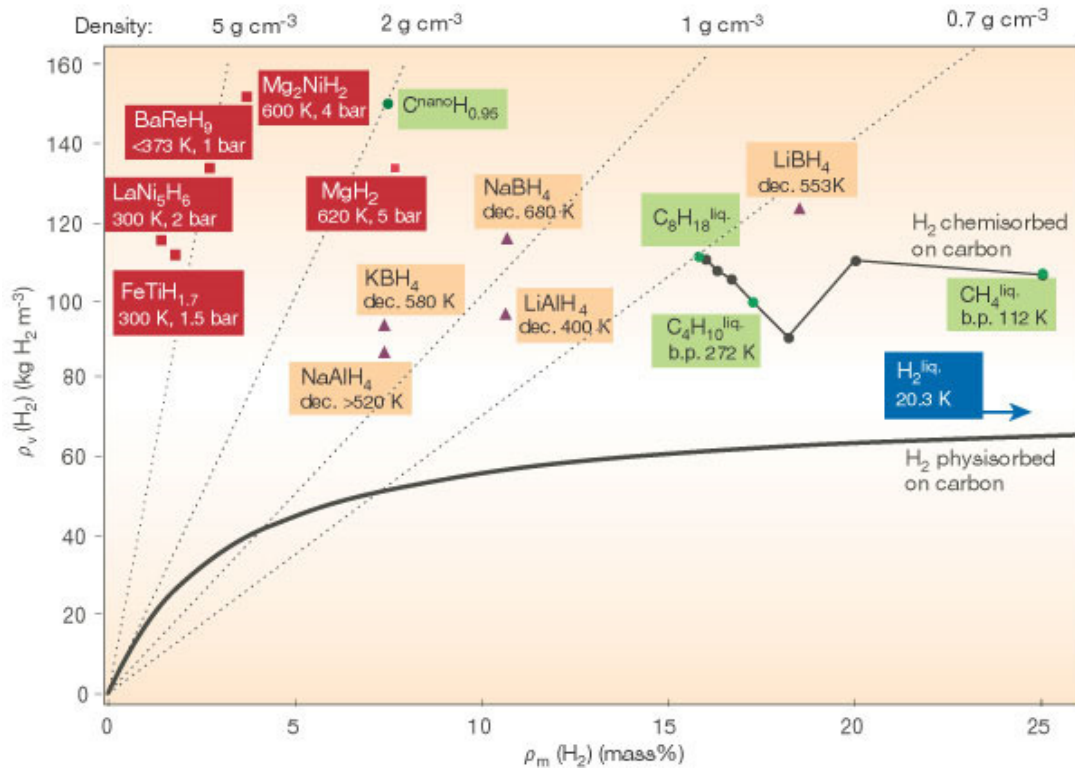


Figura 37. Cantidad de hidrógeno almacenado de diferentes sistemas de almacenamiento por masa y por volumen

Fuente: *Nature*

d. Almacenamiento en nanotubos de carbono

Son estructuras de grafito, en forma de hexágonos de carbono, que se disponen formando tubos de diámetro muy pequeño (nanotubos), dentro de los cuales puede almacenarse gran cantidad de hidrógeno.

Los avances que se consigan en esta novedosa tecnología, aún en fase de investigación, resultarán decisivos para conseguir el almacenamiento de grandes cantidades de hidrógeno de forma segura.

Los investigadores están desarrollando diversos procedimientos y, aunque aún hay disparidad en los resultados, todos coinciden en el gran potencial del sistema.

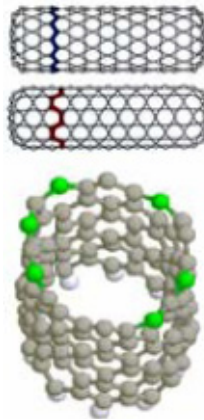


Figura 38. Nanotubos de carbono

Fuente: **Gobierno de Aragón**

El almacenamiento en nanotubos de carbono se realiza mediante adsorción. Este material con base de carbono puede revolucionar algún día la tecnología de almacenamiento de hidrogeno. Se pueden acumular grandes cantidades de hidrogeno en tubos formados microscópicamente por una pequeña estructura de grafito.

A bajas temperaturas (80K) y relativamente altas presiones, la adsorción es más eficiente, llegando al 8% en peso sobre el adsorbente, pero si consideramos que un gramo de nanotubos cuesta miles de euros, se vislumbra que hace falta mucho desarrollo todavía para permitir su aplicación comercial.

Muchos grupos de investigadores de todo el mundo están efectuando investigación de tecnologías de almacenamiento en nanotubos, pero hasta ahora los informes de capacidad de almacenamiento difieren mucho entre ellos. Existen experimentos de laboratorio que alcanzan entre un 20% a un 25% de eficiencia en peso, pero los resultados a escala práctica aún no son los esperados.

e. Microesferas de cristal

Se trata de esferas de 25 a 500 micras de diámetro, construidas de material vítreo poroso al hidrógeno.

El concepto básico de cómo las microesferas de cristal se pueden utilizar para almacenar el gas de hidrógeno en un vehículo se puede describir por tres pasos: carga, relleno y descarga. Primero, las esferas de cristal huecas se llenan de hidrógeno (H_2) a alta presión (350-700 bar) y a alta temperatura ($300^\circ C$) por la impregnación en un recipiente de alta presión. Después, las microesferas se enfrían a la temperatura ambiente y se transfieren al tanque de baja presión del vehículo. Finalmente, las microesferas se calientan a $200-300^\circ C$ para el lanzamiento controlado de hidrógeno para el funcionamiento del vehículo.

El problema principal con las microesferas de cristal es la densidad volumétrica intrínsecamente baja que puede ser alcanzada y la alta presión requerida para llenarlas. Las microesferas de cristal dejan escapar lentamente el hidrógeno a la temperatura ambiente. Otro inconveniente práctico es que hay demasiado tiempo muerto al completar el ciclo.

El inconveniente operacional principal es la necesidad de añadir calor a temperaturas más altas que las recomendables para las pilas de combustible tipo PEM ($70-80^\circ C$). La alta temperatura requerida ($300^\circ C$) también hace difícil la rápida respuesta-control.

Sin embargo, existen algunas ventajas claras. Las microesferas de cristal tienen el potencial de ser intrínsecamente seguras y almacenan hidrógeno a una presión relativamente baja. Esto permite costes bajos del envase. La ventaja técnica más significativa es la elevada densidad demostrada del almacenaje, alcanzando valores del 5,4% en peso de hidrógeno.

No obstante, tareas de investigación y desarrollo se hacen imprescindibles con el objetivo de reducir las temperaturas de liberación del hidrógeno hasta temperaturas inferiores a los $100^\circ C$. Otros aspectos susceptibles de mejora son:

- Desarrollo de cristales más fuertes
- Desarrollo de técnicas específicas que disminuyan el coste de producción
- Desarrollo de técnicas para mejorar la permeabilidad del hidrógeno
- Desarrollo de técnicas de control de permeabilidad por métodos no térmicos

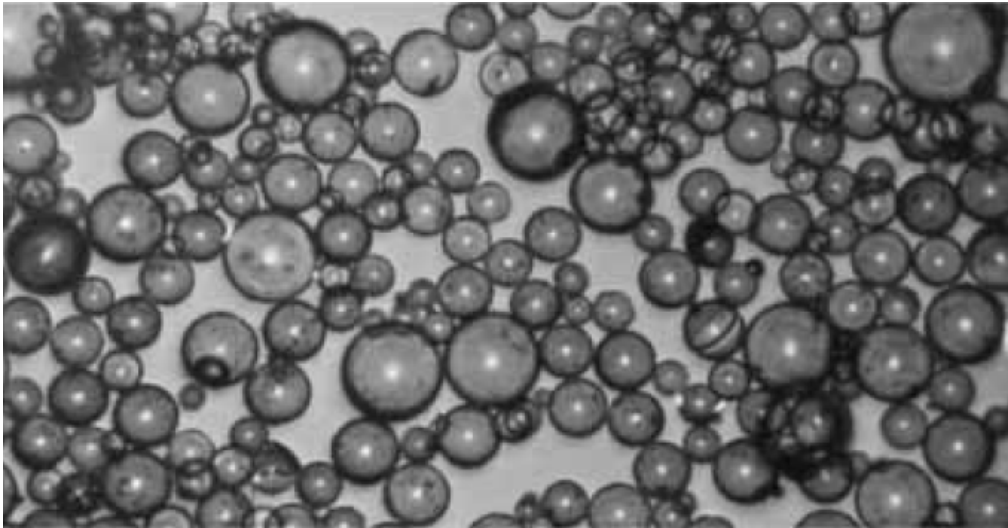


Figura 39. Imagen al microscopio de las microesferas de cristal

f. Estado de las tecnologías de almacenamiento del hidrogeno

El hidrógeno gas comprimido es la tecnología más desarrollada y es la que presenta un menor coste. Los inconvenientes que presenta son: una baja densidad energética y una alta presión de trabajo.

El hidrógeno líquido criogénico tiene una alta densidad energética. Los problemas que surgen son debido a las temperaturas de trabajo: materiales, seguridad, coste energético.

El hidrógeno en forma sólida está en desarrollo y es una tecnología con muchas posibilidades: gran capacidad de almacenamiento a bajas presiones y poco espacio. Presenta el inconveniente del coste y del alto peso del sistema.

Los nanotubos de carbono presentan una alta capacidad de almacenamiento a bajas temperaturas y presiones relativamente altas. Su inconveniente es su elevadísimo precio y que está todavía en fase de laboratorio.

A raíz de lo visto anteriormente, enfocando los sistemas de almacenamiento de hidrógeno para su utilización en estaciones de repostaje de hidrógeno, de forma general, los sistemas idóneos, en función de las características de la hidrogenera serán:

- Hidrógeno gaseoso en tanques a presión: para estaciones de tamaño pequeño o mediano. Si ni hay limitación de espacio y las características técnicas lo permiten, la mejor opción, en términos económicos es el almacenamiento a una presión de 200 bar.
- Hidrógeno líquido criogénico: para instalaciones grandes que muevan grandes flujos de hidrógeno o para aquellas que dispensan hidrógeno en estado líquido.
- Hidruros metálicos: cuando se trate de estaciones pequeñas o medianas según coste y estaciones que tengan un peor acceso. Por el alto coste, esta opción suele ser desestimados a favor del almacenamiento en tanques a presión

4.3.2. Instalaciones de Repostaje de Hidrógeno

El suministro de hidrógeno a los automóviles se realiza en las estaciones de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras.

Existen diferentes tipos de hidrogeneras desde el punto de vista del suministro de hidrógeno, en lo que se refiere a la viabilidad técnica y económica de este elemento del sistema de suministro.

En el futuro, la localización de las hidrogeneras influirá en la solución técnica adoptada para el suministro:

- Hidrogeneras ubicadas en localizaciones remotas, con una demanda pequeña, pero constante de hidrógeno, contarán con producción in situ.
- Grandes estaciones en áreas rurales, por ejemplo, alejadas de las principales vías de comunicación, posiblemente sólo reciban suministro de hidrógeno líquido en camión cisterna.
- Hidrogeneras situadas en los alrededores de las ciudades, recibirán suministro de hidrógeno líquido en camión cisterna o en forma de hidrógeno gas por medio de tubería.
- En hidrogeneras localizadas en vías principales, que cuenten con una demanda estacional, no es recomendable la solución in situ, debido a las cargas parciales y las capacidades máximas.

Atendiendo a los criterios de localización, demanda y modo de suministro del hidrógeno al usuario final (gas comprimido o gas licuado), actualmente nos encontramos con diferentes soluciones a la hora de enfrentarse a la instalación de una hidrogenera.

4.3.2.1. Hidrogeneras con tanques de almacenamiento de gas comprimido

En la Figura 40 se presenta un esquema general de una hidrogenera que cuenta con almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso, independientemente del modo de aprovisionamiento del hidrógeno: suministrado de modo externo, ya sea en estado gaseoso o líquido, o generado in situ, mediante electrólisis o *steam reforming*.

Dependiendo de la configuración final se podrá prescindir de alguno de los elementos. Por ejemplo, dependiendo de la pureza con la que salga el hidrógeno del electrolizador o reformador, será necesario o no el purificador.

El proceso de licuefacción requiere un equipo muy caro y un gasto energético muy elevado, por lo que es recomendable evitar el mayor número de cambios de estado posible. Por ello, si

el objetivo final es realizar el repostaje de vehículos que dispongan de depósitos criogénicos, es preferible un aprovisionamiento de hidrógeno en estado líquido con su correspondiente almacenamiento en tanques criogénicos.



Figura 40. Esquema general de hidrogenación con almacenamiento de hidrógeno en estado gaseoso

Fuente: **Elaboración propia**

Dependiendo de la presión de almacenamiento se requerirán uno o dos compresores. Si la presión de almacenamiento es mayor a la de dispensado, los depósitos de los vehículos se llenarán por diferencia de presión, requiriendo un único compresor para la recarga. De lo contrario se requerirán dos: uno para la recarga del almacenamiento y otro para proporcionar al gas almacenado la presión necesaria para su dispensado.

Actualmente, en las numerosas estaciones instaladas en el mundo, el hidrógeno gaseoso es acumulado a presiones de hasta 700 bar.

Una opción muy utilizada actualmente es utilizar remolques de apoyo al almacenamiento normal, que cuentan con botellas de hidrógeno de gas comprimido, y que son fácilmente reemplazables cuando su contenido se ha agotado.



Figura 41. Plataforma móvil para el almacenamiento de hidrógeno a 200bar

Fuente: *Air Products*

4.3.2.2. Hidrogenas con tanque de almacenamiento criogénico

A continuación se presenta un esquema general de una hidrogena que cuenta con almacenamiento de hidrógeno en estado líquido criogénico, independientemente del modo de aprovisionamiento del hidrógeno. Éste será, bien suministrado de modo externo: en estado gaseoso o líquido, bien generado in situ, mediante electrólisis o *steam reforming*.

Dependiendo de la configuración final se podrá prescindir de alguno de los elementos. Por ejemplo, en el caso de que se vaya a realizar un repostaje en estado gaseoso a partir del depósito criogénico, el líquido puede ser presurizado tras el evaporador utilizando una bomba

criogénica, de este modo no es necesario ningún compresor para la fase gas y el repostaje se realiza por diferencia de presiones.

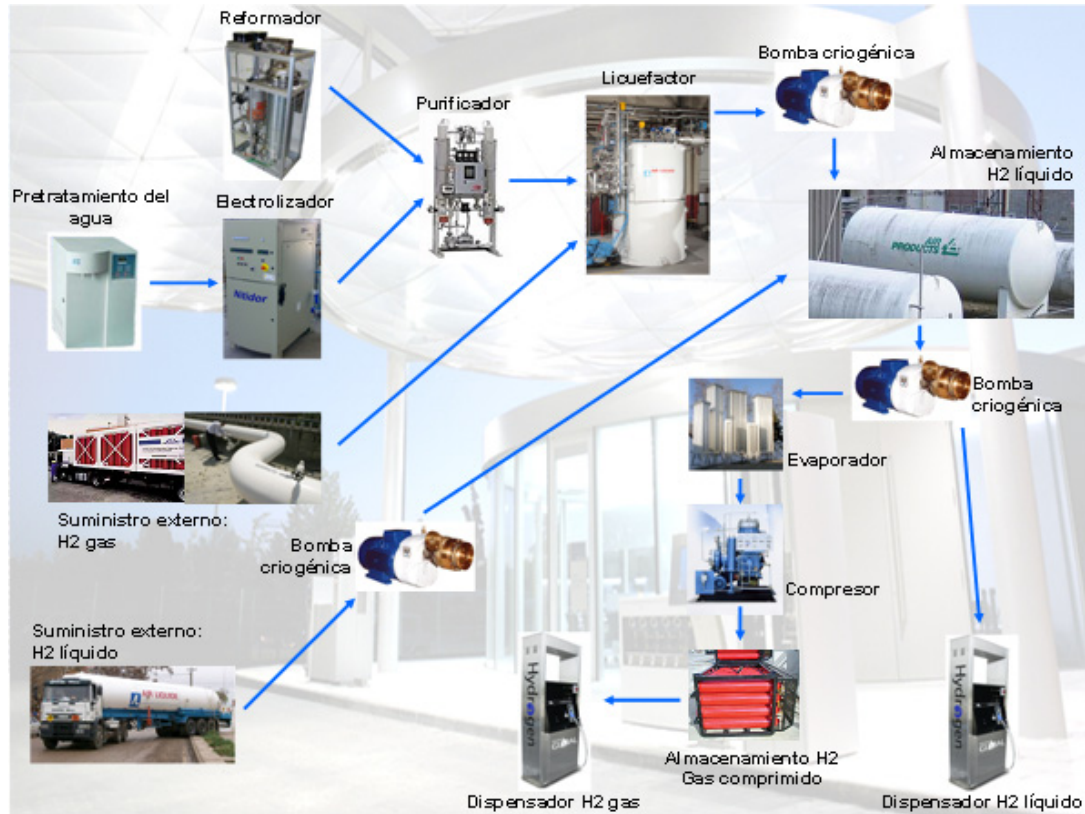


Figura 42. Esquema general de hidrogenera con almacenamiento de hidrógeno en estado líquido

Fuente: **Elaboración propia**

El hidrógeno llega a la planta en estado líquido y luego en la propia estación se transforma a estado gaseoso para dispensarlo como combustible para los coches de hidrógeno. Un ejemplo de hidrogenera de este tipo es la diseñada por *Linde AG* y cuyo esquema se muestra a continuación:

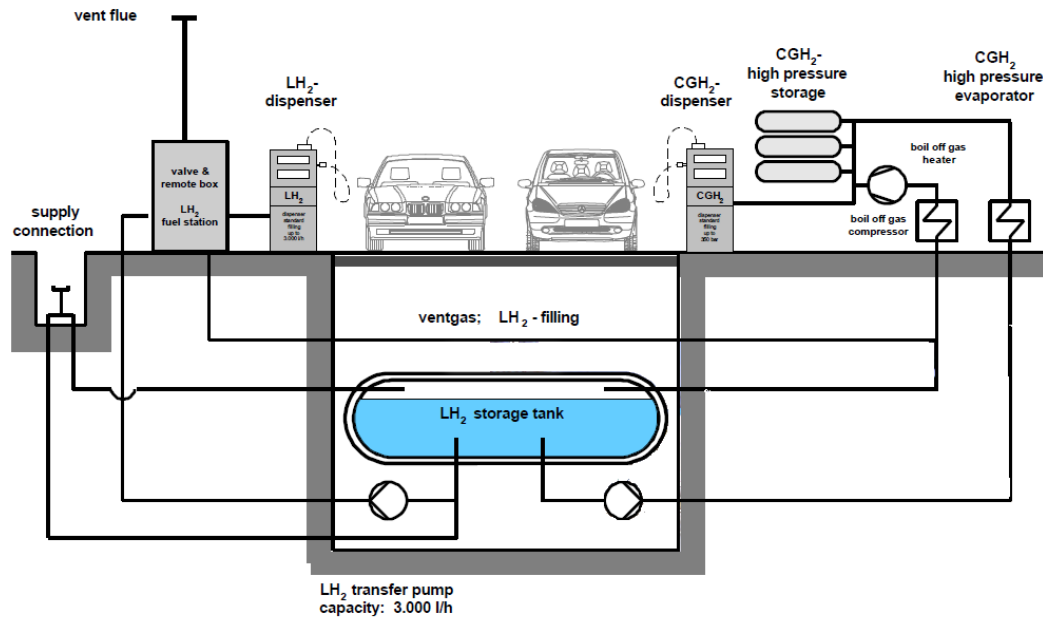


Figura 43. Esquema de hidrogenera instalada por Linde AG

Fuente: *Linde AG*

4.3.2.3. Hidrogeneras móviles

Las hidrogeneras móviles surgen como un modo de llegar al consumidor hasta que las hidrogeneras sean lo suficientemente accesibles. Los fabricantes de coches utilizan para sus demostraciones este tipo de hidrogeneras. Lo que las caracteriza es su movilidad, y el hecho de que como la estación móvil se abastece de hidrógeno generado en una fuente externa, no tiene limitaciones en el número de vehículos que es posible repostar.

La mayoría de empresas especialistas en la construcción de hidrogeneras estáticas, han lanzado al mercado soluciones de hidrogeneras móviles, tanto para hidrógeno comprimido, como para hidrógeno líquido; este es el caso, por ejemplo, de *PowerTech* o *Air Products*.

Existen diferentes conceptos de hidrogenera móvil, desde las que simplemente se trata de camiones cisterna de hidrógeno líquido con sistema de bombeo integrado que pueden suministrar el hidrógeno al almacenamiento a alta presión de una hidrogenera o dispensarlo

directamente al vehículo; hasta las hidrogeneras montadas en contenedores o remolques que cuentan con los mismos equipos que una hidrogenera estacionaria.



Figura 44. Estaciones de hidrogeno móviles

Fuente: *PowerTech Labs. / Air Products*

4.3.2.4. Estado actual hidrogeneras a nivel mundial

El número de estaciones de servicio de hidrógeno está aumentando de forma exponencial durante los últimos años. Esta tendencia se observa en la figura siguiente:

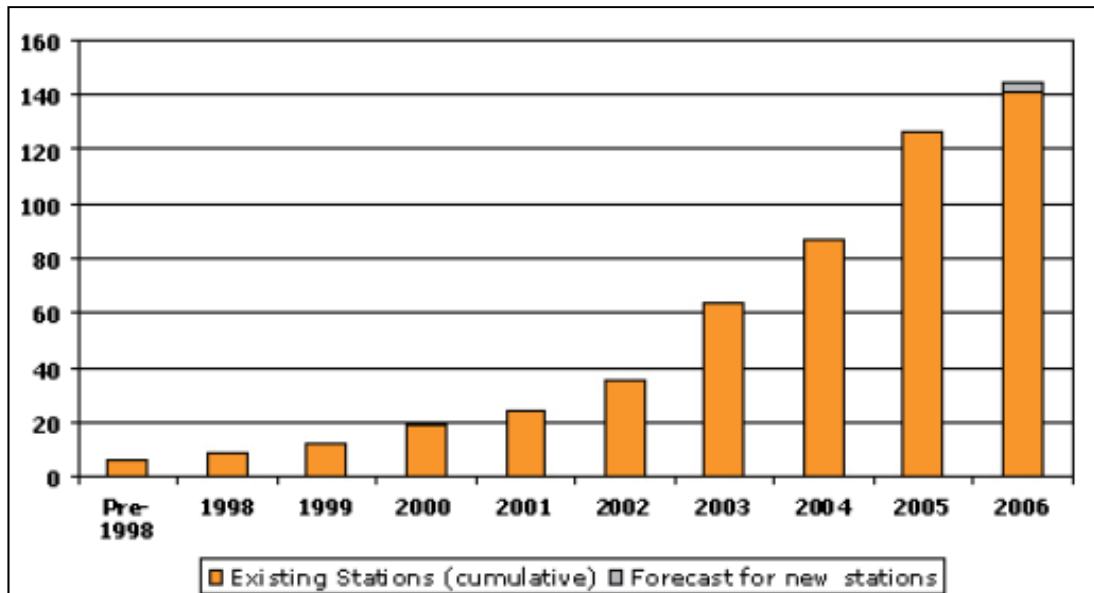


Figura 45. Número de hidrogenas existentes

Fuente: *Fuelcelltoday* (2007)

Ante el elevado número de opciones existentes, con el objetivo de acotar el número de soluciones tecnológicas a considerar en los siguientes apartados de la presente tesis, se ha realizado un análisis de las características de las hidrogenas existentes a nivel mundial, obteniéndose las siguientes lecturas:

- El número de hidrogenas es mucho mayor en Norte América y Europa que en el resto del mundo. Dentro de Europa, Alemania e Italia son los países que más hidrogenas disponen, al ser los países con mayor I+D en automoción.

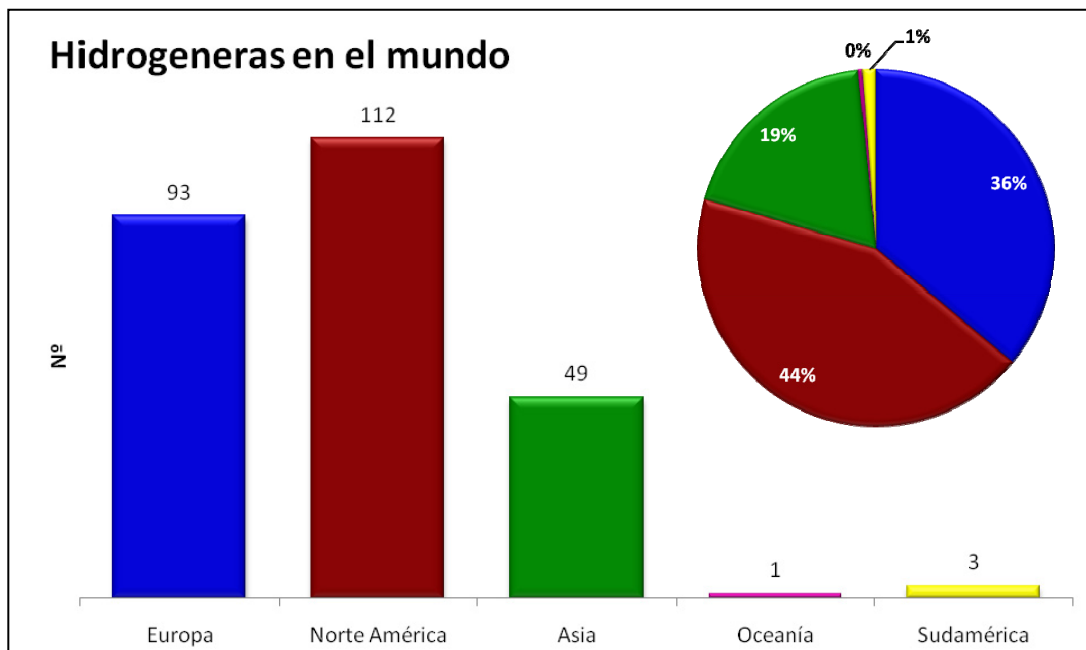


Figura 46. Hidrogeneras estudiadas localizadas por continentes

Fuente: Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)

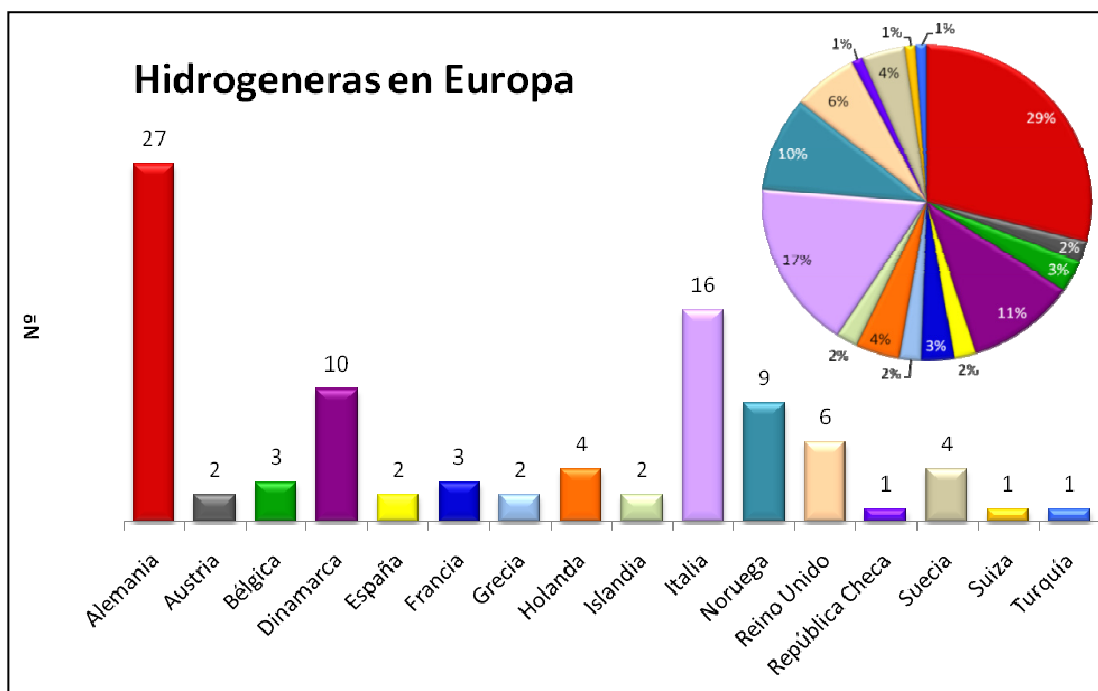


Figura 47. Hidrogeneras estudiadas en Europa y su distribución por países

Fuente: Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)

El proveedor principal de tecnología para hidrogenas a nivel mundial es *Air Products*. También son importantes proveedores *Linde AG*, *Hydrogenics Corp.* y *Distributed Energy System*.

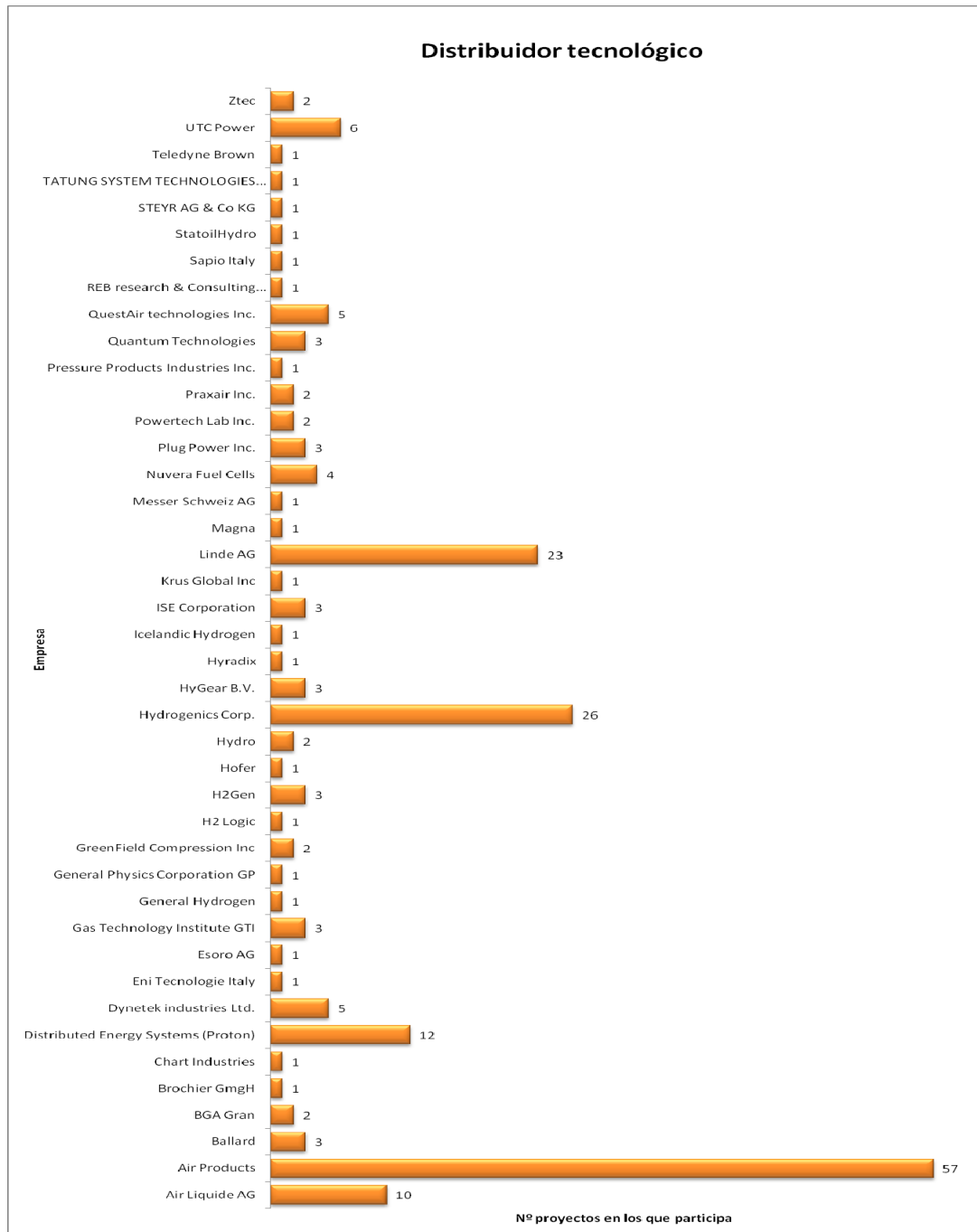


Figura 48. Distribuidores de tecnología para hidrogenas y número de proyectos en los que han participado

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)**

Para obtener el hidrógeno que se suministra en las hidrogeneras existen variados procedimientos, y se suele utilizar más de uno en cada instalación. No obstante el más utilizado es el proceso de electrólisis, que está presente en más del 40% de las hidrogeneras estudiadas. La fuente de energía más utilizada en este proceso es la proveniente de las energías renovables, principalmente de la eólica y fotovoltaica. También son de importancia el reformado de gas y el suministro de hidrógeno, bien en estado gaseoso, bien en estado líquido.

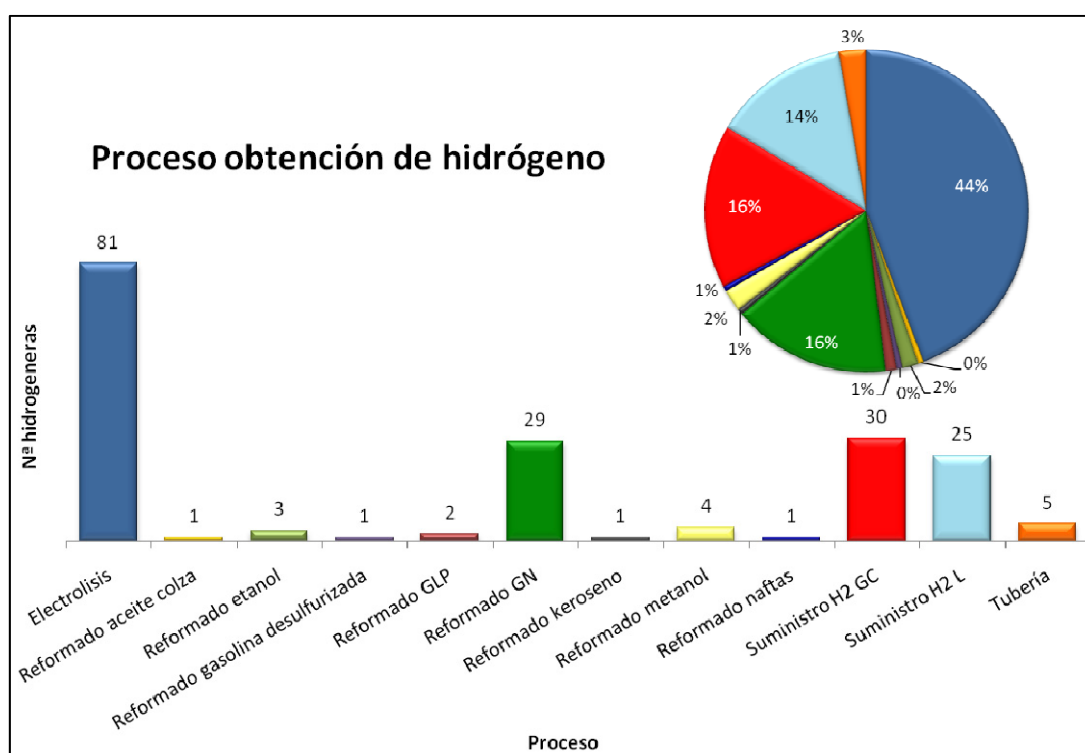


Figura 49. Procesos de obtención de hidrógeno utilizados en las hidrogeneras

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)**

El método más utilizado para almacenar el hidrógeno que posteriormente se suministrará a los vehículos es el de tanques o botellas de gas comprimido. La utilización de los hidruros metálicos como fuente de almacenamiento aún no ha sido demasiado explotada. El tamaño del sistema de almacenamiento dependerá del uso final y del tamaño de la hidrogenera.

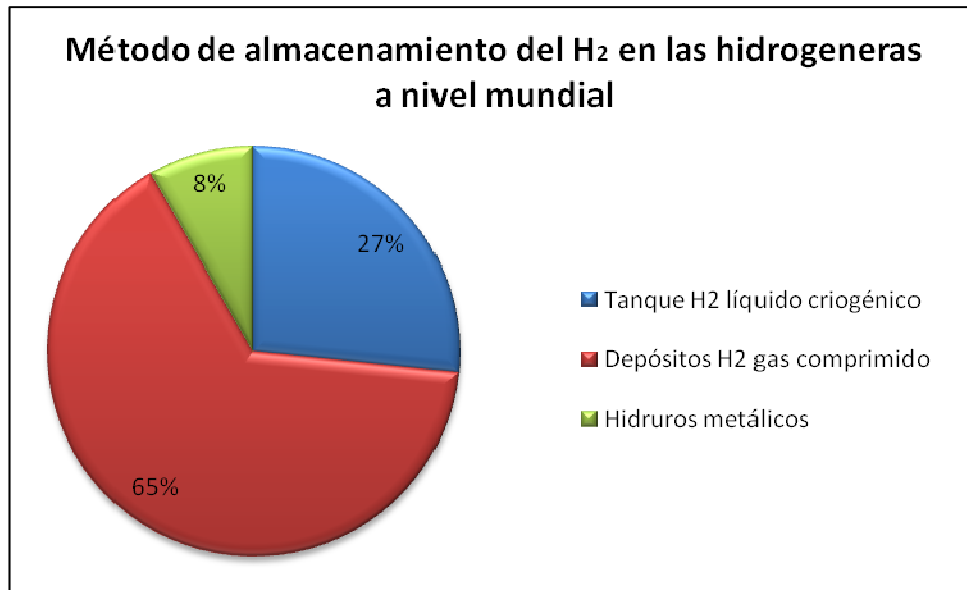


Figura 50. Reparto del método de almacenamiento del hidrógeno a nivel mundial

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)**

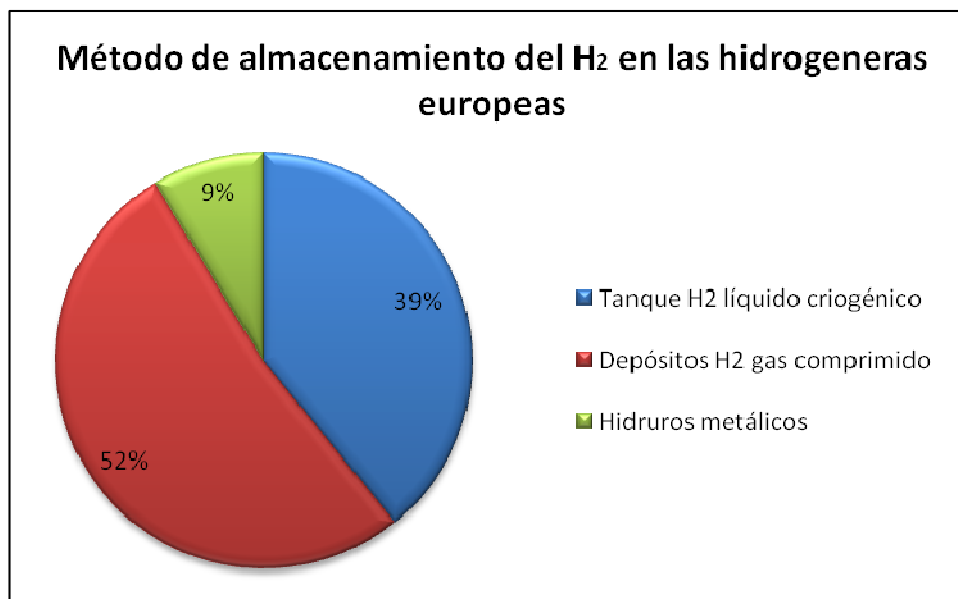


Figura 51. Reparto del método de almacenamiento del hidrógeno a nivel europeo

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)**

En la siguiente gráfica se muestra la capacidad de almacenamiento de hidrógeno de las hidrogeneras estudiadas:

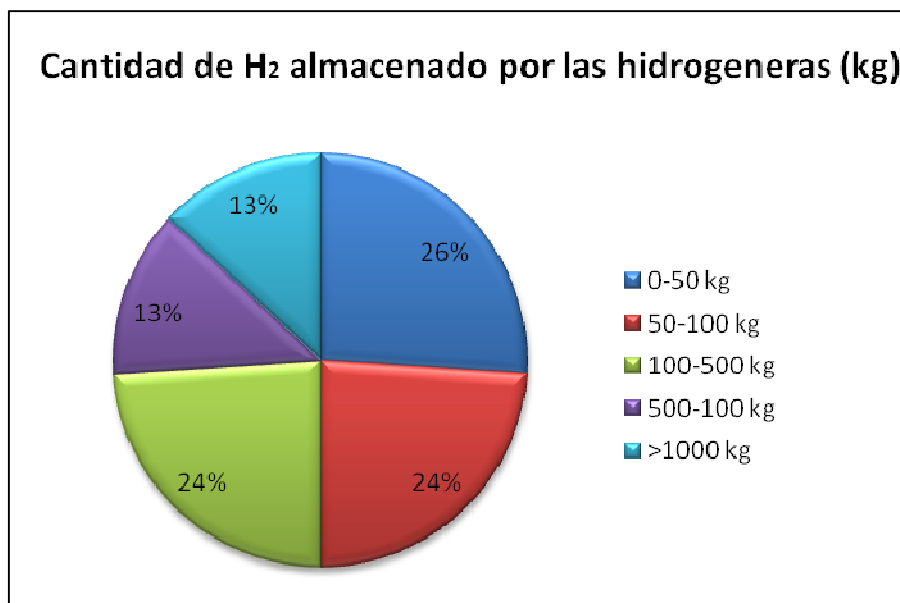


Figura 52. Cantidad de hidrógeno almacenado por las hidrogeneras estudiadas

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)**

La presión de almacenamiento del hidrógeno en estado gaseoso más habitual es entre 30 y 50 MPa.

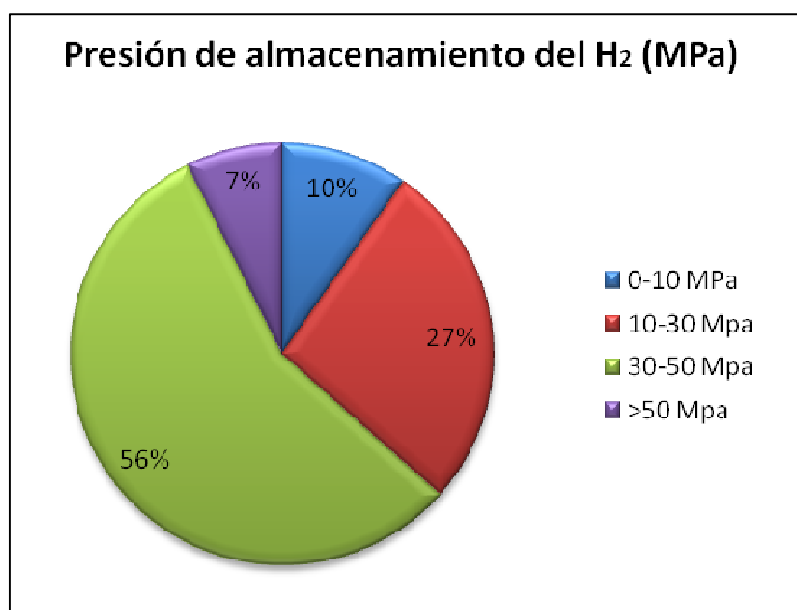


Figura 53. Presión de almacenamiento del hidrógeno almacenado en las hidrogeneras

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada (2009)**

A pesar de que la mayoría de las hidrogeneras ofrecen más de una posibilidad de suministro del hidrógeno, el suministro a 350 bar es la opción que más se repite, estando presente en 66 de las hidrogeneras estudiadas.

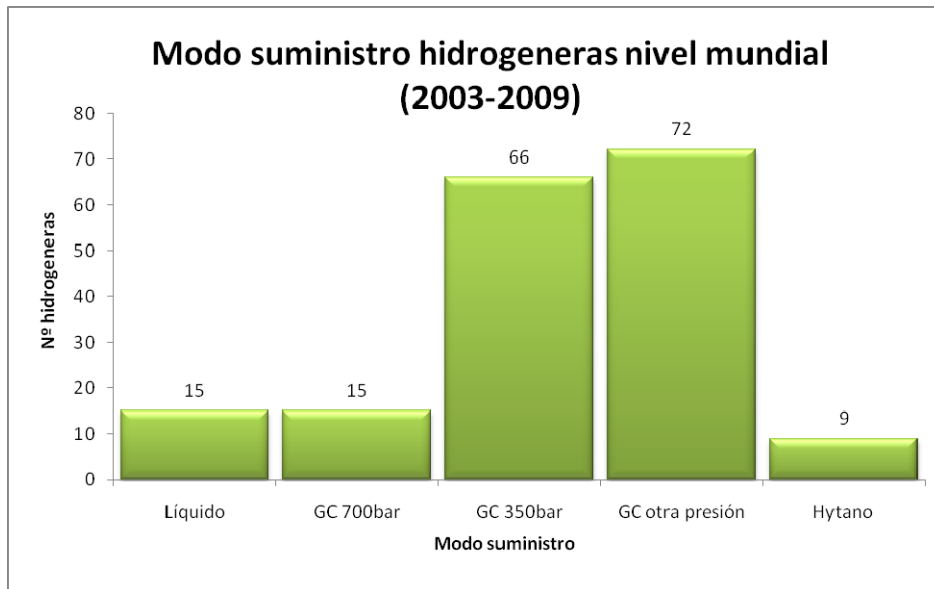


Figura 54. Modos de suministro ofrecidos por las hidrogeneras a nivel mundial

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

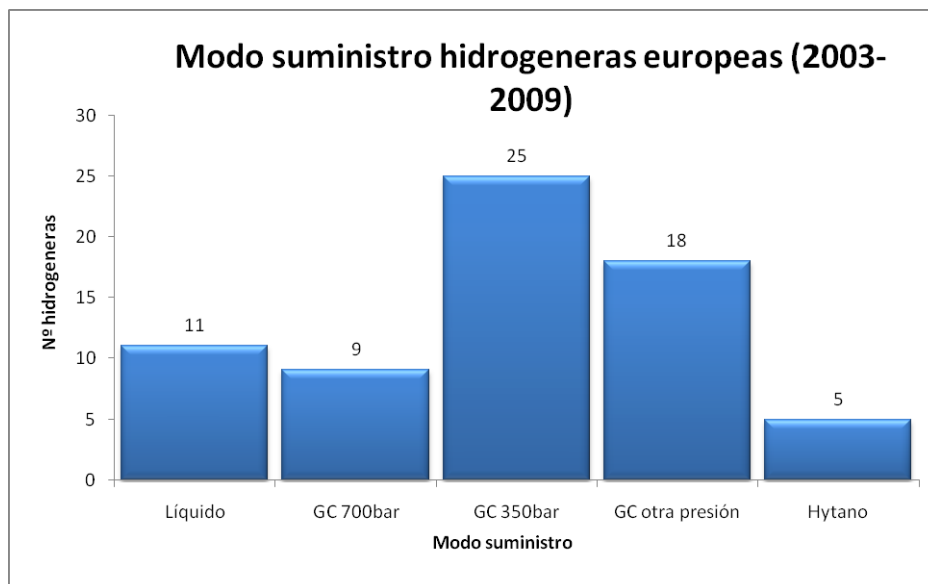


Figura 55. Modos de suministro ofrecidos por las hidrogeneras a nivel europeo

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

4.3.2.5. Componentes de las hidrogeneras

Los principales equipos que componen las hidrogeneras son los que aparecen en la Tabla 19. No todos los equipos son requeridos para todos los tipos de hidrogenera, la combinación de estos irá en función de diferentes tecnologías de almacenamiento y producción del hidrógeno que se decidan.

Tabla 19. Equipos principales que componen las hidrogeneras

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

Equipo	Funciones
Reformadores	Los reformadores usan el calor y los catalizadores para hacer “crack” de los hidrocarburos de forma que liberen el hidrogeno que contienen. Un reformador produce una mezcla de gases que debe ser purificado con el fin de producir hidrógeno lo suficientemente puro para su uso en automoción.
Electrolizadores	Producen hidrogeno usando la electricidad y el agua mediante el proceso de electrolisis.
Pretratamiento del agua	Elemento necesario para desionizar y eliminar las sales presentes en el agua que posteriormente se introducirá en el electrolizador.
Purificadores	Elementos encargados de proporcionar la pureza requerida por el hidrógeno para su posterior dispensado a las pilas de combustible de los vehículos, necesarios para aquellas instalaciones en las que se genere hidrógeno in situ y el electrolizador o reformador no proporcione la pureza necesaria.
Compresores	Dispositivos encargados de aumentar la presión del hidrógeno en estado gaseoso hasta las presiones de almacenamiento o dispensado.
Almacenamiento	Elementos requeridos para almacenar el hidrógeno requerido para el repostaje de los vehículos en la hidrogenera, ya sea en estado gaseoso, líquido o sólido en forma de hidruros metálicos.
Vaporizadores	Dispositivo que permite el paso de hidrógeno líquido a gas, aumentando su temperatura.
Bombas criogénicas	Las bombas criogénicas centrífugas se utilizan para transferir el líquido criogénico entre el tanque de almacenamiento y dispensadores o el camión de suministro. Estas bombas producen altos flujos y el mantenimiento requerido es escaso.
Dispensadores	Elementos encargados de realizar el repostaje del hidrógeno desde la estación de servicio al vehículo. Los dispensadores de hidrógeno tienen un principio de funcionamiento muy similar a los que suministran gasolina, pero tienen una conexión al tanque de hidrógeno.

4.3.3. Vehículos. Estado Actual y Evolución

Un vehículo de hidrógeno es un vehículo de combustible alternativo que utiliza hidrógeno diatómico como su fuente primaria de energía para propulsarse.

Hay dos razones principales por las que es deseable sustituir los combustibles fósiles por el hidrógeno:

- La combustión del hidrógeno no contamina, sólo produce como subproducto agua, mientras que los combustibles fósiles liberan CO₂ que queda en la atmósfera y es uno de los mayores responsables de lo que se denomina "efecto invernadero".
- Las reservas de combustibles fósiles se agotarán tarde o temprano, mientras que el hidrógeno permanecerá inagotable.

4.3.3.1. Vehículo con pila de combustible de hidrógeno

Estos vehículos utilizan el hidrógeno en pilas de combustible. La pila de combustible de hidrógeno funciona muy similar a una batería, lo que hace es convertir el hidrógeno en oxígeno y agua, de ese proceso químico es que se logra la electricidad para poder mover el automóvil. La pila de combustible no mantiene la carga, por lo que se necesita un flujo constante de hidrógeno para impulsar la transmisión del vehículo, algo parecido a la combustión interna pero con electricidad.

Actualmente, las pilas de combustibles han conseguido un buen nivel de eficiencia y compactación que permiten 2 kW por litro y por kilo con presiones variables de 1,5 y 2,7 bar. Eso se consigue conectando en serie hasta unas 200 células simples. Un motor de 60 kW (82 CV) permite alcanzar las velocidades modernas. La velocidad en el automóvil de hidrógeno es el resultado no de las revoluciones de un pistón sino de la potencia en kilovatios que rinde la electricidad inyectada en el rotor.

Tabla 20. Tecnología de las pilas de combustibleFuente: *SAE International*

Fuel Cell Type		Electrolyte	Operating Temperature	Electrical Efficiency	Fuel Oxidant	Energy Output
AFC	Alkaline Fuel Cell	Potassium hydroxide solution	Room temperature to 90°C	60-to-70%	H ² O ²	300W-to-5KW
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Proton Exchange Membrane	Room temperature to 80°C	40-to-60%	H ² O ² , Air	1KW
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell	Proton Exchange Membrane	Room temperature to 130°C	20-to-30%	CH ³ OH , O ² Air	1KW
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	Phosphoric Acid	160-to-220°C	55%	Natural gas, bio gas, H ² O ² , Air	200KW
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	Molten mixture of alkali metal carbonates	6200-to-660°C	65%	Natural gas, bio gas, coal gas, H ² O ² , Air	2MW-to-100MW
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	Oxide ion conducting ceramic	800-to-1000°C	60-to-65%	Natural gas, bio gas, coal gas, H ² O ² , Air	100KW

a. Interés en el uso de pilas de combustible en autobuses para el transporte urbano

A continuación se van a exponer algunos beneficios por los que resulta muy interesante la introducción de las tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible en flotas de autobuses para transporte urbano:

En primer lugar, las dimensiones y la estructura de un autobús permiten la instalación de pilas de combustible y sus equipos auxiliares, incluyendo los tanques de hidrógeno. Además, el porcentaje de aumento de peso representa un problema menor en comparación con el caso de instalar estos sistemas en coches privados.

Por otro lado, los autobuses suelen circular en el centro de los núcleos urbanos, en los cuales la contaminación del aire es un problema serio. Por ello, la utilización de este tipo de

transporte sin emisiones puede adquirir una renta alta en términos de costes sociales relacionados con la contaminación del aire, puede reportar un importante beneficio medioambiental y alcanzar un alto grado de aceptación desde la opinión pública, las administraciones y la sociedad en general.

Desde el punto de vista económico, la tecnología de pilas de combustible es, en estos momentos, mucho más cara que la relacionada con los motores tradicionales. Sin embargo, gracias al hecho de que habitualmente los autobuses se compran y gestionan en flotas de un gran número de unidades, esto permitiría una reducción de costes de inversión y mantenimiento importante. Además, si la infraestructura de repostaje es muy cara para un número reducido de vehículos, como va a ser el caso de los proyectos demostrativos / iniciativas a corto plazo, el coste medio por vehículo descendería en el caso de utilizar una flota de autobuses numerosa (por ejemplo 50 - 100 autobuses).

También desde el punto de vista económico, la opción de fomentar el uso de las tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible en flotas de autobuses para transporte público urbano a corto plazo está favorecida por el hecho de que habitualmente los servicios de transporte urbano están gestionados por una administración pública, la cual está más interesada en la adquisición de beneficios sociales y, por lo tanto, menos obligada a la recuperación de la inversión a corto plazo.

Finalmente, destacar que algunas características de una pila de combustible son particularmente interesantes para un autobús: el motor no es ruidoso, las vibraciones brillan por su ausencia y el motor eléctrico presenta un funcionamiento suave, lo cual permite incrementar el confort de los usuarios.

b. Estado comercial

Los vehículos de pila de combustible aún no se encuentran a la venta, aunque sí es posible alquilar aquellos que se encuentran dentro de programas de demostración. En cualquier caso, siguen sin estar al alcance de todos los posibles usuarios interesados en esta

tecnología, bien por razones económicas, bien por razones de localización o bien por falta de infraestructuras.

Los fabricantes de vehículos se encuentran trabajando activamente en el desarrollo de modelos de hidrógeno. Analizando los diferentes modelos de vehículos que cuentan con pila de combustible y algunas de sus características, es posible extraer algunas conclusiones:

- Los vehículos propulsados con tecnología de pila de combustible, pueden recorrer una distancia media que ronda los 400 kilómetros para turismos y 275 kilómetros para autobuses.

Tabla 21. Valor medio de autonomía de los vehículos con pila de combustible de hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

Valor medio autonomía	
Turismos	422,6 km
Autobuses	274,7 km

Atendiendo a los datos de capacidad de los depósitos de combustible de los vehículos de los que se dispone, la capacidad media para turismos de estos depósitos es de unos 5 kg y ronda los 45 kg para autobuses.

Tabla 22. Valor medio de la capacidad del depósito de hidrógeno de los vehículos con pila de combustible de hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

Valor medio de capacidad del depósito de hidrógeno	
Turismos	4,93 kg
Autobuses	44,67 kg

La autonomía específica en km recorridos/kg vehículo, de los turismos con este tipo de sistema propulsor tiene un valor medio de 0,27 km/kg, mientras que para los autobuses es de 0,018 km/kg.

Tabla 23. Autonomía específica de los vehículos con pila de combustible de hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia a partir de documentación analizada**

Autonomía específica	
Turismos	0,27 km/kg
Autobuses	0,018 km/kg

Los autobuses con tecnología de pila de combustible de hidrógeno son los vehículos que tienen un mayor potencial para, en un futuro a corto-medio plazo, hacerse hueco en los sistemas de transporte urbanos actuales. Por ello, a partir de los autobuses que actualmente están circulando por el mundo dentro de los diferentes proyectos existente, para la presente tesis se ha hecho un análisis más detallado de este tipo de vehículo. De este análisis se extraen las siguientes conclusiones:

- Prácticamente la totalidad de los autobuses montan pilas de combustible PEM, siendo *Ballard* el principal fabricante de pilas de combustible para su aplicación en autobuses.
- La mayoría de autobuses montan depósitos hidrógeno comprimido, siendo la presión de 350 bar la más utilizada. Muy pocos utilizan hidrógeno líquido o metanol.
- La autonomía media que alcanzan estos autobuses ronda los 300 kilómetros, aunque existen modelos que alcanzan autonomías superiores a los 500 kilómetros, como por ejemplo el *Van Hool A330*.

4.3.3.2. Vehículo con motor de combustión interna alimentado con hidrógeno

Estos vehículos logran la fuerza motriz gracias a la ignición del hidrógeno dentro de la cámara de combustión. El motor de combustión interna de hidrógeno se parece mucho a los motores de gasolina, exceptuando que el combustible es gaseoso en lugar de líquido.

Algunos fabricantes de automóviles ya ven a los motores de combustión interna de hidrógeno como un puente a corto plazo hacia el uso de vehículos alimentados por células o celdas de combustible.

Un automóvil de hidrógeno no requiere el tratamiento de los gases de escape, cuando opera correctamente. La alta velocidad de combustión del hidrógeno ofrece la oportunidad de aumentar el rendimiento de potencia sin incrementar el tamaño del motor. Usando la inyección directa del hidrógeno, la densidad de potencia es aproximadamente un 117 por ciento superior con respecto a un motor de gasolina equivalente, y los motores de combustión interna de hidrógeno pueden arrancar fácilmente aún con muy bajas temperaturas de ambiente. Sin embargo, a diferencia de los combustibles líquidos, el hidrógeno tiene una baja densidad de energía por unidad de volumen, lo que significa que el vehículo estará un poco limitado en su autonomía en comparación con los actuales.

a. Estado comercial

Ya se encuentra disponible para determinados clientes el primer modelo de turismo con motor de combustión interna que funciona con hidrógeno: el *BMW Hydrogen 7*; ver siguiente figura.

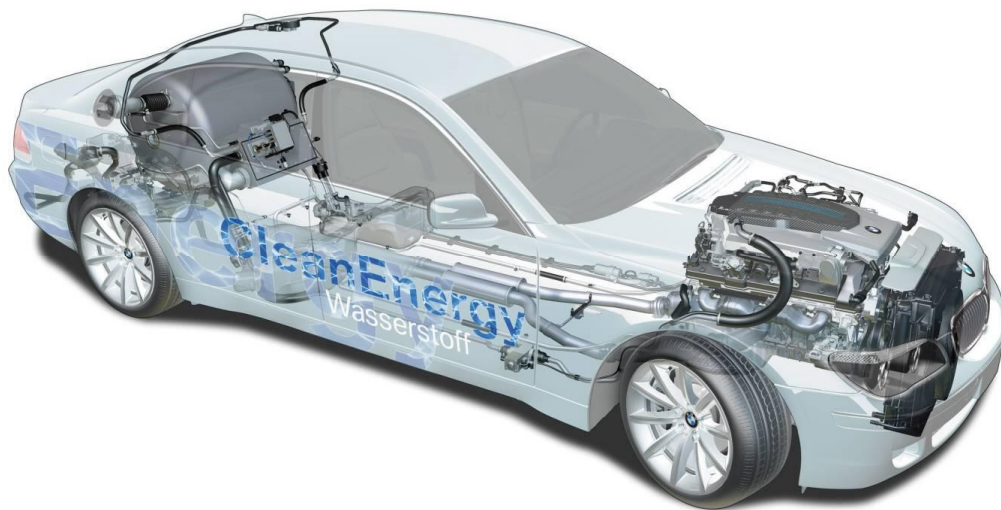


Figura 56. BMW Hydrogen 7

Fuente: **BMW**

Tras analizar una relación de vehículos con motor de combustión interna alimentado con hidrógeno y sus características, es posible extraer algunas conclusiones:

- Los turismos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno, pueden recorrer una distancia media que ronda los 250 kilómetros únicamente utilizando el hidrógeno existente en sus depósitos. Por el contrario, los autobuses alcanzan una media de 325 kilómetros.

Tabla 24. Valor medio de autonomía de los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

Valor medio autonomía	
Turismos	255 km
Autobuses	325 km

- Atendiendo a los datos de capacidad del depósito de hidrógeno de los vehículos estudiados, la capacidad media para turismos de este tipo de depósitos es de 8 kg, mientras que para autobuses superan los 50 kg.

Tabla 25. Valor medio de la capacidad del depósito de hidrógeno de los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno.

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

Valor medio de capacidad	
Turismos	8,15 kg
Autobuses	51,35 kg

- La autonomía específica proporcionada únicamente por el hidrógeno en km recorridos/kg vehículo, de los turismos con este tipo de sistema propulsor tiene un valor medio de 0,153 km/kg, mientras que para los autobuses es de 0,021 km/kg.

Tabla 26. Autonomía específica de los vehículos con motor de combustión interna alimentados con hidrógeno.

Fuente: **Elaboración propia a partir de la documentación analizada**

Autonomía específica	
Turismos	0,153 km/kg
Autobuses	0,021 km/kg

4.4. Conclusiones

Una vez analizadas las tecnologías asociadas a la aplicación del hidrógeno en el transporte, y tras haber hecho un repaso del estado comercial de este tipo de vehículos, se extraen las siguientes conclusiones:

- La cultura del hidrógeno se ofrece como la más prometedora para luchar contra el cambio climático y limitar la dependencia del petróleo, pero hay que tener en cuenta que el hidrógeno proviene de fuentes primarias. Se trata de un vector energético de transformación y utilización limpia de la energía.
- El rendimiento ambiental total del hidrógeno como combustible depende en gran medida de la fuente de energía primaria que se utilice para su generación, es decir, si se usan combustibles fósiles o renovables. Además, el procesamiento adicional y los pasos de distribución determinan los impactos ambientales totales de la producción del hidrógeno.

El hidrógeno presenta tanto ventajas como inconvenientes cuando se compara con otros combustibles fósiles:

- Ventajas:
 - o El hidrógeno presenta una alta densidad energética en base másica. Bajo peso de combustible en los tanques de almacenamiento.
 - o Alta disponibilidad. Se puede producir a partir de distintas materias primas.
 - o Se trata de un elemento estable y no corrosivo.
 - o El hidrógeno es un combustible "limpio". La combustión del hidrógeno con oxígeno sólo produce agua (aunque con determinadas relaciones H_2 /aire se producen óxidos de nitrógeno (NO_x)).

- Inconvenientes:
 - El hidrógeno presenta una baja densidad energética en base volumétrica. Se requieren tanques contenedores grandes y pesados.
 - Los procesos de transporte y almacenamiento son costosos y de implementación compleja.
 - Se trata de un combustible secundario: se debe consumir energía para generarlo a partir de las distintas materias primas (agua, biomasa, combustibles fósiles) ya que no existe en estado elemental.

- Como el hidrógeno puede producirse a partir de muy diversas fuentes primarias, también puede contribuir considerablemente a mejorar la seguridad del suministro de energía.

- De cara a un futuro basado en un desarrollo sostenible, el vector energético hidrógeno, producido a partir de energías renovables, está adquiriendo cada vez más protagonismo. Producir hidrógeno con energía solar o eólica se presenta como una manera adecuada de almacenar, en forma de energía química, la energía procedente de sol y viento respectivamente. Con ello se consigue subsanar uno de los principales obstáculos para el aprovechamiento de las energías renovables: se dispone de ellas únicamente en el momento en el que existe el recurso.

- El 40% de las hidrogeneras que están en funcionamiento a nivel global, cuentan con un proceso de electrólisis para obtener hidrógeno. La fuente de energía más utilizada en estos casos es de origen renovable, principalmente se trata de energía eólica y fotovoltaica.

- La producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles sin emisión de CO₂ es tecnológicamente posible y económicamente viable utilizando las técnicas existentes para la captura, transporte y almacenamiento de CO₂.

- A corto plazo, la electrólisis del agua y los reformados a pequeña escala de gas natural son las tecnologías más apropiadas. La electrólisis del agua es una tecnología probada que se puede utilizar para el sector de transporte. Muchos equipos de reformado a pequeña escala de gas natural se están probando en proyectos de demostración.
- A medio y largo plazo, la producción del hidrógeno basada en la producción centralizada del combustible fósil con captura del CO₂ y el almacenaje son factibles. La captura y el almacenaje del CO₂ no está hoy todavía técnica y comercialmente probado y requiere un desarrollo adicional en procesos de absorción/separación.
- A corto-medio plazo, el hidrógeno será producido principalmente *on-site* a partir de gas natural en pequeñas unidades descentralizadas cerca de los centros de consumo. Esto beneficiará a la red actual de gas natural de larga distancia.
- En un futuro a corto plazo, el transporte de hidrógeno en camiones, ya sea en estado gaseoso o líquido, será el sistema de transporte más utilizado, hasta que los flujos de hidrógeno se hagan lo suficientemente grandes para que el suministro por gaseoducto justifique la alta inversión en infraestructuras requerida y empiece a ser competitivo. Para demandas bajas y medias, los tipos de transporte de hidrógeno más apropiados será en estado gaseoso a alta presión y en estado líquido respectivamente.
 -
- En el futuro, la localización de las hidrogeneras influirá en la solución técnica adoptada para el suministro y transporte:
 - Hidrogeneras ubicadas en localizaciones remotas, con una demanda pequeña, pero constante de hidrógeno, contarán con producción *in situ*.
 - Grandes estaciones en áreas rurales, por ejemplo, alejadas de las principales vías de comunicación, posiblemente sólo reciban suministro de hidrógeno líquido en camión cisterna.

- Hidrogeneras situadas en los alrededores de las ciudades, recibirán suministro de hidrógeno líquido en camión cisterna o en forma de hidrógeno gas por medio de tubería.
 - En hidrogeneras localizadas en vías principales, que cuenten con una demanda estacional, no es recomendable la solución in situ, debido a las cargas parciales y las capacidades máximas.
- A pesar de que el hidrógeno es visto como el combustible del futuro del transporte al ser el que ofrece el mayor potencial en términos de emisiones reducidas de contaminantes y de gases con efecto invernadero, y desde el punto de vista del suministro de energía primaria diversificado, el desarrollo de una infraestructura de energía basada en el hidrógeno es vista frecuentemente como una formidable barrera técnica y económica.
- Los métodos más extendidos para el almacenamiento de hidrógeno son en estado gaseoso a altas presiones: 200-700 bar; en estado líquido a bajas temperaturas: -253°C; y en estado sólido (en forma de hidruros metálicos). La idoneidad de elección de un método sobre otro dependerá de la aplicación final, principalmente de si se trata de una aplicación fija o móvil.
- Hidrógeno gaseoso en tanques a presión: para estaciones de tamaño pequeño o mediano. Si ni hay limitación de espacio y las características técnicas lo permiten, la mejor opción, en términos económicos es el almacenamiento a una presión de 200 bar.
 - Hidrógeno líquido criogénico: para instalaciones grandes que muevan grandes flujos de hidrógeno o para aquellas que dispensan hidrógeno en estado líquido.
 - Hidruros metálicos: cuando se trate de estaciones pequeñas o medianas según coste y estaciones que tengan un peor acceso. Por el alto coste, esta opción suele ser desestimada a favor del almacenamiento en tanques a presión

- El gas comprimido y el líquido son las dos formas comercialmente más viables, pero se deben desarrollar los sistemas de almacenaje para que la relación coste-eficiencia sea mejor. Permitiendo superar las bajas densidades energéticas y altas presiones de trabajo del almacenamiento en estado gaseoso y el alto coste energético del almacenamiento criogénico.
- El uso del hidrógeno como combustible abre una nueva era en el sector transporte ya que permite utilizar para este fin las energías renovables, las fósiles y la nuclear al tiempo que reduce drásticamente las emisiones de CO₂.
- Existen en estos momentos tres inconvenientes principales o barreras a superar por parte de las tecnologías del hidrógeno para que adquieran un papel predominante en el sector transporte (P. Agnolucci, 2007 [3]; P. Forsberg, 2007 [4]):
 - La falta de conocimiento o desconfianza hacia las mismas por parte de la sociedad
 - La falta de infraestructura de repostado de hidrógeno actual para las flotas de vehículos
 - El elevado precio de estas tecnologías que todavía no hace asequible, desde un punto de vista económico, el vehículo de pila de combustible o con motor de combustión de hidrógeno.
- Sin embargo, los expertos apuntan al periodo de tiempo 2015 – 2020 como aquel en el que se producirá el punto de inflexión para el despliegue del mercado de vehículos de hidrógeno a nivel mundial, por lo que hay razones para ser optimistas a la hora de considerar al hidrógeno como una alternativa importante en el transporte público sostenible del futuro.
- En primera instancia, el empleo del hidrógeno en los motores de combustión puede ofrecer un medio importante para la progresiva introducción del hidrógeno, mientras se espera la consolidación de la tecnología relacionada con las pilas de combustible.

Finalmente, la introducción generalizada de las pilas de combustible permitirá que la producción local de energía (distribuida) se convierta en algo común, incluso en los hogares.

- Además de la propia pila de combustible, los vehículos de pila de combustible necesitan montar indispensablemente depósitos de almacenamiento de hidrógeno. Estos son depósitos de alta presión, alcanzan hasta los 700 bar, para los que hasta el momento no se ha desarrollado la normativa de seguridad correspondiente. El todavía reducido número de este tipo de vehículos ha hecho que la necesidad de crear normas de seguridad específicas no sea muy acuciante, por lo que aún no han sido estipuladas. No obstante, es muy probable de que antes de que este tipo de vehículos salgan al mercado, ya haya entrado en vigor algún estándar de seguridad. Antes de que eso ocurra, la investigación y el desarrollo de nuevos diseños de depósitos de hidrógeno para vehículos aún es de gran importancia.

- Actualmente la gran mayoría de los vehículos de pila de combustible que circulan por las carreteras del mundo son sólo vehículos de demostración. Honda es el único fabricante de automóviles que ha puesto a disposición del público en general un turismo de pila de combustible, pero sólo en la región del sur de California y cada uno de los coches está fabricado a mano. Muchos fabricantes de automóviles disponen de flotas pequeñas para pruebas (por lo general de menos de un centenar de vehículos), que ponen a disposición de la prensa y el público en general. En el año 2009, ocho fabricantes de automóviles (*Ford, Daimler AG, Ford Motor Company, General Motors, Honda, Hyundai Motor Company, Kia Motors, Renault/Nissan y Toyota*) firmaron una carta de Entendimiento (LOU), por la que se comprometieron a iniciar el lanzamiento al mercado de sus vehículos de pila de combustible en el año 2015.

- Entre los fabricantes de automóviles, cinco se sitúan al frente en el campo de los vehículos de pila de combustible: *Daimler AG, Honda, General Motors, Hyundai y Toyota*. Estos fabricantes cuentan con las flotas más importantes de vehículos de pila de combustible, y ha sido así desde hace mucho tiempo.

- Uno de los factores a tener en cuenta es el aumento del número de autobuses con pila de combustible que han aparecido en el mercado. Los autobuses se utilizan y tienen una mayor salida comercial debido a que su alto costo puede ser subvencionado (o directamente sufragado) por los gobiernos, en lugar de individuos o entidades privadas. Además, el sistema de transporte mediante autobuses cuenta con la ventaja de que al seguir los autobuses rutas fijas y disponerse prácticamente siempre de unas instalaciones de mantenimiento, a menudo sólo es necesaria la instalación de una estación de dispensado de hidrógeno, en vez de hacerse necesario crear, en el caso de los turismos privados, una infraestructura completa.

- Para que el mercado de este tipo de vehículos experimente un crecimiento se antoja necesario que ocurran dos cosas:
 - o Que los fabricantes consigan aumentar la durabilidad y eficiencia de las pilas de combustible.
 - o Que los gobiernos creen la infraestructura necesaria y aumente así el número de estaciones de servicio de hidrógeno.

*"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía
atómica: la voluntad"*

Albert Einstein

CAPÍTULO 5.

Dimensionamiento de instalaciones e infraestructuras del hidrógeno

5.1. Introducción

A la hora de enfrentarse al reto de diseñar y dimensionar las instalaciones englobadas en un sistema basado en el hidrógeno, uno de los problemas que se plantean es el cálculo de los elementos que deben verse involucrados. Hasta el momento, han sido escasos los proyectos de estas instalaciones, y en la mayoría de los casos se ha tratado de proyectos demostrativos y por lo tanto, a medida. Esto ha contribuido a que no exista una metodología determinada que ayude a la toma de decisiones en este tipo de proyectos.

Ante esta oportunidad, en la presente tesis se plantean unas herramientas que pretenden dar solución al dimensionado de las instalaciones de repostaje de hidrógeno y la logística que arrastran. Las dos herramientas que se proponen son:

- Una herramienta con la que realizar un predimensionamiento inicial y genérico de las hidrogeneras.
- Un modelo de cálculo que permita el dimensionamiento completo de una hidrogenera en función de las particularidades de cada caso en concreto.
- Una metodología de análisis que permita conocer y establecer la influencia de cada uno de los componentes del sistema en la instalación final.

La implementación de la herramienta y el modelo de cálculo desarrollados en un software específico que de forma dinámica sirva como herramienta de ayuda a la toma de decisiones, también permitirá analizar las variables que intervienen en el dimensionamiento de este tipo de instalaciones y determinar cuáles de ellas son más influyentes, utilizando los resultados obtenidos para determinar los costes a utilizar en el análisis económico desarrollado en el *CAPÍTULO 6. Análisis de las variables económicas más influyentes a la hora de establecer una infraestructura de recarga para vehículos de hidrógeno. Análisis de sensibilidad.*

5.2. *Predimensionamiento de Instalaciones de Hidrógeno*

En este apartado de la tesis se persigue utilizar los principales parámetros que influyen en el dimensionamiento de las instalaciones de hidrógeno asociadas al sector transporte y para diseñar una Herramienta de Predimensionamiento. La Herramienta de Predimensionamiento es un procedimiento que permite, de forma automática, sencilla y ágil, definir las características básicas de unas hidrogeneras tipo a partir de unos datos de entrada muy básicos: el tipo y el número de vehículos (turismos y autobuses) que se prevé utilizarán la instalación. Las características que define son: número de dispensadores necesarios, el caudal diario de suministro, el tipo de suministro y un coste aproximado, pero lo más ajustado posible, de la infraestructura. De este modo se obtiene un pre-diseño de la instalación que utilizar como primer nivel del modelo de cálculo y dimensionamiento de nuevas instalaciones de hidrógeno.

Tras el análisis de la documentación sobre los proyectos y experiencias previas más representativas sobre la materia (*CEP, Munich Airport Hydrogen Infrastructure Project, PSS, JHFC, STEP, ECTOS, CUTE y Bavarian Bus Demonstration Project*), no se apreció una tendencia compartida en la estructura y tecnologías de las instalaciones de repostaje de hidrógeno utilizadas en estos proyectos. Además, al tratarse la gran mayoría de proyectos demostrativos, estas estaciones están altamente sobredimensionadas, como se puede apreciar en la Tabla 28, cuyos valores se han obtenido a partir de los datos referidos a los proyectos analizados que se presentan en la Tabla 27. En consecuencia, basar el procedimiento sobre una asignación directa del tipo de hidrogeneras atendiendo a la experiencia no resultaba recomendable.

Tabla 27. Principales características de las hidrogeneras de los proyectos analizados

Fuente: **Elaboración propia a partir de los proyectos analizados**

Proyecto	Vehículos		Capacidad depósito vehículos [kg H ₂]		Capacidad de depósito almacenam. [kg]	nº dispensadores	tiempo repostaje [min]		tiempo uso/dispensador [min]	tiempo total [min]
	Turismo	Bus	Turismo	Bus			Turismo	Bus		
CEP	15	14	4,6	44	1750	2	8	18	186	3600
Munich Airport Hydrogen Infrastructure Project	0	29	0	44	1500	2	0	18	261	3600
PSS	3	0	4	0	122	1	7	0	21	3600
JHFC	55	12	5	44	755	20	8	18	32,8	3600
STEP	0	3	0	44	350	1	0	15	45	3600
ECTOS	0	3	0	40	364	1	0	15	45	3600
CUTE	0	21	0	40	2500	9	0	18	42	3600
Bavarian Bus Demonstration Project	0	1	0	30	852	1	0	23	23	3600

Tabla 28. Resumen de las conclusiones obtenidas tras el análisis de los proyectosFuente: **Elaboración propia a partir de los proyectos analizados**

Proyecto	Hidrógeno almacenado en la instalación por vehículo	Dispensadores por vehículo	Grado de utilización de los dispensadores
CEP	2,5547	0,0690	0,0517
Munich Airport Hydrogen Infrastructure Project	1,1755	0,0690	0,0725
PSS	10,1667	0,3333	0,0058
JHFC	0,9402	0,2985	0,0091
STEP	2,6515	0,3333	0,0125
ECTOS	3,0333	0,3333	0,0125
CUTE	2,9762	0,4286	0,0117
Bavarian Bus Demonstration Project	28,4000	1,0000	0,0064

Consecuencia de lo expuesto en el párrafo anterior, se ha hecho imprescindible utilizar una formulación muy básica para realizar la herramienta, pero con el único fin de determinar de una forma genérica el número de dispensadores, (entendiendo como dispensador, cada boca de surtido, con su manguera y caudalímetro), el caudal de suministro, limitado por el número de dispensadores y un coste aproximado, todo ello de forma independiente a las particularidades de cada instalación, las cuales se tendrían todas en cuenta en niveles superiores de cálculo del modelo a desarrollar.

El único punto que se considera debe hacerse mayor hincapié, por su alta sensibilidad tanto en el aspecto técnico como económico, es el tema del tipo de abastecimiento de hidrógeno a la estación, motivo por el cual, para cada rango de número de vehículos a dar servicio, se estudian las siete posibilidades de suministro más representativas de entre las existentes:

- Abastecimiento exterior
- Electrolisis
- Reformado gas

- 90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis
- 90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado
- 80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior
- 80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior

El tipo de abastecimiento depende de cuatro variables básicas: el coste, la demanda, la ubicación de las instalaciones y la seguridad de abastecimiento. Por ello, pese a que la decisión final se suele tomar en función del menor coste posible, dependiendo la situación particular del cliente y sus necesidades, existirán casos en los que no sea suficiente este criterio. Puede que exista un caso en el que debido a la elevada cantidad de hidrógeno demandada, por motivos económicos, a priori sea aconsejable un abastecimiento exclusivamente exterior, pero que por motivos de seguridad de abastecimiento, bajo solicitud del cliente, se requiera de un electrolizador o un reformador. Incluso se puede dar el caso de que el cliente demande un tipo concreto de suministro.

Debido a los condicionantes iniciales y el fin último, que no es otro que el de realizar un pre-diseño de unas hidrogeneras tipo y fijar unas características y costes genéricos para cada una, se intentó dar unos umbrales de entrada (Número de vehículos) que intentaran representar desde una hidrogenera pequeña a otras de mayor tamaño, representadas por el número de dispensadores. Los umbrales representan por un lado el número máximo de autobuses, y por otro, el de turismos a los que es posible dar suministro en cada caso, incluyéndose todas las combinaciones intermedias entre estos umbrales.

5.2.1. Datos de partida

El objetivo de la Herramienta de Predimensionamiento es, a partir de un único dato inicial: los vehículos se prevé van a utilizarse diariamente en las instalaciones, se proporcione un predimensionamiento de la hidrogenera y un coste aproximado, que deberán ser lo más cercano a la realidad posible.

Así, dispondremos de las siguientes entradas como datos de partida de la metodología a seguir en el procedimiento:

1. Propulsión
2. Nº vehículos/día
3. Nº dispensadores
4. Capacidad de repostaje [kg/min]
5. Tipo abastecimiento
6. Capacidad abastecimiento in situ [kg/día]
7. Capacidad abastecimiento exterior [kg/día]
8. Capacidad de almacenamiento [kg]
9. Coste [€]

Como prerrequisito para realizar los cálculos, se debe conocer:

- La capacidad media de los depósitos de hidrógeno con los que cuentan los vehículos. En nuestro caso, guiados por el estudio del arte previamente realizado, supondremos 5 y 40 kg de hidrógeno para los depósitos de turismos y autobuses respectivamente.
- Diferentes modelos tanto de electrolizadores como de reformadores, con sus correspondientes capacidades diarias de producción de hidrógeno en kilogramos, con el objetivo de validar las soluciones técnicas propuestas, con independencia de que estos equipos sean los más óptimos técnica y económicamente. Estos equipos deberán de ser capaces, ya sea de forma individual o agrupando varios de ellos, de cubrir la demanda de los usuarios previstos para la instalación. La Tabla 29 recoge los dispositivos seleccionados para la elaboración del patrón.

Tabla 29. Relación de electrolizadores y reformadores seleccionados para elaborar la Herramienta de Predimensionamiento.

Fuente: **Elaboración propia a partir datos de fabricantes (HGenerators, HyGear)**

Equipo	Modelo	Capacidad de producción	
Electrolizador	HGenerators™ LM 30000	3,87	kgH ₂ /día (1,8 Nm ³ /h)
	HGenerators™ HG 50	107,52	kgH ₂ /día (50 Nm ³ /h)
	HGenerators™ HG 300	645,12	kgH ₂ /día (300 Nm ³ /h)
	HGenerators™ HG 400	810,7008	kgH ₂ /día (400 Nm ³ /h)
	HGenerators™ HG 500	1042,944	kgH ₂ /día (500 Nm ³ /h)
Reformador	HyGear HGS-V	10,8	kgH ₂ /día (5 Nm ³ /h)
	HyGear HGS-L	108	kgH ₂ /día (50 Nm ³ /h)
	HyGear 200	432	kgH ₂ /día (200 Nm ³ /h)
	HyGear 250	540	kgH ₂ /día (250 Nm ³ /h)

- El tiempo que se estima pueden permanecer en funcionamiento el equipo de producción de hidrógeno (electrolizador o reformador). En el caso que nos ocupa supondremos un tiempo de operación de 24 horas diarias.
- Las características que caracterizan el proceso de suministro de hidrógeno del dispensador. En especial es importante la velocidad con la que se suministra el hidrógeno. Para evitar utilizar un modelo comercial de dispensador, en la Herramienta de Predimensionamiento se ha utilizado como valor de referencia el valor medio recogido por el proyecto de demostración *Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Infrastructure Learning Demonstration* del DoE [112], Figura 57, para las 21.854 operaciones de repostaje registradas en las hidrogeneras participantes; y que es de 0,78 kgH₂/min, cuyo inverso denominaremos a partir de ahora $T_{\text{unitario}} = 1,282$ min/kgH₂.

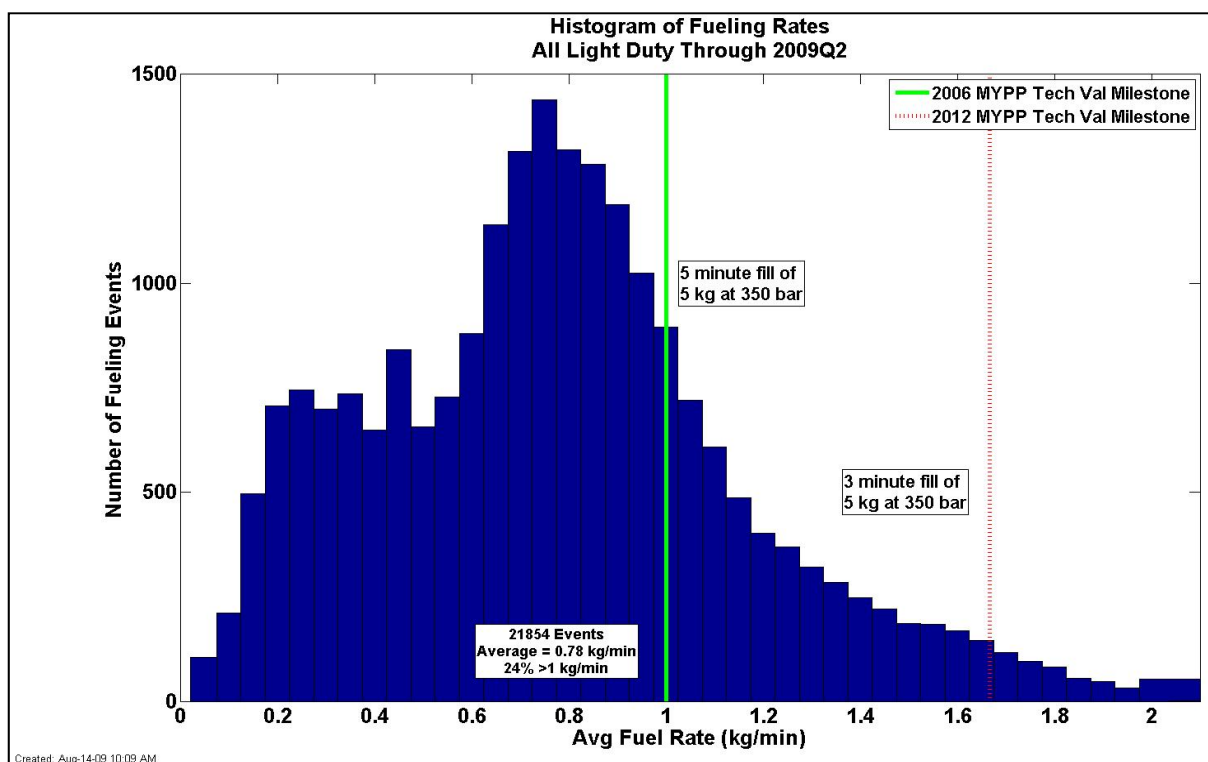


Figura 57. Cantidades de hidrógeno repostadas por minuto en el segundo cuarto del año 2009 en el proyecto *Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Infrastructure Learning Demonstration*.

Fuente: *U.S. Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory* [24]

- Las horas en las que permanece operativa la estación. Para este caso particular se consideran 24 horas diarias.
- El tiempo que cuesta realizar el repostaje ($T_{\text{repostaje}}$) de un turismo y un autobús, y que se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{repostaje}} [\text{min}] &= \\
 &= T_{\text{aproximación}} [\text{min}] + T_{\text{preparación}} [\text{min}] + T_{\text{salida}} [\text{min}] + T_{\text{suministro}} [\text{min}]
 \end{aligned}$$

[Ec. 1]

donde:

$T_{\text{aproximación}}$ es el tiempo que se tarda en aproximar al vehículo al dispensador de suministro

desde el momento en el que se está dentro de la hidrogenera. El valor de referencia se considera de 0,5 minutos.

$T_{\text{preparación}}$ es el tiempo que se tarda en preparar la operación de repostaje: colocación de la manguera, ajuste de boquerel. El valor de referencia se considera de 0,5 minutos.

T_{salida} es el tiempo que tarda el vehículo en abandonar la zona del dispensador y dejarla lista para el siguiente vehículo. Incluye el tiempo correspondiente a la recogida de la manguera y el tiempo que tarda el vehículo en dejar libre la zona. El valor de referencia se considera de 1 minuto.

$T_{\text{suministro}}$ es el tiempo que tarda en sí la operación de dispensado, desde los depósitos de la hidrogenera al depósito del vehículo. Para su cálculo se utilizará la siguiente fórmula:

$$T_{\text{suministro}} [\text{min}] = T_{\text{unitario}} \left[\frac{\text{min}}{\text{kgH}_2} \right] * \text{Capacidad depósito} [\text{kgH}_2]$$

[Ec. 2]

donde:

T_{unitario} representa el tiempo que cuesta el repostar un kilogramo de hidrógeno. Como valor de referencia se toma el de 1,282 min/kgH₂ indicado anteriormente.

Por lo tanto, la suma de los tiempos de aproximación, preparación y salida es de 2 minutos, y es un valor que se considera constante. El tiempo de repostaje será de 8,41 minutos y 53,28 minutos para turismos y autobuses respectivamente, en función de la capacidad media de sus correspondientes depósitos de hidrógeno.

5.2.2. Propulsión

Se refiere al tipo de propulsión utilizada por los vehículos considerados. Por defecto se tratará del hidrógeno para su utilización en pilas de combustible.

5.2.3. Número de vehículos

El procedimiento fija el número máximo de vehículos (coches y autobuses) a los que es posible dar servicio con la instalación predimensionada. El número de vehículos no está elegido desde el punto de vista del tamaño de flota, sino que desde el punto de vista del tamaño de la instalación, y a qué cantidad de vehículos tiene la capacidad de dar servicio, considerando como factor limitante el número de dispensadores, es decir el conjunto manguera - caudalímetro.

Para los casos en los que es suficiente con un dispensador, se plantean tres casos diferentes en función del tamaño de la hidrogenera, y por consiguiente, del tamaño del electrolizador/reformador con el que contará la instalación. Los tres casos planteados son para hidrogeneras preparadas para dar suministro como máximo a:

- 2 autobuses (Ec. 3) + 5 turismos (Ec. 4) ó 21 turismos (Ec. 5).
- 13 autobuses (Ec. 3) + 4 turismos (Ec. 4) ó 108 turismos (Ec. 5).
- 27 autobuses (Ec. 6) ó 171 turismos (Ec. 4).

Los tres casos incluyen todos los casos intermedios de autobuses y turismos que se encuentren entre estos límites.

Para determinar los vehículos límite para cada una de las dos primeras opciones, en las que no se opera a plena capacidad del dispensador, se ha procedido de la siguiente manera:

- Primero se selecciona el tamaño de electrolizador/reformador que se montará en la instalación para aquellas hidrogeneras basadas en una producción de hidrógeno estrictamente in situ, para así conocer la cantidad de hidrógeno diario que es posible suministrar. Conocidos los kilos de hidrógeno que se disponen diariamente, se calcula por un lado la cantidad máxima de autobuses a los que es posible dar suministro y por otro la cantidad máxima de turismos. Par ello se opera como se indica:

$$\text{Cantidad máxima autobuses} = \frac{\text{Tamaño electrolizador/ reformador} \left[\frac{\text{kg H}_2}{\text{día}} \right]}{\text{Capacidad media depósito autobús} [\text{kgH}_2]}$$

[Ec. 3]

- Si hay hidrógeno en exceso tras esta operación, se calcula el número máximo de turismos en los que se puede utilizar, siguiendo la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad turismos} &= \\ &= \frac{\text{Tamaño electrolizador / reformador} \left[\frac{\text{kgH}_2}{\text{día}} \right] - (\text{Cantidad máxima autobuses} * \text{Capacidad media depósito bus} [\text{kg}])}{\text{Capacidad media depósito turismo} [\text{kgH}_2]} \end{aligned}$$

[Ec. 4]

$$\text{Cantidad máxima turismos} = \frac{\text{Tamaño electrolizador / reformador} \left[\frac{\text{kg H}_2}{\text{día}} \right]}{\text{Capacidad media depósito turismo} [\text{kgH}_2]}$$

[Ec. 5]

- Para los casos en los que se opera a máxima capacidad de los dispensadores, el número límite de vehículos se calcula de la siguiente manera:

$$Cantidad\ máxima\ autobuses = \frac{1440 \left[\frac{min}{día} \right]}{T_{repostaje\ camiones} [min]} * N^{\circ} dispensadores$$

[Ec. 6]

$$Cantidad\ máxima\ turismos = \frac{1440 \left[\frac{min}{día} \right]}{T_{repostaje\ turismos} [min]} * N^{\circ} dispensadores$$

[Ec. 7]

Donde $T_{repostaje\ camiones}$ y $T_{repostaje\ turismos}$ se obtiene mediante la Ec. 1.

5.2.4. Número de dispensadores

Se refiere al número mínimo de dispensadores que son necesarios para cubrir la demanda de hidrógeno creada por los vehículos planteados.

Cuando se habla de dispensador en la presente tesis, se entiende como tal una boca de surtido, con su manguera y caudalímetro correspondiente, independientemente de que éstas se encuentren en el mismo equipo de dispensado o no. Queda incluida de este modo la posibilidad de dispensados simultáneos.

La presión de dispensado no se plantea. A la hora del cálculo, la herramienta considera un modelo ideal en el que sólo existe una única presión de suministro. Si se introduce este parámetro, aumentaría el número de variables de entrada, yendo en contra de la naturaleza de la Herramienta de Predimensionamiento, concebida para tener una única variable de entrada, el número/tipo de vehículos. Al tomarse de este modo, siempre se considera el caso más desfavorable, en el que la totalidad de los vehículos van a tener que usar un mismo dispensador, y que en el caso de flotas cautivas concretas podría darse el caso. Lógicamente, si se conoce que las presiones de suministro de los usuarios es a diferentes presiones, el problema no podrá resolto con un único dispensador; teniendo entonces que pasar de uno a dos dispensadores.

5.2.5. Capacidad de repostaje

Esta variable se refiere a la velocidad, medida en kilogramos hidrógeno suministrado por minuto, con que se realiza el suministro de hidrógeno por parte del dispensador.

Para elaborar la herramienta tabla patrón, se ha considerado un valor constante de 0,78 kgH₂/min obtenido, como se ha indicado en el apartado 5.2.1 *Datos de partida*. Datos de partida, del proyecto de demostración *Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Infrastructure Learning Demonstration* del DoE [112].

5.2.6. Tipo de abastecimiento

El tipo de abastecimiento depende de cuatro variables básicas: el coste, la demanda, la ubicación de las instalaciones y la seguridad de abastecimiento. Por ello, pese a que la decisión final se suele tomar en función del menor coste posible, dependiendo la situación particular del cliente y sus necesidades, habrá casos en los que no sea suficiente este criterio. Puede que exista un caso en el que debido a la elevada cantidad de hidrógeno demandada, por motivos económicos, a priori se aconseje un abastecimiento exclusivamente exterior, pero que por motivos de seguridad de abastecimiento, bajo solicitud del cliente, se requiere de un electrolizador o un reformador.

Para cada una de las opciones estudiadas, se contemplan para la hidrogenera siete estrategias diferentes de abastecimiento de hidrógeno:

- Abastecimiento exterior. Opción que plantea que la obtención del hidrógeno sea 100% de una planta exterior. El abastecimiento se realizaría mediante reparto con camión.
- Electrolisis. El abastecimiento de hidrógeno se realiza 100% in situ mediante electrolizadores.

- Reformado gas. El abastecimiento de hidrógeno se realiza 100% in situ mediante reformadores de gas.
- 90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis. Se realiza un abastecimiento prácticamente exterior (90%), con un pequeño equipo de abastecimiento in situ, en este caso un electrolizador, que permita, por un lado actuar como equipo de reserva, y por otro ajustar pequeñas variaciones en la demanda.
- 90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado. Se realiza un abastecimiento prácticamente exterior (90%), con un pequeño equipo de abastecimiento in situ, en este caso un reformador de gas, que permita, por un lado actuar como equipo de reserva, y por otro ajustar pequeñas variaciones en la demanda.
- 80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior. Se realiza un abastecimiento prácticamente in situ (80%), mediante un electrolizador, con un abastecimiento exterior de apoyo del 20%, que permita ajustar pequeñas variaciones en la demanda.
- 80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior. Se realiza un abastecimiento prácticamente in situ (80%), mediante un reformador de gas, con un abastecimiento exterior de apoyo del 20%, que permita ajustar pequeñas variaciones en la demanda.

5.2.7. Cantidad abastecimiento in situ

En función del tipo de abastecimiento determinado, se debe indicar la cantidad de hidrógeno que hay que generar *in situ* en la propia instalación. De igual modo, se señala el equipo, de los mostrados en la Tabla 29, que se acopla de mejor modo a la demanda generada. Esto es importante a la hora de que el coste estimado de la instalación no resulte demasiado sobredimensionado.

Estas cantidades se obtienen mediante la Ec. 8, en función del número de vehículos máximos para los que se dimensiona la hidrogenera, multiplicando el número de vehículos obtenidos mediante la Ec. 3 y la Ec. 4, ó la Ec. 7, según el caso que nos ocupe, por las capacidades medias de sus respectivos depósitos y por los porcentajes correspondientes cuando proceda.

$$Cantidad H_2 [kg] = N^o \text{ veh\u00edculos} * Capacidad \text{ dep\u00f3sito} [kgH_2] + \% \text{ in situ}$$

[Ec. 8]

En los casos en los que los dispensadores operan a su capacidad m\u00e1xima, la cantidad de hidr\u00f3geno a generar se ve condicionado por el n\u00famero de repostajes m\u00e1ximos que se pueden dar en un d\u00eda, y en este caso, la cantidad necesaria de hidr\u00f3geno para dar suministro a una flota enteramente de autobuses ser\u00e1 mayor que si se tratan de turismos, ya que la suma de los tiempos muertos entre lo que son los suministros propiamente dichos (tiempos de aproximaci\u00f3n, preparaci\u00f3n y salida) ser\u00e1 menor. Es decir, el dispensador estar\u00e1 m\u00e1s tiempo operativo si se dedica exclusivamente a repostar autobuses, y por lo tanto suministrar\u00e1 m\u00e1s hidr\u00f3geno.

En los dos casos establecidos con un \u00fanico dispensador, como \u00e9ste no opera a capacidad m\u00e1xima, la cantidad de hidr\u00f3geno a generar es independiente del tiempo de repostaje y depende \u00fanicamente del n\u00famero de veh\u00edculos, por lo que la cantidad de hidr\u00f3geno a suministrar desde la hidrogenera ser\u00e1 la misma si se realiza el repostaje \u00fanicamente de autobuses, o si se realiza de turismos, o una mezcla de ambos.

5.2.8. Cantidad abastecimiento exterior

En funci\u00f3n del tipo de abastecimiento se debe indicar la cantidad de hidr\u00f3geno que hay que generar *in situ* en la propia instalaci\u00f3n.

Estas cantidades se obtienen mediante la Ec. 8, en funci\u00f3n del n\u00famero de veh\u00edculos m\u00e1ximos para los que se dimensiona la hidrogenera, multiplicando el n\u00famero de veh\u00edculos obtenidos mediante la Ec. 3 y la Ec. 4, o la Ec. 7, seg\u00fan el caso que nos ocupe, por las capacidades medias de sus respectivos dep\u00f3sitos y por los porcentajes correspondientes cuando proceda.

5.2.9. Capacidad de almacenamiento

Nos indica los kilogramos de hidrógeno que debe ser capaz de almacenar el sistema de almacenamiento de la hidrogenera.

Tanto la tecnología como la presión de almacenamiento se han dejado abiertas, al igual que se hizo con las presiones de dispensado a los vehículos, ya que son parámetros que están estrechamente ligados, e incluir cualquiera de estos aspectos supondría aumentar el número de variables de entrada a la herramienta.

Para su cálculo se supone, de acuerdo a la documentación consultada [90], una capacidad de almacenamiento igual a la capacidad de producción diaria *in situ* de la instalación.

Esta cantidad de hidrógeno almacenada es necesaria por motivos de seguridad de abastecimiento, para aquellos casos en los que se produzcan averías o actividades de mantenimiento. Con el fin de justificar estas medidas, se realiza a continuación un análisis del número y duración de las operaciones de mantenimiento llevadas a cabo en las instalaciones de proyectos y experiencias previas estudiadas:

Los electrolizadores y reformadores, en especial los primeros, suele ser equipo fiables; muestra de ello son los resultados de mantenimiento mostrados por el proyecto *CUTE* (K. Stolzenburg, 2009 [64]). En este proyecto, en el caso particular de las instalaciones de suministro de hidrógeno que contaban con sistema de producción de hidrógeno basado en la electrólisis del agua, los motivos por los que permaneció fuera de operación la mencionada unidad de producción vienen reflejados, en porcentaje sobre el total, en la siguiente figura.

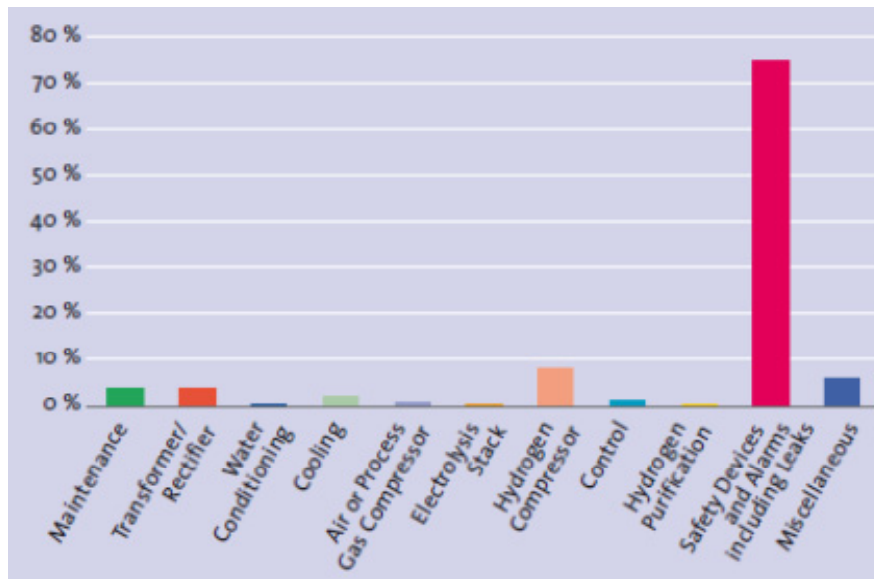


Figura 58. Causas por las que las instalaciones de producción de hidrógeno basadas en la electrólisis del agua permanecieron inoperativas (%)

Fuente: **Proyecto CUTE [91]**

En el mismo proyecto, para el caso particular de las instalaciones de suministro de hidrógeno que contaban con sistema de producción de hidrógeno basado en el reformado por vapor de agua del metano, los motivos por los que permaneció fuera de operación la mencionada unidad de producción vienen reflejados, en porcentaje sobre el total, en la siguiente figura.

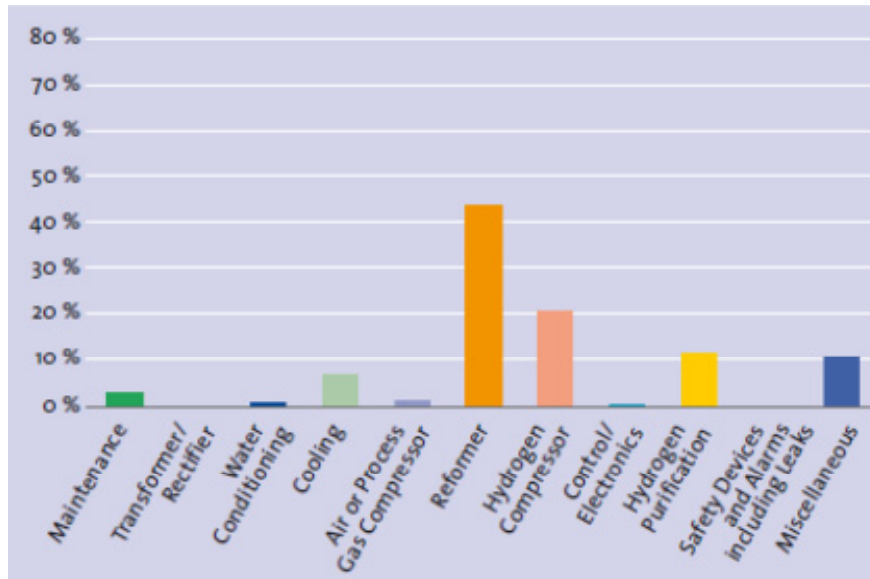


Figura 59. Causas por las que las instalaciones de producción de hidrógeno basadas en el reformado por vapor de agua del metano permanecieron inoperativas (%)

Fuente: Proyecto *CUTE* [91]

Por otro lado, los resultados mostrados a partir del proyecto de demostración *Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Infrastructure Learning Demonstration del DoE*, Figura 60, aunque muestran unos porcentajes elevados en lo que se refiere a las horas de operación de mantenimiento, tanto en electrolizadores como en reformadores, también indican unos porcentajes elevados de números de operaciones de mantenimiento, lo que indica que las operaciones son de corta duración.

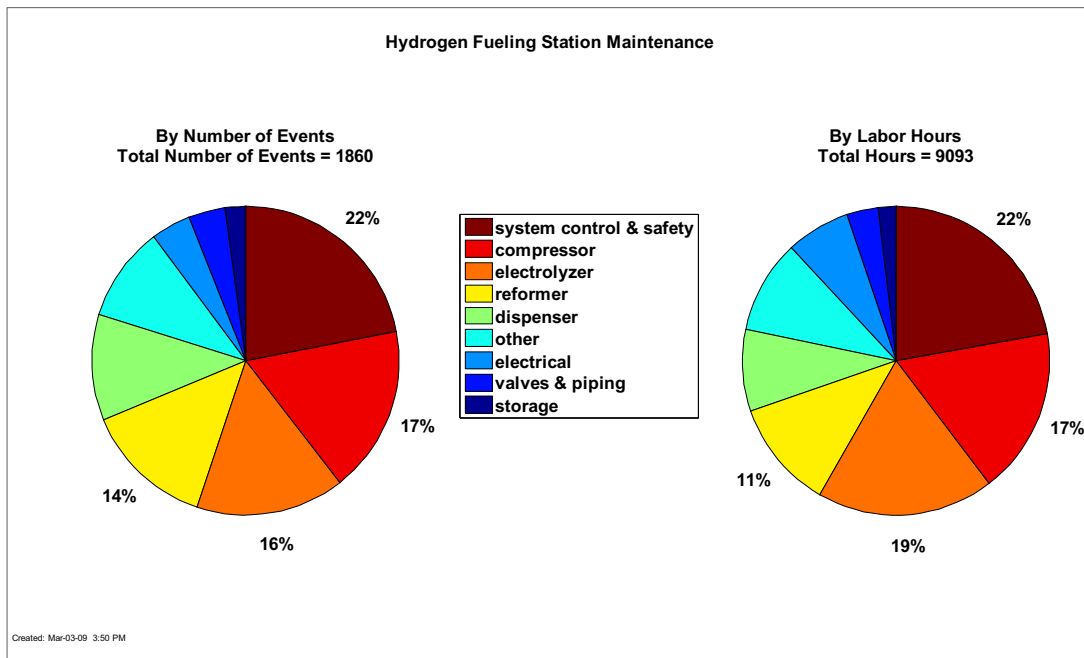


Figura 60. Porcentajes del número de operaciones y de horas dedicadas al mantenimiento de los diferentes elementos y sistemas de que consta una hidrogenera

Fuente: National Renewable Energy Laboratory

Así mismo, para el hidrógeno suministrado desde el exterior, se supone que el reparto se realiza dos veces por semana. Este dato podría ser variable en función de la cantidad de hidrógeno a suministrar. Ello requiere un análisis económico que presente una relación coste del reparto frente a coste del equipo de almacenamiento.

5.2.10. Costes

El coste estimado de la hidrogenera se determinará a partir de las características indicadas en los apartados previos.

Partiendo de la idea inicial de que la Herramienta de Predimensionamiento se ha concebido para dar un coste genérico de lo que costaría una hidrogenera tipo a partir de unos datos de entrada que se reducen únicamente al número de vehículos, el coste se calcula de forma

simplificada en función de los equipos principales de los que constará, en función del tipo de abastecimiento de hidrógeno y del equipo de almacenamiento.

Los costes de construcción se considerarán constantes y no se incluirá ni el coste del terreno necesario para instalar la estación de suministro ni los costes de mantenimiento.

No obstante, se debe tener en cuenta que el coste total de cada uno de los escenarios que se plantean es sensible a un gran número de variables, de hecho, no sólo será función de los equipos necesarios para llevar a buen cabo cada una de los procesos que son requeridos en cada uno de los escenarios (equipos de producción, compresión, almacenamiento y dispensación de hidrógeno), el coste de la electricidad necesaria para llevar a cabo el proceso de electrolisis y de las placas fotovoltaicas o aerogeneradores si se contempla la opción de generación con energía renovable, sino que además, para un mismo número de vehículos, el coste final dependerá de la ubicación de las instalaciones, no pudiendo basarnos en unos criterios generales, ya que los pueden valer para la construcción de una hidrogenera en una ciudad, que cuenta con todas las infraestructuras necesarias, no nos valdrán para una instalación en paraje de difícil acceso, o para otra que se encuentre junto a una planta industrial de generación de hidrógeno.

5.2.11. Ejemplo funcional

Con el fin de probar el funcionamiento del procedimiento fijado para la Herramienta de Predimensionamiento, recogida en formato Excel en la Tabla 30, en este apartado de la tesis se proponen dos supuestos para dos situaciones ficticias diferentes:

- Caso 1. Instalación de una hidrogenera en las instalaciones de una empresa de alquiler de vehículos con conductor, que ha adquirido dos autobuses y seis turismos propulsados con pila de combustible.

- Caso 2. Instalación de una red de 5 hidrogeneras en una ciudad de tamaño pequeño-medio que ha hecho una fuerte apuesta por la introducción de los vehículos de hidrógeno en la ciudad y tiene unas previsiones de que en un horizonte temporal corto, el 1% del campo de turismos, que asciende a 120.000 unidades, serán propulsados por esta nueva tecnología.

Ante estas solicitudes, con la ayuda de la herramienta se realizará un predimensionamiento de las instalaciones necesarias para dar solución a los problemas planteados. Recordar que los resultados que con esta herramienta se proporcionan no son específicos para cada instalación en particular, sino que se trata de una primera aproximación a la solución final, que habrá que estudiar a posteriori a partir de las particularidades y condicionantes de cada caso concreto.

Tabla 30. Herramienta de Predimensionamiento
Fuente: Elaboración propia

Propulsión	Nº vehículos/día (límites)		Nº Dispensadores	Capacidad de repostaje (kg/min)	Tipo abastecimiento	Cantidad abastecimiento <i>in situ</i>		Cantidad abastecimiento exterior (kg/día)	Capacidad almacenamiento (kg)	Coste (M€)
	Autobuses	Turismos				(kg/día)	nº equipos			
H2	2	5	1	0,78	Abastecimiento exterior	0	0	105	367,5	1
					Electrolisis	105	1* HG 50	0	105	2
					Reformado gas	105	1* HGS-L	0	105	1,7
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	10,5	3* LM 30000	94,5	341,25	1,3
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	10,5	1* HGS-L	94,5	341,25	1,2
H2	13	4	1	0,78	80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	84	1* HG 50	21	157,5	2,1
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	84	1* HGS-L	21	157,5	1,8
					Abastecimiento exterior	0	0	540	1890	1,1
					Electrolisis	540	1* HG 300	0	540	2,7
					Reformado gas	540	1* HyGear 250	0	540	2,2
H2	0	108	1	0,78	90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	54	1* HG 50	486	1755	2,1
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	54	1* HGS-L	486	1755	1,8
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	432	1* HG 300	108	810	2,8
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	432	1* HyGear 250	108	810	2,3
					Abastecimiento exterior	0	0	1080	3780	1,2
H2	27	0	1	0,78	Electrolisis	1080	1* HG 500	0	1080	4
					Reformado gas	1080	2* HyGear 250	0	1080	3,2
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	108	1* HG 50	972	3510	2,3
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	108	1* HGS-L	972	3510	2
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	864	1* HG 400	216	1620	3,5
H2	54	0	2	0,78	80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	864	2* HyGear 200	216	1620	2,8
					Abastecimiento exterior	0	0	2160	7560	1,3
					Electrolisis	2160	2* HG 500	0	2160	6,7
					Reformado gas	2160	4* HyGear 250	0	2160	5,4
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	216	2* HG 50	1944	7020	3,4
H2	0	342	3	0,78	90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	216	2* HGS-L	1944	7020	3
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	1728	2* HG 400	432	3240	5,6
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	1728	4* HyGear 200	432	3240	5
					Abastecimiento exterior	0	0	3240	11340	1,4
					Electrolisis	3240	3* HG 500	0	3240	9,5
H2	81	0	3	0,78	Reformado gas	3240	6* HyGear 250	0	3240	7,6
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	324	3* HG 50	2916	10530	4,5
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	324	3* HGS-L	2916	10530	4
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	2592	3* HG 400	648	4860	7,7
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	2592	6* HyGear 200	648	4860	7

El único dato de entrada requerido para obtener el predimensionamiento de la instalación es el número y tipo de vehículos que se prevén serán los usuarios de la hidrogenera. Así para los dos casos se obtiene:

Caso 1

El número de vehículos es:

2 autobuses

6 turismos,

Por lo tanto a la tabla se entra por la entrada correspondiente a este número de vehículos que es la segunda, ya que se pasa del límite de vehículos de la primera entrada (2 autobuses + 4 turismos) y está por debajo del límite de la segunda.

Tabla 31. Entrada de la tabla Herramienta de Predimensionamiento solución al Caso 1

Fuente: **Elaboración propia**

Propulsión	Nº vehículos/día (límites)		Nº Dispensadores	Capacidad de repostaje (kg/min)	Tipo abastecimiento	Cantidad abastecimiento <i>in situ</i>		Cantidad abastecimiento exterior	Capacidad almacenamiento	Coste
	Autobuses	Turismos				(kg/día)	nº equipos	(kg/día)	(kg)	(M€)
H2	2	5	1	0.78	Abastecimiento exterior	0	0	105	367.5	1
					Electrolisis	105	1* HG 50	0	105	2
					Reformado gas	105	1* HGS-L	0	105	1.7
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	10.5	3* LM 30000	94.5	341.25	1.3
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	10.5	1* HGS-L	94.5	341.25	1.2
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	84	1* HG 50	21	157.5	2.1
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	84	1* HGS-J	21	157.5	1.8
					Abastecimiento exterior	0	0	540	1890	1.1
H2	13	4	1	0.78	Electrolisis	540	1* HG 300	0	540	2.7
					Reformado gas	540	1* HyGear 250	0	540	2.2
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	54	1* HG 50	486	1755	2.1
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	54	1* HGS-L	486	1755	1.8
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	432	1* HG 300	108	810	2.8
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	432	1* HyGear 250	108	810	2.3
					Abastecimiento exterior	0	0	4080	12240	4.4
					Electrolisis	4080	12* HG 300	0	4080	20.4

De este modo se determina directamente:

- El número de dispensadores requeridos = 1 (si la presión de dispensado es la misma para todos los vehículos)
- Cantidad de abastecimiento *in situ* y exterior, capacidad de almacenamiento que debe tener la instalación y coste aproximado, todo ello en función de siete tipos de abastecimiento de hidrógeno de la hidrogenera:

En caso de que la instalación no se tenga ninguna restricción de diseño y esté bien comunicada, se seleccionará la opción más barata, es decir, el caso de abastecimiento exterior. Por lo tanto no se requerirá abastecimiento *in situ*, la cantidad de hidrógeno a abastecer desde el exterior es de 540 kilogramos al día y se requerirá un sistema de almacenamiento de 1890 kilogramos de hidrógeno, el equivalente a las previsiones de consumo de media semana, debido a que como ya se ha indicado, se ha presupuestado que el suministro se realiza dos veces a la semana.

En el caso de que se tenga algún tipo de restricción de diseño, como que el hidrógeno se debe obtener a partir de energías renovables, porque, por ejemplo, la empresa quiere dar una imagen de empresa comprometida con el medio ambiente, se seleccionará la opción de electrolisis o 80% electrolisis + 20% suministro exterior. Por lo tanto, si sólo hay generación *in situ* mediante electrolisis, se deberán generar 540 kilogramos al día, se requerirá de un electrolizador de suficiente tamaño y un sistema de almacenamiento con capacidad para 540 kilogramos, las previsiones de consumo diario.

Caso 2

El número de vehículos es:

$$150.000 \cdot 0.01 = 1500 \text{ turismos}$$

Como se quieren 5 instalaciones:

$$1500/5 = 300 \text{ turismos por cada hidrogenera}$$

Por lo tanto a la tabla se entra por la entrada correspondiente a este número de vehículos que es la cuarta, ya que se pasa del límite de vehículos de la tercera entrada (hasta 171 turismos) y está por debajo del límite de la segunda (342 turismos).

Tabla 32. Entrada de la tabla Herramienta de Predimensionamiento solución al Caso 2

Fuente: **Elaboración propia**

Propulsión	Nº vehículos/día (límites)		Nº Dispensadores	Capacidad de repostaje (kg/min)	Tipo abastecimiento	Cantidad abastecimiento <i>in situ</i>		Cantidad abastecimiento exterior (kg/día)	Capacidad almacenamiento (kg)	Coste (M€)
	Autobuses	Turismos				(kg/día)	nº equipos			
H2	27 0	0 171	1	0,78	Abastecimiento exterior	0	0	1080	3780	1,2
					Electrolisis	1080	1* HG 500	0	1080	4
					Reformado gas	1080	2* HyGear 250	0	1080	3,2
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	108	1* HG 50	972	3510	2,3
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	108	1* HGS-L	972	3510	2
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	864	1* HG 400	216	1620	3,5
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	864	2* HyGear 200	216	1620	2,8
H2	54 0	0 342	2	0,78	Abastecimiento exterior	0	0	2160	7560	1,3
					Electrolisis	2160	2* HG 500	0	2160	6,7
					Reformado gas	2160	4* HyGear 250	0	2160	5,4
					90% Abastecimiento exterior + 10% Electrolisis	216	2* HG 50	1944	7020	3,4
					90% Abastecimiento exterior + 10% Reformado	216	2* HGS-L	1944	7020	3
					80% Electrolisis + 20% Abastecimiento exterior	1728	2* HG 400	432	3240	5,6
					80% Reformado gas + 20% Abastecimiento exterior	1728	4* HyGear 200	432	3240	5

De este modo se determina directamente:

- El número de dispensadores requeridos por hidrogenera = 2 (si la presión de dispensado es la misma para todos los vehículos)
- Cantidad de abastecimiento *in situ* y exterior, capacidad de almacenamiento que debe tener la instalación y coste aproximado, todo ello en función de siete tipos de abastecimiento de hidrógeno de la hidrogenera. En función de las tecnologías con las que se quiera dotar a cada instalación, se realizará el predimensionado de los equipos.

Si se opta por la opción más barata, será la que presenta un abastecimiento a las instalaciones exclusivamente exterior, no requerirá de equipo de generación *in situ* y el equipo de almacenamiento de hidrógeno deberá tener capacidad para 7560 kilogramos de hidrógeno.

5.3. Dimensionamiento de Instalaciones de Hidrógeno

En este apartado de la tesis, el objetivo que persigue es desarrollar las bases funcionales de un modelo de cálculo que permita determinar cuáles deben de ser las principales características que debe reunir una estación de suministro de hidrógeno en función de las necesidades que debe ser capaz de cubrir y los condicionantes exteriores que la rodeen y establecer las bases funcionales de una posible herramienta informática que implemente este modelo de cálculo.

5.3.1. Modelo de cálculo

En el presente apartado de la tesis se van a recoger las especificaciones de requisitos, la descripción del nuevo sistema y la planificación del modelo de cálculo planteado.

5.3.1.1. Alcance del sistema

a. Estudio de la solicitud

A continuación se van a plantear las necesidades a satisfacer por el sistema planteado. El objetivo final del modelo de cálculo es obtener una serie de resultados que se pueden dividir en seis grupos:

1. Estación de suministro de hidrógeno
2. Sistema de abastecimiento de hidrógeno
3. Mantenimiento de instalaciones y flotas
4. Costes
5. Seguimiento

A continuación se detalla cada uno de estos grupos:

1. Estación de suministro de hidrógeno:

Dentro del conjunto de resultados pertenecientes a este grupo, se encuentran los siguientes:

- Número de estaciones de suministro necesarias.
- Características de las mismas:
 - o Extensión de terreno requerido.
 - o Dimensiones de los sistemas de almacenamiento.
 - o Número de dispensadores.
 - o Presiones de suministro.
 - o Consumo de hidrógeno.
- Ubicación geográfica. Estos resultados dependerán de los siguientes factores:
 - o Comunicaciones existentes y necesarias.
 - o Modo de abastecimiento del hidrógeno.
 - o Características de urbanización.
 - o Tipo de suelo.

2. Sistema de abastecimiento de hidrógeno

Se deberá determinar:

- Si se apuesta por una producción propia de hidrógeno o se compra a un tercero.
- Si se produce de forma centralizada o descentraliza, ya sea in situ, o en pequeñas estaciones de producción intermedias.
- En el caso de producción centralizada o en estaciones intermedias, debe determinarse la logística de abastecimiento que optimice el proceso tanto técnica como económicamente: desde donde parte el hidrógeno, como se transporta, por dónde y hasta dónde.

3. Mantenimiento de instalaciones y flotas

El modelo de cálculo deberá facilitar la ubicación apropiada de los talleres y centros de mantenimiento y asistencia según las previsiones de actividad.

4. Costes

Normalmente, los costes son uno de los factores determinantes en la toma de decisiones. Por ello es importante proporcionar unos costes lo más aproximados posibles, tanto de la instalación en general, como de los costes desglosados de todas las partidas por separado. Para lograr resultados lo más aproximados a la realidad, existirá la opción de introducir, por parte del usuario, los precios y costes actualizados de todos los equipos y operaciones.

A continuación se recogen todos los costes que deberán ser atendidos por el sistema, si bien, no todos deberán contemplarse en todas las configuraciones de instalación elegidas por el usuario, o recogidas por el modelo de cálculo.

- Costes de mantenimiento:
 - Mano de obra: salarios, formación
 - Materiales
 - Instalaciones
 - Equipos

- Costes de operación:
 - Mano de obra: salarios, formación
 - Materiales
 - Instalaciones
 - Equipos

- Coste de abastecimiento del hidrógeno:
 - Coste de producción de hidrógeno:

- Energía eléctrica
- Combustible
- Coste de los equipos:
 - Equipo de pretratamiento de agua
 - Electrolizador
 - Reformador
 - Purificador
 - Compresor
 - Licuefactor
 - Evaporador
 - Tanque/depósito/botellas de almacenamiento HCG
 - Tanque/depósito criogénicos de almacenamiento HL
 - Coste de instalación
- Coste de las instalaciones
- Coste de adquisición del hidrógeno:
 - Precio por kilogramo del hidrógeno adquirido a un tercero
- Coste de transporte del hidrógeno:
 - Tubería
 - Bomba de presión
 - Compresor
 - Camión cisterna HCG
 - Plataforma botellas HCG
 - Camión cisterna criogénica HL
 - Bomba criogénica

- Coste de la hidrogenera:
 - Compresor
 - Licuefactor
 - Evaporador
 - Tanque/depósito/botellas de almacenamiento HCG
 - Tanque/depósito criogénicos de almacenamiento HL

- Dispensador de hidrógeno gas
 - Dispensador de hidrógeno líquido
 - Coste de instalación
- Coste del terreno:
- Adquisición de parcela
 - Urbanización
 - Accesos
 - Servicios

5. Seguimiento

El sistema permitirá realizar un seguimiento del comportamiento de la instalación y su empleo a través del análisis estadístico de diferentes variables en diferentes marcos temporales, reflejados en forma de tablas o gráficas. Las variables registradas serán las siguientes:

- Consumos.
- Visitas.
- Costes de operación.
- Incidencias.

Estos resultados no deben ser independientes, sino que deben relacionarse los unos con los otros, es decir, el modificar, por ejemplo los costes, puede producir una variación de la ubicación óptima de la estación de suministro o de las instalaciones de mantenimiento.

b. Identificación del alcance del sistema

El método de cálculo debe dar solución a las incógnitas previstas en el punto anterior, con el fin último de lograr un criterio decisional que permita ubicar con garantías una estación de suministro de hidrógeno atendiendo a criterios económicos, técnicos y medioambientales, a la

vez que permita realizar un seguimiento de la instalación a partir de datos estadísticos de registros históricos de resultados.

Con el fin de lograr un resultado lo más fiel a la realidad posible, es imprescindible que el modelo de cálculo se nutra de datos reales y actualizados referentes a las variables iniciales que planteará el sistema.

Para la elaboración de la herramienta se parte de la premisa de que, aunque se conocen cuáles son las demandas y se determinarán los elementos que deben incluirse en la instalación de hidrogena, esta elección se realizara de acuerdo al criterio de cubrir la demanda en función del sistema de abastecimiento de hidrógeno, los costes y el espacio disponible, por el contrario, aspectos como el diseño interno y la arquitectura pormenorizada de la instalación no es tenida en cuenta.

Se podría decir que la herramienta de cálculo se sirve de datos técnicos, medioambientales y económicos para concluir en una serie de resultados finales de alto contenido logístico, de gran valor a la hora de enfrentarse con un proyecto de estas magnitudes.

El desarrollo y planteamiento debe realizarse teniendo en cuenta el estado del arte de la tecnología actual relacionada con las tecnologías del hidrógeno aplicadas al sector transporte, con el fin de asegurar unas soluciones acorde con los últimos avances técnicos y en base a los procedimientos alcanzados.

c. Especificación del alcance del estudio de viabilidad del sistema

A continuación se detallan las fases y las actividades de que consta el proceso de desarrollo del modelo de cálculo. Aunque deberán realizarse en el orden expuesto, las últimas deberán realimentar a las primeras conforme vayan surgiendo problemas o se localicen nuevas oportunidades.

El proceso total de desarrollo del modelo de cálculo se divide en cuatro fases, y cada una de ellas a su vez se subdivide en varias actividades:

FASE 1: Análisis de requisitos y especificaciones del modelo de cálculo

Fase en la que, a partir de las necesidades expuestas por el usuario final, se establecen las bases para el desarrollo del modelo de cálculo. A partir del análisis de estas necesidades, se determinan los principios técnicos y conceptuales que permiten solucionar la problemática planteada.

En esta primera fase se llevan a cabo las siguientes actividades:

- Análisis de las necesidades planteadas y reflexión sobre los resultados finales a obtener.
- Análisis de la situación actual y de los precedentes existentes a nivel técnico. Actividad de gran utilidad a la hora de ayudar a enfocar las soluciones a desarrollar.
- Estudio de viabilidad. Recoge el punto de partida del modelo de cálculo y facilita su futuro desarrollo.
- Determinación de las características y especificaciones con las que deberá contar el modelo de cálculo atendiendo a los resultados finales deseados.
- Programación de tareas. Constituye en sí misma una herramienta de control de plazos que facilitará el desarrollo del modelo de cálculo en el periodo de tiempo deseado.

FASE 2: Diseño del modelo de cálculo

Un buen diseño, permite facilitar mucho el trabajo de desarrollo del modelo de cálculo. En esta fase, a partir de las especificaciones iniciales que debe cumplir el modelo de cálculo, se determina el procedimiento a seguir por el sistema para lograr los resultados requeridos.

Las actividades de que consta esta segunda fase son las siguientes:

- Determinación de variables. Conjunto de datos tanto de partida como de salida, requeridos por el modelo para iniciar el cálculo.

- Análisis de los casos de uso.
- Elección y descripción de cálculos y operaciones. Estos cálculos y operaciones son los que relacionan las variables de entrada entre sí y permiten obtener los resultados que satisfacen las necesidades planteadas.
- Análisis del sistema. Se realizan diagramas de decisión en los que a partir de todas las variables, ayudan a entender el mecanismo del sistema de información.
- Creación de listados de equipos. Se crean los listados con las especificaciones técnicas de los diversos equipos de los que se componen una estación de suministro de hidrógeno o de producción de hidrógeno; o los costes estimados de todas las variables de entrada consideradas. Estos listados son importantes especialmente cuando no se conocen datos concretos que son esenciales para el inicio del proceso de cálculo.
- Creación de históricos de datos que recojan las soluciones obtenidas a lo largo del tiempo y que permitan obtener datos iniciales de entrada lo más próximos a la realidad posibles.

FASE 3: Validación del modelo de cálculo

Se llevarán a cabo una serie de pruebas que verifiquen que el modelo de cálculo trabaja correctamente y de acuerdo a las especificaciones deseadas. Estas serán de dos tipos, y deberán complementarse entre sí:

- Verificación mediante simulaciones. Dimensionamiento de instalaciones dadas. Una vez obtenidos los resultados, se comprobará que tienden a coincidir con resultados reales o teóricos validados o con los ensayos de campo.
- Verificación del modelo de cálculo mediante ensayos en campo. En instalaciones existentes, una vez obtenidos los resultados, se comprobará que tienden a coincidir con resultados teóricos validados o con las simulaciones realizadas con el modelo de cálculo.

FASE 4: Realimentación del modelo de cálculo

Se llevarán a cabo las modificaciones requeridas por el modelo de cálculo y se solventarán posibles errores detectados en la fase de validación. Se incorporaran mejoras sensibles a poder ser incorporadas y que se hayan detectado durante el proceso de desarrollo.

5.3.1.2. Estudio de la situación actual

No se ha detectado ningún modelo de cálculo que satisfaga las necesidades planteadas por el usuario final. No obstante, debido a la inminente proliferación de este tipo de instalaciones, la oportunidad que aquí se presenta se revela como interesante y de un gran interés general.

Se prevé, según las conclusiones extraídas de ciertos proyectos a nivel europeo y mundial, que en los 10-20 próximos años, el número de vehículos que requieran hidrógeno para su propulsión se incremente notablemente, desde las primeras épocas, en las que la demanda será reducida y destinada predominantemente a flotas cautivas y de demostración, a épocas más avanzadas, en las que la demanda será elevada al haberse extendido el uso de este tipo de vehículos al consumidor a nivel global.

El desarrollo de este modelo de cálculo ayudará a localizar de la manera más eficiente posible el número y la ubicación de las estaciones de suministro de hidrógeno, así como la dimensión de las mismas, atendiendo a las diferentes demandas que se produzcan en las diferentes épocas de implementación. Esta elección de la ubicación óptima, que atiende a criterios logísticos, pero también técnicos, es de gran importancia debido al elevado coste que supone la construcción de este tipo de instalaciones.

En la actualidad, no se sigue ningún criterio de optimización para ubicar este tipo de instalaciones. Al tratarse de flotas localizadas, su ubicación atiende a criterios de proximidad, y en muchos casos se trata de instalaciones de uso privado. Es por ello que si se generalizara la utilización del hidrógeno para el uso en el transporte y se abrieran al público estas instalaciones, resultarían insuficientes y su explotación presentaría graves problemas logísticos, tanto a la hora de abastecer a la propia instalación del hidrógeno demandado,

como de acceso a las estaciones por parte de los usuarios. Esta problemática es la que se pretende solucionar con el desarrollo de este modelo de cálculo.

5.3.1.3. Diseño del modelo de cálculo

Las características generales que el modelo de cálculo debe poseer se recogen en la Tabla 33.

Tabla 33. Características del modelo de cálculo

Fuente: **Elaboración propia**

Características modelo de cálculo
Ayuda al usuario en la toma de decisiones para el estudio, análisis, diseño e instalación de una infraestructura de hidrogeneras.
Permitir determinar de la manera más aproximada posible varias alternativas. Cada una de estas alternativas proporciona el número de hidrogeneras, si estas deben abastecerse con hidrógeno producido <i>in situ</i> o bien mediante abastecimiento externo vía vehículo industrial o tubería, número de dispensadores necesarios en cada una, capacidad de almacenamiento necesaria, que sistema utilizar para la producción del hidrogeno, los costes de cada posible alternativa, reducción de las emisiones.
Una vez se disponen de todas las aproximaciones con unos costes medios relativos, el usuario podrá determinar con mayor precisión, a partir de la elección de una de las alternativas anteriores: el número exacto de hidrogeneras, el tipo de cada una de ellas, la ubicación en un mapa, el impacto medioambiental, el coste estimado en base a históricos.

Para facilitar la comprensión del funcionamiento de esta herramienta se presentan a continuación una serie de diagramas junto a una explicación detallada de los mismos, que ayudan a entender el mecanismo que sigue este sistema de información para ayudar al usuario a decidir sobre la implantación de una compleja red de hidrogeneras.

En la Figura 61 se expone el funcionamiento global del sistema de ayuda para decidir la configuración de la infraestructura de hidrogeneras. A continuación se explica el funcionamiento del mismo.

En primer lugar se necesita determinar el número de hidrogeneras necesario para satisfacer la demanda total de hidrogeno. En esta primera aproximación no se considerarán restricciones relativas al tráfico necesarias para la buena planificación de la logística, como son la determinación de las zonas que son las más transitadas, el tiempo de distribución, colapsos en hora punta. Estos parámetros se tendrán en cuenta en el ajuste final del problema, en el que se devolverá la solución óptima.

Dato imprescindible previo a determinar el número y la dimensión óptima de las estaciones de repostaje de hidrógeno es la demanda diaria de hidrógeno prevista que va a tener que satisfacer. Esta demanda futura de hidrógeno es posible determinarla a partir de:

- Las previsiones de demanda de la flota de vehículos, públicos o privados, que van a utilizar hidrógeno en un horizonte temporal determinado.
- En el caso de tratarse de flotas cautivas o privadas con recorridos conocidos, el estudio y diseño de las rutas a seguir por los vehículos.

La primera de las opciones es más estimativa y se basa en la asignación de la demanda en función del número de vehículos de cada tipo: turismos, furgonetas, autobuses o camiones.

En el segundo de los casos, al tratarse de recorridos conocidos, se puede realizar un análisis más en profundidad de las rutas seguidas, lo que permite alcanzar unas estimaciones de la demanda mucho más cercanas a la realidad. Este caso se desarrolla a continuación.

A partir del estudio y análisis de las líneas de transporte existentes, es posible obtener los datos a partir de los cuales es posible calcular la estimación de demanda de hidrógeno total diaria utilizada para realizar los trayectos fijados. Estos datos son:

- Tipos de vehículos utilizados y sus características (consumos de hidrógeno y capacidad de los depósitos de hidrógeno o autonomía).
- Número de recorridos por vehículo.
- Número de vehículos por ruta.
- Tiempos de recorrido.

- Longitudes de las líneas.
- Puntos de inicio y fin de ruta.
- Puntos por los que debe pasar la ruta (paradas de bus, zonas de carga-descarga).

Conocida la demanda a satisfacer por las hidrogeneras y las características de la flota de vehículos que van a utilizarlas, es posible calcular el número y el tamaño que deben tener las estaciones, es decir, el número de dispensadores necesarios para cubrir la demanda máxima que se produzca.

La demanda total de hidrógeno, y las demandas por estado y presión utilizada por los diferentes tipos de vehículos pueden ser calculadas mediante las siguientes fórmulas:

$$Demanda H_2 \text{ Líquido [kg]} = \sum (\text{Consumo líquido} \left[\frac{kg}{100km} \right] * N^{\circ} km)$$

[Ec. 9]

$$Demanda H_2 \text{ Gas200bar [kg]} = \sum (\text{Consumo Gas200bar} \left[\frac{kg}{100km} \right] * N^{\circ} km)$$

[Ec. 10]

$$Demanda H_2 \text{ Gas350bar [kg]} = \sum (\text{Consumo Gas350bar} \left[\frac{kg}{100km} \right] * N^{\circ} km)$$

[Ec. 11]

$$Demanda H_2 \text{ Gas700bar [kg]} = \sum (\text{Consumo Gas700bar} \left[\frac{kg}{100km} \right] * N^{\circ} km)$$

[Ec. 12]

$$\begin{aligned} & \textit{Demanda } H_2 \textit{ Total} [\text{kg}] = \\ & \textit{Demanda } H_2 \textit{ Líquido} [\text{kg}] + \textit{Demanda } H_2 \textit{ Gas}200\textit{bar} [\text{kg}] + \\ & + \textit{Demanda } H_2 \textit{ Gas}350\textit{bar} [\text{kg}] + \textit{Demanda } H_2 \textit{ Gas}700\textit{bar} [\text{kg}] \end{aligned}$$

[Ec. 13]

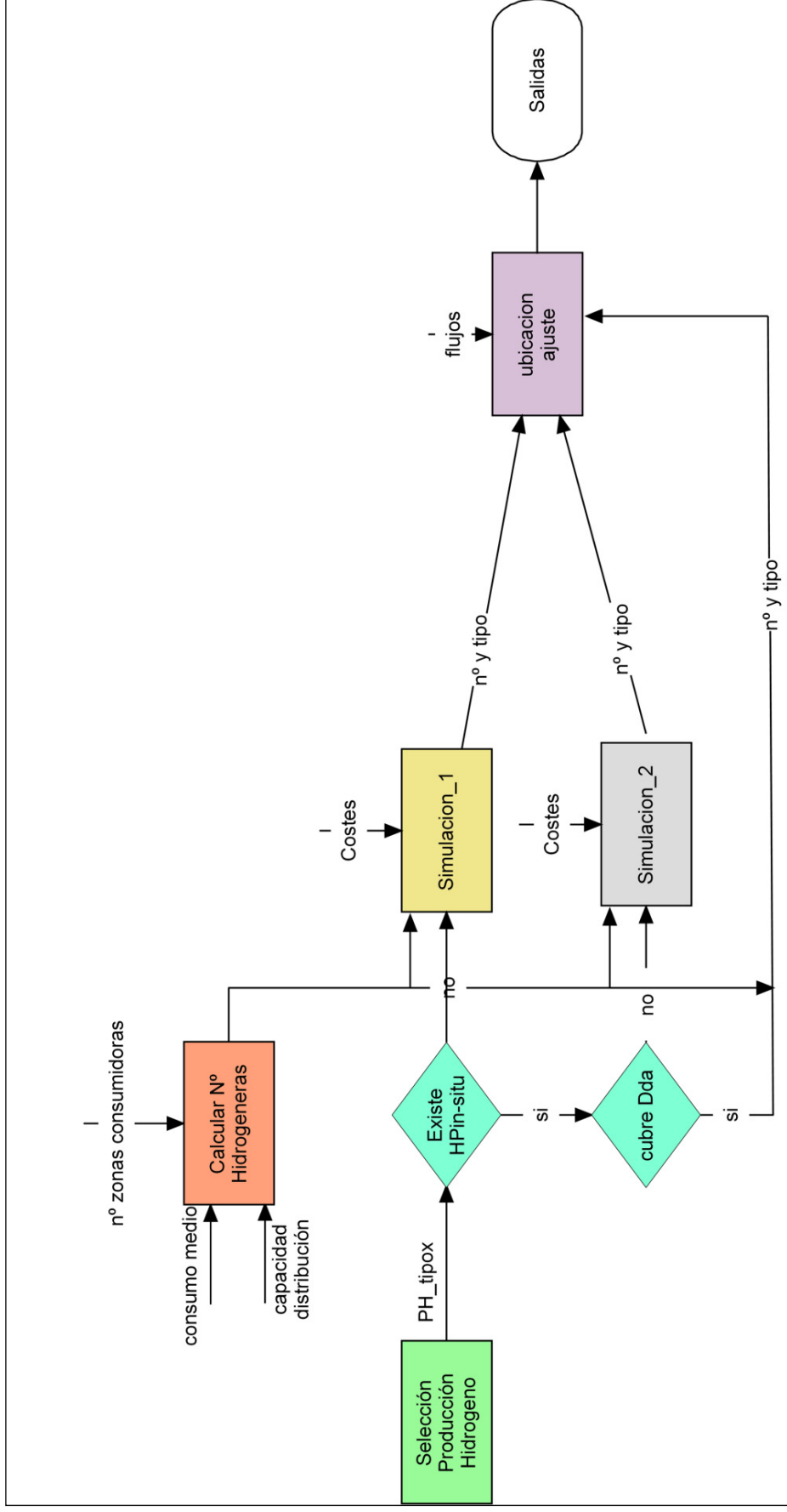


Figura 61. Esquema General

Fuente: Elaboración propia

A continuación se seleccionará el modo que se utilizará para la producción del hidrogeno.

Una vez se han determinado el número de hidrogeneras y el sistema de producción de hidrógeno, se considera si existe *a priori* alguna planta de producción de hidrogeno o hidrogenera que produzca hidrógeno *in situ* (*HP_insitu*), ya que esto determina el proceso a seguir:

- *No existe HP in situ*: se tendrá que construir una planta como mínimo que produzca el hidrogeno y (n-1) a las que se les distribuya el hidrogeno, siendo n el número de hidrogeneras determinado en el cálculo del número de hidrogeneras. Este caso se estudia en el proceso que se ha denominado *simulación_1*.
- *Existe HP in situ*: en este caso se debe conocer si la planta existente es capaz de satisfacer la nueva demanda o no.

En caso de no ser capaz, se tendrá que determinar si una posible ampliación de la planta cubriría la nueva demanda, es decir, examinando todas las posibles alternativas. Este caso se estudia en el proceso que se ha denominado *simulación_2*.

Si satisface la demanda, se deberá pasar directamente al proceso de ubicación y ajuste de las hidrogeneras de distribución. Es decir, no será necesario instalar ninguna planta o instalación de producción de hidrogeno, porque la existente es capaz de cubrir las necesidades existentes.

Una vez estudiado el caso general, a continuación se estudia cada uno de los módulos para facilitar la comprensión del funcionamiento global. A continuación se enumeran los diferentes módulos, junto con su color identificativo:

1. *Calculo de la Demanda de Hidrógeno y del Número de Hidrogeneras* – Naranja
2. *Selección Sistema de Producción de Hidrógeno* – Verde
3. *Proceso de Decisión* – Azul
4. *Simulación_1*

5. Simulación_1.1 – Amarillo
6. Simulación_1.2 – Amarillo
7. Simulación_2 – Gris
8. Ubicación y Ajuste – Morado

a. Cálculo del Número de Hidrogeneras

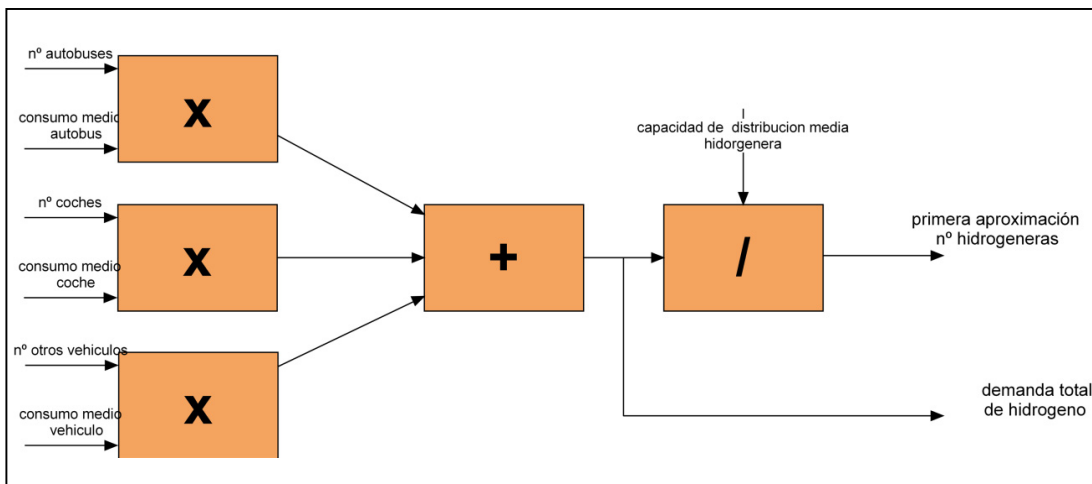


Figura 62. Cálculo Número Hidrogeneras

Fuente: **Elaboración propia**

Las entradas de este módulo se corresponden con los consumos medios de todos los tipos de vehículos, el número estimado de vehículos de cada tipo demandantes de hidrógeno y la capacidad de distribución media de una hidrogenera.

Los tipos de vehículos considerados son turismos, autobuses y otros vehículos pesados, todos ellos con unos consumos de hidrógeno medios elevados.

La demanda total de hidrógeno se determinará a partir de las Ec. 9, Ec.

$$Demanda H_2 Gas200bar [kg] = \sum (Consumo Gas200bar \left[\frac{kg}{100km} \right] * N^o km)$$

[Ec. 1010 , Ec. 11, Ec. 12 y Ec. 13 mostradas anteriormente.

Dividiendo la demanda prevista total por la capacidad de distribución máxima de una hidrogenera, considerando tanto los tiempos requeridos para el dispensado, como los tiempos de espera entre repostaje, se determinará en una primera aproximación del número de hidrogeneras necesarias.

Las salidas de este módulo de cálculo no constituyen salidas de la herramienta, sino resultados intermedios utilizados por el resto de los procesos.

b. Selección Sistema de Producción de Hidrógeno

Este proceso se muestra en la Figura 63 donde se puede ver con más detalle.

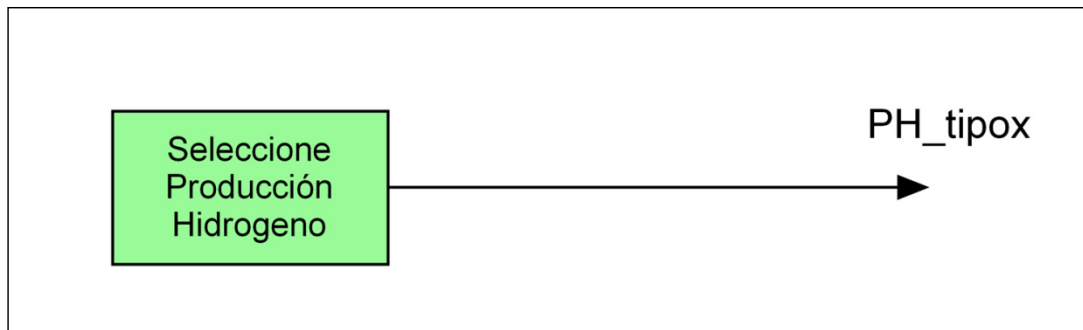


Figura 63. Selección Sistema de Producción de Hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia**

Simplemente constará de un diálogo con el usuario, a través del cual, bien se solicitará al usuario que seleccione el sistema de producción de hidrógeno deseado, obteniendo como respuesta el sistema la demanda energética requerido, o bien directamente recomendará el sistema de producción de hidrógeno, atendiendo principalmente a criterios de demanda, económicos y logísticos.

De esta forma, este módulo proporcionará respuesta a la tecnología de producción de hidrógeno a utilizar: PH_tipox, donde x se refiere a electrólisis o reformado.

c. *Proceso de Decisión*

Una vez seleccionado el sistema de producción del hidrógeno, se inicia un diálogo con el usuario con el objetivo de conocer si existe alguna hidrogenera con producción *in situ* o planta de generación de hidrógeno próxima a la hidrogenera.

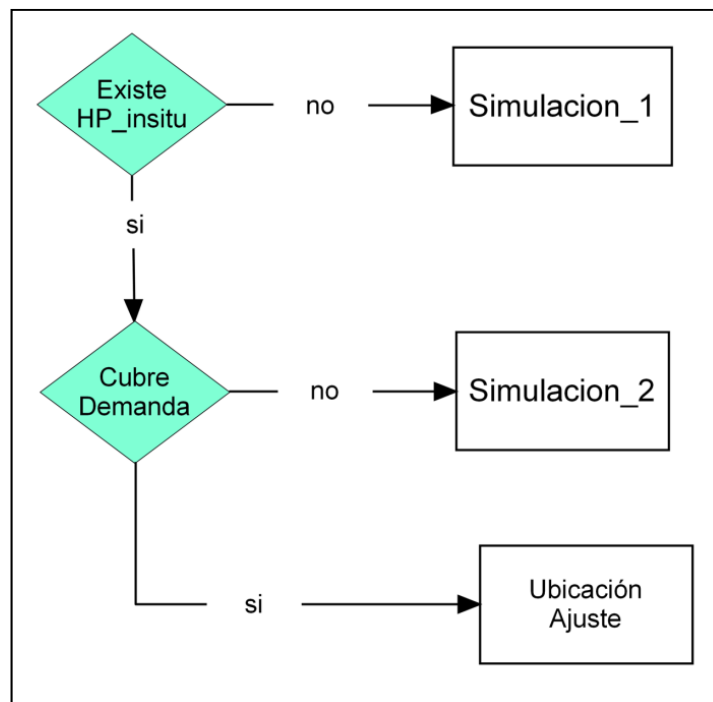


Figura 64. Definir *Proceso de Simulación*

Fuente: **Elaboración propia**

En caso que la respuesta sea negativa, se iniciará el proceso que se ha denominado *Simulación_1*. Además este proceso se dividirá a su vez en dos subprocesos denominados *Simulación_1.1* y *Simulación_1.2*.

En caso que la respuesta sea positiva, se iniciara otro dialogo con el usuario. En primer lugar se solicitará la capacidad de producción instalada y la demanda a la que está sometida. Si la suma de la demanda que ya tenía la instalación más la que ahora se plantea supera la capacidad de producción de la planta, se plantean dos casos:

- a) Demanda actual más demanda anterior es inferior a la capacidad instalada; lo que implica pasar directamente al proceso de ubicación y ajuste, ya que no es necesario instalar o ampliar nuevas plantas de producción de hidrogeno.
- b) Demanda actual más demanda anterior es superior o igual a la capacidad instalada; entonces entraremos en *Simulación_2*, ya que es necesario realizar una ampliación de la instalación o crear nuevas plantas de producción de hidrogeno.

Los módulos *Simulación_1* y *Simulación_2* se ejecutaran de forma reiterada. El número de simulaciones a realizar dependerá del número de hidrogeneras n devueltas en el proceso de *Cálculo de Número de Hidrogeneras*. El estudio en ambos casos se iniciara considerando que solo se va a instalar una planta de producción de hidrogeno abastecida por la fuente de energía seleccionada y $(n-1)$ hidrogeneras que serán abastecidas por camiones cisternas a partir del hidrogeno producido por la planta obtenida en el módulo *Simulación_1.1* de la Figura 65 o en el módulo *Simulación_2* de la Figura 67. El proceso se repetirá considerando que el número de plantas de producción de hidrogeno es $m > 1$ hasta $m = n$ y el número de hidrogeneras de distribución $(n-m)$, por tanto, en este último caso denominado *Simulación_1.2* y mostrado en la Figura 66, el número de reiteraciones será $(n-1)$. Una vez se disponga de todos los resultados, el usuario seleccionará aquella que reporte menor coste, mayor rendimiento o aquella que presente unas prestaciones más favorables.

Una vez haya terminado el proceso de simulación y el usuario haya seleccionado la opción resultante entre las posibles más acorde a sus objetivos, se iniciará el último módulo del modelo de cálculo planteado, denominado *Ubicación y Ajuste*.

Antes de continuar, se debe aclarar que hasta ahora se ha supuesto que todas las hidrogeneras van a tener el mismo tamaño, es decir, todas van a distribuir la misma cantidad de hidrogeno. Sin embargo, estos resultados se someterán a un último módulo denominado *Ajuste y Ubicación*, que podrá hacer variar los resultados, repercutiendo en el aumento de tamaño de algunas hidrogeneras o su reducción, con la consecuente reducción o aumento del número de hidrogeneras respectivamente.

d. Simulación_1

Simulación_1.1

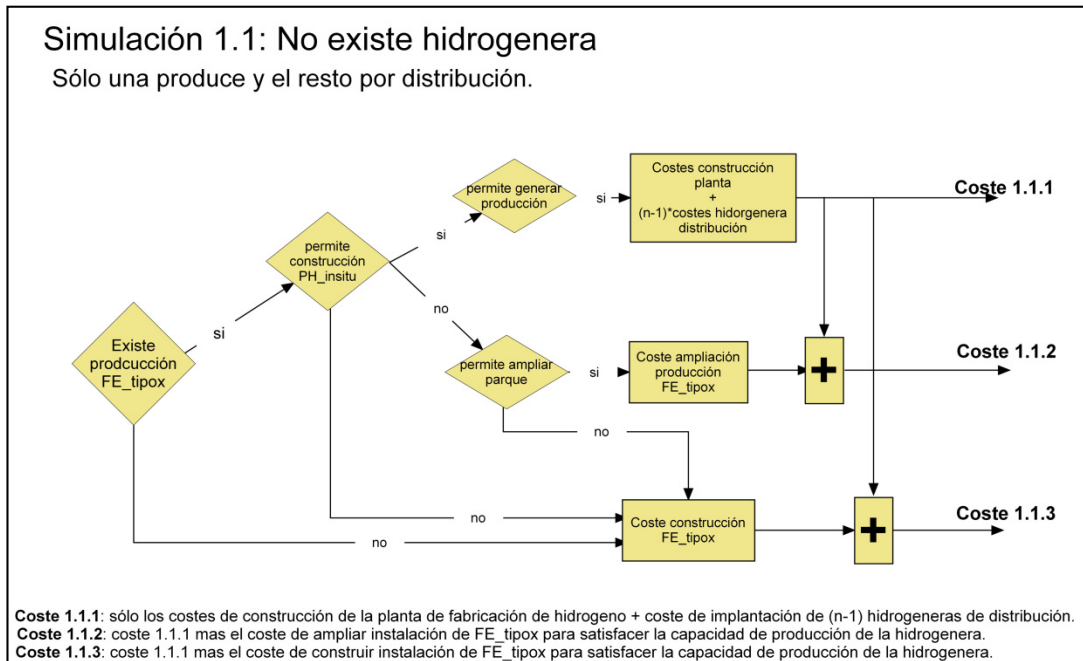


Figura 65. Simulación_1.1

Fuente: **Elaboración propia**

El proceso *Simulación_1* se ejecutará en el caso de que no exista hidrogenera con producción *in situ* o planta de producción de hidrogeno próxima a la hidrogenera. En este caso, en el módulo *Simulación_1.1*, se simulará que sólo una planta de producción va a abastecer a las n hidrogeneras, es decir, esa instalación va a ser la encargada de producir toda la demanda de hidrógeno resultado del proceso *Cálculo del Número de Hidrogeneras*. Por tanto, en este caso, resulta justificado que el análisis comience preguntando al usuario si existe capacidad de generación de energía para su utilización como fuente de energía primaria en el proceso de producción del hidrógeno, cualquiera que sea la tecnología empleada.

1. En caso afirmativo: Se pregunta si la energía producida es capaz por si sola de abastecer al sistema de generación de hidrogeno, instalando la planta de producción de hidrogeno en las inmediaciones.
 - 1.1. En caso de que la energía producida sea suficiente para abastecer a la planta, los costes resultantes serán los siguientes: coste de construcción de la planta de producción más el coste de implantación de $(n-1)$ hidrogeneras de distribución; *Coste 1.1.1* de la Figura 65.
 - 1.2. En caso de que la energía producida no sea suficiente para abastecer por si misma a la planta de producción, se obtendrán dos posibles resultados en función de si es posible ampliar las instalaciones de generación de energía o no:
 - 1.2.1. Existe la posibilidad de ampliar las instalaciones. En este caso se podrá ubicar la planta de producción de hidrogeno y los costes totales serán: costes de la opción anterior: *Coste 1.1.1*, más el coste de la ampliación de la fuente de energía: *Coste 1.1.2*.
 - 1.2.2. No existe la posibilidad de ampliar las instalaciones; ver caso 2 a continuación.
2. En caso negativo, deberá financiarse la construcción de unas nuevas instalaciones de producción de energía, a lo que habría que sumar los costes del apartado 1.1 o el *Coste 1.1.1*, dando lugar a lo que se ha denominado *Coste 1.1.3*.

Simulación_1.2

En la *Simulación_1.2*, se simula con la hipótesis de que m plantas de producción van a abastecer a las $(n-m)$ hidrogeneras, es decir, cada una de las m plantas de producción se van a dedicar a producir una parte de la demanda total (producción = demanda total/ m). Por lo tanto, al contrario que ocurre en el caso anterior, no se va a preguntar si existe fuente de energía que abastezca las instalaciones, ya que el objetivo es situarlas en distintos y dispares puntos de forma que se abastezcan a partir de su propia fuente de energía.

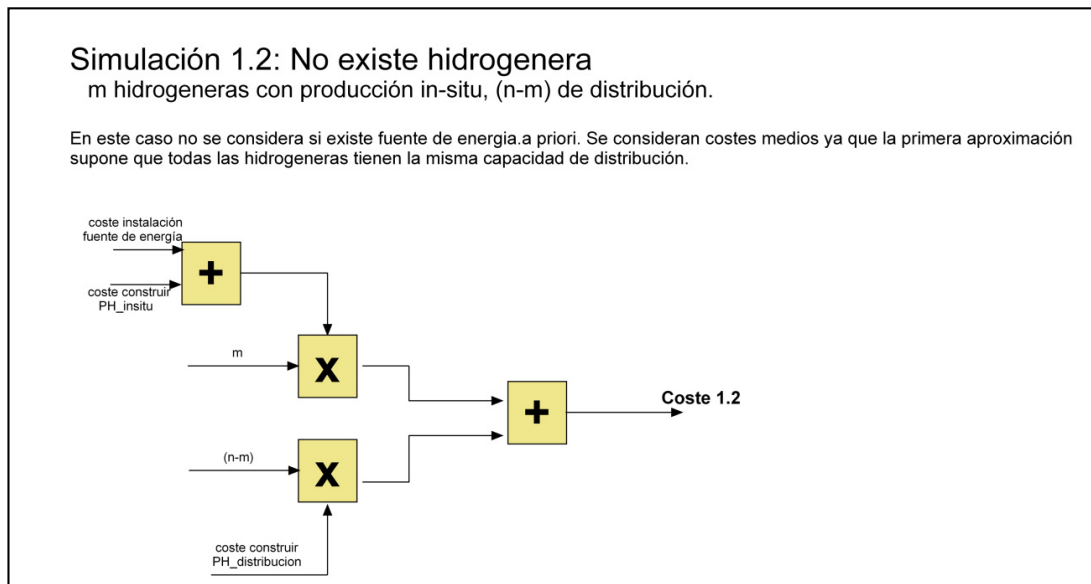


Figura 66. Simulación_1.2

Fuente: **Elaboración propia**

Como se ha mencionado anteriormente, este proceso se ejecutara $(n-1)$ veces, considerando todos los posibles casos. Es decir, desde $m=2$ hasta $m=n$ plantas de producción de hidrogeno obteniendo $(n-1)$ veces el *Coste 1.2.*, reflejado en la Figura 66.

En este módulo se calcularán los costes que suponen la instalación de la fuente de energía necesaria para abastecer una planta de producción del tamaño correspondiente más el coste de construcción de la propia planta de producción. Al hacer el producto por m , se tiene el coste total de las m hidrogeneras de producción *in situ* abastecidas por la fuente de energía x . Por otro lado, al multiplicar por $(n-m)$ el coste de instalar una planta de distribución, se obtendrá el coste total de las hidrogeneras distribución. Por último para obtener el coste total, se suman los dos resultados anteriores y se tiene el Coste 1.2.

e. Simulación_2

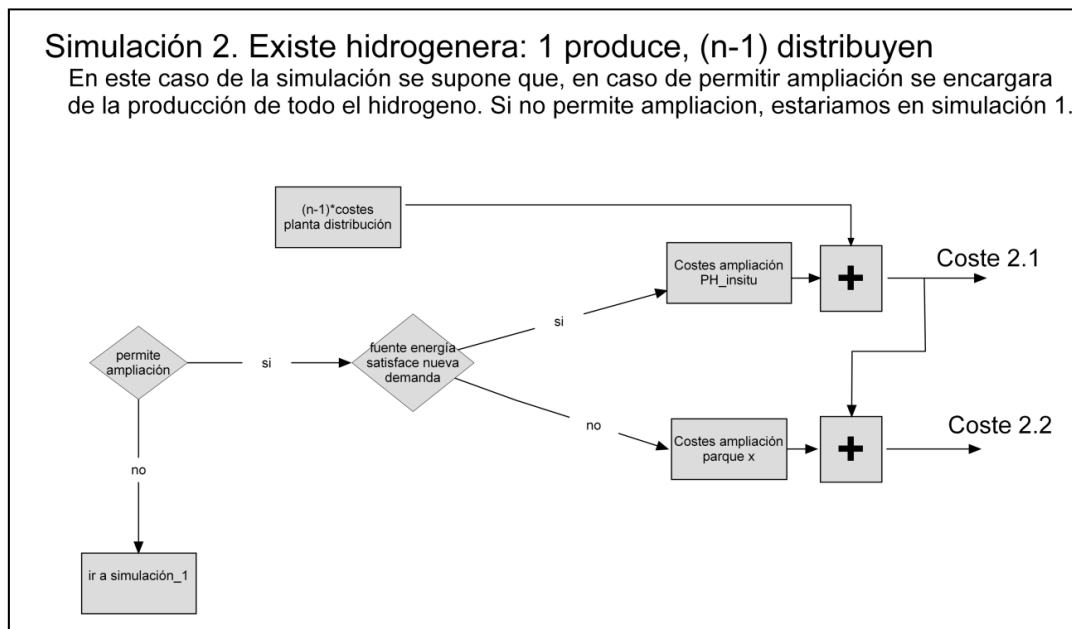


Figura 67. Simulación_2

Fuente: **Elaboración propia**

Este submódulo recoge los casos en el que existe una hidrogenera en la que se realiza producción *in situ* del hidrógeno necesario o en que existe una planta de producción de hidrógeno en una localización próxima a la hidrogenera, pero que cuenta con la particularidad que por ella misma no es capaz de abastecer toda la nueva demanda (la demanda total calculada en el proceso de *Cálculo del Número de Hidrogeneras*) más la demanda anterior. El proceso comenzará con un diálogo con el usuario en el que se solicitará información sobre la posibilidad de ampliación de la instalación de producción existente para dar cabida a la nueva producción.

1. En caso afirmativo, se deberá conocer si la fuente de energía puede dar suministro a la ampliación de dicha instalación de producción de hidrógeno:
 - 1.1. Si la respuesta es positiva, se consideraran los costes de la ampliación de la planta de producción de hidrogeno más los costes de la creación de $(n-1)$ plantas de distribución de hidrogeno, obteniendo el *Coste 2.1* de la Figura 67.

1.2. Si la respuesta es negativa, a los costes anteriores habrá que añadir el coste de la ampliación del sistema de generación de energía, resultando el Coste 2.2 de la Figura 67.

2. En caso negativo, se ejecutaría el módulo de *Simulación_1*, ejecutando en primer lugar el caso *Simulación_1.1* y en segundo lugar el caso *Simulación_1.2*.

Es decir, en caso de no ser posible la ampliación se debería ejecutar directamente el módulo de *Simulación_1* teniendo en consideración los dos submódulos en los que se divide: *Simulación_1.1* y *Simulación_1.2*. Esto se debe a que se tendría que reubicar la situación de las plantas de producción de hidrogeno, tanto si se desea que exista sólo una o varias.

f. Ubicación y Ajuste

Este paso es el más complejo de todos, ya que es necesario considerar un mayor número de parámetros. Antes de nada, será necesario mostrar al usuario todas las alternativas resultantes en el proceso anterior. Este seleccionará la opción que más le interese.

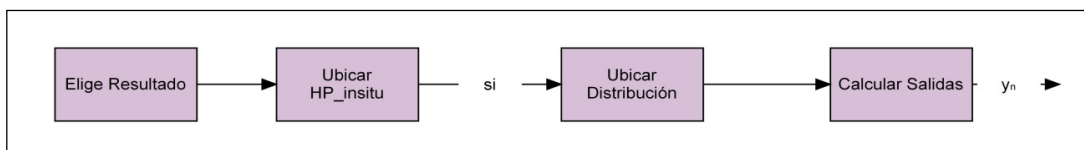


Figura 68. Ubicación y ajuste

Fuente: **Elaboración propia**

A continuación se ubicarán las hidrogeneras de producción *in situ*, y a posteriori aquellas abastecidas a partir de centrales de producción de hidrógeno.

Hidrogenas de producción in situ (Figura 69): esta posible solución a seleccionar por el usuario estará constituida por m hidrogenas. Para realizar la ubicación de las mismas será necesario comprobar si existen m zonas que satisfacen los siguientes condicionantes:

- Se dispone de terreno suficiente para la instalación (también se considerará el terreno necesario para instalar la fuente de energía en caso de ser necesario)
- Condiciones de seguridad
- Flujos de tráfico superiores a un mínimo

En el caso de que se cumplan todas estas condiciones, es decir, se han encontrado m zonas que satisfacen todas las condiciones, se determina la ubicación óptima donde colocarlas y el coste total.

En caso de que no se cumplan todos estos condicionantes, se deberá realizar un ajuste: se dividirá la demanda total entre $(m-1)$ hidrogenas y se volverá al paso anterior, pero ahora para $(m-1)$ hidrogenas. Este proceso se seguirá realizando hasta que se obtenga una solución o se agoten todas las posibilidades.

Hidrogenas de distribución: Una vez finalizado el proceso anterior, se tendrán ubicadas las x hidrogenas, pero necesitaremos satisfacer la demanda de las $(n-x)$ que no han sido todavía instaladas. En este caso, se buscarán las zonas con mayores flujos de vehículos y se irán situando las hidrogenas para satisfacer la demanda de esas instalaciones. Este proceso se repetirá hasta que quede cubierta toda la demanda. Una vez se tengan ubicadas todas ellas y se disponga del tamaño de cada una, se calculará el coste total.

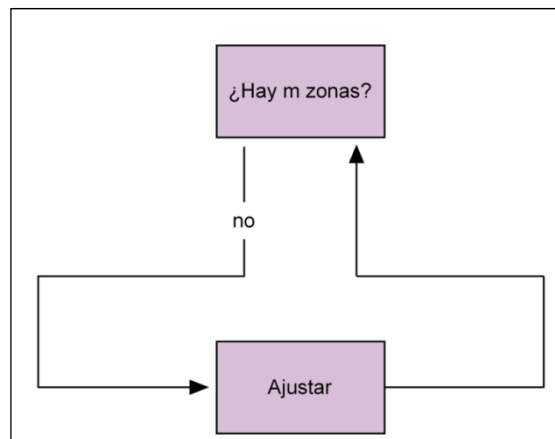


Figura 69. *Ubicación Hidrogenera in situ*

Fuente: **Elaboración propia**

A continuación se indica el algoritmo que satisface el proceso ¿Hay m zonas? del submódulo *Ubicación Hidrogenera in situ*:

```
Mientras Que  $i < m$  y existe hacer
  Si hay zona donde
    Hay Terreno
    Satisface seguridad
    Flujos de circulación mayor que un mínimo
  Entonces existe and  $i++$ ;
  Sino existe =false;
Fin si;
Fin Mientras Que;
```

Si el bucle anterior proporciona una solución positiva, se procederá a ubicar las hidrogeneras en las que no se da generación *in situ*, en caso contrario se ejecutara el proceso *Ajustar* de la Figura 69 y se volverá al proceso ¿Hay m zonas?. El proceso *Ajustar*: suprimirá una hidrogenera de las m anteriores, realizará un ajuste de la producción de la demanda total entre las $(m-1)$ y redimensionara los tamaños de las nuevas hidrogeneras.

El algoritmo a utilizar para ubicar las hidrogeneras en las que se produce distribución del hidrógeno necesario desde las plantas de producción centralizada, es el siguiente:

```
Mientras Que demanda>0 hacer
    Zona = Buscar_zona_mayor_flujo();
    demandaZona = Satisfacer_demanda(zona);
    ubicarHidrogenera(zona, demandaZona);
    demanda = demanda – demandaZona;
Fin Mientras Que;
```

Por último nos queda el proceso Calcular_Salidas. Este procedimiento calculará los costes y eficiencias energéticas como criterios para analizar las diferentes opciones tecnológicas y determinar cuál es la óptima. Para ello se estudia toda la cadena, que incluye: abastecimiento (agua, energía, gas o hidrógeno), producción, almacenamiento y suministro.

Se calcularán las opciones posibles y se ordenarán en función de cada uno de los criterios de selección: de menor a mayor en el caso del coste y de mayor a menor en el caso de la eficiencia.

A continuación se le asociará a cada una de las opciones un valor (R_{ϵ} y R_{η} para coste y eficiencia respectivamente) que tomará los valores de 1 hasta n , siendo n el número de opciones estudiadas. A la mejor opción se le asociará el valor n , mientras que la peor tomará el valor de 1.

Para obtener un resultado en el que se tenga en consideración ambos criterios, se sumarán los valores asociados a cada una de las opciones multiplicados cada uno por un peso (λ_{ϵ} , λ_{η}), que tomará un valor u otro en función de que se quiere dar mayor importancia a uno de los criterios de selección, siendo en este caso la opción óptima aquella cuya suma (R_{τ}) sea mayor.

$$OPCIÓN \acute{O}PTIMA = MAX(R_T)$$

[Ec. 14]

Siendo:

$$R_T = (R_e \times \lambda_e) + (R_\eta \times \lambda_\eta)$$

[Ec. 15]

λ_e y λ_η , tomarán valores de 0 a 1, según se les dé menor o mayor importancia y deberán cumplir la condición:

$$\lambda_e + \lambda_\eta = 1$$

[Ec. 16]

Criterio de selección según coste

El criterio de selección según coste se rige por la siguiente función:

$$f \text{ MIN } COSTE (COSTE_{\text{combustible } e} + COSTE_{\text{equipos}} + COSTE_{\text{energía}} + COSTE_{\text{abast. ext. H}_2\text{O}})$$

[Ec. 17]

Coste del combustible:

- Si se trata de producción *in situ* mediante electrolisis:

$$COSTE_{\text{combustible } e} = COSTE_{\text{H}_2\text{O}}$$

[Ec. 18]

$$COSTE_{H_2O} = Q_{H_2O} \times \epsilon_{H_2O}$$

[Ec. 19]

donde:

ϵ_{H_2O} , se refiere al precio del agua en €/m³. Como precio medio del agua para uso industrial se tomará 1,81 €/m³, que es el precio que alcanzó en el año 2009 (fuente: AEAS).

Q_{H_2O} , se refiere al caudal de agua requerido por el electrolizador para producir el hidrógeno demandado anualmente; que se obtiene de una de las dos formas siguientes:

$$Q_{H_2O} = \left[\frac{Q_{H_2 \text{ electrolizador}}}{\eta_{\text{electrolizador}}} \right] \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

[Ec. 20]

$$Q_{H_2O} = Q_{H_2O \text{ consumido electrolizador}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

[Ec. 21]

donde:

$Q_{H_2 \text{ electrolizador}}$, representa la cantidad de hidrógeno generado por el electrolizador en Nm³/día.

$\eta_{\text{electrolizador}}$, es el rendimiento de conversión agua/hidrógeno del electrolizador. Dependerá del modelo seleccionado.

$Q_{H_2O \text{ consumido electrolizador}}$, representa la cantidad de agua consumida por el electrolizador en m³/día.

- Si se trata de producción *in situ* mediante reformado:

$$COSTE_{combustible} = COSTE_{GN}$$

[Ec. 22]

$$COSTE_{GN} = \left[\frac{Q_{H_2} \times PCI_{H_2O} \times (3,6 \times 10^{-3}) \frac{MWh}{MJ}}{\eta_{reformador}} \right] \times \epsilon_{GN} \times 365 \frac{días}{año}$$

[Ec. 23]

donde:

Q_{H_2} , es la demanda diaria de hidrógeno en kg/día.

PCI_{H_2O} , representa el poder calorífico inferior del hidrógeno (120 MJ/kg ó 0,11374 MMBtu/kg).

$\eta_{reformador}$, es la eficiencia del proceso de producción de hidrógeno.

ϵ_{GN} , es el precio del gas natural utilizado. Se propone como precio medio de referencia el precio de gas para el cuarto trimestre del 2010, incluidos los componentes por mermas y primas de riesgo, que es de 21,56 €/MWh (CNE 2010 [92]).

Coste de los equipos

En función del tipo de abastecimiento, almacenamiento y distribución del hidrógeno se incluirá el coste de los equipos que correspondan de entre los siguientes:

- Equipo de pretratamiento de agua
- Electrolizador

- Reformador
- Purificador
- Compresor
- Licuefactor
- Evaporador
- Bomba criogénica
- Tanque/depósito/botellas de almacenamiento HCG
- Tanque/depósito criogénicos de almacenamiento HL
- Dispensador

Se considera el coste anual de los diferentes equipos. En los estudios consultados no existe uniformidad en lo que se refiere a la vida útil de los equipos e instalaciones, que por otra parte dependerá del grado de utilización de los mismos y del adecuado mantenimiento de esas instalaciones.

Para calcular el coste anual que se supone para cada equipo, de utilizará el factor de recuperación de capital, definido como el factor que transforma un valor presente a serie de pagos uniformes equivalentes y cuya fórmula es:

$$FRC = \left[\frac{((1+i)^n) \times i}{((1+i)^n) - 1} \right]$$

[Ec. 24]

donde:

FRC , representa al Factor de Recuperación del Capital.

i , es el tipo de interés. Como referencia se considerará el Euribor en el año 2011, estableciéndose un rango de 0,1 a 0,3 puntos. Se propone que el tipo de aplicación se mantenga en el 2%.

n_i es el periodo de amortización ó tiempo esperado de vida del equipo. A falta de referencias que avalen una vida útil de los equipos e instalaciones, se considera un periodo de vida para todas las instalaciones y equipos de 20 años.

Así, el coste total de los equipos se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$COSTE_{equipos} = \sum_1^n ((COSTE_{Equipo_i} \times N.equipo_i) \times FRC_i)$$

[Ec. 25]

donde:

$COSTE_{Equipo_i}$, representa el valor de cada equipo concreto [€].

$N.equipo_i$, es el número de equipos de igual marca, modelo y precio.

FRC_i , representa al Factor de Recuperación del Capital para cada equipo en concreto.

El tamaño, y por tanto el coste de los equipos, se seleccionará con el fin de que cubran la demanda de hidrógeno diario. En el caso de los equipos de almacenamiento, deberán tenerse en cuenta los periodos de tiempo preestablecidos: para los casos de generación *in situ*, se tratará de almacenamiento para cubrir el doble de la demanda diaria (por motivos de seguridad); para el caso de abastecimiento exterior de hidrógeno mediante vehículo industrial, se supondrá que el camión realiza el reparto 2 veces a la semana.

Coste de la energía

El coste variable anual de la energía eléctrica consumida en el proceso global de producción, almacenamiento y producción de hidrógeno en la hidrogenera se calcula mediante la expresión:

$$COSTE_{Energía} = \sum_1^n (COSTE_{producción\ H_2O\ i}) + \sum_1^n (COSTE_{Energía\ equipo\ i})$$

[Ec. 26]

El coste de la electricidad varía considerablemente de un lugar en función de los recursos disponibles y la tecnología de producción utilizada. El consumo de energía y el precio de la misma determinarán el coste energético para cada modo de suministro.

Para España se ha tomado como referencia, el precio medio de la energía eléctrica [€/MWh] establecido para el primer trimestre del 2011 por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo a través de la Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas [93], fijando su valor en 47,75 €/MWh, o lo que es lo mismo, 4,775 c€/kWh.

El coste variable anual de energía referido a la producción de hidrógeno, ya sea mediante electrolisis o reformado de gas, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$COSTE_{producción\ H_2O} = P_{equipo} \times T_{funcionamiento\ producción} \times \epsilon_{Energía\ eléctrica} \times 365 \frac{días}{año}$$

[Ec. 27]

donde:

P_{equipo} , es la potencia máxima consumida por el equipo de producción de hidrógeno [kW].

$\epsilon_{Energía\ eléctrica}$, es el precio medio de la energía eléctrica [€/MWh], en este caso establecido para el primer trimestre del 2011 por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo a través de la Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas [93], fijando su valor en 47,75 €/MWh.

$T_{funcionamiento}$, representa las horas diarias [h/día] en las que debe permanecer en funcionamiento el equipo para producir el hidrógeno diario demandado. Si se trata de equipos de producción se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{funcionamiento} = \frac{Q_{H_2}}{Q_{equipo}}$$

[Ec. 28]

donde:

Q_{H_2} , es la demanda diaria de hidrógeno en kg/día.

Q_{equipo} , es el caudal de producción de hidrógeno particular de cada equipo, en kg/hora.

Tabla 34. Conversión de unidades de producción de hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia**

Conversión de unidades de producción de H ₂ a kg/h	
1 kg/día	1/24 = 0,04166667 kg/h
1 ml/min	0,000005394 kg/h
1 l/min	0,005394 kg/h
1 cm ³ /min	0,000005394 kg/h
1 Nm ³ /día	0,003745833 kg/h
1 Nm ³ /h	0,0899 kg/h

El gasto variable anual de energía generado por el equipo de pretratamiento de agua y el purificador se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$COSTE_{Energíapretratamiento/purificador} = P_{equipo} \times T_{funcionamiento\ pretratamiento/purificador} \times \epsilon_{Energíaeléctrica} \times 365 \frac{días}{año}$$

[Ec. 29]

donde:

P_{equipo} , es la potencia máxima consumida por el equipo [kW].

$\epsilon_{\text{Energía eléctrica}}$, es el precio medio de la energía eléctrica [€/MWh], en este caso establecido para el primer trimestre del 2011 por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo a través de la Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas [93], fijando su valor en 47,75 €/MWh.

$T_{\text{funcionamiento pretratamiento / purificado}}$, representa las horas diarias [h/día] en las que debe permanecer en funcionamiento el equipo. Coincide con $T_{\text{funcionamiento}}$

El gasto variable anual de energía generado por compresor, evaporador y bomba criogénica, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$COSTE_{\text{Energía compresor / evaporador / bomba}} = P_{\text{equipo}} \times T_{\text{funcionamiento}} \times \epsilon_{\text{Energía eléctrica}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

[Ec. 30]

donde:

P_{equipo} , es la potencia máxima consumida por el equipo [kW].

$\epsilon_{\text{Energía eléctrica}}$, es el precio medio de la energía eléctrica [€/MWh], en este caso establecido para el primer trimestre del 2011 por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo a través de la Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas [93], fijando su valor en 47,75 €/MWh.

$T_{\text{funcionamiento}}$, representa el tiempo diario, en horas [h/día] en las que debe permanecer en funcionamiento el equipo. Dependerá de si los equipos se encuentran en etapas previas al almacenamiento o al dispensado de hidrógeno.

El gasto variable anual de energía generado por el licuefactor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$COSTE_{Energía\ licuefactor} = Q_{H_2} \times E_{licuefacción} \times (3,6 \times 10^{-3}) \frac{MWh}{MJ} \times \epsilon_{Energía\ eléctrica} \times 365 \frac{días}{año}$$

[Ec. 31]

donde:

Q_{H_2} , es la demanda diaria de hidrógeno en kg/día.

$E_{licuefacción}$, es la energía teórica para la licuefacción del hidrógeno es de 11.8 MJ/kg aunque si la conversión transcurre durante la licuefacción la energía necesaria se eleva hasta 14,1MJ/kg.

$\epsilon_{Energía\ eléctrica}$, es el precio medio de la energía eléctrica [€/MWh], en este caso establecido para el primer trimestre del 2011 por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo a través de la Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas [93], fijando su valor en 47,75 €/MWh.

Coste del abastecimiento exterior de hidrógeno

El coste del abastecimiento exterior de hidrógeno dependerá de si se hace mediante vehículos industriales de gas comprimido, de hidrógeno líquido o mediante gaseoducto y dependerá de la demanda diaria de hidrógeno.

- Hidrógeno gas comprimido

El abastecimiento se realiza mediante remolques. En la hidrogenera un paso de compresión extra eleva a altas presiones parte del hidrógeno producido, necesario para el almacenamiento a bordo de vehículos (a 350 atm), mientras que el almacenamiento del remolque de cilindros se utiliza como la parte del sistema de baja presión de almacenamiento en cascada.

De este modo, el coste anual de abastecimiento de hidrógeno corresponde con la siguiente expresión:

$$COSTE_{Abastecimiento\ H_2} = COSTE_{H_2} + COSTE_{reparto}$$

[Ec. 32]

donde:

$COSTE_{H_2}$, es el coste, en €, del hidrógeno, según el precio fijado por el gasista. Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$COSTE_{H_2} = (Q_{H_2} \times y) \times \epsilon_{H_2} \times N^{\circ} \text{repartos}$$

[Ec. 33]

donde:

Q_{H_2} , es la demanda diaria de hidrógeno en kg/día.

y , representa el plazo, en días, que existe entre dos entregas sucesivas. Como ya se ha indicado anteriormente, para el caso de abastecimiento exterior de hidrógeno mediante vehículo industrial, se supondrá que el camión realiza el reparto 2 veces a la semana, por tanto supondremos una capacidad de almacenamiento de 4 veces la demanda diaria; lo que supone un abastecimiento exterior equivalente a esas 4 veces la demanda diaria. Por lo tanto, en este caso particular $y=4$.

ϵ_{H_2} , es el precio del kilo de hidrógeno fijado por la empresa gasista distribuidora.

$N^{\circ} \text{repartos}$, es el número de repartos que se producen anualmente. Responde a la fórmula:

$$N^{\circ} \text{ repartos} = \frac{365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}{y \frac{\text{días}}{\text{reparto}}} = \frac{365 \text{ repartos}}{4 \text{ año}}$$

[Ec. 34]

$COSTE_{\text{reparto}}$, es el coste, en €, que corresponde al reparto del hidrógeno hasta que llega a la hidrogenera, es decir, el coste del transporte en vehículo industrial desde la estación de producción hasta la hidrogenera. Responde a la siguiente ecuación:

$$COSTE_{\text{reparto}} = \epsilon_{\text{camión}} \times N^{\circ} \text{ repartos}$$

[Ec. 35]

donde:

$\epsilon_{\text{camión}}$, es el coste de cada entrega de semirremolque de hidrógeno.

$N^{\circ} \text{ repartos}$, es el número de repartos que se producen anualmente.

- *Hidrógeno gas licuado*

Cada vehículo industrial de hidrógeno líquido consiste en una cabina de vehículo industrial y un único tanque de hidrógeno líquido montado sobre un remolque. No es práctico dejar el remolque de hidrógeno líquido en la hidrogenera, siendo diferente al caso de remolques de cilindro de gas comprimido (C. Yang, J. Orden, 2006 [94]). El número de cabinas de vehículo industrial es siempre igual al número de remolques de tanque de hidrógeno líquido. Por ello se puede asumir que en cada viaje el vehículo industrial visita a una única hidrogenera, donde descarga el contenido de la carga antes de volver a la planta central (en lugar de realizar múltiples paradas descargando pequeñas cantidades hidrógeno líquido en cada estación).

De este modo, el coste anual de abastecimiento de hidrógeno corresponde con la siguiente expresión:

$$COSTE_{Abastecimiento\ HGL} = COSTE_{H_2} + COSTE_{reparto}$$

[Ec. 36]

donde:

$COSTE_{H_2}$, es el coste, en €, del hidrógeno, según el precio fijado por el distribuidor. Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$COSTE_{H_2} = (Q_{H_2} \times y) \times \epsilon_{H_2} \times N^{\circ} \text{repartos}$$

[Ec. 37]

donde:

Q_{H_2} , es la demanda diaria de hidrógeno en kg/día.

y , representa el plazo, en días, que existe entre dos entregas sucesivas. Como ya se ha indicado anteriormente, para el caso de abastecimiento exterior de hidrógeno mediante vehículo industrial, se supondrá que el camión realiza el reparto 2 veces a la semana, por tanto supondremos una capacidad de almacenamiento de 4 veces la demanda diaria; lo que supone un abastecimiento exterior equivalente a esas 4 veces la demanda diaria. Por lo tanto, en este caso particular $y=4$.

ϵ_{H_2} , es el precio del kilo de hidrógeno fijado por la empresa gasista distribuidora.

$N^{\circ} \text{repartos}$, es el número de repartos que se producen anualmente. Responde a la fórmula:

$$N^{\circ} \text{ repartos} = \frac{365 \frac{\text{días}}{\text{año}}}{y \frac{\text{días}}{\text{reparto}}} = \frac{365 \text{ repartos}}{4 \text{ año}}$$

[Ec. 38]

$COSTE_{\text{reparto}}$, es el coste, en €, que corresponde al reparto del hidrógeno hasta que llega a la hidrogenera, es decir, el coste del transporte en vehículo industrial desde la estación de producción hasta la hidrogenera. Responde a la siguiente ecuación:

$$COSTE_{\text{reparto}} = \epsilon_{\text{camión}} \times N^{\circ} \text{ repartos}$$

[Ec. 39]

donde:

$\epsilon_{\text{camión}}$, es el coste de cada entrega de semirremolque de hidrógeno.

$N^{\circ} \text{ repartos}$, es el número de repartos que se producen anualmente.

- *Transporte mediante gaseoducto*

Para calcular el coste anual debido a este tipo de abastecimiento exterior ($COSTE_{\text{Gaseoducto}}$), habrá que tener en cuenta, además del precio del hidrógeno, el coste de la tubería y de su instalación desde la hidrogenera al centro de producción.

De este modo tenemos la siguiente ecuación:

$$COSTE_{\text{Gaseoducto}} = COSTE_{H_2G} + COSTE_{\text{tubería}}$$

[Ec. 40]

donde:

$COSTE_{H_2G}$, es el coste, en €, del hidrógeno suministrado mediante gasoducto, según el precio fijado por el gasista. Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$COSTE_{H_2} = Q_{H_2} \times \epsilon_{H_2} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

[Ec. 41]

donde:

Q_{H_2} , es la demanda diaria de hidrógeno en kg/día.

ϵ_{H_2} , es el precio del kilo de hidrógeno, en €/kg, fijado por la empresa gasista distribuidora.

$COSTE_{tubería}$, es el coste anual asociado a la instalación de la tubería y al coste de los materiales de dicha tubería. Los costes de la tubería pueden calcularse en función del diámetro del gaseoducto, el cual está basado en la cantidad de material utilizado en la misma. Por lo tanto se puede calcular en función del diámetro del gaseoducto dado un coste por kilómetro de gaseoducto.

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$COSTE_{tubería} = \frac{COSTE_{materiales} + COSTE_{instalaciónG}}{n_G}$$

[Ec. 42]

donde:

$COSTE_{materiales}$, es el coste, en €, del material requerido para fabricar la tubería. Se calcula según:

$$COSTE_{materiales} = D \times \pi \times l \times \epsilon_{material}$$

[Ec. 43]

donde:

D , es el diámetro de la tubería, en metros [m].

l , es la longitud total de la tubería, en metros [m].

$\epsilon_{material}$, es el precio unitario del material requerido para fabricar la tubería por unidad de superficie [€/m²].

$COSTE_{instalación}$, es el coste de instalación de la tubería, en €. Se calcula según:

$$COSTE_{instalación} = l \times \epsilon_{instalación}$$

[Ec. 44]

donde:

l , es la longitud total de la tubería, en metros [m].

$\epsilon_{instalación}$, es el precio unitario de instalación por unidad de longitud [€/m].

n_G , es el número de años que se estima esté en uso el gaseoducto.

Criterio de selección según rendimiento

El criterio de selección según rendimiento responde a la siguiente función:

$$f \text{ MAX RENDIMIENTO } (\eta_{\text{producciónH}_2} \times \eta_{\text{procesos}} \times \eta_{\text{abast.ext.H}_2})$$

[Ec. 45]

En la siguiente tabla se recogen los rendimientos de los principales procesos a los que se refiere la ecuación anterior, cuyos valores corresponden con los porcentajes más representativos extraídos de las fuentes consultadas: *APPICE*; *ELCOGAS S.A.*; K. Haman, E. Stiever [95]; M. Wang, M. Mintz (*Argonne National Laboratory*) [96]; *IEA Energy Technology Essentials* [97]; [98] y [99].

Tabla 35. Rendimientos de los diferentes procesos según bibliografías estudiadas.

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

PROCESO	EFICIENCIA %
Reformado por vapor (gas natural)	80
Electrólisis convencional	35
Licuefacción	55 - 70
Gasificación	70
Compresión	90
Transporte por tubería	80
Transporte tanque criogénico	85
Transporte <i>tube trailer</i>	85

La electrólisis tiene una eficiencia muy baja, porque a la eficiencia de la propia electrólisis (56%-73%) hay que aplicarle la eficiencia de la producción de la energía eléctrica aplicada al proceso (35%-55%).

Rendimiento del sistema de producción in situ de hidrógeno

Se refiere al rendimiento que tienen los equipos de producción de hidrógeno; es decir, el rendimiento del electrolizador, si se trata de producción *in situ* mediante electrólisis, o el rendimiento del reformador, si se trata de producción de hidrógeno *in situ* mediante reformado del gas natural. Así tenemos:

- Si se trata de producción *in situ* mediante electrólisis:

$$\eta_{\text{producción } H_2} = \eta_{\text{electroliz ador}}$$

[Ec. 46]

- Si se trata de producción *in situ* mediante reformado de gas natural:

$$\eta_{\text{producción } H_2} = \eta_{\text{reformador GN}}$$

[Ec. 47]

Donde el rendimiento de electrolizador y reformador se obtendrán de las bases de datos respectivas. En el caso de que no se tengan datos del rendimiento de un equipo específico, se utilizarán los valores indicados en la Tabla 35.

Rendimiento de los procesos

Se refiere a todos los procesos que se producen en función del tipo de abastecimiento, almacenamiento y distribución del hidrógeno. Para obtener el rendimiento total se deberá tener en cuenta el rendimiento de todos los equipos y procesos existentes en la opción sometida a estudio:

- Equipo de pretratamiento de agua
- Purificador
- Compresor
- Licuefactor
- Evaporador
- Bomba criogénica
- Dispensador

Así tenemos la siguiente ecuación:

$$\eta_{\text{procesos}} = \eta_{\text{pretrat. } H_2} \times \eta_{\text{purificado } r} \times \eta_{\text{compresor}} \times \eta_{\text{licuefacto } r} \times \eta_{\text{evaporador}} \times \eta_{\text{bomba}} \times \eta_{\text{dispensado } r}$$

[Ec. 48]

Donde los rendimientos de los diferentes equipos se obtendrán de la base de datos de los diferentes equipos. En el caso de que no se tengan datos del rendimiento de un equipo específico se utilizarán los valores indicados en la Tabla 35.

Rendimiento del sistema de abastecimiento exterior de hidrógeno

Este apartado incluye el rendimiento de los procesos de transporte y distribución del hidrógeno para aquellas opciones en las que el abastecimiento de hidrógeno a la hidrogenera se produce desde una instalación ajena a la misma. Así, en función de si el abastecimiento exterior se produce en estado gaseoso mediante tubería o vehículo industrial, o en estado líquido mediante tanque criogénico tenemos:

- Si se trata de abastecimiento en estado gaseoso mediante tubería:

$$\eta_{abast.est.H_2} = \eta_{tuberia}$$

[Ec. 49]

- Si se trata de abastecimiento en estado gaseoso mediante vehículo industrial:

$$\eta_{abast.est.H_2} = \eta_{vehiculoH_2G}$$

[Ec. 50]

- Si se trata de abastecimiento en estado líquido mediante vehículo cisterna criogénica:

$$\eta_{abast.est.H_2} = \eta_{vehiculoH_2L}$$

[Ec. 51]

Donde los valores de rendimiento de los diferentes sistemas de abastecimiento serán los recogidos en la Tabla 35.

Estos valores de rendimiento no incluyen el proceso en sí de transporte, únicamente las pérdidas energéticas por las pérdidas y desaprovechamiento de hidrógeno, o por los procesos de regasificación que se dan en las diferentes opciones de distribución.

5.3.2. Implementación del modelo de cálculo

Para llevar a cabo la implementación de la herramienta de cálculo en un software específico, ha sido necesario realizar un proceso de traducción al lenguaje de programación de los procesos de decisión y cálculos determinados en la fase de diseño del modelo de cálculo.

Para ello, se han desarrollado las siguientes actividades:

- Elección del lenguaje de programación y creación del código. Se elige el tipo de lenguaje de programación en función de las variables y los objetivos a satisfacer.
- Traducción al lenguaje de programación de los procesos de decisión y cálculos determinados en la fase de diseño del modelo de cálculo.
- Definición de un diccionario de datos que facilite la localización de las diferentes variables y su significado.
- Definición de unas bases de datos que recojan los diferentes listados con las especificaciones técnicas de los diversos equipos de los que se componen una estación de suministro de hidrógeno o de producción de hidrógeno; o los costes estimados de todas las variables de entrada consideradas.

Los requisitos que debe satisfacer el sistema, y que se extraen de las necesidades planteadas por el usuario final, se definen y catalogan en funcionales y no funcionales. Los primeros especifican las operaciones y funcionalidades que debe ofrecer el sistema, los segundos detallan aspectos relativos a datos, interfaces y hardware.

Tabla 36. Requisitos Funcionales a satisfacer por el software

Fuente: **Elaboración propia**

Descripción
El administrador del sistema es el único que tiene poderes totales sobre la aplicación.
El sistema permite añadir, borrar, modificar y consultar cualquier información disponible.
El administrador es el encargado de gestionar la base de datos, aunque un usuario puede consultar - actualizar los datos de las operaciones en la base de datos.
Los resultados intermedios que se generan durante el proceso de cálculo hasta que se llega a la solución final se guardan en tablas intermedias de la base de datos, para poder utilizar estos datos resultantes en los siguientes procesos.
Las tablas intermedias van a ser eliminadas al terminar la sesión, quedando sólo los resultados finales.
Las tablas intermedias contendrán datos relativos a las soluciones intermedias que se utilizan para conseguir que las soluciones finales sean más factibles.
El sistema irá devolviendo información en diferentes grados de dificultad según se vaya avanzando en el proceso de cálculo de la aplicación.
El sistema dispone de unos costes estimados asociados a todo lo referente a la hidrogenera.
El usuario puede consultar la información relativa a la normativa actual que concierne a una hidrogenera.
La base de datos va a estar en continua actualización, de manera que los datos de los que se dispone se asemejen en la mayor medida posible a la realidad.

Tabla 37. Requisitos No Funcionales a satisfacer por el software

Fuente: **Elaboración propia**

Descripción
La aplicación dispone de un interfaz gráfico basado en ventanas y diálogos.
El proceso para realizar las operaciones es un mecanismo de sucesión de ventanas o proceso guiado, en el que el usuario no avanza hacia la siguiente opción hasta que no ha concluido la anterior.
El sistema se ejecutará en un entorno Windows con máquina virtual Java y bases de datos MySQL.
No debe haber pérdidas en caso de caídas del sistema.
Una operación realizada con éxito no mostrará ningún mensaje de confirmación de la operación, simplemente permitirá avanzar hacia la siguiente ventana del sistema de decisión.
Una operación que no ha sido realizada con éxito abrirá un mensaje indicando la causa del error.
La base de datos debe ser accesible desde una red local.
El hardware necesario será un servidor con la aplicación, la base de datos y un sistema gestor de base de datos, accesible por los ordenadores de la empresa de forma que el usuario trabaje con la aplicación a través de un navegador.
La aplicación irá evolucionando con el paso del tiempo, adaptándose a las evoluciones de las hidrogeneras.

5.3.2.1. Diagramas de eventos o iteración de objetos

El objetivo de esta tarea es describir la cooperación entre los objetos utilizados para la realización de un caso de uso. Para representar esta información, se usan diagramas de interacción que contienen instancias de los actores participantes, objetos, y la secuencia de mensajes intercambiados entre ellos. Se pueden establecer criterios para determinar que tipo de objetos y mensajes se van a incluir en estos diagramas, como por ejemplo: si se incluyen objetos y llamadas a base de datos, objetos de interfaz de usuario, de control,...

Estos diagramas pueden ser tanto de secuencia como de colaboración, y su uso depende de si se quieren centrar en la secuencia cronológica o en cómo es la comunicación entre los objetos.

a. Diagrama de colaboración

Los diagramas de colaboración muestran las interacciones que ocurren entre los objetos que participan en una situación determinada.

Nivel de dimensionamiento

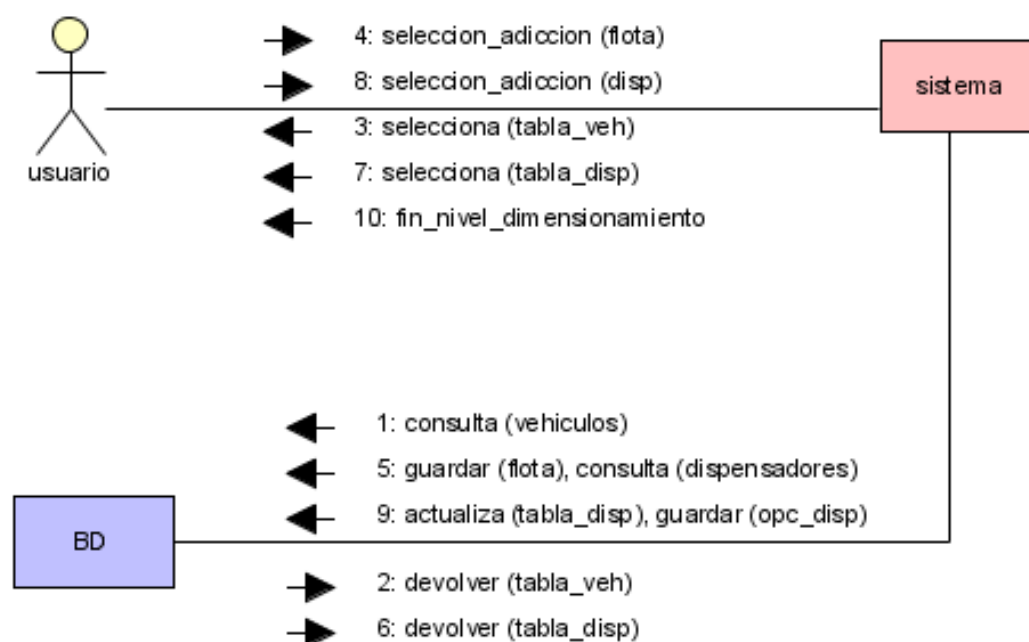


Figura 70. Diagrama de colaboración proceso funcional dimensionamiento

Fuente: **Elaboración propia**

El sistema consulta la tabla de vehículos de la base de datos y se la muestra en una lista al usuario, el cual selecciona los que quiere utilizar en su flota y además pudiendo añadir nuevos vehículos que el desee para diseñar sus hidrogeneras.

El sistema guarda los datos característicos de la flota en la base de datos, y consulta la tabla de dispensadores para mostrárselos al usuario, de forma que esté seleccione los que desee utilizar, pudiendo añadir otros modelos.

Por último, el sistema guarda en la base de datos las opciones de dimensionamiento resultantes del cálculo interno de posibles opciones que se pueden utilizar de acuerdo a criterios específicos (coste, tiempo entre repostaje, etc) y a la demanda de la flota selecciona anteriormente, y le comunica al usuario que ha acabado con este nivel para que pueda continuar.

Nivel de tecnología

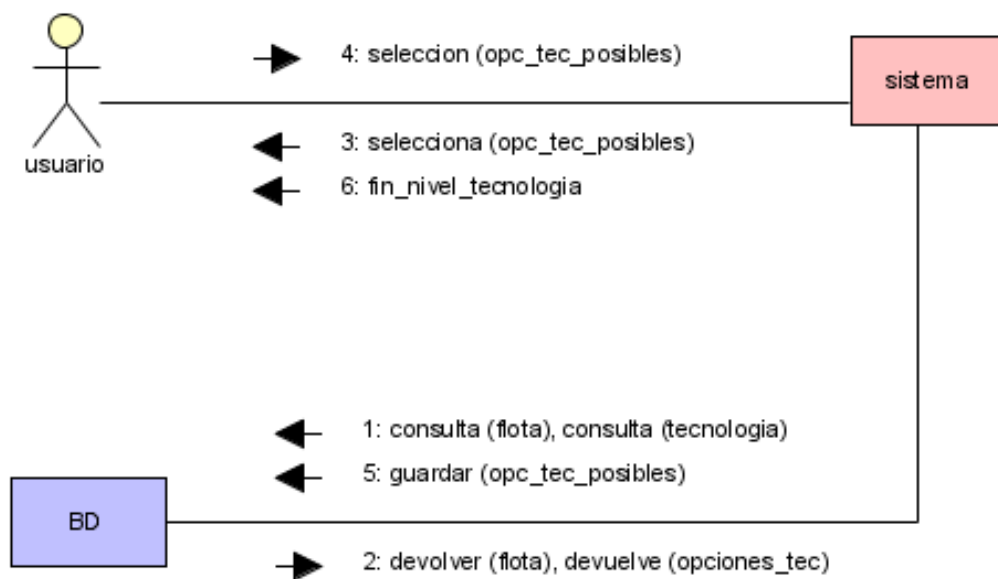


Figura 71. Diagrama de colaboración proceso funcional tecnología

Fuente: **Elaboración propia**

En este apartado, en primer lugar el sistema consulta las características de la flota anteriormente seleccionada y, también consulta las opciones de tecnología que existen para calcular las posibles opciones de abastecimiento y/o producción de hidrogeno que puede

haber de acuerdo a las características de la flota con la que se está diseñando las estaciones, sobre todo, con la demanda total.

Conocidas las opciones posibles, el sistema se las muestra al usuario para que realiza la selección que el desee sobre las que dispone, para que con esa última selección el sistema calcule los dispositivos necesarios para cada opción y la superficie que se necesita para su instalación en cada estación de repostaje.

Por último, el sistema guardar las opciones de abastecimiento y/o producción resultantes junto con sus características en la base de datos y se le comunica al usuario el fin de este nivel.

Nivel de cálculo combinatorio

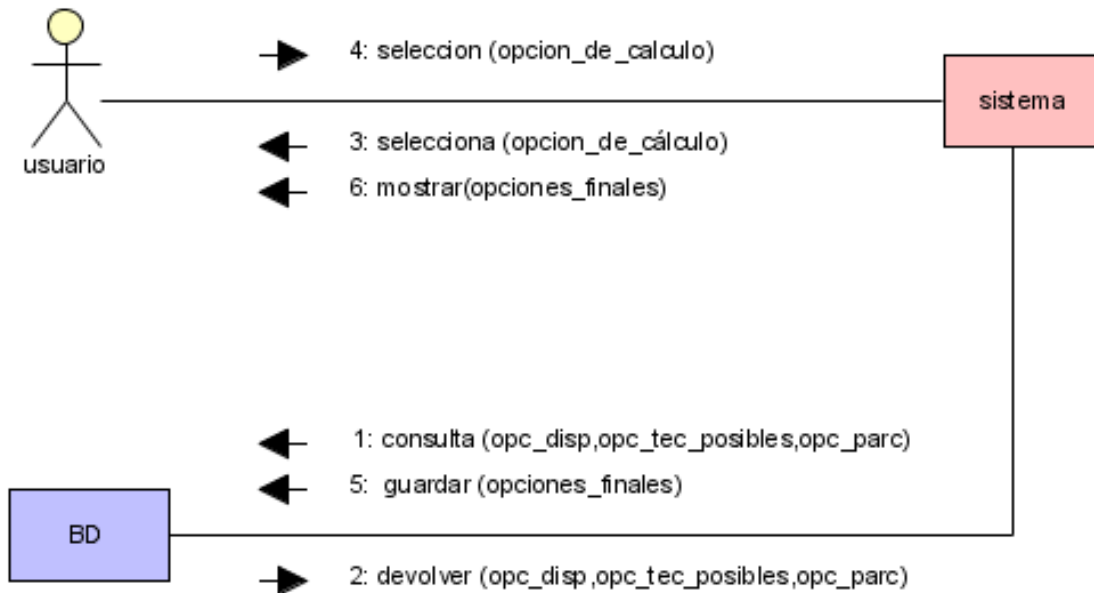


Figura 72. Diagrama de colaboración proceso funcional cálculo combinatorio

Fuente: **Elaboración propia**

El sistema consulta en la base de datos las opciones resultantes de los apartados anteriores de dimensionamiento y tecnología para trabajar en la combinación de ellas.

Por otro lado, le comunica al usuario cual es la opción de cálculo que quiere realizar, es decir, selección manual de las opciones para combinarlas, o selección mediante criterios específicos que restrinjan las opciones.

Seguido de esto el sistema realiza cálculos internos de combinación de todas las opciones para el diseño de hidrogenas según una flota determinada, guardando los resultados finales en la base de datos y mostrándoselos al usuario como último paso de la aplicación.

b. Diagramas de secuencia

Los diagramas de secuencia muestran el intercambio de mensajes (es decir la forma en que se invocan) en un momento dado. Los diagramas de secuencia ponen especial énfasis en el orden y el momento en que se envían los mensajes a los objetos.

- Los diagramas de secuencia ilustran la interacción entre objetos y el orden secuencial en el que ocurren dichas interacciones, es decir cómo se comunican los objetos entre sí.
- Los objetos se comunican mediante interfaces, para poder invocar a un operación.
- El diagrama de secuencias proporciona un camino a partir de los escenarios para describir las operaciones en una forma más detallada
- En un sistema orientado a objetos son estos últimos los que deben controlar a los datos, moverlos, responder preguntas, etc. Estos trabajan juntos comunicándose y/o interactuando con otros.
- Los diagramas de secuencias se modelan a nivel de objetos y utilizan tres elementos fundamentales: objetos, mensajes/estímulos y líneas de vida de los objetos.

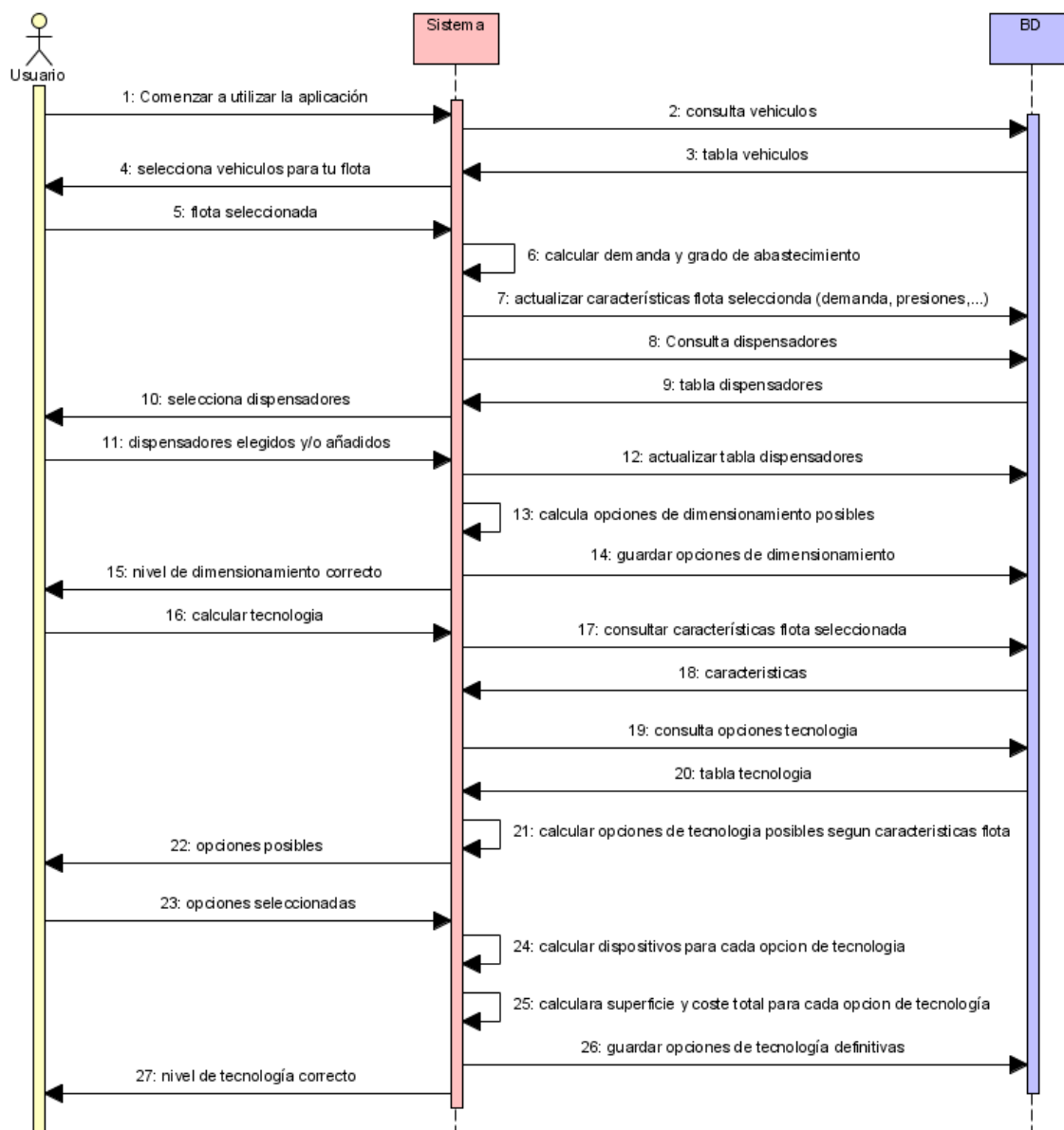


Figura 73. Diagrama de secuencia proceso funcional

Fuente: **Elaboración propia**

El usuario comienza a trabajar con la aplicación informática, seleccionando los vehículos que va a disponer en su flota para el diseño de las hidrogeneras donde van a repostar dichos vehículos. Estos vehículos se encuentran almacenados con sus características en la base de datos y el usuario los selecciona de una lista.

Una vez definida la flota el sistema calcula la demanda total de la flota y el grado de abastecimiento que el usuario quiere que se suministre en un determinado momento respecto al total de la demanda.

Seguido de esto, se guardan las características generadas en la base de datos para posterior uso y el usuario selecciona o elige los dispensadores que según sus propiedades quiere que lleven sus estaciones de suministro. Además el usuario puede añadir nuevos dispensadores al sistema. Una vez elegidos, el sistema calcula los tipos de dispensadores que se pueden utilizar en las estaciones y guarda los resultados.

En el nivel de tecnología, el sistema muestra al usuario las características de la flota seleccionada anteriormente y las posibles opciones de tecnología que se pueden dar.

Según las características de la flota el sistema restringe las posibles opciones de abastecimiento y producción de hidrógeno, pudiendo además, el usuario restringir aun más las opciones de tecnología, antes de calcular los posibles dispositivos que se van a utilizar en cada opción y la superficie que va a ocupar todo el conjunto de aparatos tecnológicos. El sistema guarda las opciones finales para su posterior uso.

5.3.2.2. Algoritmo de cálculo combinatorio

Para que la implementación del modelo de cálculo sea exitosa deberá contarse con un algoritmo de cálculo encargado de decidir en un tiempo de respuesta reducido cuál es la mejor combinación de entre las posibles. Este algoritmo debe basarse en técnicas de optimización novedosas basadas en algoritmos heurísticos, los cuales permiten combinaciones adaptadas a la extensa casuística que se puede generar en el caso estudiado en esta tesis. Se deben explorar todas las combinaciones posibles y elegir la mejor en función del criterio a optimizar, que puede ser el coste, la calidad del servicio, el coste medio ambiental o una combinación de ellas. La explosión de combinaciones posibles y la justificación del uso de la heurística se explican a continuación.

A partir de la demanda y de datos referentes a los tiempos de suministro que constan en la base de datos se puede calcular el número de dispensadores necesarios para un primer dimensionamiento de la hidrogenera. Con este dato (número de dispensadores posibles), las tecnologías disponibles (producción por electrólisis, producción por reformado, abastecimiento por tubería y abastecimiento por cisterna) y los datos del conjunto de zonas (superficie, accesibilidad, coste, instalaciones) se estudiarían todas las combinaciones posibles y se elegiría la mejor solución. Sin embargo, el tiempo computacional para realizar esto sería excesivo y por ello se utilizan los algoritmos heurísticos. Para comprenderlo se incluye el esquema de la figura siguiente, que presenta un caso sencillo.

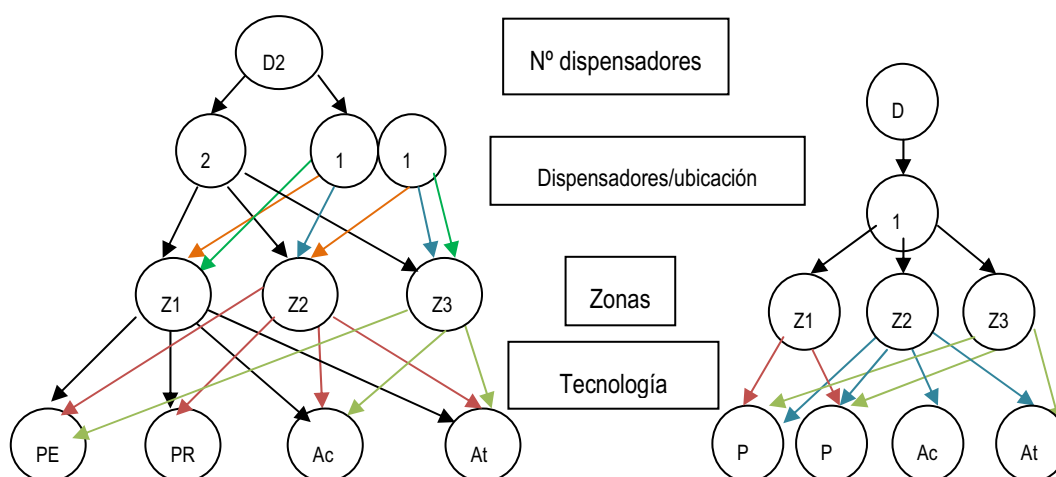


Figura 74. Ejemplo de caso de combinatoria

Fuente: **Elaboración propia**

En un primer nivel de dimensionamiento se devuelven dos opciones, como máximo puede tener dos dispensadores y como mínimo puede tener un dispensador.

1. Para la opción de dos dispensadores

En el segundo nivel, hay dos combinaciones. Que los dos dispensadores se encuentren en una sola ubicación o en dos ubicaciones.

En el tercer nivel se tienen las zonas en la que se pueden ubicar y en el cuarto nivel el tipo de tecnologías.

Si se explora la ubicación en una sola zona, se obtienen 12 posibles soluciones. Es decir, ubicarla en la Z1, en la Z2 o en la Z3 con PE (producción *in situ* mediante electrolisis), con PR (producción *in situ* mediante reformado reformado), AC (abastecimiento mediante cisterna) o AT (abastecimiento mediante tubería).

Si se explora la ubicación en dos zonas, se obtienen 24 combinaciones posibles, es decir:

Ubicación en Z1 y Z2, ubicación en Z1 y Z3 o ubicación en Z2 y Z3 con las siguientes posibilidades para cada ubicación: las dos PR, las dos PE, PR y AC, PR y AT, PE y AC, PE y AT, las dos AT ó las dos AC.

2. Para la opción de un dispensador

Esta opción será más barata pero quizás no satisfaga las condiciones de calidad del servicio.

Al existir un solo dispensador, se deberá elegir en qué zona y qué tipo de producción resulta más beneficiosa. De forma que el número total de posibilidades es de 12.

El total de posibilidades son $12 + 24 + 12$, es decir, 48.

Si se supone un ejemplo más complejo que disponga de más zonas, más dispensadores o muchas más posibilidades de dispensadores el número de combinaciones aumenta exponencialmente.

Para acotar el espacio de búsqueda y no consumir excesivo tiempo computacional se utilizan algoritmos de optimización basados en heurísticas. Estas heurísticas funcionan según se indica a continuación:

La solución del problema comienza calculando las primeras soluciones, las puntuas y elige la de mayor puntuación según un criterio de selección previamente fijado. Con la opción elegida, se realizan técnicas de entrecruzamiento y mutaciones y se hallan las nuevas posibilidades. De nuevo se puntuas y se elige la de mejor puntuación para seguir explorando el siguiente nivel, hasta que se hayan aplicado todos los criterios de selección. Al final se obtendrá la opción que satisfaga todas las restricciones y además sea la más barata.

Si se continúa con el ejemplo anterior. Se supone que la calidad del servicio para un dispensador tiene una puntuación de 7 y la de dos dispensadores de 9. El criterio de selección de calidad del servicio mínima, exige que como mínimo tenga una puntuación de 8. Por lo tanto, las 12 posibilidades correspondientes a un dispensador se eliminan. A continuación, se exploraría si las zonas satisfacen los criterios de selección según la configuración. Supongamos que ninguna de las 3 zonas tiene una superficie suficiente para instalar los dos dispensadores. De esta forma se eliminan otras 12 posibilidades.

Con este sencillo ejemplo de heurística se consigue reducir el espacio de búsqueda de 48 a 24 casos. Si se aplica la heurística de manera mucho más elaborada y eligiendo inteligentemente los criterios de selección y funciones de optimización en cada paso del algoritmo, se conseguirá una solución de calidad en un corto espacio de tiempo.

5.3.3. Descripción del software

El software desarrollado está basado en una herramienta web que permite definir las necesidades e infraestructuras de suministro de hidrógeno.

El diagrama de flujo de las pantallas que constituyen el interfaz de usuario del software es el que se describe a continuación:

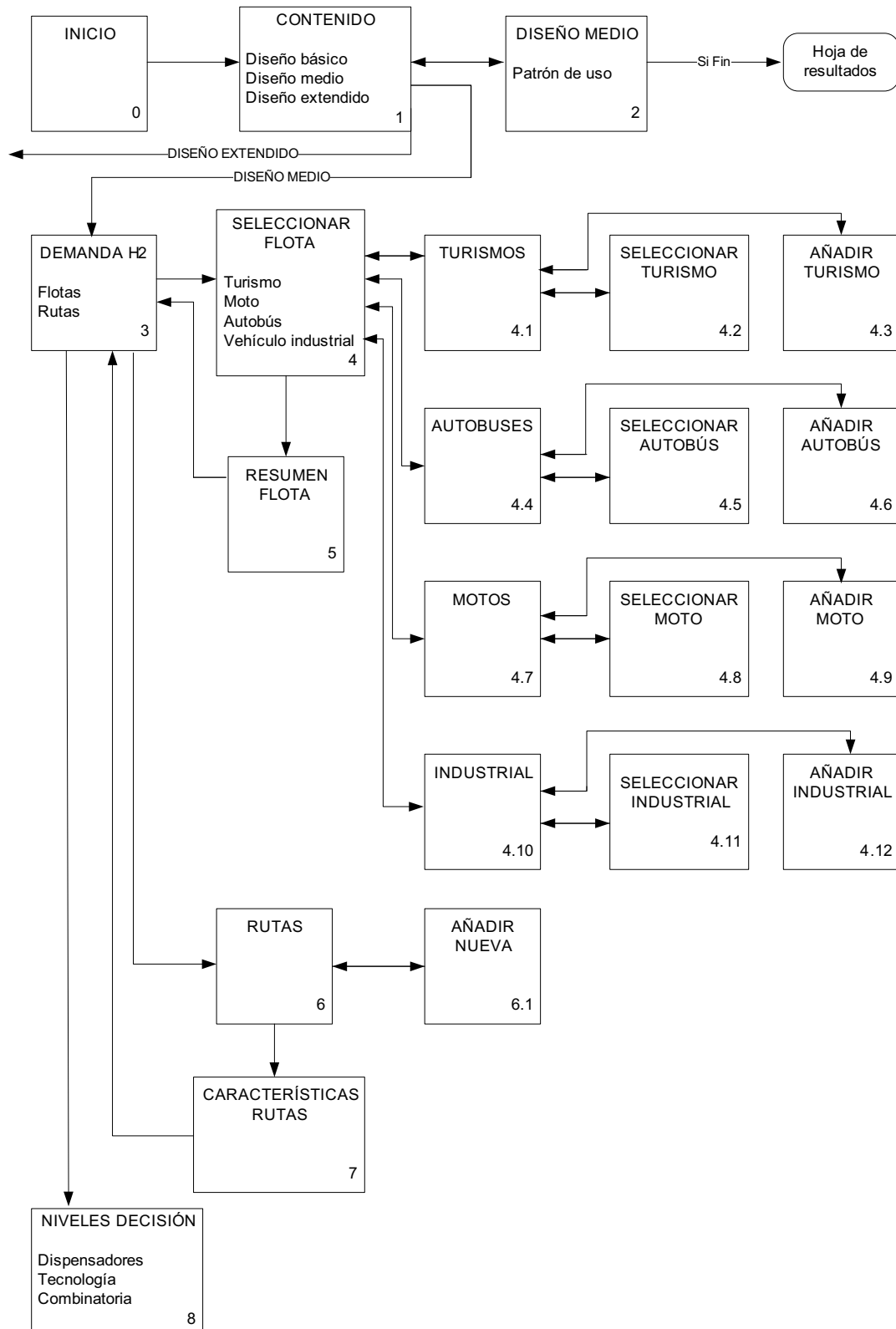


Figura 75. Diagrama de flujo de las pantallas de la aplicación web (I)

Fuente: Elaboración propia

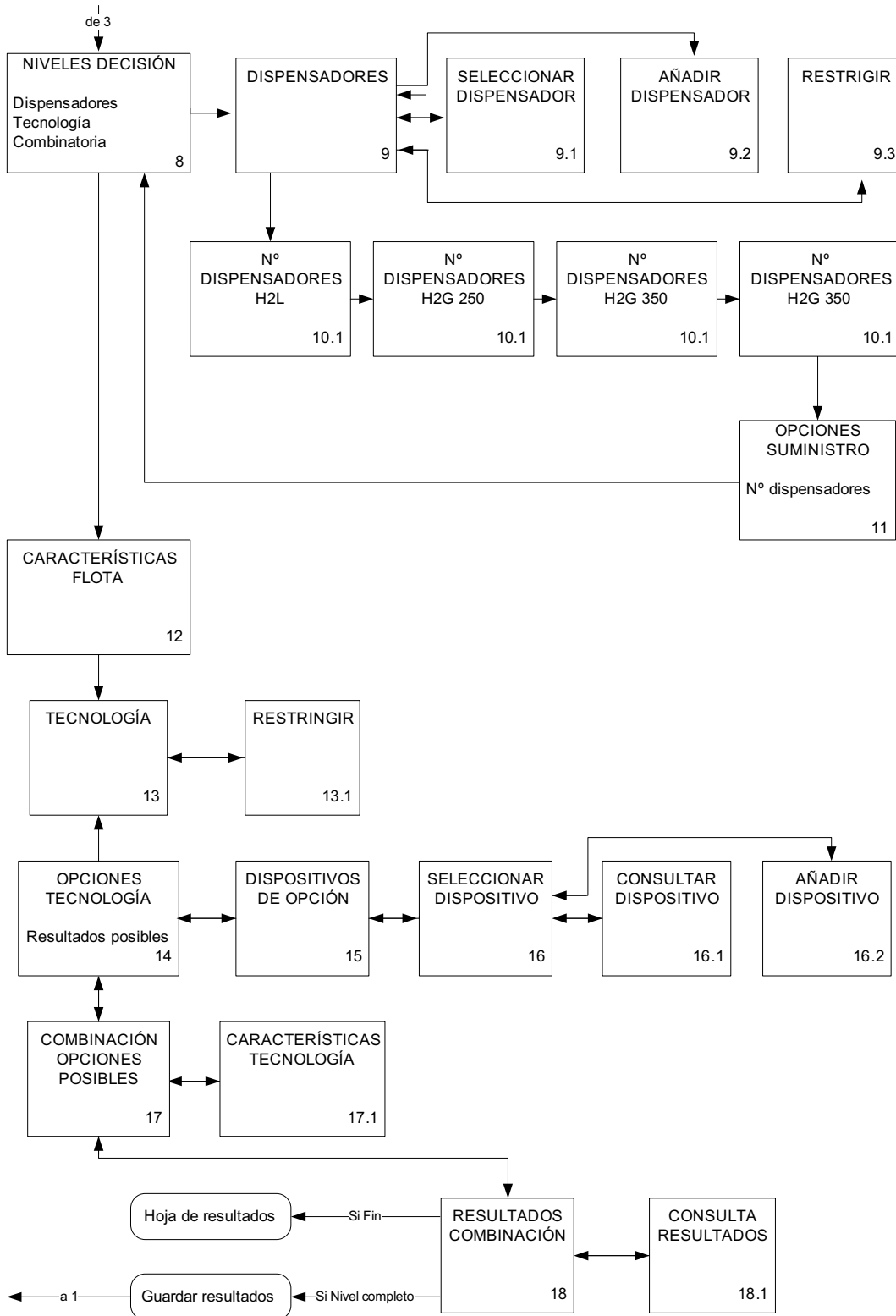


Figura 76. Diagrama de flujo de las pantallas de la aplicación web (II)

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de describir y evaluar el funcionamiento de la herramienta web, y comprobar que su utilización no se limita exclusivamente a automóviles, sino que su uso puede extenderse a cualquier tipo de vehículo, se define el caso de implantación de un tranvía de hidrógeno.

Para llevar a cabo estas tareas, se ha supuesto el caso concreto de la ciudad de Zaragoza y su línea de tranvía. Concretamente se realiza el cálculo de la estructura de suministro de hidrógeno necesaria en el hipotético caso de que el tranvía de Zaragoza funcionase con hidrógeno.

Para la definición del caso se toman los datos reales de ruta, distancias, frecuencias y número de trenes en explotación. La modelación del vehículo (de especial importancia para la realización de la validación el dato relativo al consumo de hidrógeno (kgH_2/km)) ha sido facilitada por CAF y no forma parte del alcance de la validación.

5.3.3.1. Descripción del vehículo

Los datos de partida proporcionados por CAF referentes a cada uno de los vehículos guiados, modelo URBOS-III, son los siguientes:

- Consumo de hidrógeno estimado del vehículo: $0,24 \text{ kgH}_2/\text{km}$
- Capacidad de almacenamiento de hidrógeno a bordo del vehículo: 28 kgH_2
 - o Número de tanques: 6
 - o Presión de almacenamiento: 700 bar
 - o Masa de hidrógeno almacenada por tanque: 4,8 kg

Por lo tanto, el número máximo de recorridos completos que puede realizar un tranvía antes de volver a repostar sería:

$$\frac{28 \text{ kgH}_2}{24,98 \text{ km/recorrido} \cdot 0,24 \text{ kgH}_2/\text{km}} = 4,67 \quad \rightarrow 4 \text{ recorridos completos}$$

5.3.3.2. Descripción de la ruta y número de vehículos

Según los datos proporcionados por CAF, el recorrido real de la Línea 1 del tranvía de Zaragoza tiene una distancia total de 24.980 m, incluyendo ida y vuelta, y cuenta con 25 paradas por sentido. Actualmente la línea se encuentra en construcción y sólo está operativa la primera fase de la línea. En la siguiente figura se representa el recorrido de la Línea 1; en rojo el tramo operativo.



Figura 77. Recorrido de la Línea 1 del tranvía de Zaragoza

Fuente: *Tranvía de Zaragoza*

Para calcular la demanda diaria de hidrógeno, se considera la opción más desfavorable, que en este caso coincide con los días laborables, en los cuales las frecuencias de paso de los tranvías son menores y hay un mayor número de vehículos circulando, y por lo tanto mayor consumo de hidrógeno. Los datos de uso de la línea en un día laborable son los que se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 38. Datos de uso Línea 1 Tranvía de Zaragoza

Fuente: *CAF*

Franja horaria	Frecuencia [min]	Nº vehículos
5:00 - 7:00	15	6
7:00 - 10:00	5	18
10:00 - 17:00	7	13
17:00 - 20:00	5	18
20:00 - 22:00	7	13
22:00 - 0:00	20	5

A partir de estos datos, y sabiendo que el tiempo a emplear por cada vehículo en el recorrido completo son 90 minutos, es posible calcular el número de viajes que realizará cada vehículo, y por lo tanto el número total de recorridos diarios. Así mismo se obtiene una velocidad media de circulación de 16,653 km/h.

5.3.3.3. Programa Diario de Repostaje

De forma paralela a la obtención del número de recorridos a realizar por cada vehículo, es posible llevar a cabo un programa de repostaje compatible con la operación.

Para ello es necesario conocer el tiempo que se tarda en realizar el repostaje de los tranvías ($T_{\text{repostaje}}$), en función de si han realizado uno, dos, tres o cuatro recorridos completos desde el último repostaje. Para ello se utiliza la Ec. 1[Ec. 1:

$$T_{\text{repostaje}} (\text{min}) = T_{\text{aproximación}} (\text{min}) + T_{\text{preparación}} (\text{min}) + T_{\text{salida}} (\text{min}) + T_{\text{suministro}} (\text{min})$$

Con los siguientes valores de referencia:

$T_{\text{aproximación}}$: 0,5 minutos.

$T_{\text{preparación}}$: 0,5 minutos.

T_{salida} : 1 minuto.

$T_{\text{suministro}}$ es el tiempo que tarda en sí la operación de dispensado. Para su cálculo se utilizará la siguiente fórmula, derivada de la Ec. 2:

$$T_{\text{suministro}} (\text{min}) = T_{\text{unitario}} \left(\frac{\text{min}}{\text{kg H}_2} \right) + \text{Demanda H}_2 (\text{kg H}_2)$$

[Ec. 52]

donde:

T_{unitario} representa el tiempo que cuesta el repostar un kilogramo de hidrógeno. Como valor de referencia se toma 1,282 min/kgH₂, que es el valor medio recogido por el proyecto de demostración *Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Infrastructure Learning Demonstration* del DoE [112], Figura 57, para las 21.854 operaciones de repostaje registradas en las hidrogeneras participantes.

Demanda H₂ toma valores en función del número de recorridos que se hayan realizado desde el último repostaje. El hidrógeno consumido en un recorrido completo se obtiene multiplicando el consumo del tranvía por la distancia total de un recorrido, datos que han sido proporcionados por CAF:

$$\text{Consumo} \left(\frac{\text{kgH}_2}{\text{recorrido}} \right) = 0,24 \left(\frac{\text{kg H}_2}{\text{km}} \right) * 24,98 \left(\frac{\text{km}}{\text{recorrido}} \right) = 5,995$$

Tabla 39. Tiempos de repostaje en función del número de recorridos realizados

Fuente: *Elaboración propia a partir datos de CAF*

	Nº Recorridos			
	1	2	3	4
T _{repostaje} [min]	10	18	26	33
T _{aproximación} [min]	0,5	0,5	0,5	0,5
T _{preparación} [min]	1	1	1	1
T _{salida} [min]	0,5	0,5	0,5	0,5
T _{suministro} [min]	7,686	15,372	23,058	30,743

De esta forma, a partir de los datos referentes a horarios y frecuencias de la Tabla 38, los tiempos de repostaje mostrados en la Tabla 39, y sabiendo que un recorrido completo se realiza en 90 minutos, se obtienen el programa diario de repostaje mostrado en la Tabla 40.

Tabla 40. Programa de repostaje diario

Fuente: *Elaboración propia*

Coche 1	Coche 2	Coche 3	Coche 4	Coche 5	Coche 6	Coche 7	Coche 8	Coche 9	Coche 10	Coche 11	Coche 12	Coche 13	Coche 14	Coche 15	Coche 16	Coche 17	Coche 18
5:00	5:15	5:30	5:45	6:00	6:15	6:30	6:45	7:00	7:20	7:30	7:35	7:45	7:50	8:00	8:05	8:15	8:20
6:30-6:40	6:45-6:55	7:00-7:10	7:15-7:25	7:30-7:40	7:45-7:55	8:00-8:10	8:15-8:25	8:30	8:50	9:00	9:05	9:15	9:20	9:30	9:35	9:45	9:50
7:05	7:10	7:15	7:25	7:40	7:55	8:10	8:25	10:00	10:21	10:33-10:51	10:35-10:53	10:49	10:51-11:09	11:09-11:27	11:13-11:31	11:27-11:45	11:31-11:49
8:35	8:40	8:45	8:55	9:10	9:25	9:40	9:55	11:49-12:15	12:15-12:41	10:56	11:03	12:55-13:21	11:10	11:31	11:38	11:45	11:52
10:07	10:14	10:15-10:33	10:28	10:42	10:55-11:13	11:24	11:45-12:03	12:20	12:41	12:27	12:48	13:23	13:02	13:21-13:31	13:30	13:33-13:43	14:04-14:14
11:59	12:03-12:29	10:35	12:29-12:55	12:41-13:07	11:17	13:07-13:33	12:06	14:24-14:34	14:37-14:47	14:01-14:19	14:19-14:37	15:15-15:25	14:34-14:52	13:37	15:02-15:20	13:51	14:19
13:31-14:04	12:34	12:13	12:55	13:09	13:16	13:44	13:58	14:40	14:54	14:26	14:47	15:36	15:01	15:20-15:30	15:29	15:35-15:45	15:55-16:05
14:12	14:14-14:24	13:43-14:01	14:52-15:02	15:05-15:15	14:47-15:05	15:25-15:35	15:30-15:48	16:10-16:20	16:24-16:34	15:58-16:08	16:17-16:27	17:06-17:16	16:31-16:41	15:43	16:59-17:09	15:57	16:25
15:48-15:58	14:33	14:05	15:08	15:22	15:15	15:50	16:04	16:46	17:00	16:32	16:53	17:30	17:05	17:13-17:23	17:25	17:27-17:37	17:55-18:05
16:18	16:05-16:15	15:45-15:55	16:38-16:48	16:52-17:02	16:45-16:55	17:20-17:30	17:34-17:44	18:20	18:30	18:02-18:12	18:25	19:00	18:35	17:35	18:55	17:45	18:05
17:48-17:58	16:39	16:11	17:10	17:20	17:15	17:40	17:50	19:50	20:00	18:15	19:55	20:30-20:48	20:07	19:05	20:28	19:15	19:35
18:00	18:10	17:41-17:51	18:40	18:50	18:45	19:10	19:20	21:24-21:50	21:50-22:16	19:45	21:37-22:03	20:49	21:59	20:35-20:53	22:39	20:48-21:06	21:31
19:30	19:40	17:55	20:14	20:21	20:15-20:33	20:42	20:53-21:11	21:52		21:45		22:26-22:36	23:29-0:02	20:56	0:09-0:42	21:10	23:39
21:06-21:24	21:11-21:37	19:25	22:03-22:29	22:19	20:35	22:59	21:17	23:22-23:32		23:59				22:29-22:38		22:40-22:50	1:09-1:42
21:24	21:38	21:03	23:49-0:22	0:22	22:16-22:26	0:29-1:02	22:47-22:57			1:29-2:02							
22:54-23:04	23:08-23:18	23:19															
23:04	23:18	1:22	22:29	0:22	22:26	1:02	22:57	23:32	22:16	2:02	22:03	22:36	0:02	22:39	0:42	22:50	1:42
10	10	11	9	10	9	10	9	9	8	10	8	8	9	8	9	8	9

Número de Tranvía

Hora inicio recorrido con frecuencia cada 15 min

Hora inicio recorrido con frecuencia cada 7 min

Hora inicio recorrido con frecuencia cada 5 min

Hora inicio recorrido con frecuencia cada 20 min

Hora inicio y fin de repostaje en surtidor 1

Hora inicio y fin de repostaje en surtidor 2

Hora en la que el tranvía queda listo para su empleo la jornada siguiente

Número de recorridos realizados diariamente por cada tranvía

Para llevar a cabo el programa de repostaje se ha requerido el contar con dos equipos de dispensado de hidrógeno, ya que uno sólo no alcanzaba a cubrir el caudal de hidrógeno demandado por los tranvías.

Por lo tanto, para los 18 vehículos que están programados funcionen diariamente, el número de recorridos diarios por vehículo es de 9,111 (164 recorridos totales/18 vehículos).

5.3.3.4. Herramienta web

Conocido el recorrido a seguir por la línea 1 del tranvía de Zaragoza. Y a partir de del programa de repostaje diario de los tranvías, del que es posible obtener el número de recorridos totales a realizar por el número total de tranvías, ya es posible realizar el caso de validación propuesto mediante la herramienta web.

A continuación se muestran los pasos a seguir en la herramienta web.

a. Edición de ruta

A partir del menú *Edición* → *Rutas* → botón *Crear ruta*, salta la pantalla siguiente, en la que se puede dibujar la ruta deseada.

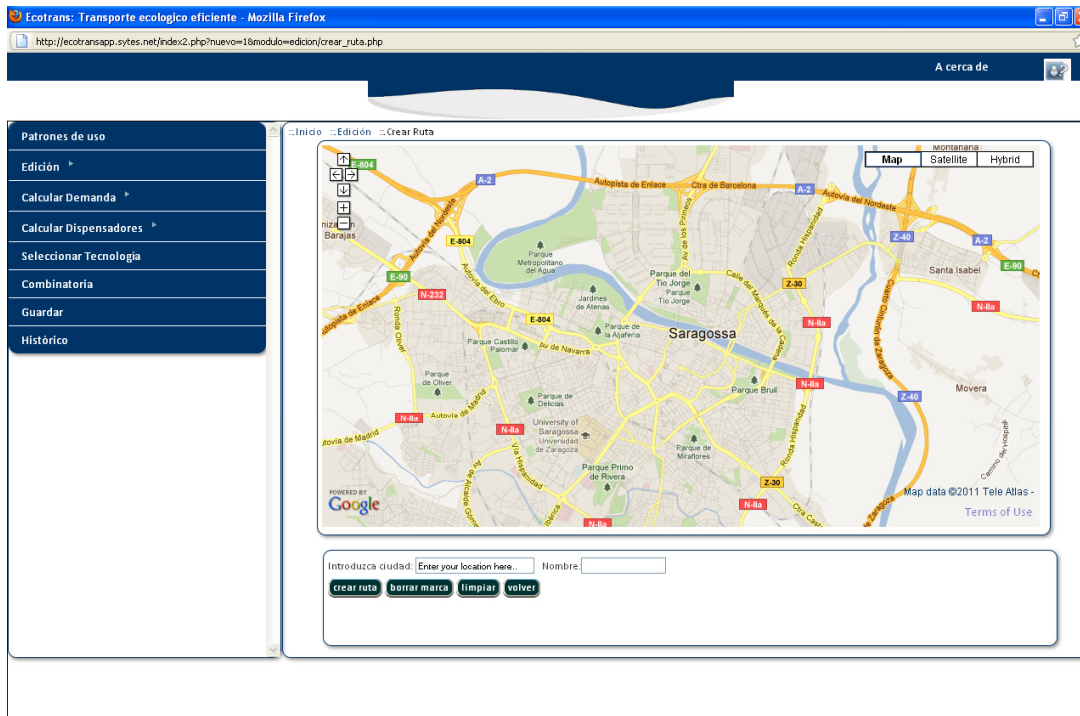


Figura 78. Pantalla *crear ruta* de la herramienta

Previamente a pulsar sobre el botón *crear ruta*, se deben marcar sobre el mapa de Google los puntos por los que debe pasar la ruta y se debe escribir un nombre a la ruta, en el campo existente para tal fin.

Así, se obtiene la ruta mostrada en la siguiente imagen, que coincidirá con la del trazado completo de la línea L1 del tranvía de Zaragoza.

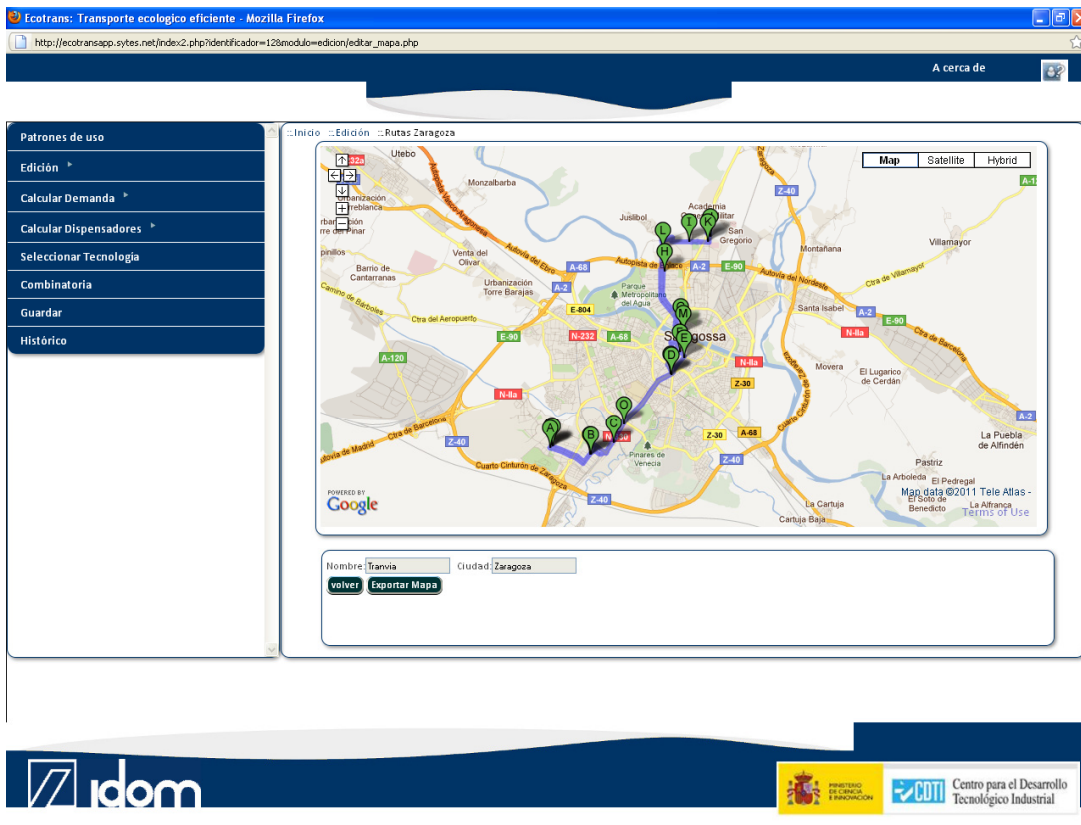


Figura 79. Recorrido de la Línea 1 del tranvía de Zaragoza obtenida en la herramienta

b. Edición de Flota y Tecnologías

A continuación se comprueba que el modelo de vehículo, en este caso el tranvía *URBOS III* de *CAF* se encuentra en la base de datos. En el caso de que no esté, es posible incluirlo a partir del menú: *Edición* → *Flota* → *Otros* → botón *Crear nuevo*. En el caso de que el modelo deseado esté en la base de datos, pero se quiera modificar o incluir algún dato, se puede hacer a partir del menú: *Edición* → *Flota* → *Otros* → botón *Modificar*. En la siguiente imagen se reproduce la pantalla *Modificar*, con las características del *URBOS III* proporcionadas por *CAF*.



Figura 80. Prestaciones del modelo URBOS III de CAF

De igual modo, es posible añadir o modificar los diferentes equipos de que constará la estación de repostaje mediante los menús: *Edición* → *Dispensadores* y *Edición* → *Tecnologías*.

c. Edición de Parámetros

Antes de proceder al cálculo, es posible variar los parámetros que por defecto se utilizan para determinar el número de surtidores necesarios para cubrir la demanda total de hidrógeno. Así será posible modificar:

- Tiempo de aproximación. Es el tiempo que se tarda en aproximar el tranvía al dispensador de suministro de hidrógeno. El valor de referencia se considera de 0,5 minutos.
- Tiempo de preparación. Es el tiempo que se tarda en preparar la operación de repostaje: colocación de la manguera, ajuste de boquerel. El valor de referencia se considera de 0,5 minutos.
- Tiempo unitario. Representa el tiempo que cuesta el repostar un kilogramo de hidrógeno. Como valor de referencia se toma 1,282 min/kgH₂, que es el valor medio recogido por el proyecto de demostración *Hydrogen Fuel Cell Vehicle and Infrastructure Learning Demonstration* del DoE [112], Figura 57, para las 21.854 operaciones de repostaje registradas en las hidrogeneras participantes.
- Tiempo de espera. Es el tiempo máximo previsto que debería esperar un vehículo hasta que llega su turno de repostar.
- Tiempo de salida. Es el tiempo que tarda el vehículo en abandonar la zona del dispensador y dejarla lista para el siguiente tranvía. Incluye el tiempo correspondiente a la recogida de la manguera y el tiempo que tarda el tranvía en dejar libre la zona. El valor de referencia se considera de 1 minuto.

Además, en esta pantalla hay unos campos para modificar:

- Porcentaje de demanda. Representa el porcentaje de llenado de los depósitos de los vehículos con los que se calcula la demanda.
- Número de Dispensadores por Hidrogenera. Determina el número de hidrogeneras totales a instalar y el tamaño de las mismas.

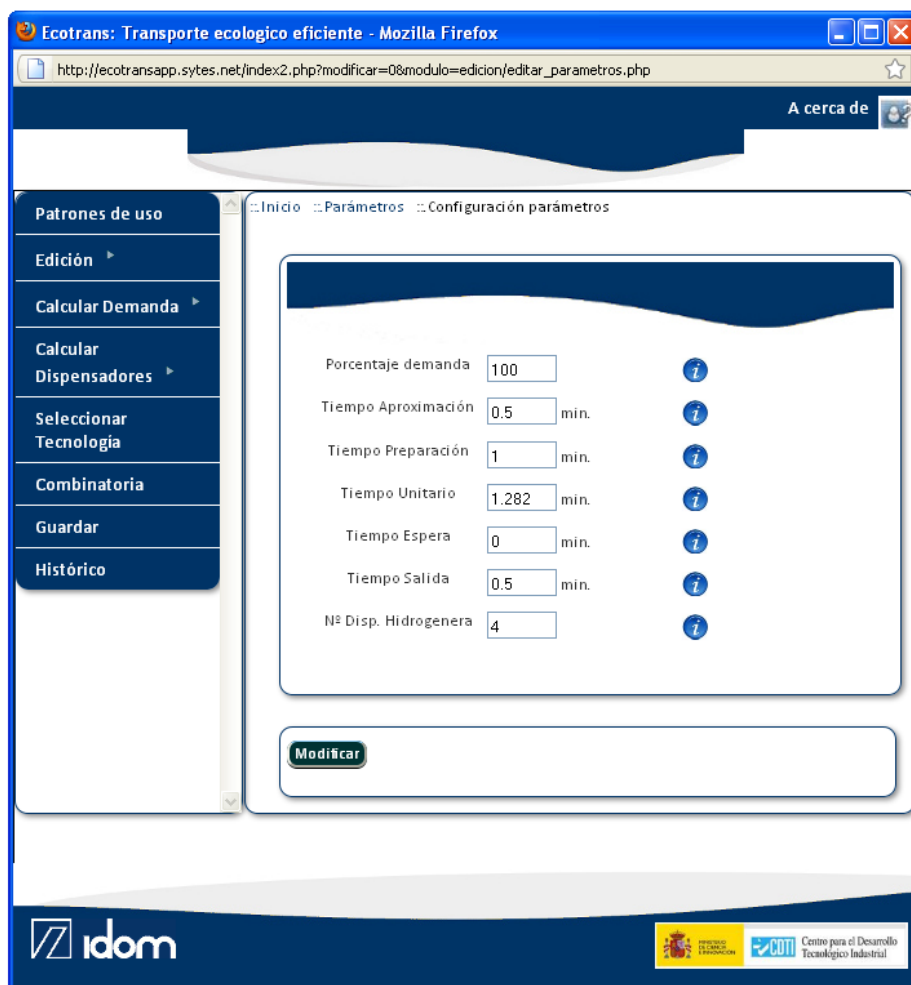


Figura 81. Pantalla *Configuración de Parámetros*

d. Calcular Demanda

Una vez que ya se dispone en la base de datos de la ruta a realizar y del vehículo y sus prestaciones, ya es posible proceder a calcular la demanda de hidrógeno diaria que se producirá en la actividad prevista. Para ello se debe seleccionar el menú *Calcular Demanda* → *Selección Ruta*. En este punto aparece una pantalla con las rutas existente en la base de datos; se selecciona la relativa a la ruta del tranvía y lo que hará saltar una nueva pantalla con la totalidad de vehículos existentes en la base de datos. Se localiza el vehículo deseado, en este caso el *URBOS III*, y al pinchar sobre el botón *Seleccionar Vehículo* se pedirá que se inserte el *Número de Vehículos* previstos que seguirán la ruta diariamente, 18 según los datos proporcionados por CAF, y el *Número de Recorridos* diarios que realizarán estos

vehículos, que según el plan de repostaje realizado en el punto 5.3.3.3. *Programa Diario de Repostaje*, se obtiene una media de 9,111 recorridos por cada vehículo (ver figura siguiente).

El resultado del cálculo de la demanda que así se obtiene, es el mismo que se obtendría si para cada uno de los 18 tranvías se introdujese la ruta y el número de recorridos individuales, y luego se sumaran las demandas de hidrógeno calculadas individualmente.



Figura 82. Pantalla de selección de número de vehículos y de recorridos por vehículo en la opción de *Calcular de Demanda* mediante *Selección Ruta*

Al pinchar sobre el botón *Aceptar*, se vuelve a la pantalla en la que aparecen las rutas existentes en la base de datos, pero esta vez con la ruta deseada ya seleccionada. Desde este punto, bien se puede acceder a una pantalla en la que se muestra sobre el mapa la ruta

seleccionada y se indica el tipo de vehículo, sus prestaciones y los datos introducidos en la pantalla anterior, así como se indica la longitud de cada recorrido y el tiempo estimado en realizarlo (ver figura siguiente), pinchando sobre el botón *Ver Ruta*, o bien se puede acceder a la pantalla de cálculo de la demanda mediante el menú *Calcular Demanda* → *Calcula demanda* (ver Figura 84).

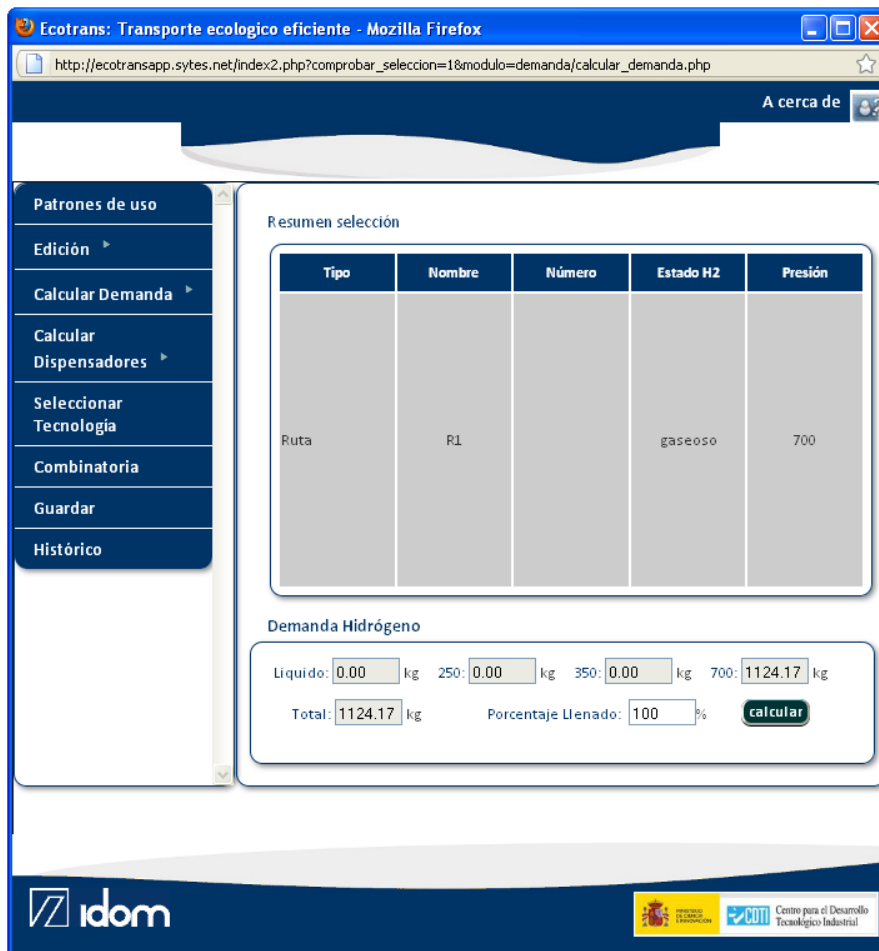


Figura 83. Pantalla Ver Ruta

En la pantalla *Calcular demanda* (Figura 84), se obtiene la cantidad total de hidrógeno demandada por los vehículos diariamente para completar el número de recorridos previstos a la ruta preestablecida. También se incluye la cantidad de hidrógeno demandada diariamente por estado, hidrógeno líquido ó gaseoso, y en este último caso, por presión de almacenamiento en los vehículos. En este caso, la demanda total coincide con la demanda

en estado gaseoso a 700 bar de presión, ya que sólo contamos con un modelo de vehículos, el *URBOS III*, que cuenta con un sistema de almacenamiento de hidrógeno a 700 bar compuesto por 4 depósitos de 6 kilogramos cada uno.

En esta pantalla vuelve a darse la oportunidad de modificar el campo *Porcentaje de Llenado*, que coincide con el campo *Porcentaje de Demanda* de la pantalla *Configuración de Parámetros*, y volver a recalcular la demanda pinchando sobre el botón *Calcular*. En el caso particular de la línea del tranvía, al tratarse de una flota cautiva y un repostaje programado, el porcentaje de llenado será del 100%.



The screenshot shows a web browser window titled "Ecotrans: Transporte ecologico eficiente - Mozilla Firefox". The address bar contains the URL: `http://ecotransapp.sytes.net/index2.php?comprobar_seleccion=1&modulo=demanda/calcular_demanda.php`. The page features a navigation menu on the left with options: Patrones de uso, Edición, Calcular Demanda, Calcular Dispensadores, Seleccionar Tecnología, Combinatoria, Guardar, and Histórico. The main content area is titled "Resumen selección" and contains a table with the following data:

Tipo	Nombre	Número	Estado H2	Presión
Ruta	R1		gaseoso	700

Below the table, the "Demanda Hidrógeno" section displays input fields for different states and pressures:

Líquido: kg 250: kg 350: kg 700: kg

Total: kg Porcentaje Llenado: %

At the bottom of the page, there are logos for "idom" and "CDTI Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial".

Figura 84. Demanda diaria total de hidrógeno y demanda por estado y presión de almacenamiento en vehículo

Por lo tanto, en el caso que nos ocupa, se ha obtenido que la demanda diaria de hidrógeno es de 1124,17 kgH₂.

e. Cálculo del Número de Hidrogeneras

Una vez se dispone de la demanda de hidrógeno, se procede a calcular el número de dispensadores necesarios para cubrir la demanda de hidrógeno, y por lo tanto, el número de hidrogeneras que serán necesarias (también en función del número de dispensadores por hidrogenera (como ya se ha indicado, modificable en la pantalla *Configuración de Parámetros*).

Previo al cálculo, como se ve en la Figura 85, pantalla a la que se accede mediante el menú: *Calcular Dispensadores* → *Selección Dispositivos*, se deben seleccionar los modelos de dispensadores que se quiere que se utilicen en el cálculo, desde uno al máximo que haya en la base de datos, ya que cada uno cuenta con unas prestaciones y un precio propios. Se debe tener en cuenta que los dispensadores seleccionados deben ser aptos para el suministro de hidrógeno en los diferentes estados y presiones en los que existe demanda. En este caso que nos ocupa, deberá tenerse en cuenta sólo el suministro gaseoso a 700 bar.

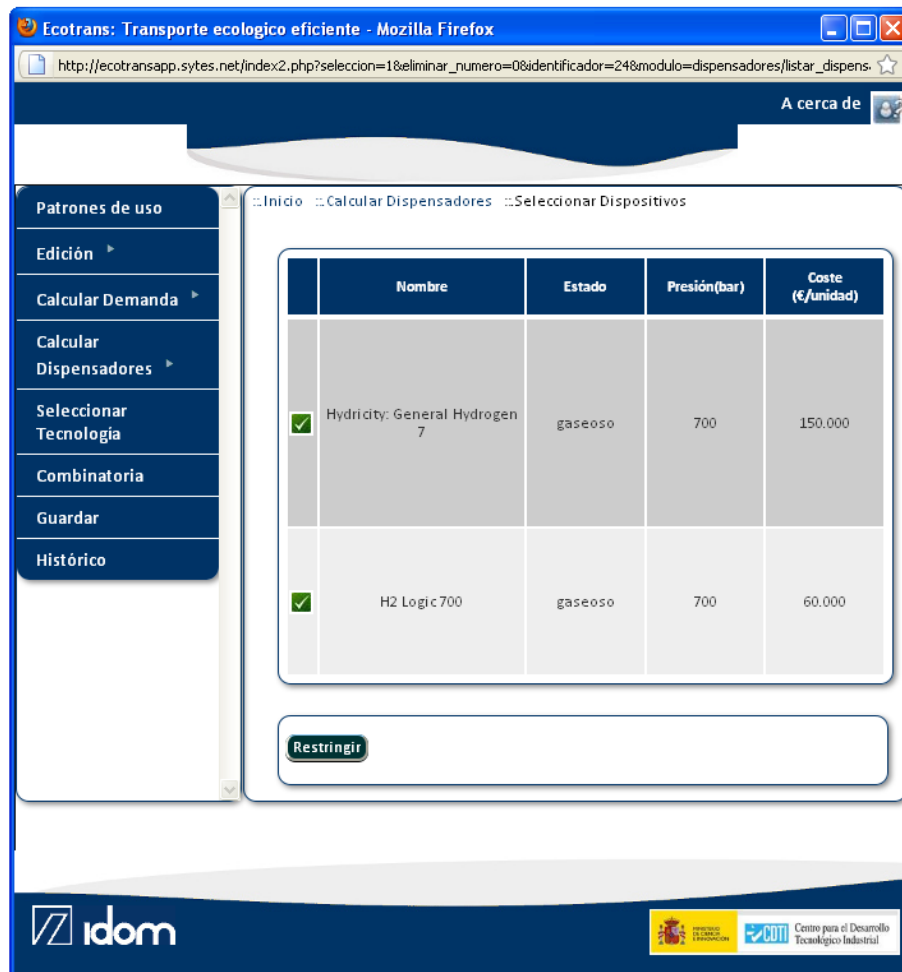


Figura 85. Pantalla de selección entre las opciones de dispensadores existentes en la base de datos

A partir del menú: *Calcular Dispensadores* → *Parámetros*, es posible modificar para cada estado y presión, los parámetros externos al propio dispensador, pero que influyen a la hora de determinar el número de dispensadores necesarios para cubrir la demanda.

De este modo, se debe indicar el tipo de demanda que se espera: si se prevé se producirán horas punta de demanda, en ese caso habrá que indicar el número de horas que se prevé habrán las instalaciones de repostaje y/o el porcentaje de la demanda total de hidrógeno se prevé en las horas de mayor demanda. Si por el contrario se prevé un reparto de la demanda uniforme, porque, por ejemplo, se trata de una flota cautiva en la que es posible planificar los

repostajes, s debe indicar la opción de *Reparto Uniforme*. Este es el caso de la línea de tranvía que nos ocupa en el presente apartado.

En esta pantalla vuelve a darse la oportunidad de modificar los campos *Tiempo de Aproximación*, *Tiempo de Preparación*, *Tiempo de Salida* y *Tiempo de Máxima Espera* de la pantalla *Configuración de Parámetros*, y volver a recalcular la demanda pinchando sobre el botón *Calcular*.

Como resultados, además del *Número de Dispensadores* necesarios, se obtiene la demanda de hidrógeno en hora punta (demanda horaria en caso de reparto uniforme), el tiempo total empleado en el suministro (que es función de la demanda de hidrógeno y la velocidad de dispensado), el número de vehículos a los que habrá que dar suministro y el tiempo total (función de la demanda y del número de vehículos).

Como resultado particular del caso que nos ocupa, ver siguiente figura, se obtiene que son requeridos dos dispensadores con capacidad de suministrar a 700 bar de presión; que es el mismo número obtenido el plan de repostaje realizado en el punto 5.3.3.3. *Programa Diario de Repostaje*.

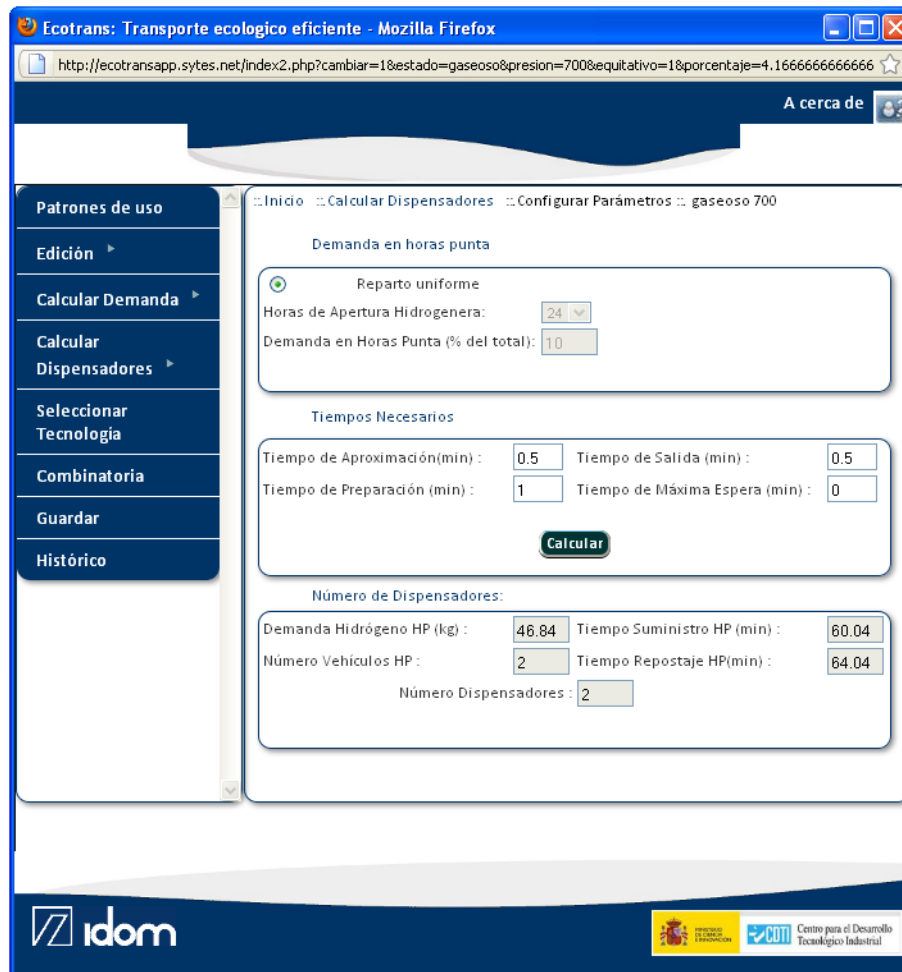


Figura 86. Pantalla de parámetros que influyen en el cálculo del número de dispensadores

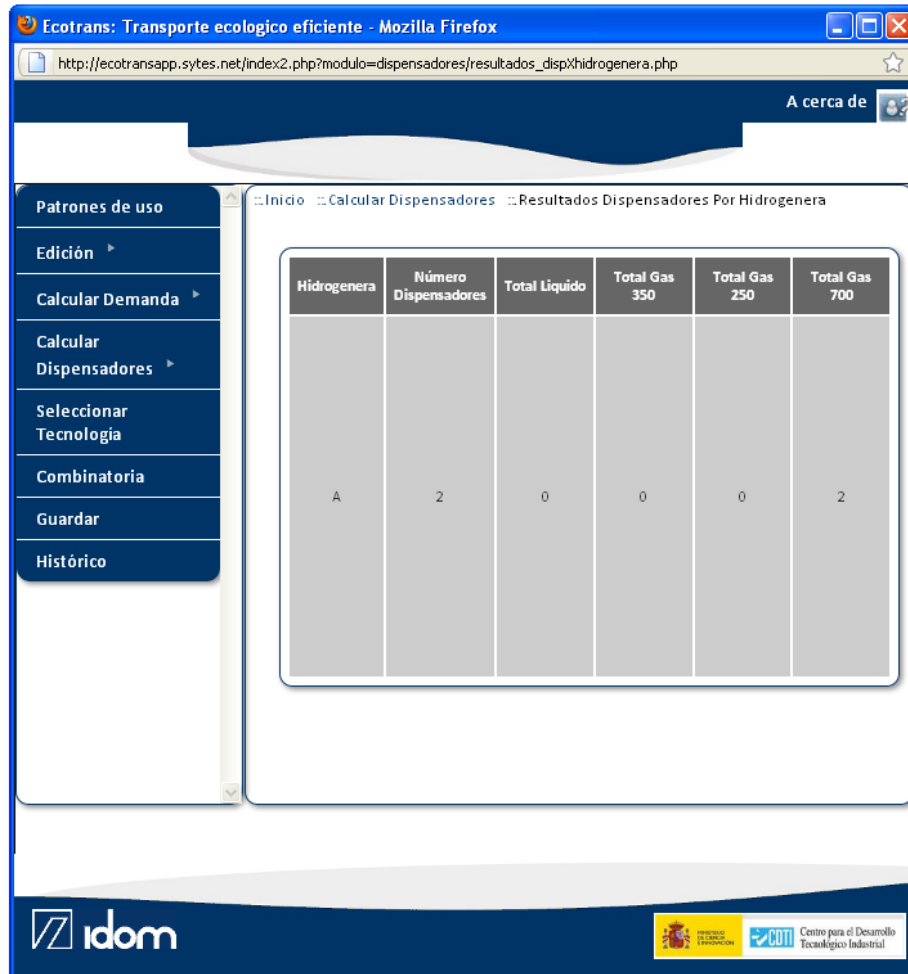
Mediante el menú: *Calcular Dispensadores* → *Resultados*, se accede a la pantalla que se muestra en la siguiente imagen. En ella se recogen las diferentes opciones posibles para cubrir la demanda en función de los modelos de dispensadores seleccionados. La pantalla de devuelve el número, el modelo de dispensador, la presión y estado de operación, el coste y la superficie requerida.

Nº	Tipo	Presión(bar)	Coste Total(€)	Superficie(m²)
2[2]	Hydricity: General Hydrogen 7	700	300.000	0
2[2]	H2 Logic 700	700	120.000	0

Figura 87. Pantalla Resultados Dispensadores

Mediante el menú: *Calcular Dispensadores* → *Hidrogenas*, se accede a la pantalla Resultados Dispensadores por Hidrogenas, en la que se muestran las hidrogenas necesarias para cubrir la demanda, con el número de dispensadores de que constará cada una y las presiones o estados a las que deberá utilizarse.

Para el caso particular del tranvía de Zaragoza, como se puede observar en la figura siguiente, se requerirá de una hidrogena con dos dispensadores con capacidad para servir hidrógeno a 700 bar de presión.



Ecotrans: Transporte ecologico eficiente - Mozilla Firefox
http://ecotransapp.sytes.net/index2.php?modulo=dispensadores/resultados_disp%hidrogenera.php

A cerca de

Inicio | Calcular Dispensadores | Resultados Dispensadores Por Hidrogenera

Hidrogenera	Número Dispensadores	Total Liquido	Total Gas 350	Total Gas 250	Total Gas 700
A	2	0	0	0	2


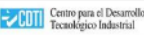
idom   Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

Figura 88. Pantalla *Dispensadores por Hidrogenera*

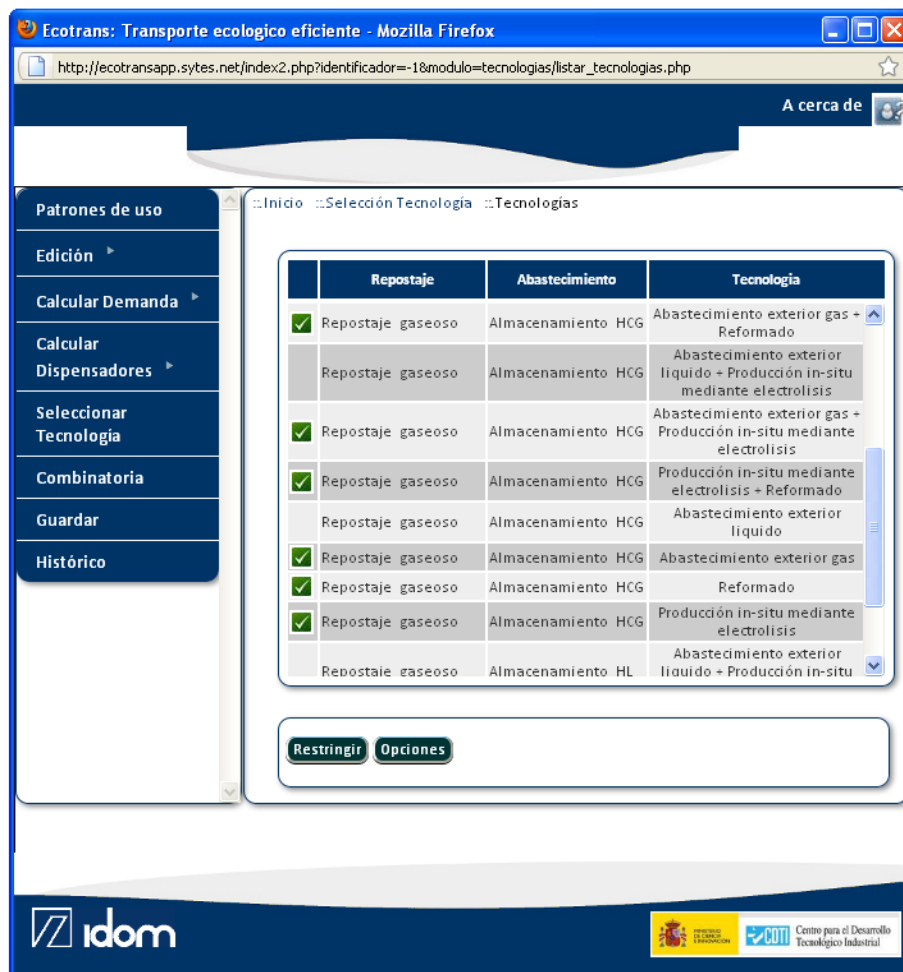
f. Selección de Tecnología

El siguiente paso es seleccionar las tecnologías que se quiere que se tengan en cuenta a la hora de determinar los equipos necesarios para la instalación. Se puede seleccionar:

- el tipo de repostaje: líquido o gaseoso (limitado en parte por el tipo de vehículo que vaya a hacer uso de la estación de repostaje)
- el tipo de almacenamiento: líquido o gaseoso
- el tipo de abastecimiento de hidrógeno:
 - o exterior: líquido o gaseoso

- producción de hidrógeno in situ mediante reformado
- producción de hidrógeno in situ mediante electrolisis
- combinación de varios de estos sistemas de abastecimiento

A partir del menú: *Seleccionar Tecnología*, se obtiene un listado con todas las posibles combinaciones posibles entre tipo de repostaje, almacenamiento y abastecimiento (ver figura siguiente).



The screenshot shows a web browser window with the URL `http://ecotransapp.sytes.net/index2.php?identificador=-1&modulo=tecnologias/listar_tecnologias.php`. The page title is "Ecotrans: Transporte ecologico eficiente - Mozilla Firefox". The main content area displays a table with three columns: "Repostaje", "Abastecimiento", and "Tecnología". The table lists various combinations of these elements, with some rows marked with a green checkmark in the first column. Below the table, there are two buttons: "Restringir" and "Opciones".

	Repostaje	Abastecimiento	Tecnología
<input checked="" type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Abastecimiento exterior gas + Reformado
<input type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Abastecimiento exterior liquido + Producción in-situ mediante electrolisis
<input checked="" type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Abastecimiento exterior gas + Producción in-situ mediante electrolisis
<input checked="" type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Producción in-situ mediante electrolisis + Reformado
<input type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Abastecimiento exterior liquido
<input checked="" type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Abastecimiento exterior gas
<input checked="" type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Reformado
<input checked="" type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Producción in-situ mediante electrolisis
<input type="checkbox"/>	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HL	Abastecimiento exterior liquido + Producción in-situ

Figura 89. Pantalla de selección de las combinaciones posibles de tecnologías

La selección de cada una de estas combinaciones posibles se puede hacer, bien manualmente, bien a partir de la opción restringir (pinchando el botón Restringir).

Al pinchar en Restringir, salta una nueva pantalla (ver figura siguiente) en la que marcando las diferentes tecnologías de repostaje, almacenamiento y abastecimiento/producción de hidrógeno, al pinchar sobre el botón Restringir, te devuelve a la pantalla Tecnologías, en la que ya aparecen seleccionadas las combinaciones posibles con las opciones que se han elegido como posibles.

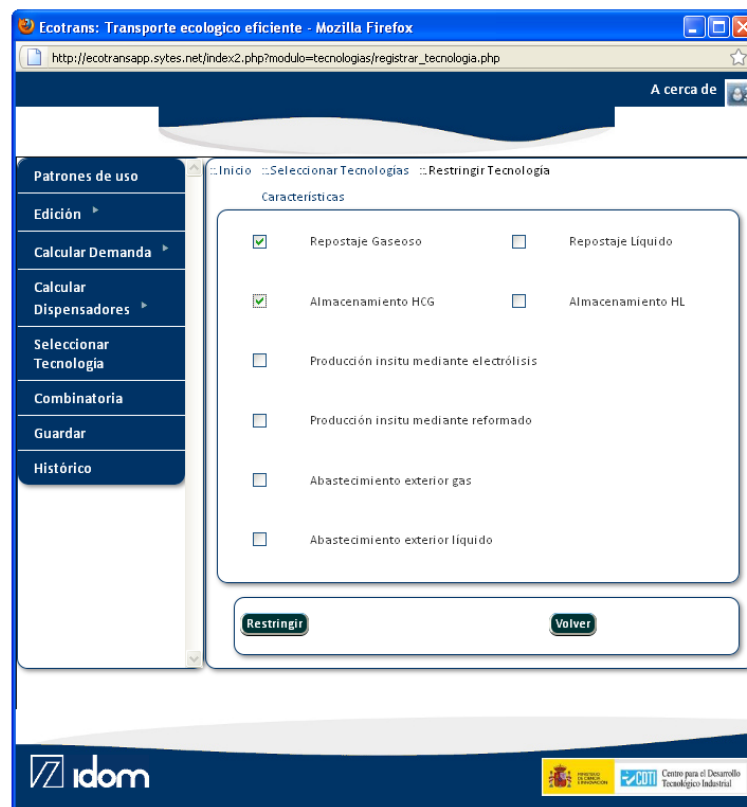


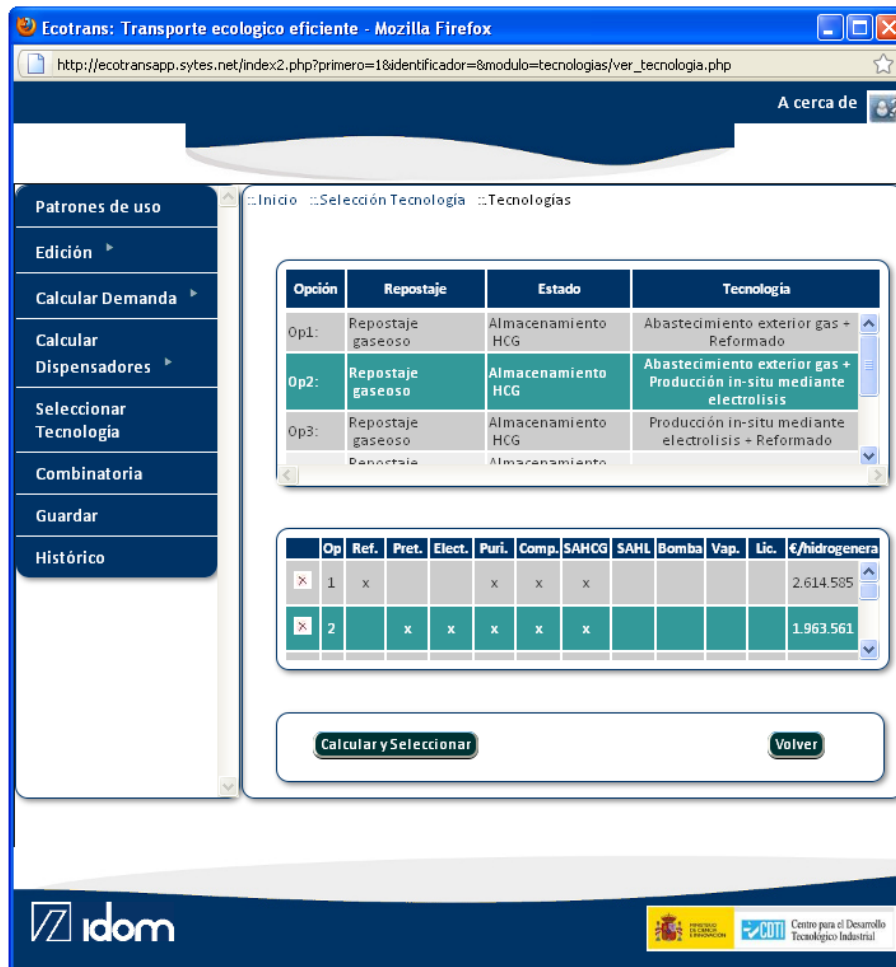
Figura 90. Pantalla Restringir Tecnología

En el caso que nos ocupa, tal y como se observa en la Figura 89 y en la Figura 90, como únicamente se requiere repostar en estado gaseoso, se han seleccionada únicamente repostaje y almacenamiento en estado gaseoso, ya que los cambios de estado líquido-gas supone pérdidas de energía y por ende, de rendimiento y económicas. De este modo queda limitado el estudio a 6 opciones, que se recogen en la siguiente tabla, y que son las opciones que aparecen marcadas en la Figura 89.

Tabla 41. Opciones de combinación de tecnologías para la configuración de la hidrogenera

Opción	Estado en el Sistema de Dispensado	Estado en el Sistema de Almacenamiento	Tipo Abastecimiento
1	Gaseoso	Hidrógeno Comprimido Gas	Abastecimiento exterior gas + Reformado
2	Gaseoso	Hidrógeno Comprimido Gas	Abastecimiento exterior gas + Producción in-situ mediante electrolisis
3	Gaseoso	Hidrógeno Comprimido Gas	Producción in-situ mediante electrolisis + Reformado
4	Gaseoso	Hidrógeno Comprimido Gas	Abastecimiento exterior gas
5	Gaseoso	Hidrógeno Comprimido Gas	Reformado
6	Gaseoso	Hidrógeno Comprimido Gas	Producción in-situ mediante electrolisis

Pinchando sobre el botón *Opciones* de la pantalla *Tecnologías* (Figura 89), salta una nueva pantalla en la que aparecen las opciones contempladas en el estudio, y un nuevo recuadro en el que se indican los equipos principales que deben estar presentes en las diferentes configuraciones y el precio mínimo de los equipos para cada opción. Este precio se obtiene a partir de los precios que aparecen en la base de datos en la ficha de cada equipo y tecnología. La elección de equipos se realiza de forma que siempre se cubra la demanda de hidrógeno. Para ello, en ocasiones, si la opción resulta más económica, se seleccionarán varios equipos iguales que de forma individual no llegarán a cubrir la demanda, pero que en conjunto sí que lo hacen. El número de equipos iguales y para la misma función se limita a un máximo de 2.



The screenshot shows the 'EcoTrans' web application in a Mozilla Firefox browser. The page title is 'EcoTrans: Transporte ecologico eficiente - Mozilla Firefox'. The URL is 'http://ecotransapp.sytes.net/index2.php?primero=1&identificador=8modulo=tecnologias/ver_tecnologia.php'. The page has a navigation menu on the left with options: Patrones de uso, Edición, Calcular Demanda, Calcular Dispensadores, Seleccionar Tecnología, Combinatoria, Guardar, and Histórico. The main content area is titled 'Inicio :: Selección Tecnología :: Tecnologías' and contains two tables and two buttons.

Opción	Repostaje	Estado	Tecnología
Op1:	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Abastecimiento exterior gas + Reformado
Op2:	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Abastecimiento exterior gas + Producción in-situ mediante electrolisis
Op3:	Repostaje gaseoso	Almacenamiento HCG	Producción in-situ mediante electrolisis + Reformado

Op	Ref.	Pret.	Elect.	Puri.	Comp.	SAHCG	SAHL	Bomba	Vap.	Lic.	€/hidrogenera
1	x			x	x	x					2.614.585
2		x	x	x	x	x					1.963.561

Buttons: **Calcular y Seleccionar**, **Volver**

Figura 91. Resumen de las opciones sometidas a estudio de equipos requeridos

Para ver con mayor detenimiento los equipos requeridos en cada opción, y conocer y tener la opción de cambiar el modelo seleccionado para cada una de las tecnologías, está la opción de seleccionar entre las posibles la opción deseada, y pinchar sobre el botón *Calcular y Seleccionar*. De este modo se accede a una nueva pantalla: *Calcular costes* (ver figura siguiente), en la que para cada opción, aparecen activos los campos correspondientes a los equipos que deben estar presentes en la estación de repostaje, con los modelos de los equipos seleccionados por la herramienta y el número de equipos necesarios, y el coste de la suma de estos equipos.



Figura 92. Pantalla *Calcular costes*

La herramienta permite, mediante un desplegable, seleccionar para cada tipo de equipo, cualquiera de los modelos existentes en la base de datos, actualizándose de forma automática el coste total de los equipos. Pinchando sobre el botón *volver*, se vuelve a la pantalla anterior (*Tecnologías*, Figura 91), desde donde es posible acceder a otra de las opciones de estudio. Si se ha realizado algún cambio de equipo, para que la modificación sea registrada, debe pincharse el botón *Seleccionar*.

Además, pinchando sobre el botón de información, *i*, de cada tipo de equipo, salta una nueva pantalla: *Selección "tipo de equipo"* (ver figura siguiente), en la que se detalla el precio, prestaciones y número de equipos necesarios para cubrir la demanda de hidrógeno definida por la flota de vehículos prevista. En esta pantalla también es posible elegir el modelo de

entre los existentes en la base de datos para ver sus prestaciones y características, pero al volver a la pantalla anterior, no se guarda ningún cambio realizado.



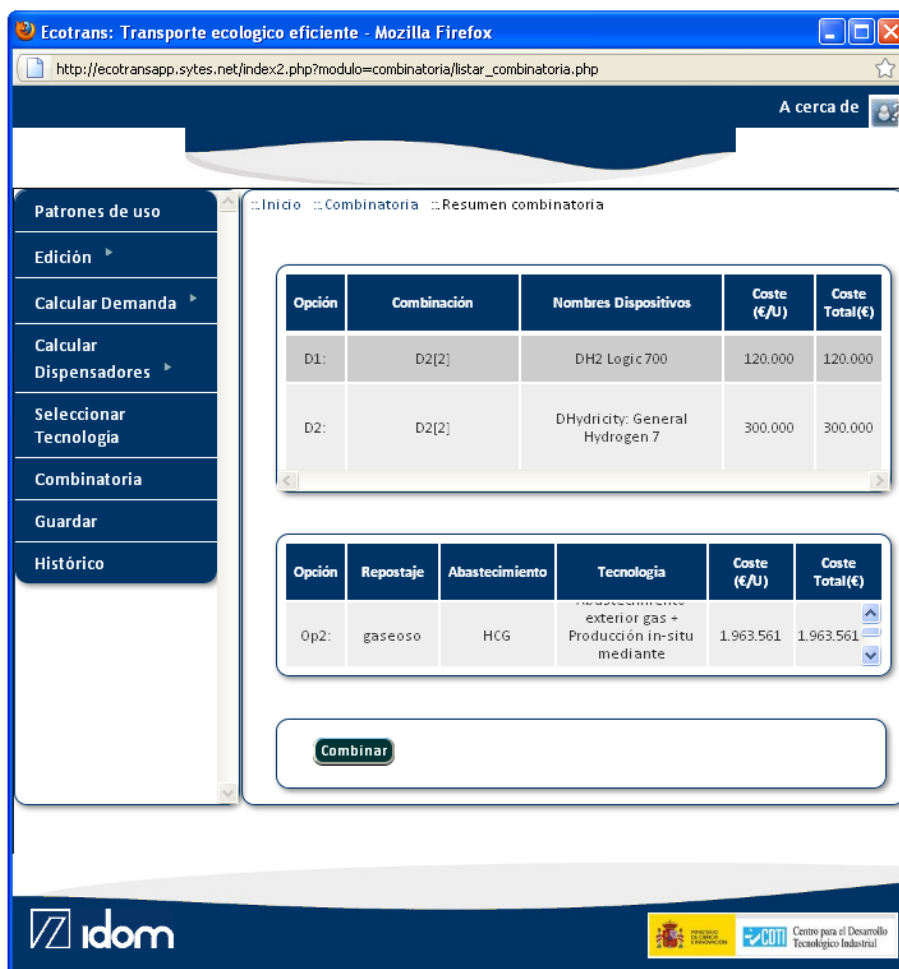
Figura 93. Pantalla Selección de Electrolizador

Recordar que en cualquier momento es posible añadir a la base de datos un modelo nuevo para cualquiera de los equipos a partir de los menús: *Edición* → *Dispensadores* y *Edición* → *Tecnologías* → “Nombre del tipo de equipo”.

g. Combinatoria

Una vez seleccionados las opciones de estudio referentes a las tecnologías y equipos, y confirmado los modelos a utilizar en la simulación para cada una de las tecnologías

necesarias, a partir del menú: Combinatoria, se accede a una nueva pantalla: *Resumen combinatoria* (ver figura siguiente), en la que se muestran las diferentes opciones, por un lado de los dispositivos de dispensados seleccionados, y por otro de las diferentes opciones de tecnología.



Opción	Combinación	Nombres Dispositivos	Coste (€/U)	Coste Total(€)
D1:	D2[2]	DH2 Logic 700	120.000	120.000
D2:	D2[2]	DHydricity: General Hydrogen 7	300.000	300.000

Opción	Repostaje	Abastecimiento	Tecnología	Coste (€/U)	Coste Total(€)
Op2:	gaseoso	HCG	Abastecimiento exterior gas + Producción in-situ mediante	1.963.561	1.963.561

Combinar

Figura 94. Pantalla *Resumen Combinatoria*

Al pinchar sobre el botón *Combinar*, salta una nueva pantalla en la que aparece un listado de todas las combinaciones posibles de modelos de dispensadores con las opciones de tecnología seleccionadas. Este listado se puede ordenar por cualquiera de las columnas de la tabla (ver siguiente figura).



#	Dispensadores	Respostaje	Almacenamiento	Coste (€/U)	Coste Total(€)
1	H2 Logic 700	gaseoso	HCG	733.430	733.430
2	Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	913.430	913.430
3	H2 Logic 700	gaseoso	HCG	2.083.561	2.083.561
4	Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	2.263.561	2.263.561
5	H2 Logic 700	gaseoso	HCG	2.734.585	2.734.585
6	Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	2.914.585	2.914.585
7	H2 Logic 700	gaseoso	HCG	3.318.132	3.318.132
8	Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	3.498.132	3.498.132
9	H2 Logic 700	gaseoso	HCG	6.136.580	6.136.580

Figura 95. Resumen de las opciones combinadas analizadas ordenadas por coste

Como se observa en la imagen, los resultados del caso pueden exportarse a formato Excel, Word y PDF, simplemente pinchando en los botones correspondientes.

h. Resultados

A modo de resumen, para el caso de la transformación a hidrógeno del tranvía de Zaragoza, se obtienen los siguientes resultados en cuanto a las instalaciones requeridas:

El número e hidrogeneras y dispensadores es el siguiente:

Tabla 42. Resumen: número de hidrogeneras y dispensadores

Nº Hidrogeneras	1
Nº Dispensadores	2
Presión suministro (bar)	700

Los modelos de los equipos para las versiones más económicas de cada una de las opciones valoradas por la herramienta, las cuales se recogen en la Tabla 41, son los siguientes:

Tabla 43. Resumen: equipos Opción 1

Opción 1	Modelo	Nº equipos
Purificador	Purif (500kg)	1
Compresor	H2logic 1-1000 BAR DIAPHRAGM O	2
Depósito HCG	H2G 350 (2000kg)	1
Reformador	HyGear 200	1

Tabla 44. Resumen: equipos Opción 2

Opción 2	Modelo	Nº equipos
Pretratamiento	HGenerators Water distiller 1	2
Electrolizador	Electrolizador alcalino 120.0	2
Purificador	Purif (500kg)	1
Compresor	H2logic 1-1000 BAR DIAPHRAGM O	2
Depósito HCG	H2G 350 (2000kg)	1

Tabla 45. Resumen: equipos Opción 3

Opción 3	Modelo	Nº equipos
Pretratamiento	HGenerators Water distiller 1	1
Electrolizador	Electrolizador alcalino 510.0	1
Purificador	Purif (1000kg)	1
Compresor	H2logic 1-1000 BAR DIAPHRAGM O	2
Depósito HCG	H2G 350 (2000kg)	1
Reformador	HyGear 250	1

Tabla 46. Resumen: equipos Opción 4

Opción 4	Modelo	Nº equipos
Compresor	H2logic 1-1000 BAR DIAPHRAGM O	2
Depósito HCG	H2G 350 (2000kg)	1

Tabla 47. Resumen: equipos Opción 5

Opción 5	Modelo	Nº equipos
Purificador	Purif (2000kg)	1
Compresor	H2logic 1-1000 BAR DIAPHRAGM O	2
Deposito HCG	H2G 350 (2000kg)	1
Reformador	HyGear 250	2

Tabla 48. Resumen: equipos Opción 6

Opción 6	Modelo	Nº equipos
Pretratamiento	HGenerators Water distiller 1	1
Electrolizador	Electrolizador alcalino 1175.	1
Purificador	Purif (2000kg)	1
Compresor	H2logic 1-1000 BAR DIAPHRAGM O	2
Deposito HCG	H2G 350 (2000kg)	1

De esta forma se obtienen los siguientes costes para las instalaciones, en función de la combinación de los modelos de dispensadores y las opciones de tecnología analizadas:

Tabla 49. Costes de la instalación

Dispensadores	Repostaje	Almacenamiento	Opción Tecnologías	Coste [€]
H2 Logic 700	gaseoso	HCG	Abastecimiento exterior gas	733.430
Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	Abastecimiento exterior gas	913.430
H2 Logic 700	gaseoso	HCG	Abastecimiento exterior gas + Producción in-situ mediante electrolisis	2.083.561
Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	Abastecimiento exterior gas + Producción in-situ mediante electrolisis	2.263.561
H2 Logic 700	gaseoso	HCG	Abastecimiento exterior gas + Reformado	2.734.585
Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	Abastecimiento exterior gas + Reformado	2.914.585
H2 Logic 700	gaseoso	HCG	Producción in-situ mediante electrolisis	3.318.132
Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	Producción in-situ mediante electrolisis	3.498.132
H2 Logic 700	gaseoso	HCG	Producción in-situ mediante electrolisis + Reformado	6.136.580
Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	Producción in-situ mediante electrolisis + Reformado	6.316.580
H2 Logic 700	gaseoso	HCG	Reformado	8.419.848
Hydricity: General Hydrogen 7	gaseoso	HCG	Reformado	8.599.848

Así, con los equipos y costes de los mismos de los que se dispone en la base de datos, se obtiene que la opción más económica es la que se basa exclusivamente en el abastecimiento exterior de hidrógeno en estado gaseoso. Indicar que es estos costes no se incluye el precio de compra de este hidrógeno que se obtiene externamente a la estación.

En el apartado A6.1. *Escenario 2050. Parque Móvil Público Zaragoza con Hidrógeno* del ANEXO 6, se propone un caso de validación par esta aplicación web: “*Escenario 2050. Parque móvil público Zaragoza con hidrógeno*”, con la que se obtiene un número de hidrogeneras, en función de la flota total de vehículos planteada. A continuación, a partir de

estos datos será posible validar la *Herramienta de Valoración* descrita en el ANEXO 4, la cual se ha diseñado para calcular los costes de inversión totales y acumulados por periodos, así como la amortización de los mismos.

5.3.4. Criterios de selección SIG

Ante la problemática existente a la hora de determinar la ubicación geográfica más óptima de las instalaciones de repostaje de hidrógeno, a partir del uso de un sistema GIS se ha desarrollado una metodología que mediante la asignación de pesos a una serie de criterios esenciales a la hora de localizar la ubicación de las nuevas instalaciones (IMD de los viales, accesos a vías principales, tipo de suelo, proximidad a zonas pobladas o comerciales, rutas de transporte público), constituye una herramienta de ayuda en las tareas de toma de decisiones que se complementa con la aplicación web desarrollada.

El objetivo es definir los criterios de decisión que permitan, a través de un Sistema de Información Geográfico (SIG), determinar en un área geográfica determinada, las posibles ubicaciones de las estaciones de repostaje que conformarían una nueva infraestructura de suministro de hidrógeno aplicada al sector transporte.

La metodología propuesta se basa en la superposición de capas que permitan la priorización o exclusión de determinadas áreas o zonas en función de que cumplan o no unos requisitos determinados definidos en cada una de estas capas. Cada una de estas capas representará cada uno de los diferentes criterios de decisión que se consideran para la toma de decisiones. Estos criterios son los siguientes:

- Índice medio de densidad de tráfico diario (IMD)
- Accesibilidad
- Densidad de población
- Rutas de transporte urbano
- Zonas comerciales

- Polígonos industriales
- Plan General de Ordenación Urbana

Teniendo en cuenta estos criterios de decisión, es posible tener en cuenta escenarios basados en transporte urbano y/o privado:

- Transporte Urbano:
Se presta especial atención a las rutas seguidas por los autobuses de transporte urbano. En este caso se deberá conocer los principios y finales de línea y la concurrencia de números de línea y frecuencias en cada uno de ellos.

En el caso de que se contara con tranvías propulsados con sistemas de hidrógeno, estos se asemejarían a los autobuses, realizando una adaptación de los valores de consumo.

- Transporte Privado:
En este conjunto se incluyen los vehículos privados (turismos, furgonetas y motos), así como taxis, flotas de reparto, o flotas de vehículos municipales. A la hora de la localización óptima de las estaciones de hidrógeno acorde al movimiento de este tipo de vehículos, deberán conocerse las zonas de mayor concentración de vehículos, ya sea como origen o destino, o en itinerancia. Para ello resulta útil conocer las zonas con mayor actividad industrial y comercial del área de estudio, así como los índices medios de densidad de tráfico de vías e intersecciones. Estos datos vienen definidos por los criterios de decisión: *Índice medio de densidad de tráfico diario (IMD)*, *Accesibilidad*, *Zonas comerciales* y *Polígonos industriales*.

Para desarrollar la herramienta, el programa utilizado es el *ARCGIS*. La versión utilizada es la 10, bajo licencia *ArcView*.

La información proporcionada deberá estar referenciada con el mismo sistema de referencia de *Google Maps*, "*datum WGS84 15N*", para poder representarla a través de mapas en la aplicación y generar los *shapefiles* correspondientes. Un *shapefile* es un formato vectorial de

almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos.

Para la construcción del SIG se precisan los siguientes planos y sus respectivas tablas de atributos (en formato shp. o similar), que corresponden con la capa de información común para todos los escenarios y los diferentes criterios de decisión:

- Planos de carreteras de la zona en estudio, con sus longitudes, nº de vías, sentido.
- Planos de los índices medios diarios (IMD) del tráfico.
- Planos de la densidad demográfica de la ciudad.
- Planos de la distribución de la actividad comercial
- Planos de la distribución de los polígonos industriales.
- Planos de las líneas de autobús de la ciudad.
- Planos del P.G.O.U. para ver la posible edificabilidad de las parcelas.

Como capa de información común puede utilizarse, bien el mapa de carreteras de la zona en estudio, bien el plano del plan de ordenación urbano dividido en sus zonas catastrales. De cada una de estas zonas se debe disponer de la siguiente información: clasificación y calificación, tamaño, coste del suelo y geolocalización.

Como ejemplo de funcionamiento del sistema, debido a que se conoce la información necesaria del mismo, se ha elegido como zona de estudio el barrio del Ástur de la ciudad de Zaragoza. A lo largo del apartado, los ejemplos y figuras mostradas corresponden a este barrio de Zaragoza.

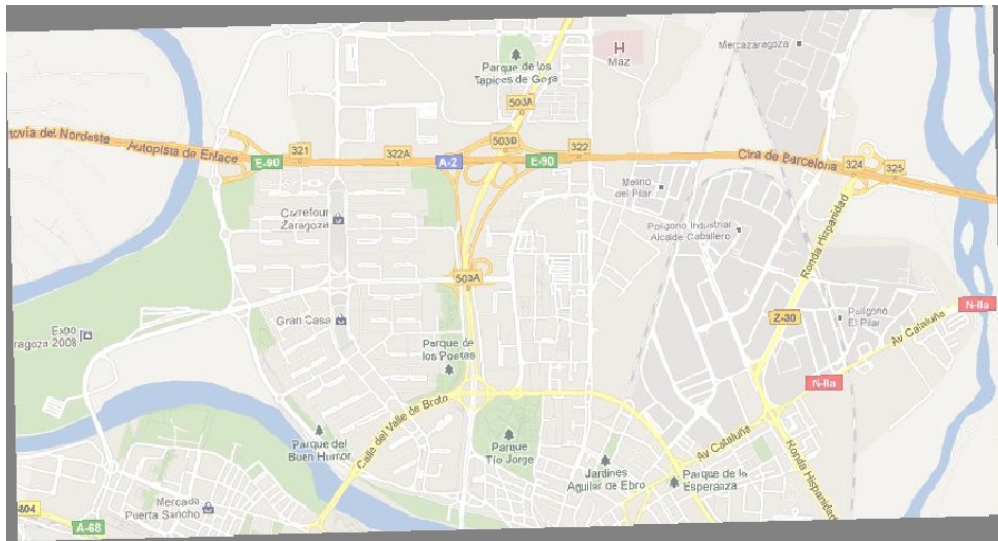


Figura 96. Capa de información general: plano general del barrio del Áctur de Zaragoza

Fuente: *Google Maps*

Una vez se dispone de la capa de información general, en el caso de que no se dispongan de las tablas asociadas con la información requerida, se deben asociar manualmente las tablas de atributos de los puntos más relevantes del mapa. Ver Figura 97:

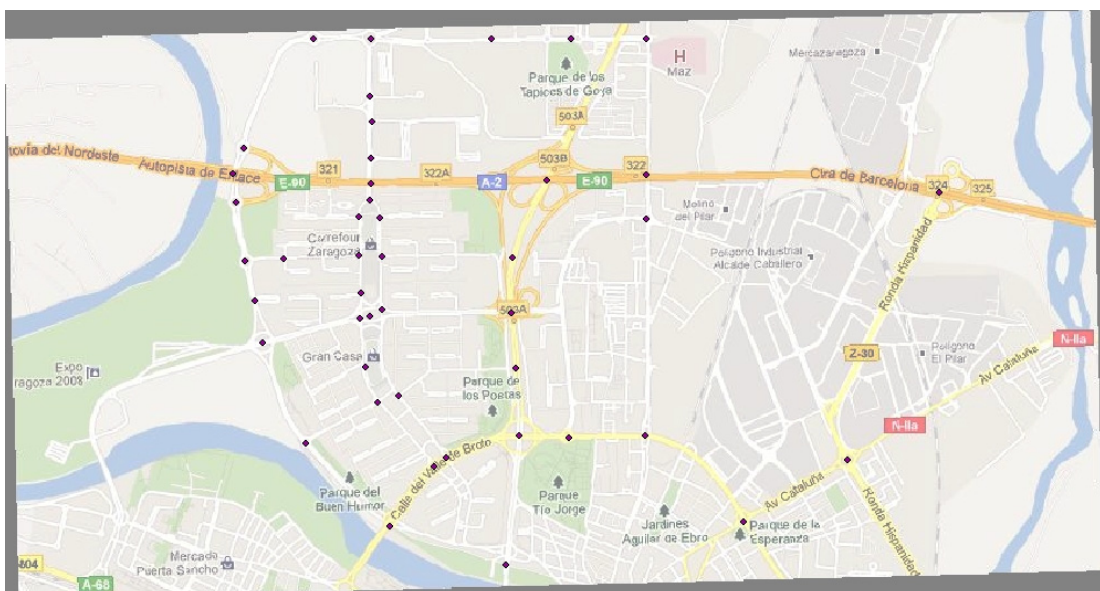


Figura 97. Inserción de puntos relevantes

Fuente: *Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10*

A continuación se analizan cada uno de los criterios de decisión que se tienen en cuenta en el sistema.

5.3.4.1. Criterios de Decisión

Con el fin de facilitar la toma de decisión sobre la localización óptima de las estaciones de recarga de hidrógeno que suministren a flotas de vehículos, se han fijado unos criterios de decisión. Cada uno de estos criterios, que se describen a continuación, viene acompañado por unos pesos (ξ_{IMD} , $\xi_{\text{accesibilidad}}$, $\xi_{\text{d.población}}$, ξ_{rutas} , $\xi_{\text{comercial}}$, $\xi_{\text{industrial}}$, ξ_{PGOU}). El valor de estos pesos viene recogido en el punto 5.3.4.3. *Metodología*.

Cada uno de estos criterios de decisión se representa en una capa diferente del sistema.

a. Intensidad Media Diaria

Se denomina intensidad media diaria anual (IMD) al número de vehículos que pasan por un vial durante un año, dividido por 365. Puede considerarse como la intensidad de tráfico que corresponde al día medio del año.

En el caso que nos ocupa, la IMD se utiliza como uno de los criterios para determinar la ubicación más óptima de las estaciones de repostaje de hidrógeno. El sistema analiza los datos referentes a los IMD de las diferentes vías y resalta mediante una traza de color azul aquellas vías que cumplen que:

IMD > 100.000

IMD entre 60.000 y 100.000

IMD entre 20.000 y 60.000

La diferenciación entre estos tres tipos de vías viene representada por el grosor de la traza; mayor cuanto mayor es el valor del IMD de la vía.

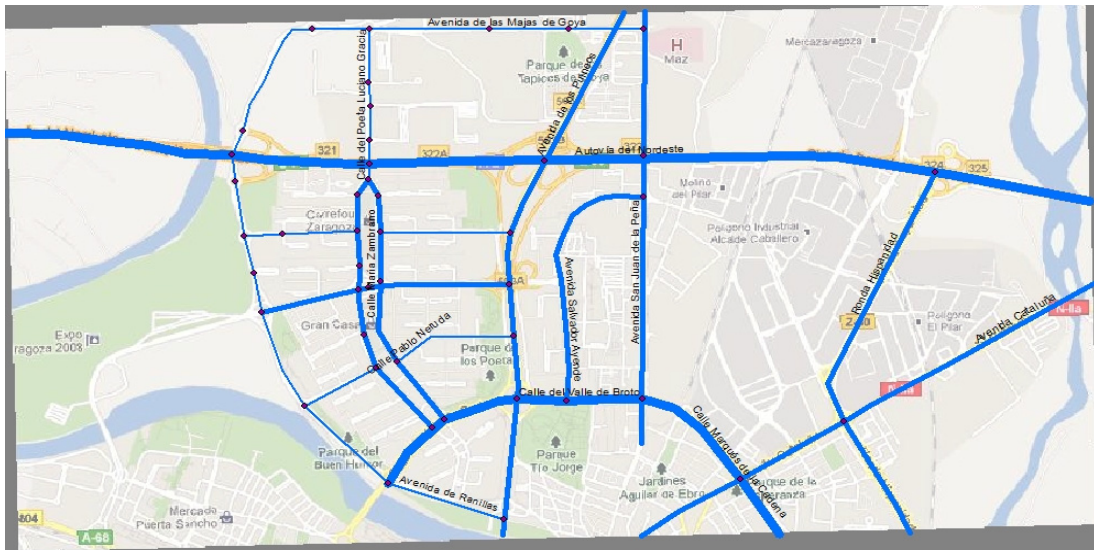


Figura 98. Representación de los principales viales con clasificación según IMD

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

El sistema resalta entonces un área en torno a las vías de mayor IMD, de forma que la mayor distancia a la vía sea de 200 m. Esta área se representa en color verde, y será considerada como zona de preferencia a la hora de ubicar una estación de suministro. Ver Figura 99:

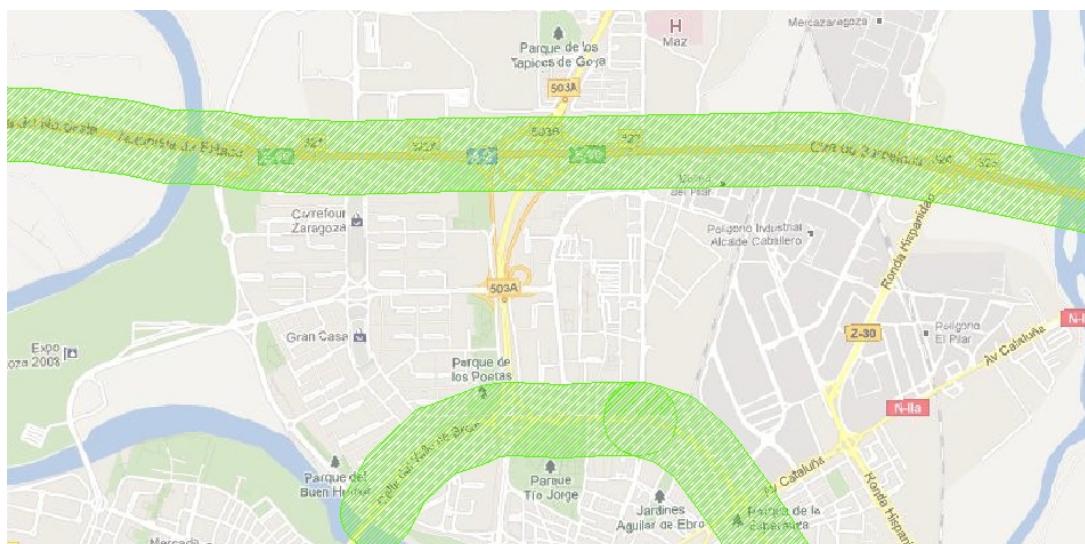


Figura 99. Representación de las áreas de preferencia debidas a la existencia de los viales con IMD alto

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

b. Accesibilidad

Este criterio de accesibilidad se refiere a la localización de los puntos de la red viaria en las que se producen intersecciones, incorporaciones y cruces de vías, con el fin de facilitar los accesos a las estaciones de servicio.

El sistema realiza el análisis de las tablas asociadas a las vías y localiza aquellos nodos que pertenecen a más de una vía. Una vez localizados, se crea una nueva capa en la que se representan tantas zonas de preferencia para la localización de las estaciones, como cruces de vías correspondientes con accesos a la ciudad existan en la zona geográfica en estudio. Estas zonas de preferencia serán de forma circular con centro en las intersecciones y un radio de 400 m. Ver Figura 100:



Figura 100. Representación de las zonas de preferencia debido a la existencia de cruces de vías

Fuente: **Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10***

c. Rutas transporte urbano

Este criterio responde especialmente a la existencia de las rutas fijas seguidas por las líneas de autobús o tranvía que conforman el transporte urbano de las ciudades. Se necesita disponer de la información de las rutas de transporte de la zona en estudio: geolocalización de las paradas bajo el sistema de referencia de Google e identificación de inicio y fin de línea, identificador de línea (número).

Una vez se han introducido las rutas en estudio en el sistema, marcando los puntos de inicio y fin de línea, éste realiza un análisis y localiza los puntos donde más líneas de transporte urbano confluyen.

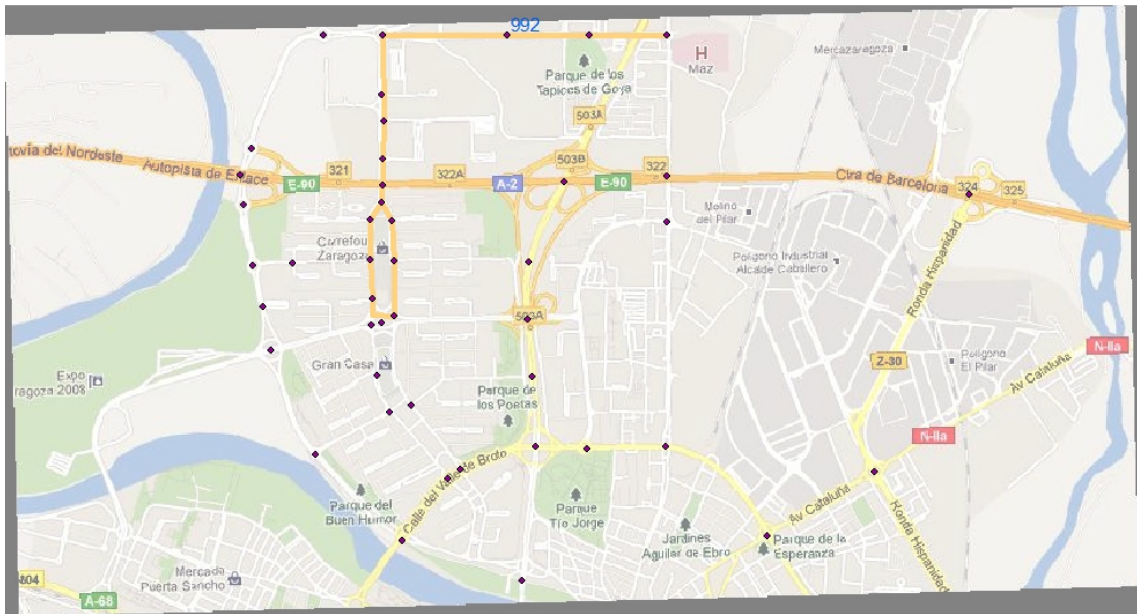


Figura 101. Inserción de la línea de bus C2 de Zaragoza

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10

Una vez localizados los principios y finales de línea, se crea una nueva capa en la que se representa un área circular de preferencia a la hora de localizar la hidrogenera en torno al los principios y finales de línea con radio 150 m. Ver Figura 102:



Figura 102. Representación del área de preferencia debido a la existencia de un inicio o fin de línea de autobús

Fuente: **Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10***

No obstante, si se realiza en cada uno de los principios y finales de línea un estudio del número de vehículos/hora que concurren en estos puntos, y se añade a la tabla de atributos asociada a los puntos correspondientes, sería posible modificar el radio del área de preferencia en función de si el número de vehículos/hora es mayor o menor. Como cuanto mayor sea este número, mayor será el consumo de hidrógeno, mayor prioridad se le debería dar a estas ubicaciones, y aumentando el área de preferencia, mayor probabilidad existe de obtener una localización óptima.

También debe analizarse a la hora de localizar la ubicación óptima de las estaciones de suministro de hidrógeno, la posibilidad de su ubicación en un lugar próximo a localización de las cocheras de autobuses y tranvías. Para tal fin, la ubicación de las cocheras puede tratarse como un principio o fin de línea que contará con la mayor concurrencia.

d. Zonas comerciales

Las zonas comerciales suelen caracterizarse por actuar como un elemento concentrador de tráfico. Por un lado atrae a grandes cantidades de clientes y visitantes, y por otro crea en su

entorno un flujo permanente de tráfico creado por los trabajadores y por el transporte de mercancías necesario para su abastecimiento.

En el sistema se introducirá la localización de las zonas con mayor actividad comercial de la zona en estudio. En nuestro caso se han localizado los grandes centros comerciales existentes en el barrio Áctur de Zaragoza. La información requerida se refiere a localización georreferenciada e identificador del centro comercial (nombre). Ver Figura 103:

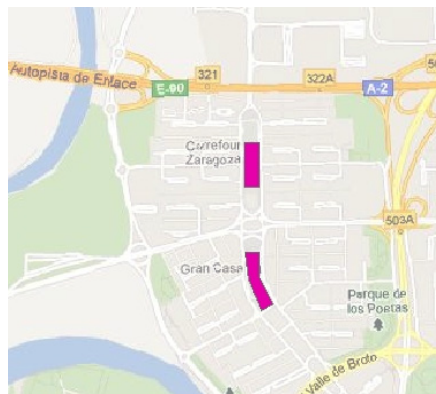


Figura 103. Representación de los principales centros comerciales del barrio Áctur de Zaragoza

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

Una vez localizadas las zonas de mayor actividad comercial, debido a que se trata de centros habitados de especial sensibilidad por el tipo de actividad que en ellos se desarrolla, el sistema crea una nueva capa en la que se representa una área de exclusión (en rojo) con un perímetro de 500 m entorno a la zona comercial. No obstante, debido a la alta concentración de tráfico que se genera en su entorno, el sistema representa a su vez una nueva área de preferencia (en verde) en la que ubicar la estación de suministro de hidrógeno. Esta nueva área tendrá forma de corona con una anchura de 200 m en torno al área de exclusión anteriormente indicada. En resumen:

Área interior de exclusión (superficie circular 500 m radio)

Área exterior de preferencia (corona circular 500 m – 700 m)

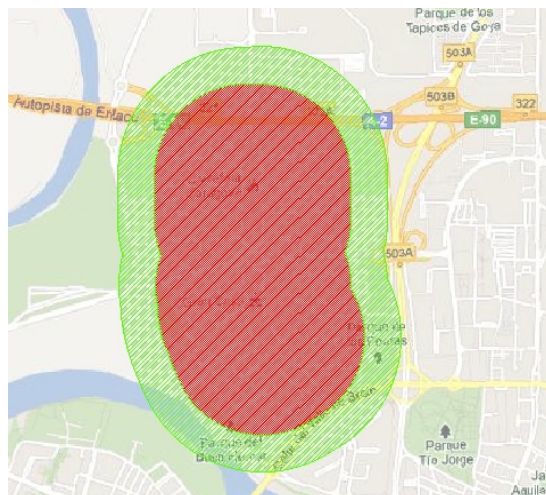


Figura 104. Representación de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) motivadas por la presencia de los grandes centros comerciales

Fuente: **Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10***

e. Polígonos industriales

Al igual que las zonas comerciales, los polígonos industriales se caracterizan por contar en su entorno con un elevado movimiento de vehículos. Por un lado atrae a grandes cantidades de clientes, y por otro crea en su entorno un flujo permanente de tráfico creado por los trabajadores y por el transporte de mercancías necesario para su abastecimiento.

En el sistema se introducirá la localización de los polígonos de la zona en estudio. La información requerida se refiere a localización georreferenciada e identificador del polígono industrial (nombre). Ver Figura 105:



Figura 105. Representación de los polígonos industriales existentes en la zona de estudio

Fuente: **Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10***

Una vez localizados los polígonos industriales, el sistema crea una nueva capa en la que se representan tantas áreas de preferencia en las que ubicar las hidrogenas, como polígono industriales existen, y que se corresponden con las extensiones que ocupan los polígonos industriales.



Figura 106. Representación de las áreas de preferencia debido a la existencia de polígonos industriales

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

Si al final se optara por ubicar una estación de suministro de hidrógeno en un polígono industrial, habría que analizar por separado la mejor localización dentro del mismo, en función de flujos de tráfico, accesos y distancias de seguridad mínimas a guardar.

f. Parcelas según el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU)

Para que sea posible la construcción de las estaciones de suministro de hidrógeno, el terreno en el que irá situada deber ser clasificado como urbanizable en el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de la zona en estudio. En la siguiente figura se muestra el PGOU de Zaragoza para la zona Áctur:

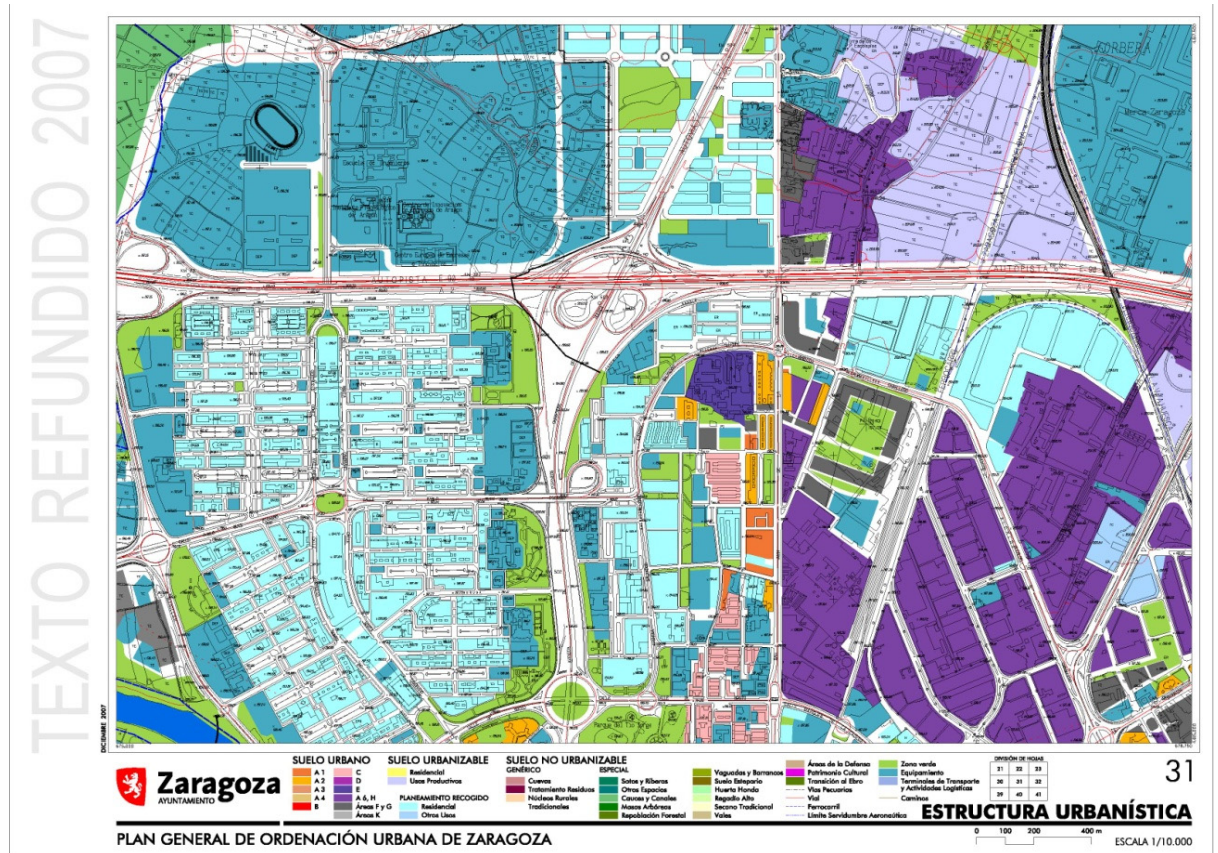


Figura 107. PGOU de Zaragoza zona Áctur. (Suelo urbanizable en gris)

Fuente: *Ayuntamiento de Zaragoza*

El sistema analizará los datos asociados a las parcelas referentes al tipo de suelo y creará una nueva capa en la que se representarán aquellas parcelas urbanizables disponibles. Ver figura siguiente:



Figura 108. Representación del área de preferencia debido a la existencia de suelos urbanizables

Fuente: **Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10***

En principio, todas las áreas de preferencia generadas hasta el momento que no coincidieran con estas aquí representadas o con las referidas a los polígonos industriales (que también son urbanizables) deberían ser eliminadas. No obstante, el sistema va a dejar esta acción supeditada a los pesos (ξ_{IMD} , $\xi_{accesibilidad}$, $\xi_{d.población}$, ξ_{rutas} , $\xi_{comercial1}$, $\xi_{comercial2}$, $\xi_{industrial}$, ξ_{PGOU}) otorgados a cada uno de los criterios de decisión y que se recogen en el punto 5.3.4.3. *Metodología*.

Con el conjunto resultante se deberá saber si la superficie disponible es suficiente para la instalación de la hidrogenera, en caso contrario, el área aun siendo urbanizable, también se eliminaría.

g. Zonas residenciales

Debido a la naturaleza del hidrógeno, por motivos de seguridad se recomienda que los emplazamientos donde se prevea situar las estaciones de suministro de este elemento, satisfagan unos criterios de seguridad fijados por la normativa vigente y en desarrollo. Entre

estas medidas de seguridad se proponen distancias mínimas a guardar entre las hidrogeneras y las zonas habitadas.

En el caso que nos ocupa, se ha interpuesto una condición por la que a menos de 300 m de las zonas catalogadas como residenciales no sea permitida la ubicación de una estación de suministro de hidrógeno.

El sistema analizará los datos relativos al plan general de ordenación urbana, localizando las parcelas calificadas como residenciales, y las identifica con una escala de color en función de la densidad demográfica de la zona.

La clasificación en cuanto a densidad demográfica también puede ser útil a la hora de determinar las ubicaciones óptimas, ya que cuanto mayor sea la densidad de población, mayor probabilidad existe de que la densidad de tráfico sea mayor. Se comprueba así que la densidad de población guarda una estrecha relación con el IMD de las vías.



Figura 109. Zonas residenciales clasificadas por densidad de población

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

El sistema creará una nueva capa con zonas de exclusión (en rojo) que comprenderán las zonas urbanas residenciales, más un perímetro de seguridad de 300 m (ver Figura 110). Este perímetro de seguridad supera a los estipulados en diversos estudios analizados para estaciones de hidrógeno. Por ejemplo *Jeffrey LaChance, 2009* [107] marca como distancia de seguridad perímetros de 200 m como máximo.

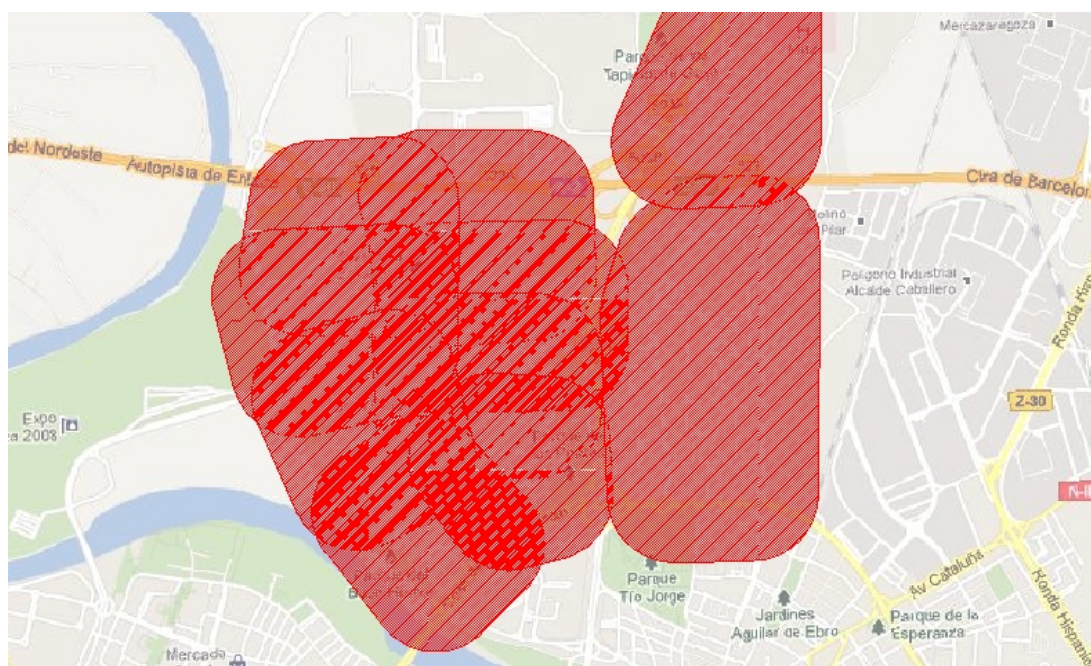


Figura 110. Representación de las áreas de exclusión generadas a partir de las zonas residenciales

Fuente: **Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10***

5.3.4.2. Selección de ubicación óptima

Una vez analizados todos los criterios de decisión se procede a la selección de estas ubicaciones óptimas que son el objeto del sistema.

En la siguiente figura se representa el conjunto de capas criterios de decisión considerados:



Figura 111. Criterios de decisión introducidos sobre el mapa base

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps, PGOUZ y ARCGIS 10**

A partir de estos criterios de decisión, se generan las capas que representan las áreas de exclusión (rojo) y preferencia (verde) para la ubicación de las hidrogeneras. En la siguiente figura se representa el conjunto de estas áreas.

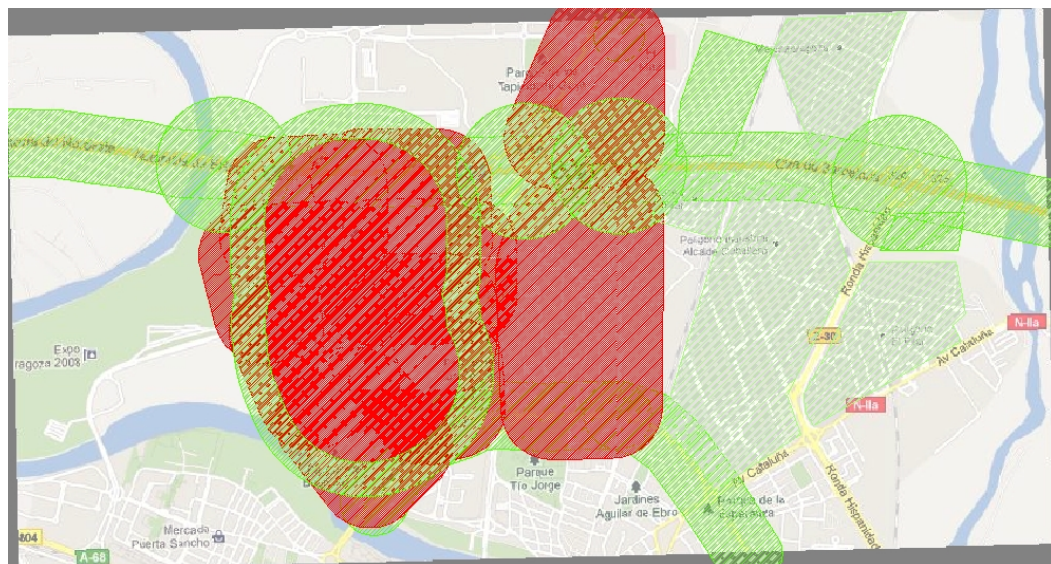


Figura 112. Representación del conjunto de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) generadas por los diferentes criterios de decisión

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps, PGOUZ y ARCGIS 10**

Las áreas de exclusión son prioritarias sobre las de preferencia, es decir, en las áreas de preferencia que se superponen a las de exclusión serían desestimadas automáticamente.

5.3.4.3. Metodología

Como ya se ha indicado anteriormente, cada criterio de decisión viene acompañado por unos pesos.

Debido a que las zonas comerciales generan dos áreas: una interior de exclusión y otra exterior de preferencia, se asocian dos pesos diferentes: $\xi_{\text{comercial1}}$ y $\xi_{\text{comercial2}}$ respectivamente. En la siguiente tabla se resumen los criterios de decisión, su identificador y su peso asociado:

Tabla 50. Resumen criterios de decisión y pesos asociados

Fuente: **Elaboración propia**

Criterio de decisión	Factor de área	Peso asociado
IMD	C_{IMD}	ξ_{IMD}
Accesibilidad	$C_{\text{accesibilidad}}$	$\xi_{\text{accesibilidad}}$
Rutas de transporte urbano	C_{rutas}	ξ_{rutas}
Zonas comerciales (área interior exclusión)	$C_{\text{comercial1}}$	$\xi_{\text{comercial1}}$
Zonas comerciales (área exterior de exclusión)	$C_{\text{comercial2}}$	$\xi_{\text{comercial2}}$
Polígonos industriales	$C_{\text{industrial}}$	$\xi_{\text{industrial}}$
PGOU	C_{PGOU}	ξ_{PGOU}
Densidad de población	$C_{\text{d.población}}$	$\xi_{\text{d.población}}$

Estos pesos se utilizarán para decidir de entre todas las posibles, la localización de las ubicaciones más óptimas.

Los valores que tomarán los pesos asociados a los diferentes criterios de decisión son los siguientes:

- Los pesos de los criterios que impliquen la creación de áreas de preferencia, tomarán valores positivos. El valor de estos oscilará entre 0 y 1, pero deberán cumplir que la suma de ellos será igual a 1, de forma que la ubicación considerada como ideal tomaría este valor.

Los pesos asociados a los criterios de decisión que toman valor positivo son: IMD (ξ_{IMD}), Accesibilidad ($\xi_{\text{accesibilidad}}$), Rutas de transporte urbano (ξ_{rutas}), Zonas comerciales ($\xi_{\text{comercial2}}$), Polígonos industriales ($\xi_{\text{industrial}}$) y PGOU (ξ_{PGOU}).

$$\xi_{\text{IMD}} + \xi_{\text{accesibilidad}} + \xi_{\text{rutas}} + \xi_{\text{comercial2}} + \xi_{\text{industrial}} + \xi_{\text{PGOU}} = 1$$

[Ec. 53]

Los valores aplicados a estos pesos podrán ser modificados por el usuario con el fin de poder priorizar unos criterios sobre otros, en función de las características que deba tener la red de estaciones de suministro (condicionada, por ejemplo, por el tipo de flota y de vehículos).

- Los pesos de los criterios que impliquen la creación de áreas excluyentes, que como ya se ha dicho son prioritarias frente a las de preferencia, tomarán el valor igual a (-1).

Los pesos asociados a los criterios de decisión que toman valor negativo son: Zonas comerciales ($\xi_{\text{comercial1}}$) y Densidad de población ($\xi_{\text{d.población}}$).

En la siguiente tabla se indican los valores de los pesos asociados a los criterios de decisión que se toman por defecto:

Tabla 51. Valores por defecto de los pesos asociados a los diferentes criterios de decisión

Fuente: **Elaboración propia**

Peso asociado a criterios de decisión	Valores
ξ_{IMD}	0,05
$\xi_{\text{accesibilidad}}$	0,05
ξ_{rutas}	0,05
$\xi_{\text{comercial1}}$	-1
$\xi_{\text{comercial2}}$	0,05
$\xi_{\text{industrial}}$	0,4
ξ_{PGOU}	0,4
$\xi_{\text{d.población}}$	-1

A la hora de determinar las localizaciones posibles para las ubicaciones de las hidrogeneras, y su posterior listado en orden de prioridad, el proceso a seguir será el siguiente:

- a) se realiza el sumatorio de los productos de los factores de área (C_x) por sus pesos asociados en las zonas donde se superponen áreas de preferencia, lo cual catalogará a la zona con un número que denominaremos Grado de Decisión:

$$\text{Grado de Decisión} = (C_{\text{IMD}} * \xi_{\text{IMD}}) + (C_{\text{accesibilidad}} * \xi_{\text{accesibilidad}}) + (C_{\text{rutas}} * \xi_{\text{rutas}}) + (C_{\text{comercial1}} * \xi_{\text{comercial1}}) + (C_{\text{comercial2}} * \xi_{\text{comercial2}}) + (C_{\text{industrial}} * \xi_{\text{industrial}}) + (C_{\text{PGOU}} * \xi_{\text{PGOU}}) + (C_{\text{d.población}} * \xi_{\text{d.población}})$$

[Ec. 54]

Los factores de área C_x correspondientes a los diferentes criterios de decisión tomarán el valor 1 o 0, en función de si el sistema reconoce activas áreas de exclusión o preferencia en las zonas de estudio.

Para que un área sea considerada como posible, el *Grado de Decisión* debe ser mayor o igual a 0,4. En el caso de que sea igual o menor a cero el área se desestima automáticamente al estar afectada por un área de exclusión. En el caso de que el resultado se encuentre entre 0 y 0,4 (ambos valores no incluidos), significa que la zona no es urbanizable, por lo que la posibilidad de que se pudiera llevar a cabo la construcción de la instalación sería remota.

- b) Cuando el *Grado de Decisión* resulta mayor o igual a 0,4, con el fin de localizar las ubicaciones más óptimas. A mayor valor de este número, más óptima será la localización de la posible ubicación. Siguiendo este criterio se realizaría el listado de las posibles ubicaciones.

A continuación se muestra un ejemplo en la que se representan en verde las localizaciones más óptimas para la ubicación de las nuevas instalaciones de suministro de hidrógeno, debido a la superposición de áreas de preferencia generadas por tres o más criterios de decisión. En rojo aparecen aquellas zonas en las que se obtienen Grados de Decisión negativos debido a la superposición de una zona de exclusión, a pesar de que coincide en la misma zona varias áreas de preferencia.

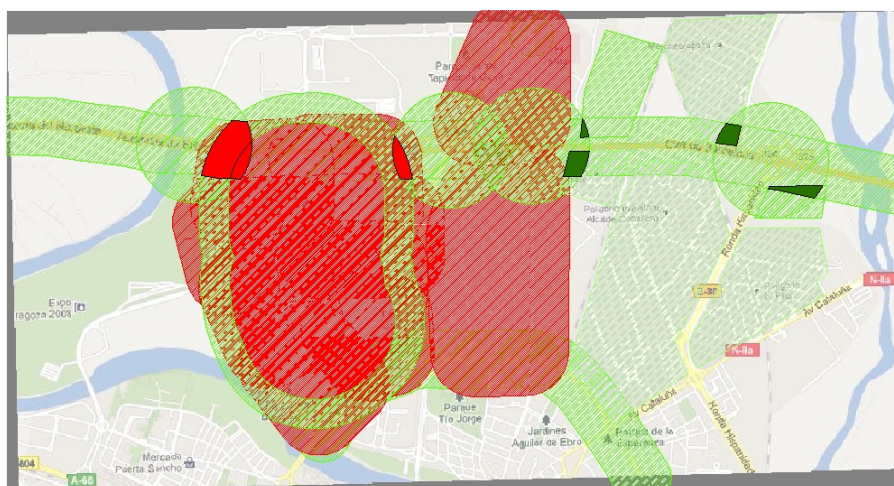


Figura 113. Representación de las zonas más óptimas para la localización de las estaciones de suministro de hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps, PGOUZ y ARCGIS 10**

Con el objetivo de validar las herramientas desarrolladas: definición de necesidades e infraestructuras de suministro mediante aplicación web y *Herramienta GIS* para la implantación de hidrogeneras, en el apartado A6.2. *Definición de Rutas y Ubicación de Hidrogeneras para la Implantación de una Red Interna de Transporte en el Polígono PLAZA* del ANEXO 6, se propone un caso de validación basado en la implantación de una red interna de transporte por carretera para el polígono PLAZA.

Para ello se han definido las rutas de autobús necesarias, se ha determinado la demanda de hidrógeno y el número de hidrogeneras necesarias y finalmente, se ha planteado la posible ubicación de la/s hidrogenera/s de acuerdo a los criterios de decisión considerados.

5.4. Conclusiones

De este capítulo es posible extraer las siguientes conclusiones:

- A la hora de enfrentarse al reto de diseñar y dimensionar las instalaciones englobadas en un sistema basado en el hidrógeno, no existen, ni una metodología concreta, ni una tendencia compartida en la estructura y tecnologías de las instalaciones de repostaje de hidrógeno existentes. Ante esta situación surge la necesidad de crear una herramienta de cálculo que ayude a dar solución al dimensionado de las instalaciones de repostaje de hidrógeno y la logística que arrastran.
- El objetivo es pues la realización de un diseño optimizado de una nueva infraestructura de distribución de hidrógeno. Para ello se plantea realizar la modelización del sistema de transporte. Esta modelización permite conocer el entorno y particularidades en las que deberá localizarse la nueva infraestructura, y ayudará a determinar el tamaño, características y localización de la red de estaciones de repostaje de hidrógeno que minimice las funciones de coste y haga máximas las de operatividad y funcionalidad.
- Dato imprescindible previo a determinar la dimensión óptima de las estaciones de repostaje de hidrógeno es la demanda diaria de hidrógeno prevista, que va a tener que satisfacer. Esta demanda futura de hidrógeno es posible determinarla a partir de:
 - o Las previsiones de demanda de la flota de vehículos, públicos o privados, que van a utilizar hidrógeno en un horizonte temporal determinado. Opción estimativa que se basa en la asignación de la demanda en función del número de vehículos de cada tipo: turismos, furgonetas, autobuses o camiones.
 - o El estudio y diseño de las rutas a seguir por los vehículos, en el caso de tratarse de flotas cautivas o privadas con recorridos conocidos. Al tratarse de

recorridos conocidos, se puede realizar un análisis más en profundidad de las rutas seguidas, lo que permite alcanzar unas estimaciones de la demanda mucho más cercanas a la realidad

- A la hora de diseñar la herramienta de cálculo, el punto en el que hay que hacer especial hincapié, por su alta sensibilidad tanto en el aspecto técnico como económico, es el tema del tipo de abastecimiento de hidrógeno a la estación. El tipo de abastecimiento depende de cuatro variables básicas: el coste, la demanda, la ubicación de las instalaciones y la seguridad de abastecimiento.
- La utilización de algoritmos genéticos permite obtener tiempos de respuesta rápidos a los problemas de decisión que tienen su origen en el dimensionamiento y elección de las tecnologías más adecuadas a la hora de establecer las infraestructuras de hidrógeno necesarias.

"Las revoluciones económicas verdaderamente importantes de la historia se producen cuando una nueva tecnología de comunicación se funde con un régimen energético emergente para crear un paradigma económico completamente nuevo"

Jeremy Rifkin

CAPÍTULO 6.

Análisis de las variables económicas más influyentes a la hora de establecer una infraestructura de recarga para vehículos de hidrógeno. Análisis de sensibilidad

6.1. Introducción

A la espera de la más que inminente irrupción de los vehículos con sistemas de tracción alternativos a los sistemas más tradicionales de combustión interna alimentados con gasolina y gasoil, en el presente capítulo se estudia la forma más óptima de adaptar las nuevas tipologías de transporte basadas en la energía procedente del hidrógeno a la demanda actual y futura de los usuarios.

Debido a que se trata de unas tecnologías nuevas, se carece de metodologías que analicen la viabilidad económica y estratégica de la implantación de un sistema de hidrógeno asociado al sector transporte. Este capítulo pretende dar solución a este vacío.

Ante el reto de incorporar una nueva tecnología en los sistemas transporte y previo paso a las tareas de planificación, organización y ejecución de todas las acciones necesarias para su implantación, se presenta imprescindible obtener unas previsiones del crecimiento y desarrollo de la tecnología a implantar. No obstante, las estimaciones de crecimiento y desarrollo de una nueva tecnología, son, por normal general, previsiones difíciles de realizar, que requieren de un conocimiento muy amplio que evalúe de manera general la situación económica global y social de una zona o área de crecimiento, y por otra parte requiere un conocimiento también muy específico de la tecnología que se está evaluando para ver realmente las posibilidades, impedimentos y retos tecnológicos a los que se enfrenta.

Con el fin de acotar el análisis a un entorno más cercano y conocido, el análisis de variables se desarrolla en el marco de la implantación en España de las nuevas tecnologías del hidrógeno. No obstante, para ser capaces de extrapolar una situación de crecimiento para España de estas tecnologías, deben ser evaluadas las estrategias y previsiones de crecimiento de las principales potencias en materia del hidrógeno y sus tecnologías asociadas: Europa, Estados Unidos y Japón. Finalmente, y debido a que España se encuentra en su zona de influencia, Europa será la que marque las líneas de crecimiento de las tecnologías del hidrógeno en el país, aunque siempre condicionada por las tendencias seguidas en el resto de regiones estudiadas.

Dentro de este marco europeo, se han previsto, para tres horizontes temporales diferentes: 2015, 2030 y 2050, tres escenarios diferentes, en función de la penetración de las diferentes tecnologías. Así planteado, para el caso particular de España y motivado por la coyuntura económica y social en la que se encuentra sumida el país, se ha previsto que el grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en los sistemas de transporte será más lento. Así mismo, partiendo de los distintos escenarios futuros considerados, tanto temporales como de demanda, se ha pretendido obtener un modelo económico que asegure el crecimiento sostenible de este nuevo sistema de transporte.

Con el objetivo de obtener una previsión sobre cuáles van a ser las características y prestaciones tanto de los vehículos de hidrógeno, como de los equipos que se incluyen en las instalaciones de suministro de hidrógeno que se prevé serán ofertados por los fabricantes a un medio-largo plazo, se desarrolla el análisis de la oferta. Esta oferta deberá ser compatible con la evolución detectada en el análisis de la demanda realizado tomando como referencia las potencias punteras en el sector del hidrógeno, y por consiguiente, en España.

Durante la fase de desarrollo de esta nueva economía es obvio que va a ser necesaria la ayuda económica de los diferentes gobiernos. Se prevé un tiempo aceptable de lanzamiento hasta que se pueda sustentar por sí mismo. La inercia que seguirá el desarrollo del mercado durante estos próximos años es fácil de predecir: un rápido crecimiento de la infraestructura, que metafóricamente actuaría a modo de esqueleto, para después expandir la flota de vehículos hasta un límite admisible que sea capaz de soportar. A partir de ese punto de equilibrio el desarrollo debe de ser lineal y ascendente.

La determinación de costes del sistema de hidrógeno es un trabajo necesario para realizar a posteriori un análisis económico y de viabilidad del sistema del hidrógeno, ya que constituyen uno de los factores determinantes en la toma de decisiones.

Existen varios factores o elementos que tienen una influencia relevante en el coste final del sistema de hidrógeno. El objetivo ha sido por lo tanto, por un lado analizar los coste actuales de los diferentes elementos, y por otro intentar determinar la evolución que van a tener en el tiempo, a medio-corto plazo, en función de factores como el aumento de la demanda o el

descenso de precio debido a la madurez que alcanzarán con el tiempo las diversas tecnologías.

Los elementos más relevantes son:

- Precio de la energía. Los procesos globales de producción, almacenamiento y producción de hidrógeno en las hidrogenera requieren en mayor o menor medida de energía eléctrica.
- Precio del gas natural. El proceso de producción de hidrógeno más extendido actualmente es el reformado de gas natural.
- Precio del hidrógeno. Depende de un elevado número de factores: modo de producción, fuente de producción (gas natural, electrolisis del agua mediante diferentes energías: eólica, solar, nuclear), lugar de producción (in situ o fuera de la instalación) y modo de suministro en el caso de que se produzca en instalaciones ajenas a la hidrogenera.
- Coste de la instalación de repostaje. Se debe tener en cuenta los costes de los diferentes equipos que la componen. Se prevé que los precios de los diferentes equipos bajen al mismo tiempo que se generaliza la utilización del hidrógeno en el transporte. Las economías de escala y la mayor madurez tecnológica contribuirán a reducir los costes a corto-medio plazo.
- Coste de los vehículos de hidrógeno. Incluyendo costes de adquisición y mantenimiento a lo largo de la vida útil del vehículo.
- Costes de mantenimiento. Estos costes son los requeridos para asegurar un buen funcionamiento de la instalación

A partir de los precedentes indicados hasta ahora, y con el objeto de determinar la viabilidad económica y estratégica de la introducción de las tecnologías del hidrógeno al sector transporte, se ha creado una herramienta que permite determinar la inversión requerida en infraestructuras y vehículos en cada uno de los escenarios temporales fijados: 2015, 2030 y 2050; y en base a unos supuestos grados de penetración: bajo, medio y alto.

Esta herramienta permite determinar, no sólo la inversión requerida en infraestructuras y vehículos para cubrir las previsiones, sino también el beneficio a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras. Así mismo, proporciona la posibilidad de calcular la rentabilidad de la inversión con o sin financiación externa.

Realizado el estudio económico para el escenario previsto para España: grado de penetración bajo, se han obtenido los siguientes resultados:

- La mayoría de la inversión respecto al total (vehículos + infraestructuras) debe ser realizada para la adquisición de los vehículos con tecnología de pila de combustible. Este porcentaje supera para cualquiera de los horizontes temporales el 90%
- Conforme el horizonte temporal se aleja en el tiempo, se obtienen mayores beneficios como resultado de la actividad de compra/producción - venta de hidrógeno.
- La mayor partida de gasto corresponde a la compra/producción del hidrógeno para su posterior suministro al usuario final. Por lo tanto, una hipotética reducción de este gasto contribuiría a una mayor viabilidad del sistema.

Como acabamos de ver, existe un gran número de variables económicas que intervienen en el proceso de la toma de decisión, por eso, a continuación se han detectado de entre todas las variables que intervienen en el cálculo de la inversión total a realizar y del beneficio bruto resultado de la actividad económica desarrollada en las hidrogeneras, las variables de mayor influencia, es decir, las variables que producen una mayor variación del resultado final del análisis al ver modificado su valor inicial. Éstas son:

- Variables de mayor influencia sobre la inversión total a realizar englobando la adquisición de vehículos e infraestructuras:
 - Previsión número de turistas
 - Precio de adquisición de los turistas
 - Subvención directa a la adquisición de los turistas
 - Subvención directa para la construcción de hidrogeneras

- Variables de mayor influencia sobre el beneficio bruto obtenido resultado de la actividad de compra/producción – venta de hidrógeno:
 - o Precio base de venta del hidrógeno
 - o Precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno
 - o Previsión número de turismos
 - o Impuestos a la venta de hidrógeno
 - o Impuestos a la producción/compra de hidrógeno
 - o Consumo medio de los turismos

En el último apartado del capítulo, para determinar el efecto que produce cada una de estas variables sobre los resultados finales, se ha realizado un análisis de sensibilidad del que se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- De las variables de mayor influencia sobre la inversión total, las variables referentes a los turismos: número y precio, son las más influyentes en la inversión en términos de valor absoluto. De forma contraria, la única de las variables estudiadas que tenía como protagonista a las hidrogeneras: Subvención directa para la construcción de hidrogeneras, sólo produce una pequeña variación respecto al valor base de la inversión.
- De las variables de mayor influencia sobre el beneficio bruto obtenido resultado de la actividad de compra/producción – venta de hidrógeno, en términos de valor absoluto, y excepto en algún caso en concreto, los porcentajes de variación son muy similares para todas las variables. En ámbito general, se puede destacar el *Precio de Venta del Hidrógeno* como la variable más influyente. Por el contrario, la variable *Impuestos a la Venta del Hidrógeno* es la menos influyente.

6.2. Escenarios Temporales

A partir del análisis de las expectativas, plazos de ejecución y magnitud de los principales proyectos desarrollados a nivel global en materia de transporte e hidrógeno, y de un estudio de las previsiones relativas a la oferta y la demanda detectadas referentes a los elementos que constituyen el sistema de hidrógeno, se seleccionan tres escenarios temporales sobre los que realizar los estudios económicos y de viabilidad correspondientes con el corto, medio y largo plazo a la hora de establecer una infraestructura del hidrógeno que permita un uso generalizado del hidrógeno en el sector transporte.

Parece que hay una fecha clave que es un punto común a todos los discursos de previsión por parte de las grandes potencias de este sector, se trata del año 2015. La mayoría de los proyectos de investigación apuntan a ese año con firmeza, para situarlo como punto de partida de la economía del hidrógeno. Las grandes constructoras de vehículos, también comprometidas en este proyecto, adoptan esta meta como fecha de lanzamiento y comercialización de los nuevos modelos equipados con pila de combustible.

De este modo, analizadas las opciones existentes, se ha decidido establecer como escenarios temporales los años 2015, 2030 y 2050, que se corresponden con los horizontes temporales utilizados en las previsiones de muchos de los proyectos e informes estudiados (por ejemplo *McKinsey* [103] o *HyWays* [89]) y coincidirán con etapas de diferente grado de penetración de la tecnología del hidrógeno en el sector transporte.

A continuación se relacionan estos escenarios temporales con las previsiones de la oferta y la demanda apreciadas. De este modo, a la hora de enfrentarse a la creación de una infraestructura del hidrógeno para el uso generalizado del hidrógeno en el sector del transporte, se dispondrá de una previsión en esos horizontes temporales sobre cuáles van a ser las características y prestaciones tanto de los vehículos de hidrógeno, como de los equipos que se incluyen en las instalaciones de suministro de hidrógeno, con el fin de determinar unas estrategias de crecimiento y previsión de desarrollo de las tecnologías del

hidrógeno en España que permitan elaborar un análisis de viabilidad de la implantación de la infraestructura del hidrógeno.

Las tablas siguientes recogen las previsiones para estos horizontes temporales planteados.

Tabla 52. Previsiones de oferta y demanda para el año 2015

ESCENARIO	2015
OFERTA	
Energía: Existen las siguientes previsiones: Petróleo: 53,77 €/barril Gas Natural: 6,22 €/MBtu (36,07 €/boe) Carbón: 59,61 €/t (17,43 €/boe) Hay que remarcar la gran variabilidad de los precios de las fuentes de energía fósiles, en especial del petróleo ya que está focalizado en unas zonas muy inestables políticamente que provocan que los precios estén sujetos por norma general a condicionantes no sólo técnicos sino también políticos y sociales. En estos momentos el barril de Brent se encuentra en unos 105 \$ y se espera que la previsión anual alcance los 121 \$. En cualquier caso, este precio puede disminuir si se normaliza la situación política en los principales países productores de petróleo.	
Vehículos: Lanzamiento de la segunda generación de sistemas de propulsión de pila de combustible por parte de los fabricantes de automóviles, con la que conseguirán reducir en un 40% el coste del sistema de propulsión de los vehículos.	
Turismos: El sistema de almacenamiento de hidrógeno que tiende a imponerse a bordo de los turismos es el de gas a alta presión a 700 bar, sin descartar en cualquier caso la posibilidad de utilizar el almacenamiento en forma de hidrógeno líquido. La capacidad de almacenamiento se encontrará entre los 4 y 6 kilogramos de hidrógeno, que proporcionarán autonomías de entre 200 y 400 kilómetros. Varios fabricantes como <i>Toyota</i> o <i>Hyundai/Kia</i> , con volúmenes de producción de 50.000 vehículos al año, lanzarán turismos con esta tecnología a un precio de aproximadamente 35.000 €, con lo que se habrán conseguido reducir los costes en prácticamente un 85% en referencia al precio actual.	
Autobuses: El sistema de almacenamiento de hidrógeno que tiende a imponerse a bordo de los autobuses es el de gas a alta presión a 350 bar. La capacidad de almacenamiento se encontrará entre los 30 y 40 kilogramos de hidrógeno, para proporcionar entre 200 y 400 kilómetros de autonomía. El precio de los autobuses se espera fijar en torno a los 615.000 € y 360.000 € para autobuses y lanzaderas respectivamente.	
Infraestructura: La distribución del hidrógeno se realizará principalmente mediante vehículos industriales que remonten un semirremolque que transporte botellas de acero o materiales compuestos a una presión que oscila entre los 200 bar y los 1000 bar. Si se dispone del espacio suficiente, los 200 bar es la presión óptima.	

El precio de suministro de gas a alta presión mediante vehículo industrial oscila entre los 1,2 €/kg y los 3,6 €/kg, y mediante gaseoducto entre los 0,72 €/kg y los 2,4 €/kg. Por otro lado, el precio del suministro de hidrógeno líquido criogénico mediante vehículo industrial, actualmente se encuentra entre 0,12 €/kg y 0,36 €/kg.

DEMANDA

Etapas muy importantes de consolidación de mejoras tecnológicas, reducción de costes y aumentos de eficiencia.

Son indispensables acciones políticas de ayudas e incentivos, ya que aunque se consigan los objetivos técnicos no es suficiente para el despegue del mercado.

Coste de la pila de combustible:

Se producirá una disminución del coste muy importante debido a las mejoras y a la progresiva entrada del FCEV con el consiguiente aumento de la producción.

Europa: media de 100 €/kW

EE.UU.: previsión muy optimista de 25 €/kW del DoE. Otros valores los sitúan en el rango de 60-80 €/kW.

Japón: media de 90 €/kW

Corea: Unos 40 €/kW

Se ha reducido en gran medida el coste del *stack*, debiéndose optimizar y reducir los costes del BOP, ensamblaje y pruebas de testeo.

Coste de hidrógeno y formas de producción:

En esta fase se considera principalmente la producción por reformado de gas natural. Introducción gradual de la producción por electrólisis con renovables y gasificación de carbón con técnicas de secuestro de CO₂.

Europa: media de 9,5 €/kg

EE.UU.: media de 4 €/kg

Japón: media de 8 €/kg

Infraestructura:

Se considera clave incentivar la creación de una infraestructura y para influir en el despegue de los FCEV. El número de estaciones no es representativo ya que depende de la extensión y población.

Europa: hasta 1.000 hidrogeneras

EE.UU.: hasta 1.300 hidrogeneras

Corea: Se consideran 50 hidrogeneras mínimas necesarias para que comience la producción a pequeña escala de FCEV.

California (extensión y población un poco menor a España): 18-30 hidrogeneras

La distribución se realizará principalmente por carretera en forma gaseosa y al aumentar la demanda en forma de hidrógeno líquido.

Tabla 53. Previsiones de oferta y demanda para el año 2030

ESCENARIO	2030
OFERTA	
<p>Energía: Existen las siguientes previsiones:</p> <p>Petróleo: 58,18 €/barril Gas Natural: 6,88 €/MBtu (39,9 €/boe) Carbón: 90,14 €/t (26,36 €/boe)</p> <p>Vehículos: Lanzamiento por parte de los fabricantes de la siguiente generación de sistema de propulsión con pila de combustible, con lo que se conseguirán ahorros de hasta el 30% del coste de los sistemas anteriores.</p> <p><u>Turismos:</u> El sistema de almacenamiento de hidrógeno que tiende a imponerse a bordo de los turismos es el de gas a alta presión a 700 bar. La capacidad de almacenamiento será de en torno a 6 kilogramos de hidrógeno, que proporcionarán autonomías mínimas de 600 kilómetros.</p> <p>Debido a la producción a gran escala, y si se dan las mismas subvenciones que las que se dan actualmente a los vehículos eléctricos, alrededor de 6.000 € por vehículo, el precio de los coches que monten esta tecnología ya será comparable con el de los coches con motor de combustión interna convencional, 20.000 € para un turismo compacto de segmento medio. Si no se contemplan ayudas, el precio seguirá siendo aún algo superior al de los vehículos diesel.</p> <p><u>Autobuses:</u> El sistema de almacenamiento de hidrógeno predominante sigue siendo el de gas a alta presión a 350 bar. La capacidad de almacenamiento se encontrará entre los 30 y 40 kilogramos de hidrógeno, para proporcionar entre 400 y 500 kilómetros de autonomía.</p> <p>Infraestructura: El suministro se realiza mediante un mix gas comprimido, hidrógeno líquido y transporte por tubería.</p> <p>Se prevé que el precio de suministro mediante vehículo industrial oscilará entre los 0,72 €/kg y los 0,96 €/kg, y mediante gaseoducto entre los 0,36 €/kg y los 0,48 €/kg.</p> <p>Para la construcción de las hidrogeneras se estiman para unas condiciones de despliegue masivo, inversiones mínimas de al menos 500.000 €-1.000.000 € por hidrogenera.</p>	
DEMANDA	
<p>Etapa de comercialización de las pilas de combustible.</p> <p>Son indispensables acciones políticas de ayudas e incentivos, ya que aunque se consigan los objetivos técnicos no es suficiente para el despegue del mercado.</p> <p>Coste de la pila de combustible: Europa: en 2020 el objetivo es que sea menor de 43 €/kW</p>	

<p>Japón: menor de 35 €/kW Corea: Se estima una reducción relación 40/1 con el precio actual.</p> <p>Coste de hidrógeno y formas de producción: En esta fase entran en funcionamiento las plantas de gasificación de carbón y ciclo combinado con secuestro de CO₂. Se mantiene también el reformado de gas natural y cada vez más la producción por electrólisis. El coste disminuye incentivado por la entrada en el mercado de los FCEV.</p> <p>Europa: media de 5 €/kg EE.UU.: media de 2 €/kg Japón: media de 5,3 €/kg</p> <p>Infraestructura: Europa: hasta 5.100 hidrogeneras EE.UU.: entre 4.000-8.000 hidrogeneras según escenario Corea : hasta 500 hidrogeneras</p> <p>Se empiezan a implementar las redes de tuberías para distribución de hidrógeno. En 2030 confluyen las tres formas de distribución.</p>

Tabla 54. Previsiones de oferta y demanda para el año 2050

ESCENARIO	2050
OFERTA	
<p>Vehículos: Los precios de los coches de los segmentos medio y alto y con rangos de autonomía elevada llegarán a precios similares a los de los vehículos con tecnología diesel: 24.000-30.000 €.</p> <p>Infraestructura: La distribución se realizará principalmente por tubería (hasta 100 toneladas de hidrógeno al día de suministro). El transporte de gas mantiene su cuota de mercado, para pequeñas demandas y cortas distancias.</p> <p>Se prevé que el precio de suministro mediante vehículo industrial oscilará entre los 0,36 €/kg y los 0,48 €/kg; y mediante gaseoducto entre los 0,24 €/kg y los 0,36 €/kg en vehículo industrial.</p>	
DEMANDA	
<p>En esta fase las previsiones dependen de los escenarios de crecimiento que se hayan planteado en cada zona. Por ejemplo, Europa prevé una electrificación del 95% de su sector automoción, pero con una mezcla del 25% FCEV, 35% BEV y 35% PHEV. En este caso EE.UU. prevé una entrada mucho mayor en el mercado, entre el 40 y 90% en función de las previsiones.</p> <p>Coste de la pila de combustible: Europa: en 2020 el objetivo es que sea menor de 43 €/kW Japón: menor de 35 €/kW</p> <p>Coste de hidrógeno y formas de producción:</p>	

Se plantea la producción centralizada en las nucleares, producción biológica y fotoelectroquímica.

Europa: a partir de 2030 el precio se mantiene casi estable en 4,5 €/kg

EE.UU.: el objetivo final es obtener el valor de 1 €/kg

Infraestructura:

Europa: hasta 18.200 hidrogeneras

La distribución se realiza mayoritariamente por tubería en 2050 para grandes distancias y demandas. El transporte por carretera en forma gaseosa mantiene una pequeña cuota de mercado y en forma líquida prácticamente desaparece.

6.3. Determinación de Costes

La determinación de costes del sistema de hidrógeno es un trabajo necesario para realizar a posteriori un análisis económico y de viabilidad del sistema del hidrógeno.

Los costes son uno de los factores determinantes en la toma de decisiones y estos adquieren una mayor importancia si el objetivo último es la creación de una nueva infraestructura para un sistema energético nuevo, el hidrógeno.

Existen varios factores o elementos que tienen una influencia relevante en el coste final del sistema de hidrógeno. El objetivo será por lo tanto, por un lado analizar los coste actuales de los diferentes elementos, y por otro intentar determinar la evolución que van a tener en el tiempo, a medio-corto plazo, en función de factores como el aumento de la demanda o el descenso de precio debido a la madurez que alcanzarán con el tiempo las diversas tecnologías.

Los costes que se tienen en cuenta son los siguientes:

- Energía
- Combustibles
- Instalaciones – Equipos
- Vehículos
- Financiación
- Factores económicos, como tipo de interés o el periodo de amortización de las instalaciones y equipos
- Mantenimiento
- Operación

6.3.1. Costes de Inversión y Explotación de Hidrogeneras

A la hora de determinar los costes de inversión y explotación de la infraestructura del hidrógeno aplicado al sector transporte hay que tener en cuenta precios de:

- Energía eléctrica. Necesaria para alimentar los posibles equipos presentes en las instalaciones, como por ejemplo los equipos de producción de hidrógeno, los compresores o los dispensadores.
- Gas natural. Necesario para los casos en los que se utilice un reformador de gas para la producción de hidrógeno.
- Gasóleo. En primera instancia, necesario para propulsar los camiones que suministrarán el hidrógeno a las hidrogeneras en el caso de que se produzca suministro mediante vehículo industrial.
- Agua, entendiéndola como “*combustible*”, ya que para la producción de hidrógeno mediante electrolisis se requiere agua como fuente primaria.
- Hidrógeno. El precio de obtención del hidrógeno variará en función del método utilizado para su producción, si se hace de forma centralizada o descentralizada. También habrá que tener en cuenta los costes de distribución en el caso que la producción no sea *in situ*.
- Instalaciones y equipos. En este apartado se incluyen todos los aparatos y equipos necesarios en las hidrogeneras para desempeñar la tarea de suministro a los vehículos.
- Otros costes. En este apartado se incluyen los costes de financiación, operación y mantenimiento, operarios e instalación entre otros.

6.3.1.1. Energía

Los procesos globales de producción, almacenamiento y producción de hidrógeno en las hidrogeneras requieren en mayor o menor medida de energía eléctrica.

El coste de la electricidad varía considerablemente de un lugar en función de los recursos disponibles y la tecnología de producción utilizada. El principal factor de la demanda energética es el precio de los combustibles, o mejor dicho, la diferencia de precio entre los mismos. Este factor experimenta cambios bruscos en cortos periodos de tiempo. Así por ejemplo el precio del petróleo se dobló en el año 2000 con respecto al inicio del 1999.

Para España se ha tomado como referencia, el precio medio de la energía eléctrica [€/MWh] establecido para el primer trimestre del 2011 por el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo a través de la Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas [93], fijando su valor en 47,75 €/MWh, o lo que es lo mismo, 4,775 c€/kWh.

En el caso del gas natural, se toma el precio fijado por la CNE para el tercer trimestre del 2010, incluidos los componentes por mermas y primas de riesgo, que es de 21,56 €/MWh (CNE Noviembre 2010,[92]).

En el caso del gasóleo A, el PVP promedio de los dos primeros meses de 2011 se sitúa en 1,217 €/l en España, 1,332 €/l en la UE-14 y en 1,313 €/l en UE-27 (CNE, Febrero 2011,[100]).

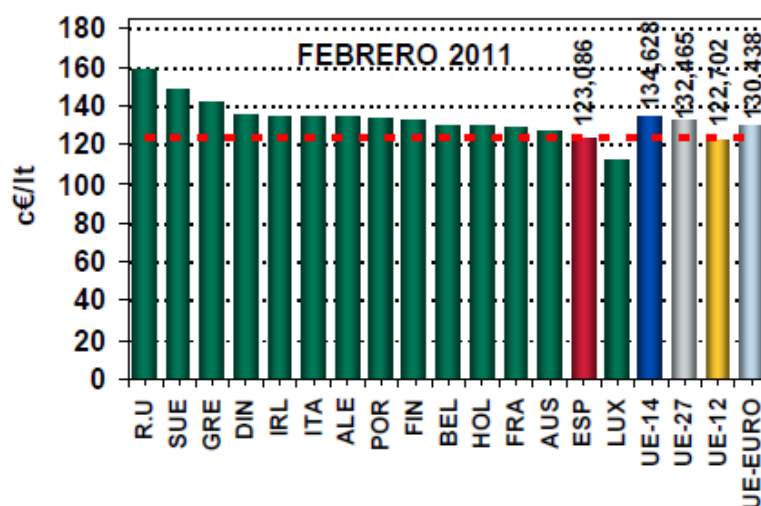


Figura 114. PVP del gasóleo A en Europa (Febrero 2011)

Fuente: **Supervisión macro estaciones de servicio: informe mensual de precios de los carburantes en España y UE. Febrero 2011. CNE [100]**

Los escenarios previstos por el estudio *Energy Trend 2030* [101], se basan en la suposición de que los mercados energéticos globales permanecerán bien suministrados a un coste relativamente modesto durante el periodo 2000-2030. No obstante, estudios posteriores (*HyWays 2010*, Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, [89]) han considerado estos precios muy bajos e irrealistas y han sido actualizados de acuerdo a lo mostrado en la siguiente figura.

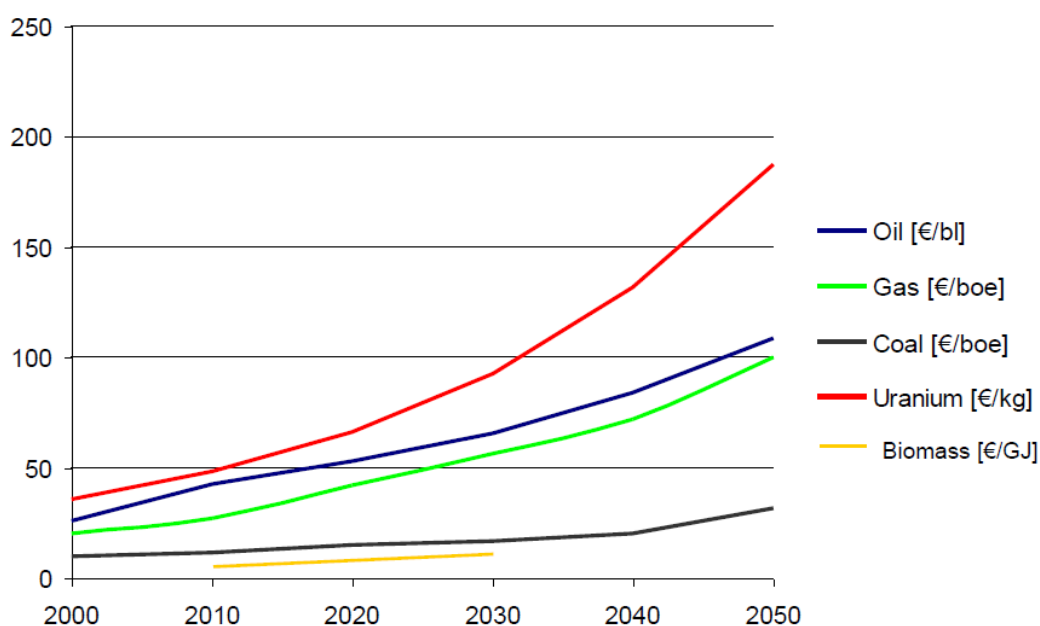


Figura 115. Evolución de los precios de la energía 2000-2050 en el escenario base del proyecto *HyWays*

Fuente: Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, *HyWays, 2010* [89]

De acuerdo a las previsiones analizadas, en la siguiente tabla se muestran los intervalos de variación del precio de los combustibles:

Tabla 55. Límites superior e inferior de los costes de la energía. Horizontes 2020 y 2050

Fuente: Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, HyWays, 2010 [89]

	2020		2050	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Petróleo [€/barril]	26	81	54	217
Gas Natural [€/boe]	22	68	38	204
Carbón [€/boe]	8	30	8	86
Uranio [€/kg]	27	66	27	187

La previsión del precio de la energía en Europa, según la *WEO 2007* [70], se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 56. Previsión de precios de la energía (€ en referencia al año 2000)

Fuente: AIE, *WEO 2007* [70]

	2015	2030
Petróleo [€/barril]	53,77	58,18
Gas Natural [€/MBtu]	6,22	6,88
Gas Natural [€/boe]	36,07	39,90
Carbón [€/t]	59,61	90,14
Carbón [€/boe]	17,43	26,36

Destacar que en el año 2008 se produjo un pico en el precio del petróleo que llegó a doblar el precio del 2007, de 55 €/barril a 110 €/barril, al igual que el carbón y el gas natural, lo que desencadenó un aumento del precio de las energías. La posterior crisis del 2009, con el descenso de demanda mundial, hizo que el precio del petróleo volviese a descender hasta valores en torno a 32 €/barril, estabilizándose en valores parecidos al 2006: 57 €/barril. A principios del año 2011 ha vuelto a alcanzar picos que superan los 72 €/barril. Se estima que en los próximos años el precio del petróleo se incremente y se mantenga en un nivel alto, en cotas similares a las de 2008.

6.3.1.2. Coste del Hidrógeno

El precio del hidrógeno depende de un elevado número de factores: modo de producción, fuente de producción (gas natural, electrolisis del agua mediante diferentes energías: eólica, solar, nuclear), lugar de producción (in situ o fuera de la instalación) y modo de suministro en el caso de que se produzca en instalaciones ajenas a la hidrogenera.

Según la Comisión Europea (*European Expert Group on Future Transport Fuels* [102]), el precio actual de producción de hidrógeno es de 16,6 €/kg, 2/3 de ese coste son debidos a los costes de distribución.

Uno de los factores importantes a la hora de determinar los costes del hidrógeno es el modo de producción del hidrógeno. Actualmente los procedimientos más extendidos son el reformado por gas natural (SMR) y la gasificación de carbón (GC) con captura de CO₂ (CCS). La producción de hidrógeno mediante electrolisis (WE) con energías renovables se prevé alcance precios de hasta 4 €/kg, en sistemas de producción centralizada, CWE; y un poco más de 4 €/kg en sistemas de producción descentralizada, DWE (*McKinsey Report*, 2010 [103]).

La siguiente figura muestra la previsión de costes de producción del hidrógeno en función de la tecnología de producción empleada, en los horizontes temporales 2030 y 2050.

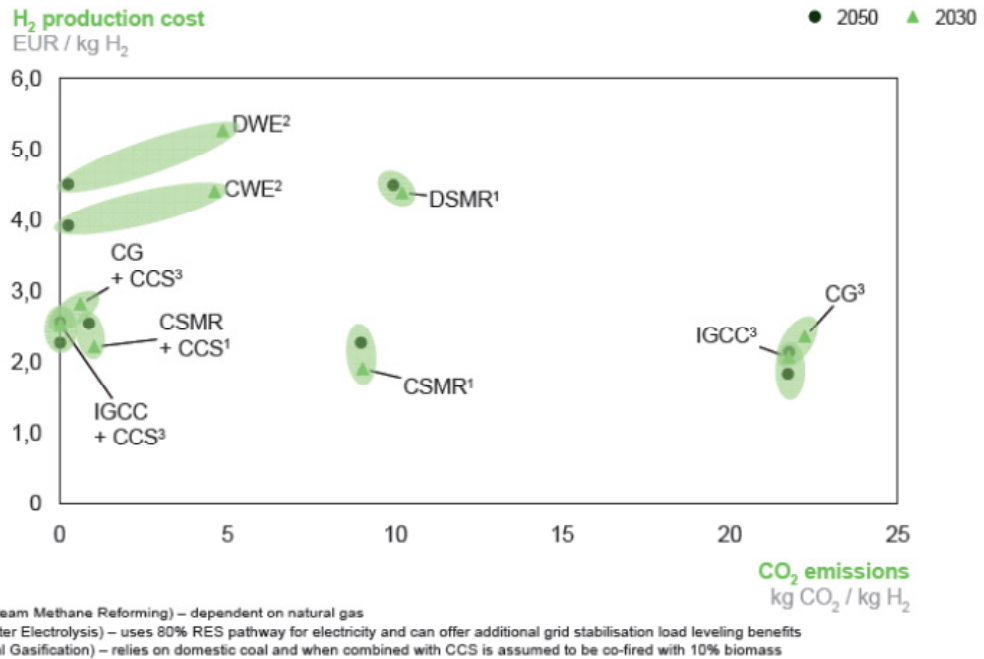


Figura 116. Costes de producción del hidrógeno en función de la tecnología de producción

Fuente: **The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report, 2010 [103]**

El precio del hidrógeno está previsto que descienda un 70% para el 2020, y que a partir de entonces se mantenga más o menos estable en torno a los 4-5 €/kg sin impuestos (*McKinsey Report, 2010 [103]*). La reducción drástica hasta 2020 es debida al aumento de penetración de los vehículos de pila de combustible, la producción mediante diferentes tecnologías, avances en la eficiencia de los sistemas y políticas favorables.

Delivered at pump, w/o taxes/excises

■ Retail ■ Distribution ■ Production

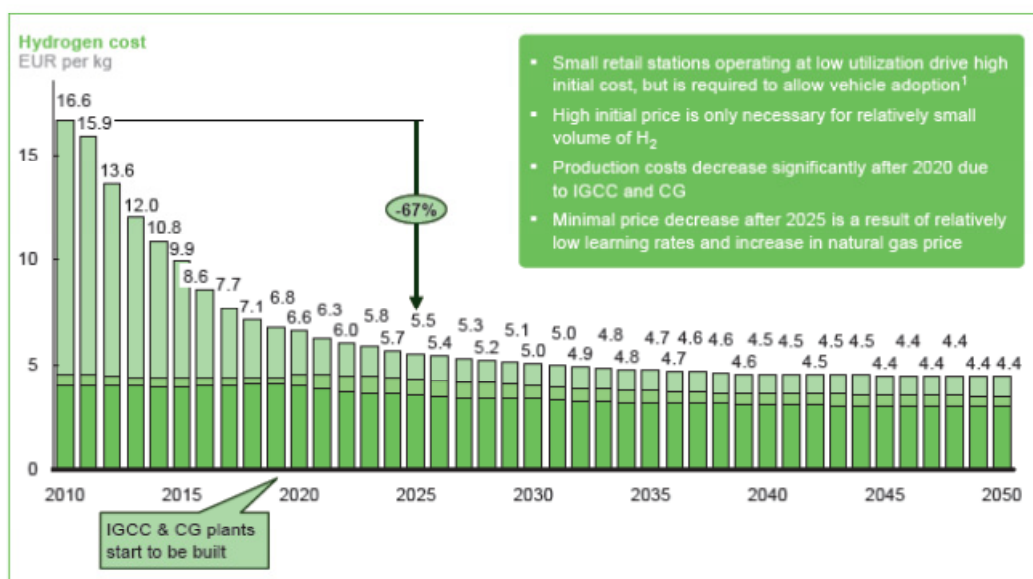


Figura 117. Disminución coste de hidrógeno hasta 2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*. McKinsey Report. 2010 [103]

Las previsiones del estudio *GermanHy* [104] desarrollado en el año 2009 son que para el año 2020 el coste del hidrógeno se encontrará entre los 4 y 5,5 €/kg y entre 3,5 y 4,5 €/kg en el año 2030; costes inferiores a los previstos por la Comisión Europea.

En términos de energía, el precio del hidrógeno actualmente es de 0,44 €/kWh; por lo tanto, para un vehículo de hidrógeno actual que presente una eficiencia media de 2,96 km/kWh, el coste de desplazamiento es de 0,15 €/km. Debido a las mejoras en las baterías y otras mejoras tecnológicas, se espera que las eficiencias de los vehículos aumenten hasta los 3,5 km/kWh en el año 2020 y hasta los 4 km/kWh para el año 2030 (Joost van den Bulk, 2009 [105]).

Si se trata de producción mediante la electrolisis del agua, también hay que considerar el precio de ésta. Para el caso particular de España se puede considerar el precio medio del agua para uso industrial alcanzado en el año 2009: 1,81 €/m³ (AEAS [106]).

a. Coste del abastecimiento exterior de hidrógeno

El coste del abastecimiento exterior de hidrógeno dependerá de si se hace mediante vehículos industriales de gas comprimido, de hidrógeno líquido o mediante gaseoducto y dependerá de la demanda diaria de hidrógeno.

El precio del suministro de hidrógeno en estado gaseoso depende en gran medida en el modo de transporte y de la distancia. De acuerdo a estudios actuales (*WETO H2* [108]), el precio de suministro mediante vehículo industrial oscila entre los 10 €/kg y los 30 €/GJ (1,2 €/kg y 3,6 €/kg), y mediante gaseoducto entre los 6 €/kg y los 20 €/GJ (0,72 €/kg y 2,4 €/kg).

Por otro lado, el precio del suministro de hidrógeno líquido criogénico mediante vehículo industrial, actualmente se encuentra entre 1 €/GJ y 3 €/GJ (0,12 €/kg y 0,36€/kg). Este coste es muy inferior al de distribución de hidrógeno gaseoso, pero el proceso de licuefacción es de una alta intensidad energética; alrededor de un tercio de la energía contenida en el hidrógeno líquido se pierde en el proceso de licuefacción.

Se prevé que en las primeras fases de desarrollo, al no haber una demanda muy importante de hidrógeno, el suministro se realiza principalmente en estado gas comprimido. A partir del año 2020, al aumentar la demanda, se empiezan a utilizar el transporte en estado líquido y el transporte por tubería de en estado gaseoso. Se observa en la gráfica como en 2050, el transporte de gas mantiene su cuota de mercado, para pequeñas demandas y cortas distancias, mientras que para grandes demandas y distancias se utilizará únicamente el transporte por tubería (hasta 100 toneladas de hidrógeno al día de suministro) una vez que la red de distribución ya se haya consolidado.

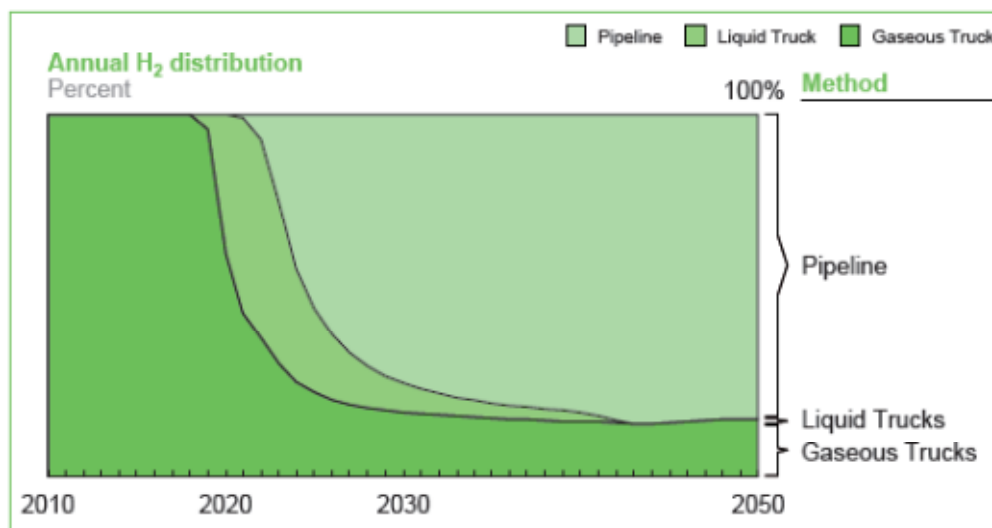


Figura 118. Previsión para el periodo de tiempo 2010-2050 de los métodos de abastecimiento de hidrógeno

Fuente: **The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]**

En la siguiente tabla se recogen los precios previstos en el estudio *WETO H2* [108] para la distribución mediante vehículo industrial y gaseoducto en los horizontes temporales 2025 y 2050:

Tabla 57. Previsiones futuras del precio de la distribución del hidrógeno

Fuente: **WETO H2 (2006) [108]**

Tecnología	2006	2025	2050
Vehículo industrial - Hidrógeno gas comprimido [€/GJ]	14-22	6-8	3-4
Vehículo industrial - Hidrógeno gas comprimido [€/kg]	1,68-2,64	0,72-0,96	0,36-0,48
Gaseoducto - Hidrógeno gas [€/GJ]	10-15	3-4	2-3
Gaseoducto - Hidrógeno gas [€/kg]	1,2-1,8	0,36-0,48	0,24-0,36
5000 kg/h, 800 km			

b. Hidrógeno gas comprimido

El abastecimiento se realiza mediante remolques. En la hidrogenera un paso de compresión extra eleva a altas presiones parte del hidrógeno producido, necesario para el almacenamiento a bordo de vehículos (a 350 atm), mientras que el almacenamiento del remolque de cilindros se utiliza como la parte del sistema de baja presión de almacenamiento en cascada.

En las siguientes tablas se recogen algunos costes a considerar a la hora de determinar los costes de distribución del hidrógeno gas comprimido mediante vehículo industrial.

Tabla 58. Costes para los vehículos industriales de gas comprimido

Fuente: *Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode*. Yang, Ogden, 2007 [109]

Factor operativo	Costes propuestos
Coste del semirremolque de cilindros [€]	150.000
Coste del remolque[€]	60.000
Coste de la cabina [€]	90.000
Salario conductor [€/hora]	10,5

Tabla 59. Factores operativos para el transporte mediante vehículo industrial

Fuente: *Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode*. Yang, Ogden, 2007 [109]

Factor operativo	Valor previsto
Horas del conductor	8
Disponibilidad del vehículo industrial	24horas/día ; 3 cambios/día
Factor de capacidad del vehículo industrial /disponibilidad	80%
Años de vida de la cabina	5
Años de vida del tráiler	20
Tiempo de carga y descarga	1 horas (HG), 2 horas (HL)
Consumo de combustible vehículo industrial [litros/km]	0,5
Velocidad media [km/h]	50

c. Hidrógeno gas licuado

Cada vehículo industrial de hidrógeno líquido consiste en una cabina de vehículo industrial y un único tanque de hidrógeno líquido montado sobre un remolque. No es práctico dejar el remolque de hidrógeno líquido en la hidrogenera, siendo diferente al caso de remolques de cilindro de gas comprimido (Christopher Yang y Joan Ogden, 2006 [94]). El número de cabinas de vehículo industrial es siempre igual al número de remolques de tanque de hidrógeno líquido. Por ello se puede asumir que en cada viaje el vehículo industrial visita a una única hidrogenera, donde descarga el contenido de la carga antes de volver a la planta central (en lugar de realizar múltiples paradas descargando pequeñas cantidades hidrógeno líquido en cada estación).

En la siguiente tabla se recogen algunos costes a considerar a la hora de determinar los costes de distribución del hidrógeno líquido criogénico mediante vehículo industrial.

Tabla 60. Costes para los vehículos industriales de hidrógeno líquido criogénico

Fuente: **Steady state model of hydrogen infrastructure for us urban areas. Christopher Yang, Joan Ogden, 2006 [94]**

Factor operativo	Costes propuestos
Coste del tanque del hidrógeno líquido [€]	650.000
Coste del remolque [€]	60.000
Coste de la cabina [€]	90.000
Salario conductor [€/hora]	10.5

d. Transporte mediante gaseoducto

Para calcular el coste anual debido a este tipo de abastecimiento exterior, habrá que tener en cuenta, además del precio del hidrógeno, el coste de la tubería y de su instalación desde la hidrogenera al centro de producción.

El coste de la tubería puede calcularse en función del diámetro del gaseoducto, el cual está basado en la cantidad de material utilizado en la misma. Por lo tanto se puede calcular en función del diámetro del gaseoducto dado un coste por kilómetro de gaseoducto.

Tabla 61. Factores económicos y operativos para el transporte mediante gaseoducto de hidrógeno gas

Fuente: **Steady state model of hydrogen infrastructure for us urban areas. Christopher Yang, Joan Ogden, 2006 [94]**

Factor operativo o económico	Valores propuestos
Coste de instalación y caminos de vía directa [€/km]. (rural)	300.000
Coste de instalación y caminos de vía directa [€/km]. (urbano)	500.000
Coste capital de la gaseoducto [€/Km]	46.725
Máxima presión de entrada [atm]	70
Presión de salida [atm]	35

6.3.1.3. Coste de Instalaciones y Equipos

Se estima que los costes asociados a la infraestructura del hidrógeno bajarán desde los 12.000 € por vehículo actuales hasta los 3.000 € por vehículo de pila de combustible en el año 2020. Tras el 2020, los costes de infraestructura para los vehículos de pila de combustible se espera alcancen los 1.000 € - 2.000 € (*Future Transport Fuels. European Commission, 2011 [102]*). Por lo tanto, sobre el precio de los vehículos de pila de combustible, los costes de la infraestructura de hidrógeno requerida suponen alrededor del 5%; un valor relativamente bajo. Hasta 2020 serán necesarios 3 billones de euros para poder hacer despegar la infraestructura que abastezca de hidrógeno a 1 millón de vehículos. Posteriormente, se estima una inversión de 2,5 billones de euros anuales, en total 101 billones de euros en 40 años. (McKinsey Report. 2010 [103]).

El estudio desarrollado por el *European Expert Group on Future Transport Fuels: Future Transport Fuels (European Comission, 2011 [102])*, estima para unas condiciones de

despliegue masivo, inversiones mínimas de al menos 500.000 € - 1.000.000 € para la construcción de las hidrogeneras.

A la hora de determinar el coste de la instalación de repostaje, se deberán tener en cuenta los costes de los diferentes equipos que la componen: dispositivo de producción de hidrógeno (electrolizador y/o reformador de gas natural), compresor, sistema de almacenamiento (líquido criogénico, gaseoso u hidruros metálicos), licuefactor, vaporador, purificador y dispensador.

Actualmente existe una gran disparidad en los precios ofrecidos por los diferentes fabricantes para equipos de características similares, por ello, de modo genérico, para determinar los costes de los diferentes equipos se propone la utilización de las siguientes ecuaciones:

Para dispositivos de producción de hidrógeno, compresores, evaporadores y purificadores:

[Ec. 55]

donde:

C_x [€] representa el precio de cada equipo x.

C_{ox} [€/h/kg] es el precio de referencia para cada uno de los equipos. Se ha obtenido para cada uno de los diferentes tipos de equipo a partir de la media del precio por kilogramo hora de los equipos de los que se disponía precios comerciales conocidos.

P [kg/h] es, en el caso de electrolizadores y reformadores, la capacidad de producción del equipo por unidad de tiempo; en el caso de compresores, licuefactores y vaporizadores y purificadores la capacidad máxima de tratamiento.

f_{ex} , es el factor de escala de cada equipo.

Para sistemas de almacenamiento:

[Ec. 56]

donde:

C_a [€] es el precio del sistema de almacenamiento.

C_{oa} [€/kg] es el precio de referencia para cada uno de los equipos. Se ha obtenido para cada uno de los diferentes tipos de equipo a partir de la media del precio por kilogramo hora de los equipos de los que se disponía precios comerciales conocidos.

P [kg] es la capacidad de almacenamiento del sistema del que se quiere determinar el precio.

f_{ea} , es el factor de escala del sistema de almacenamiento.

Tabla 62. Valores fijados para el precio de referencia y el factor de escala de los diferentes equipos

Fuente: **Elaboración propia a partir de tablas de precios de diferentes fabricantes**

	Electrolizador	Reformador	Compresor	Almacenamiento gas comprimido	Almacenamiento líquido criogénico	Almacenamiento hidruros metálicos	Licuefactor	Vaporizador	Purificador	Dispensador
C_o	203.155 (alcalino) 275.114 (PEM)	134.316	51.593	869,6 (350bar) 1.448,6 (500bar)	162,5	78.438	22.581	43.671	3.000	89.593
f_e	0,6 (Alcalino) 0,95 (PEM)	0,95	0,8	0,95	0,8	1	1	0,8	0,3	1

En el caso de los dispensadores, el precio de referencia es por unidad; por lo tanto, para determinar en primera aproximación el precio de los dispensadores necesarios en una estación de servicio será suficiente con multiplicar este precio de referencia por el número de equipos.

Se prevé que los precios de los diferentes equipos bajen al mismo tiempo que se generaliza la utilización del hidrógeno en el transporte. Las economías de escala y la mayor madurez tecnológica contribuirán a reducir los costes a corto-medio plazo.

En muchos de los casos se trata de tecnologías ya maduras empleadas en contextos diferentes al de las hidrogeneras. Otras, por el contrario, están experimentando un gran desarrollo debido a su específica utilización en estas instalaciones, como es el caso de los dispensadores de hidrógeno.

6.3.1.4. Otros Factores

Aparte de los anteriormente citados, existen otros factores que también influirán en el coste final de la instalación de repostaje de hidrógeno. Éstos son los que se citan a continuación:

- Instalación: 15% del precio total de los equipos presentes en la hidrogenera.
- Operación y Mantenimiento: 4% - 8% del coste total de la instalación.
- Periodo de Amortización de equipos e instalaciones (de acuerdo a la experiencia): equipos 10 años; instalaciones 20 años.
- Imprevistos: 1% - 3% del coste total de la instalación. Se trata de una partida que pretende recoger todos aquellos pequeños gastos no contemplados con anterioridad. Se estiman mediante un porcentaje sobre el coste total de la instalación.
- Salario Operarios: Por tomar una referencia, se consideraran salarios paralelos a los ofrecidos en estaciones de servicio convencionales. Según el último convenio publicado (2006-2009), el salario mínimo de los operarios de las estaciones de servicio en el año 2011 debe ser de 29,99 €/día, es decir, 6.599 €/año, extras y complementos a parte, y de 14.113 €/año para los encargados. Por lo tanto se estimarán salarios de 14.000 €/año.
- Tasas Aplicables:
 - IVA = 18%

- Tasa de interés = 5% - 7%
- IPC = 2,875% (media del IPC existente en los últimos 8 años en España)
- Impuestos = 30%

6.3.2. Costes de Inversión y Explotación de Flotas de Vehículos

El coste de los vehículos de hidrógeno está condicionado por el avance y coste de una serie de componentes: sistema de pila de combustible, depósitos de almacenamiento de hidrógeno o *stack*.

Los costes de los sistemas de pila de combustible para la propulsión de los vehículos han bajado de forma significativa durante los últimos años, no obstante siguen siendo prácticamente el doble que los motores de combustión interna de mayores prestaciones.

En la siguiente figura se muestra la evolución apreciada por el Departamento de Energía norteamericano para los sistemas de pila de combustible en el periodo de tiempo 2002-2009.

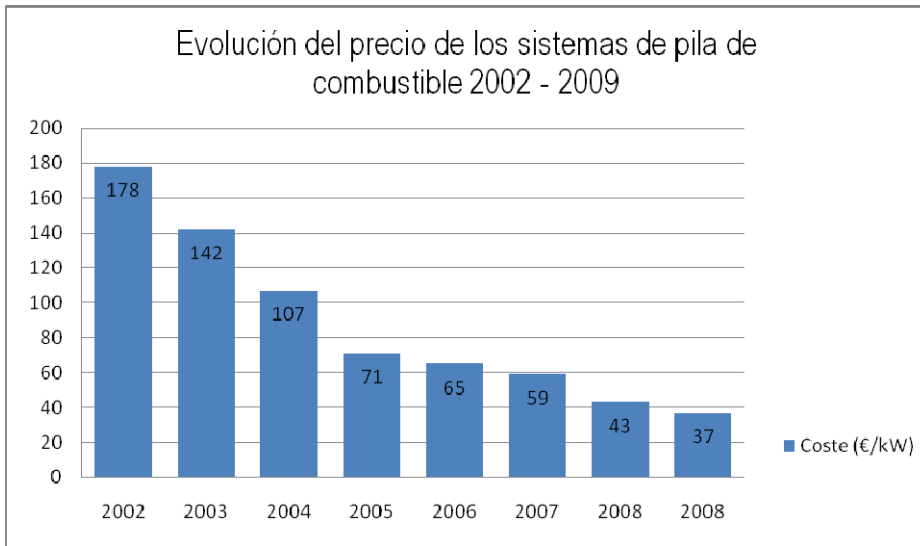


Figura 119. Evolución del precio de los sistemas de pila de combustible para vehículos 2002-2009

Fuente: **Departamento de Energía de Estados Unidos (DoE)**

Los objetivos fijados para el año 2015 es alcanzar un coste para los sistemas de pila de combustible de de 21 €/kW.

De la misma manera, actualmente el coste de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno de los propios vehículos se encuentran, para sistemas de almacenamiento gaseoso a alta presión, en torno a los 10 €/kWh – 13 €/kWh. Los límites para la comercialización está fijados en 1,5 €/kWh. Se espera reducir estos costes mediante la utilización de depósitos, bien de fibra de carbono más baratos que los actuales, bien de materiales basados en tecnologías de almacenamiento como los hidruros metálicos.

La durabilidad del *stack* de la pila en entornos de conducción reales aún se encuentra dos tercios por debajo de los límites requeridos para una comercialización con garantías. La durabilidad ha pasado en los últimos años de los 46.000 kilómetros a los 91.000 kilómetros, pero los expertos opinan que la esperanza de vida de estos sistemas deben alcanzar los 240.000 kilómetros para que los vehículos propulsados con pilas de combustible de hidrógeno puedan competir con los vehículos de gasolina tradicionales.

En la siguiente gráfica se puede observar la evolución experimentada por los avances de fiabilidad de los *stacks* de las pilas desde el año 2006 al 2009.

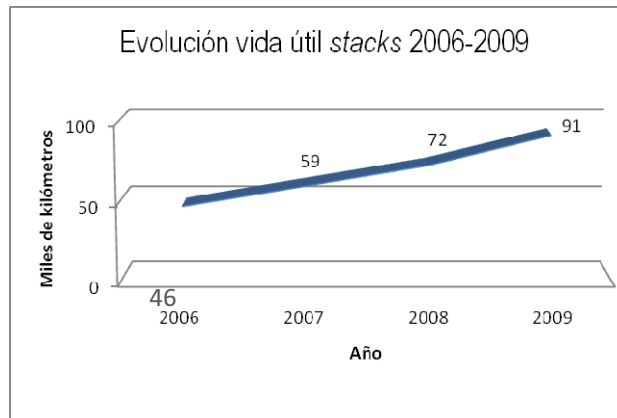


Figura 120. Evolución de la vida útil de los *stacks* de las pilas de combustibles para uso en vehículos 2006-2009

Fuente: **Departamento de Energía de Estados Unidos (DoE)**

6.3.2.1. *Turismos*

Actualmente, el coste de un vehículo tipo turismo sigue siendo elevado en comparación con los vehículos que cuentan con sistemas de propulsión tradicionales; el coste de los últimos vehículos que los diferentes fabricantes han lanzado a la calle en fase de precomercialización para los diferentes proyectos de demostración (por ejemplo el *Honda Clarity*), se encuentra entre los 150.000 € y los 215.000 €. A otros vehículos con menores prestaciones, como el prototipo Hydrogen 3 de *GM*, se les estiman precios en torno a los 80.000 €.

Para el año 2015 existen varios fabricantes como *Toyota* o *Hyundai/Kia* que ya han anunciado que con volúmenes de producción de 50.000 vehículos al año, estarán en disposición de vender vehículos de pila de combustible de hidrógeno a un precio de aproximadamente 35.000 €, con lo que se habrán conseguido reducir los costes en prácticamente un 85% en referencia al precio actual.

Existen previsiones todavía más halagüeñas, y es que otros fabricantes como *Daimler*, indican que para ese mismo año, 2015, serán capaces de producir turismos de pila de combustible al mismo precio que los diesel. *General Motors (GM)* tiene previsto introducir en el mercado en ese año su siguiente generación del sistema de propulsión de pila de combustible, la *Gen 2*, con la que conseguirán reducir en un 40% el coste del sistema de propulsión de los vehículos. Para la próxima generación, prevista para más allá del año 2025, se estima que se conseguirá una reducción del coste de un 30% adicional respecto al coste de los sistemas actuales.

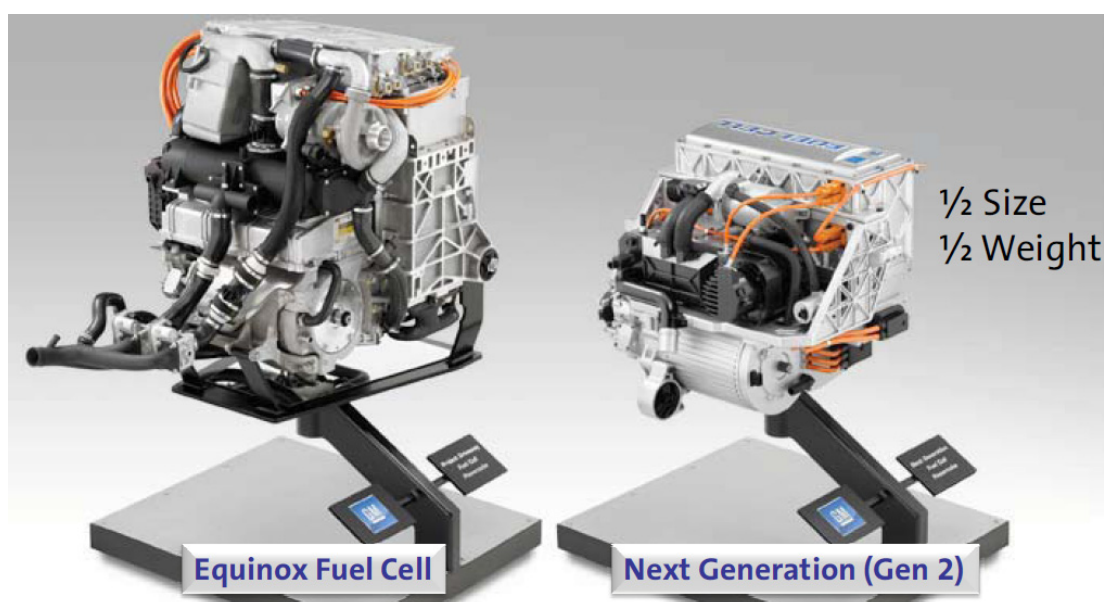


Figura 121. Próxima generación (Gen 2) del sistema de propulsión de pila de combustible de *GM*

Fuente: *GM*

Las previsiones son que para el año 2030, debido a la producción a gran escala, el precio de los coches que monten esta tecnología ya sea comparable con el de los coches con motor de combustión interna convencional, 20.000 € para un turismo compacto de tamaño medio, y que para el año 2050, ya sean considerablemente más baratos (McKinsey, 2010 [103]).

6.3.2.2. Autobuses

Los objetivos de la industria a finales del año 2008 (*Canadian Fuel Cell commercialization Roadmap*, 2008 [110]) son que en el año 2015 el coste de los autobuses públicos sea 615.000 euros y el de las lanzaderas de 360.000 €.

Tabla 63. Objetivos de volumen de mercado, coste y prestaciones para autobuses dedicados al transporte público y lanzaderas

Fuente: Ballard, *Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap Update (2008)* [110]

		2010	2015
Volumen de ventas global	Transporte público	200	>1500
	Lanzaderas	50	>100
Precio de venta (€)	Transporte público	900.000	615.000
	Lanzaderas	540.000	360.000
Durabilidad (horas)		10.000	20.000
Fiabilidad (%)		95	98
Precio del hidrógeno (€/kg)		7,2	1,8

Actualmente, la empresa norteamericana *Ebus* [111] ofrece autobuses de 22 pies de pila de combustible por 465.000 € (355.000 € para pedidos mínimos de cuatro unidades), a partir de una plataforma diseñada específicamente para este tipo de tecnología.

Debido a que las características físicas y el uso que se da a los tranvías son similares a los de los autobuses urbanos, no se dedica un apartado específico a este medio de transporte urbano.

No obstante, debe quedar constancia que los tranvías pueden ser asimilados en una primera aproximación a los autobuses, por lo que las previsiones y datos que se han aportado y se aportarán en adelante referentes a los autobuses pueden tener un paralelismo con los resultados que se obtendrían en el caso de considerar a los tranvías en el estudio.

6.3.3. Costes de Mantenimiento

Estos costes son los requeridos para asegurar un buen funcionamiento de la instalación.

6.3.3.1. Mantenimiento de las Instalaciones de Hidrógeno

El mantenimiento adecuado y oportuno de los equipos es la llave para asegurar el funcionamiento del sistema de hidrógeno de forma segura. Una estrategia de mantenimiento reactivo es desaconsejable o poco prudente para equipos en uso de hidrógeno. En una estación de servicio de hidrógeno debería implementarse un programa de mantenimiento bien planeado con el objetivo de prevenir condiciones peligrosas antes de que éstas ocurran. La estrategia de mantenimiento que debería utilizarse en este tipo de instalaciones es la conocida como “mantenimiento centrado en la confiabilidad” (*Reliability Centered Maintenance, RCM*), estrategia altamente dependiente del mantenimiento predictivo, pero que también reconoce que las actividades de mantenimiento en equipos que son baratos y no muy importantes pueden ser sustituidas por actividades de carácter reactivo.

a. Principios generales con respecto al mantenimiento de estaciones de servicio de hidrógeno:

- El mantenimiento se realizará en base a las recomendaciones del fabricante de los diferentes componentes.
- Las instalaciones de repostado deberán estar libres en todo momento de basura, escombros, maleza y otros materiales que presenten riesgo de generación de fuegos.
- Las zonas de césped en los terrenos pertenecientes a la estación serán mantenidas de tal manera que no presenten riesgos por fuego.
- Los equipos de protección contra incendios, detección de gas y seguridad serán ensayados o inspeccionados en intervalos de tiempo no superiores a 6 meses.
- Se deberían preparar programas de mantenimiento detallados para cada sistema, haciendo referencias individuales a unidades del equipo en el sistema.

Los programas de mantenimiento se establecerán detallando las actividades de mantenimiento a llevar a cabo así como sus frecuencias respectivas. Las siguientes acciones se incluirán como actividades clave:

- Con una frecuencia anual se debería realizar una inspección periódica a los recipientes de almacenamiento así como a los sistemas de tuberías de la instalación
- Comprobación de fugas en la instalación
- Comprobación funcional del sistema seguridad de corte de energía
- Ensayos a los dispositivos de alivio de presión
- Ensayos a los equipos de control y monitorización
- Comprobación de filtros
- Comprobación de la integridad de los sistemas eléctricos y de las conexiones a tierra.
- Actividades correspondientes al mantenimiento del compresor
- Inspección de los tubos flexibles

Las mangueras de repostado flexibles se consideran muy vulnerables y como una fuente de peligro potencial por lo que se requiere un cuidado especial relacionado con su uso.

También se deberá tener especial atención a la integridad de la continuidad eléctrica, a las boquillas y a las evidencias de daño físico.

La atención del operador también se debe centrar en la importancia de evitar la corrosión que puede limitar la vida de las botellas y puede afectar las características de fatiga de las mismas.

b. Requisitos de mantenimiento para recipientes de hidrógeno

Los requisitos de mantenimiento para los recipientes de almacenamiento de hidrógeno y su integridad merecen una mención especial ya que generalmente representan un gran peligro para los trabajadores y las instalaciones.

- Deberían seguirse los requisitos que marca la legislación y las normas industriales para el mantenimiento de recipientes de almacenamiento de hidrógeno:
 - Recipientes fijos: *Reglamento de Aparatos a Presión*.
 - Recipientes móviles: *Reglamento de equipos a Presión Transportables (ADR)*.
- Los recipientes deberían estar sometidos a exámenes no destructivos a intervalos de tiempo fijados.
- El carácter cíclico del servicio de los recipientes de hidrógeno a alta presión es una preocupación particular debido al potencial de éstos para aumentar el crecimiento de grietas por fatiga y la fragilización de hidrógeno.

Los recipientes a presión deben volver a certificarse periódicamente según su seguridad y fiabilidad. Los requisitos específicos variarán según el tipo de recipiente, el tipo de servicio, las leyes de aplicación y la localización.

c. Inspecciones periódicas

El mal funcionamiento de las válvulas y/o las fugas de válvulas es la causa principal de los accidentes relacionados con hidrógeno. Las “conexiones con fugas” son la segunda causa más importante, llegando al 16% del número total de incidentes.

El personal de mantenimiento debería inspeccionar, ensayar y mantener de forma frecuente todos los componentes de los sistemas de hidrógeno. Las inspecciones deberían incluir los siguientes aspectos:

- Revisar todos los puntos de consigna de las válvulas de alivio.
- Ensayar el funcionamiento de los dispositivos de alivio en base preventiva.
- Revisar la formación de fugas de carácter continuo en los sistemas de venteo.
- Revisar todas las demás características operacionales relevantes.

- Los problemas de mantenimiento crónico (mantenimiento repetido de forma frecuente) pueden ser el resultado de errores en el diseño, los cuales deberían tratarse y corregirse tan pronto como fuera posible.

Una vez analizados todos los aspectos que engloban las operaciones de mantenimiento de las instalaciones de suministro de hidrógeno, el cálculo del coste necesario se hace mediante la estimación de un porcentaje del coste total de la instalación. Este valor oscilará entre el 4 y el 8%.

6.3.3.2. Mantenimiento de Vehículos

Actualmente, tanto la tecnología de las pilas de combustible, como los vehículos de tracción eléctrica basados en tecnologías del hidrógeno, están evolucionando de forma rápida y constante, por lo que no existen dos diseños iguales, por lo que tampoco existen programas de mantenimiento estandarizados.

El mantenimiento tiene una gran importancia para asegurar el correcto funcionamiento y durabilidad de una pila de combustible (instalada en este caso en un vehículo). Gran parte de las intervenciones de mantenimiento preventivo y predictivo persiguen: mantener la pureza del hidrógeno y la limpieza del aire, lograr la refrigeración de las celdas de la pila sin que se produzca contaminación de las mismas y que y garantizar la seguridad frente a pérdidas/fugas de hidrógeno no controladas. Otras operaciones de mantenimiento también importantes para el correcto funcionamiento de los vehículos afectan a la comprobación de los sensores situados en las pilas de combustible, de los sistemas “mecánicos” involucrados (válvulas, conexiones, manguitos), de la conductividad del agua y del líquido refrigerante o de la evolución del voltaje generado por las celdas de la pila de combustible.

De todas maneras, un aspecto muy importante a tener en cuenta en este ámbito es que siempre hay que referirse a las instrucciones del fabricante cuando se realizan operaciones de mantenimiento.

Los costes de mantenimiento asociados a la totalidad de la vida útil de los turismos de pila de combustible (pertenecientes a los segmentos C y D) vienen reflejados de forma específica en la siguiente tabla (*McKinsey* [103]).

Tabla 64. Coste del mantenimiento requerido a lo largo de su vida útil de los turismos de hidrógeno en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103]

Coste vehículos segmento medio (C,D)	
Año	Mantenimiento [€]
2010	6.000
2015	5.000
2020	4.500
2030	4.200
2050	4.000

En general, el programa de mantenimiento rutinario que se suele proponer sobre autobuses de pila de combustible se realiza en diferentes intervalos de tiempo. Los periodos que se definen de forma más habitual son los siguientes: diario, semanal, cada 6.000 kilómetros, cada 12.000 kilómetros, cada 24.000 kilómetros, y anual.

De este modo, los costes de mantenimiento asociados a la totalidad de la vida útil de la autobuses de pila de combustible se calculan a partir de los datos conocidos de costes y mantenimiento y tomando como referencia los costes de mantenimiento asociados a los turismos:

Tabla 65. Coste del mantenimiento a lo largo de la vida útil de los autobuses de pila de combustible en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *Ballard, Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap Update. 2008* [110]

Coste autobuses	
Año	Mantenimiento [€]
2010	10.000
2015	9.000
2020	7.900
2030	7.400
2050	7.000

6.4. Viabilidad Económica y Estratégica del Modelo de Introducción del Hidrógeno en el Transporte Urbano

Para determinar la viabilidad económica y estratégica de una hipotética, pero a su vez inminente, introducción de las tecnologías del hidrógeno al sector transporte, especialmente la pila de combustible, se ha desarrollado una herramienta que permite determinar la inversión requerida en infraestructuras y vehículos en cada uno de los escenarios temporales fijados: 2015, 2030 y 2050; y en base a unos supuestos grados de penetración: bajo, medio y alto, siguiendo las líneas marcadas en cuanto a escenarios de penetración a nivel europeo por *McKinsey* [103].

Esta herramienta, cuyo funcionamiento se recoge en el *ANEXO 4 Herramienta de Valoración*, permite determinar, no sólo la inversión requerida en infraestructuras y vehículos para cubrir las previsiones, sino también el beneficio a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras. Así mismo, proporciona la posibilidad de calcular la rentabilidad de la inversión con o sin financiación externa.

A la hora de determinar la inversión requerida y la viabilidad económica se cuenta con cinco apartados principales, cada uno de ellos condicionados por una serie de variables: Subvenciones, Vehículos, Infraestructuras, Coste del hidrógeno e Ingresos por venta de hidrógeno. Estos apartados constituyen en sí las entradas de la herramienta.

6.4.1. Cuaderno de Hipótesis

Con el fin de elaborar a partir de la herramienta propuesta estudios de viabilidad económicos y estratégicos para determinar la idoneidad o no de implantar un sistema de hidrógeno aplicada al sector transporte en España en los diferentes horizontes temporales previamente fijados: 2015, 2030 y 2050, se cuenta con una serie de variables de partida, como lo son el

número de vehículos, el precio de los equipos y del hidrógeno o la existencia o no de financiación pública, cuyos valores se determinará a partir de las hipótesis recogidas a continuación.

Para el caso de España, estas hipótesis se extrapolarán de los datos establecidos por los expertos principalmente a nivel europeo, pero también norteamericano.

6.4.1.1. Vehículos

A la hora de realizar el estudio de viabilidad, se tendrán en cuenta las estimaciones del número de vehículos propulsados con pila de combustible que se espera recorran las carreteras europeas durante el periodo de tiempo comprendido hasta el año 2050. Se desestiman los vehículos de combustión interna de hidrógeno ya que existe una tendencia a abandonar esta línea de investigación y desarrollo por parte de los fabricantes.

Para el estudio se fijarán tres escenarios de penetración de este tipo de vehículos, en función de si se espera un grado de penetración bajo, alto o medio, y que se hará coincidir con los escenarios fijados por *McKinsey* [103] y que coinciden en gran medida con los propuestos en el proyecto *HyWays* [89].

Para el escenario de grado de penetración baja, los vehículos de combustión interna tradicionales siguen teniendo una predominancia importante para el 2050, con solo una penetración del 5% para los vehículos de pila de combustible. El escenario de penetración media, presenta una alta penetración de los vehículos eléctricos, dejando en un 25% la penetración de los de pila de combustible. Por último, el escenario más optimista presenta una predominancia de los vehículos de pila de combustible con una penetración del 50%.

a. Turismos

Para el estudio, representando al total de turismos se considerarán los precios y prestaciones previstas para los turismos de los segmentos C/D. Para estos vehículos se aplicarán las siguientes consideraciones en cuestión de vida útil, distancia media recorrida anual y consumo medio a los 100 kilómetros:

Tabla 66. Prestaciones de los turismos

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103]

Prestaciones de los vehículos	
Vida útil [años]	15
Distancia media recorrida [km/año]	12.000
Consumo medio [kg/100km]	1

Estas previsiones se han obtenido a partir del informe *McKinsey* [103], y se han contrastado con los datos previstos por el *DoE* [112].

Según los diferentes niveles de penetración de los vehículos de hidrógeno fijados, y sabiendo que hasta el año 2015 se supondrá un número de vehículos en circulación estable y similar a los actuales: 214.638.000 turismos, y que está previsto que el número de vehículos sea de 273 millones en el 2050 (según *McKinsey* [103]), el número de turismos circulando por las carreteras europeas en los diferentes horizontes temporales será el que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 67. Número de turismos en Europa en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*

Número vehículos en Europa						
	Penetración Baja		Penetración Media		Penetración Alta	
	%	Nº vehículos	%	Nº vehículos	%	Nº vehículos
2012	0,000041%	100	0,0002%	500	0,00041%	1.000
2015	0,0082%	20.000	0,041%	100.000	0,082%	200.000
2020	0,082%	200.000	0,41%	1.000.000	0,82%	2.000.000
2030	1,71%	4.680.000	8,58	23.416.000	17,1%	46.832.000
2050	5%	13.650.000	25%	68.250.000	50%	136.500.000

Entre los valores establecidos para los horizontes temporales considerados, se aplicará una progresión lineal para determinar los valores intermedios.

Para el caso particular de España, para conocer el número de vehículos de pila de combustible que está previsto circulen por las carreteras nacionales, se utilizará la relación actual existente entre el número total de turismos en Europa y los que hay en España; así, sabiendo que en el año 2009, año más reciente del que se disponen los datos en *Eurostat* [113] (excepto de Portugal, Islandia y Dinamarca), había en Europa 242.884.000 turismos en circulación, de los cuales 21.983.485 circulaban España, se obtiene un valor del 9,05%.

De este modo calculado, el número de vehículos de pila de combustible en España en los horizontes temporales estudiados serán los siguientes:

Tabla 68. Número de turismos en España en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103]; Eurostat 2009 [113]

Número vehículos en España			
	Penetración Baja	Penetración Media	Penetración Alta
2015	1.800	9.000	18.000
2030	421.200	2.107.440	4.214.880
2050	1.228.500	6.142.500	12.285.000

No obstante, debido a la coyuntura económica en la que se encuentra España y la cercanía del primer escenario planteado: año 2015; se plantea aplicar un factor de corrección para este horizonte temporal que permita obtener unas cifras que se ajusten más a la realidad del país.

Este factor de corrección se obtiene tomando como referencia Alemania, país con una economía más saneada y que está llamado a ser el pionero en Europa en la introducción de las tecnologías del hidrógeno aplicadas al transporte. Alemania aloja el 16,94% del campo automovilístico europeo (incluyendo turismos y autobuses), frente al 9,02% de España (fuente *Eurostat 2009* [113]). A partir de este dato, y teniendo en cuenta la relación del número de vehículos de hidrógeno empleados en los principales proyectos de demostración y prueba desarrollados hasta la actualidad en Alemania (*CUTE, CEP, Barth, Rheinbahn Fuel Cell Bus Project, ZeroRegio* y *Munich Airport Hydrogen Infrastructure Project*) y España (*CUTE, CITYCELL, HERCULES, EXPO 2008*) se obtiene un factor de corrección del 0,23:

Tabla 69. Cálculo del factor de corrección a aplicar en España en el horizonte temporal 2015

Fuente: *CUTE; CEP; Barth; Rheinbahn Fuel Cell Bus Project; ZeroRegio; Munich Airport Hydrogen Infrastructure Project; CITYCELL; Proyecto HERCULES; EXPO 2008; Eurostat 2009*

Cálculo Factor de Corrección España horizonte 2015				
	Campo automovilístico europeo (%)	Número vehículos empleados en proyectos	Número de vehículos correspondería a España según campo automovilístico	Factor de corrección
Alemania	16,94	94	-	12/52=
España	9,02	12	52	0,23

Así, aplicando el factor de corrección al horizonte temporal 2015, la previsión del número de turismos circulando por las carretas españolas en los diferentes horizontes temporales será el que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 70. Número de turismos en España en los diferentes escenarios temporales considerados aplicando factor de corrección 2015

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]; Eurostat 2009 [113]*

Número vehículos en España			
	Penetración Baja	Penetración Media	Penetración Alta
2015	400	2.000	4.000
2030	421.200	2.107.440	4.214.880
2050	1.228.500	6.142.500	12.285.000

De acuerdo con *McKinsey* [103], el precio de los turismos se fijaba en 160.000 euros para el año 2010. Sin embargo, se prevé que la producción en masa de los vehículos de pila de combustible, precedida de la creación de la infraestructura de recarga, produzca una disminución significativa en el precio de adquisición; a modo de ejemplo, el precio de la pila de combustible se puede llegar a reducir de un precio medio de 500 €/kW en 2010 a 43 €/kW con una cuota de mercado de 1 millón de vehículos para el año 2020. En cualquier caso,

estos datos deben ser tomados de referencia, ya que están sujetos al tamaño de las pilas (para pilas en torno a los 3-5 kW, los presupuestos a los que se tiene acceso marcan un precio en torno a los 2.500 €/kW -3.000 €/kW), a la variación del mercado, a las mejoras tecnológicas y las políticas favorables.

La evolución del precio para años futuros viene reflejada de forma específica para turismos pertenecientes a los segmentos C y D junto con sus costes asociados de mantenimiento previstos para la totalidad de la vida útil de los vehículos, en la en la siguiente tabla. Gracias a la ayuda de 6.000 euros que se espera que se conceda a la compra de los vehículos de hidrógeno (esta ayuda es equivalente a la fijada por el Plan de Acción del Vehículo Eléctrico 2010-2012 en España para los vehículos eléctricos, y es de esperar que se aplique también a los vehículos de hidrógeno), el precio de los vehículos de pila de combustible será competitivo al de los vehículos con motor de combustión interna a partir del año 2020.

Tabla 71. Coste de los vehículos y del mantenimiento requerido a lo largo de su vida útil en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: **The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]**

Coste vehículos segmento medio (C,D)		
Año	Adquisición [€]	Mantenimiento [€]
2010	160.000	6.000
2015	35.000	5.000
2020	30.900	4.500
2030	25.700	4.200
2050	23.700	4.000

b. Autobuses

En el caso de los autobuses el estudio se realizará a partir de los datos obtenidos para autobuses de 40 pies. Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones en cuestión de vida útil, distancia media recorrida anual y consumo medio a los 100 kilómetros:

Tabla 72. Prestaciones de los autobuses

Fuente: *NREL* [114]

Prestaciones de los autobuses	
Vida útil [años]	10
Distancia media recorrida [km/año]	33.000
Consumo medio [kg/100km]	7,5

Respecto al número de autobuses que está previsto que circulen en las carreteras europeas, este caso es diferente al de los turismos. Los autobuses son vehículos destinados al transporte público, con unos recorridos y horarios fijos, por lo que presentan ciertas ventajas a la hora de implantar un nuevo sistema de transporte y su infraestructura, y además este carácter público ofrece la posibilidad de dar a conocer al público en general esta nueva tecnología. Por ello están siendo muy utilizados en los proyectos de demostración que se han desarrollado en Europa en los últimos años, como por ejemplo el *CUTE/ECTOS* (2001-2005), que contaba con una flota de 30 autobuses, o el *HyFLEET/CUTE* (2006-2009), que contó con 47 autobuses.

Actualmente hay en marcha otros proyectos, como el *CHIC*, que trabaja sobre las bases fijadas por los dos proyectos mencionados anteriormente, y que tiene como objetivo principal implementar en 5 grandes regiones europeas (localizadas en Inglaterra, Italia, Noruega y Suiza) un transporte urbano limpio y renovable a través de la inserción de 26 autobuses con pila de combustible y la ampliación de la infraestructura necesaria para su repostaje; o el *H2 Movility* [115], más ambicioso, y que pretende utilizar a Alemania como ejemplo de introducción en la nueva sociedad del Hidrógeno mediante la construcción de una red de estaciones de repostaje suficientemente amplia, para luego exportar el modelo al resto de Europa. Actualmente cuentan ya con una flota de 14 autobuses y 40 vehículos de hidrógeno, turismos en su mayoría.

Por su utilización de forma más generalizada en los proyectos de demostración y prueba, se espera que en los primeros años de implantación de esta nueva tecnología, mientras dure la época precomercial (que en algunos países, debido a la coyuntura económica, puede superar

ampliamente el año 2020), el ritmo de penetración de los autobuses sea superior que el de penetración de los turismos.

Para determinar la penetración de los autobuses en los horizontes temporales analizados en el la tesis, utilizaremos los porcentajes de penetración utilizados para los turismos, sabiendo que el número total de autobuses en Europa es de 1.457.700, lo que supone un factor de 0,006 respecto al número total de vehículos (244.271.700) (datos obtenidos de Eurostat). Por lo tanto, para saber el número de autobuses previstos en los diferentes años en los diferentes escenarios previstos se obtendrán multiplicando por 0,006 los previstos en el caso de los turismos. No obstante, para reflejar el mayor ritmo de penetración de los autobuses en los primeros años de implantación, en vez de un factor 0,006, se utilizará el factor que se obtiene de la relación autobuses/vehículos (14/54) mantenida en el proyecto *H2 Movility* [115], proyecto que aspira a obtener un modelo de implantación para toda Europa. Por lo tanto el factor utilizado hasta el año 2015 será de 0,26.

La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos para el número de autobuses previstos en los diferentes escenarios temporales considerados:

Tabla 73. Número de autobuses en Europa en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103]; *Eurostat 2009* [113]; *Proyecto H₂ Movility* [115]

Número autobuses en Europa						
	Penetración Baja		Penetración Media		Penetración Alta	
	%	Nº autobuses	%	Nº autobuses	%	Nº autobuses
2012	0,0018%	26	0,0089%	130	0,0178%	260
2015	0,3567%	5.200	1,7836%	26.000	3,1737%	52.000
2020	0,3739%	5.450	1,8371%	26.780	3,6743%	53.560
2030	1,7138%	28.080	8,5750%	140.496	17,15%	280.992
2050	5%	81.900	25%	409.500	50%	819.000

Entre los valores establecidos para los horizontes temporales considerados, se aplicará una progresión lineal para determinar los valores intermedios.

Para el caso particular de España, para conocer el número de autobuses de pila de combustible que está previsto circulen por las carreteras nacionales, al igual que en el caso de los turismos, se utilizará la relación actual existente entre el número total de turismos en Europa y los que hay en España; así, sabiendo que en el año 2009, año más reciente del que se disponen los datos en *Eurostat* [113] (excepto de Portugal, Islandia y Dinamarca), había en Europa 1.457.700 autobuses en circulación, de los cuales 62.663 circulaban España, se obtiene un valor del 4,32%.

No obstante, estas previsiones para el año 2015 que se han ajustado a la realidad económica de Alemania, es conveniente corregirlas para el caso de España, debido a la coyuntura económica en la que se encuentra sumida el país y la cercanía en el tiempo de este horizonte temporal. Para corregir los valores se determina un factor de corrección a partir de la relación experimentada entre las estadísticas de población, PIB e inversión en investigación experimentadas en Alemania y España. Las relaciones estadísticas son las siguientes:

Tabla 74. Relaciones estadísticas España vs Alemania y factor de corrección para España en el año 2015

Fuente: *Eurostat* [113] (población e inversión en investigación en % PIB); *CIA World Factbook* (PIB)

Factor de corrección para España año 2015				
	PIB	Población	% respecto al PIB en Investigación	Factor de corrección
España	1,376	45.989.016	1,38	
Alemania	2,96	81.802.257	2,82	
Ratio	0,465	0,562	0,489	0,128

De este modo calculado, el número de vehículos de pila de combustible en España en los horizontes temporales estudiados serán los siguientes:

Tabla 75. Número de autobuses en España en los diferentes escenarios temporales

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]; Eurostat 2009 [113]; Proyecto H₂ Movility [115]*

Número autobuses en España						
	Penetración Baja		Penetración Media		Penetración Alta	
	Sin Factor Corrección	Con Factor Corrección	Sin Factor Corrección	Con Factor Corrección	Sin Factor Corrección	Con Factor Corrección
2015	225	5	1.123	26	2.246	52
2030	1.213		6.069		12.139	
2050	3.538		17.690		35.381	

En este primer escenario temporal, los autobuses se prevé que sean de tipo urbano debido a que, por un lado, serán las administraciones públicas las que financiarán y potenciarán la incorporación de este tipo nueva tecnología, y en este sentido, la incorporación de los autobuses urbanos a las flotas urbanas de transporte ofrece la posibilidad de dar a conocer al público en general esta nueva tecnología; y por otro lado, debido a la falta de infraestructuras.

En términos económicos, los objetivos de la industria canadiense a finales del año 2008 (*Ballard, 2008 [110]*) eran que en el año 2015 el coste de los autobuses de 40 pies fuese en torno a 615.000 euros, mientras que para el año 2010 los precios se fijaban en 900.000 euros. A partir de estos costes y suponiendo que al igual que pasa en el caso de los turismos, a partir del año 2030 los precios empezarán a ser competitivos con los de los autobuses convencionales, se obtienen los precios previstos para el resto de los horizontes temporales (2030 y 2050). De igual modo se calculan los costes de mantenimiento asociados a la vida útil de los vehículos:

Tabla 76. Coste de los autobuses en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *Ballard, Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap Update. 2008 [110]*

Coste autobuses		
Año	Adquisición [€]	Mantenimiento [€]
2010	900.000	10.000
2015	615.000	9.000
2020	350.000	7.900
2030	250.000	7.400
2050	200.000	7.000

6.4.1.2. Precio del Hidrógeno

La evolución que se prevé seguirá el precio del hidrógeno desde el año 2010 hasta el 2050 se muestra en la siguiente figura. El precio del hidrógeno hasta el año 2015 es tan elevado debido a que las estaciones de repostaje funcionarán por debajo de su nivel de productividad y el hecho de que deban construirse instalaciones muy pequeñas para reducir los costes capitales. Se trata de una etapa precomercial, con una muy baja economía de escala. Hasta el año 2025 está previsto que haya disminuido casi un 70% respecto al precio actual. Estos recortes serán consecuencia del aumento de penetración de los vehículos de pila de combustible, la producción mediante diferentes tecnologías, la mejora de los rendimientos de los equipos, la producción a gran escala y políticas favorables. Todo ello contribuirá al descenso del precio final del hidrógeno en el punto de repostaje.

A partir de esta gráfica se obtiene tanto el precio de venta a los clientes, como el de producción y distribución a la instalación, Por ejemplo, para el año 2011, según estas previsiones, el precio de venta al por menor a los clientes se situaría en 15,9 €/kg, mientras que el precio de producción y distribución se estima en 4,5 €/kg.

Delivered at pump, w/o taxes/excises

■ Retail
 ■ Distribution
 ■ Production

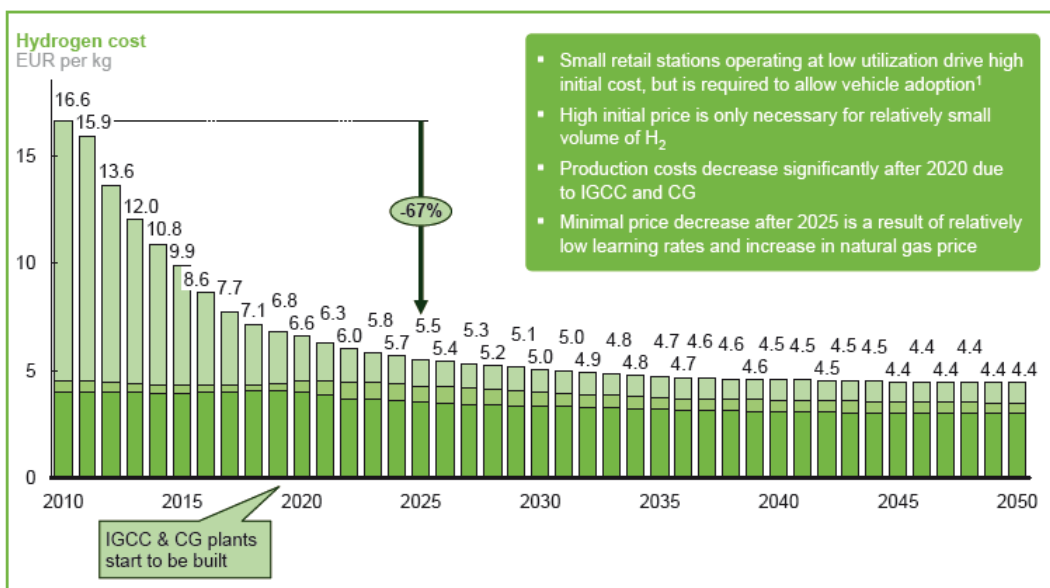


Figura 122. Previsiones de la evolución del precio del hidrógeno

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*

Los costes de producción variarán, además de en función de la madurez y eficiencia de los equipos, en función del tipo tecnología empleado y el precio de la energía requerida para la generación del hidrógeno.

En el caso de que el hidrógeno se produzca mediante el uso de combustibles de origen fósil, el procedimiento más empleado es el reformado de gas natural, por lo que habrá que tener en cuenta el precio de los equipos, reformadores, y del gas natural, el cual se espera aumente a partir del año 2025.

Considerando los precios de producción del hidrógeno propuestos en *McKinsey* [103], mostrados en la Figura 122, y las previsiones del precio del gas natural en Europa y España marcadas por el proyecto *HyWays* [89], es posible determinar la influencia del precio del gas natural en el precio final de producción.

Tabla 77. Evolución del precio de producción del hidrógeno 2010-2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103]

AÑO	Producción +distribución	
	€/kg	€/MWh
2010	4,5	135
2011	4,5	135
2012	4,4	132
2013	4,3	129
2014	4,2	126
2015	4,2	126
2016	4,2	126
2017	4,2	126
2018	4,2	126
2019	4,3	129
2020	4,5	135
2021	4,5	135
2022	4,4	132
2023	4,4	132
2024	4,3	129
2025	4,2	126
2026	4,2	126
2027	4,1	123
2028	4,1	123
2029	4	120
2030	4	120
2031	4	120
2032	3,9	117
2033	3,9	117
2034	3,8	114
2035	3,8	114
2036	3,7	111
2037	3,7	111
2038	3,7	111
2039	3,7	111
2040	3,6	108
2041	3,6	108
2042	3,6	108
2043	3,6	108
2044	3,5	105
2045	3,5	105
2046	3,5	105
2047	3,5	105
2048	3,5	105
2049	3,5	105
2050	3,5	105

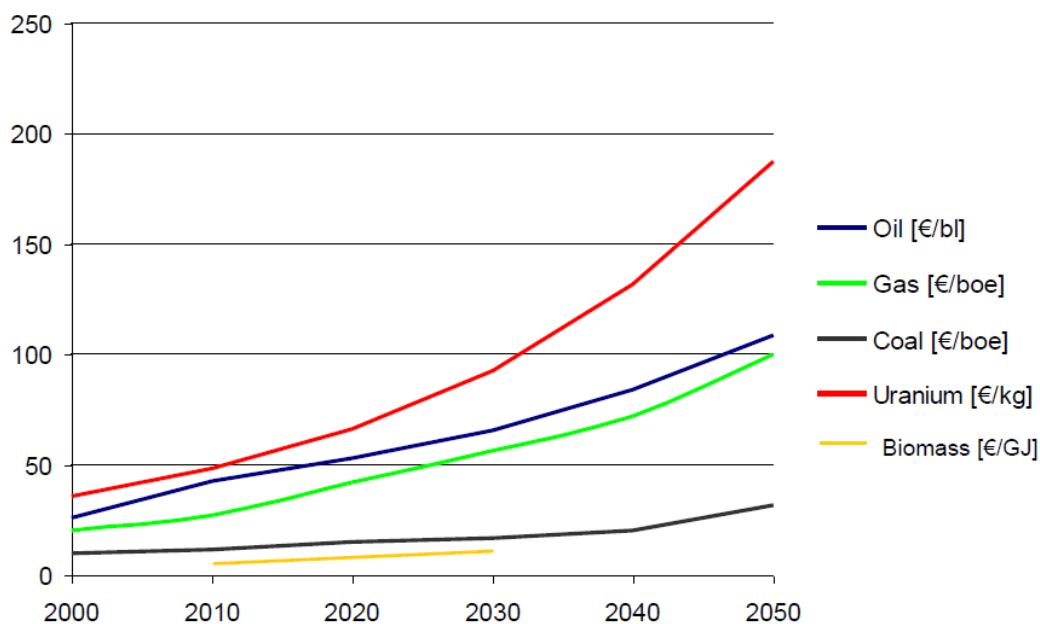


Figura 123. Evolución de los precios de la energía 2000-2050 en el escenario base del proyecto HyWays

Fuente: Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, *HyWays, 2010* [89]

De esta figura es posible extraer el precio previsto para el gas natural en los horizontes temporales sometidos a estudio: 2015, 2030 y 2050:

Tabla 78. Precio previsto del gas natural en el escenario base del proyecto HyWays

Fuente: Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, *HyWays, 2010* [103]

Precio gas natural		
Año	€/boe	€/MWh
2015	34,5	19,38
2030	56	31,36
2050	100	56

De este modo la influencia del precio del gas natural en el precio final de producción y distribución del hidrógeno, y que se considerará constante en el horizonte temporal considerado, será el mostrado a continuación:

Tabla 79. Influencia en % del precio del gas natural sobre el precio total de producción y distribución del hidrógeno en los horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*; Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, *HyWays, 2010 [89]*

Año	H ₂ (€/MWh)	GN (€/MWh)	%
2015	126	19,38	15,4
2030	120	31,36	26,1
2050	105	56	53,3

Esto significa que si por ejemplo el precio del gas natural en el 2015 aumenta en un 10% respecto al previsto, el precio final de producción y distribución del hidrógeno aumentaría en un 1,54%.

El rango de variación del precio del gas natural para los tres horizontes temporales se establece a partir de los propuestos en *HyWays [89]*:

Tabla 80. Límites superior e inferior de los costes de la energía. Horizontes 2015, 2030 y 2050

Fuente: Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, *HyWays, 2010 [89]*

	2015		2030		2050	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Gas Natural (€/boe)	22	68	28	112	38	204
Gas Natural (€/MWh)	12,32	38,08	15,68	62,72	21,28	114,24

En el caso de que el hidrógeno se produzca exclusivamente mediante electrolisis, habrá que tener en cuenta precio de electrolizadores, de la energía eléctrica y el agua. Especial atención merece el caso de la energía eléctrica:

El coste de la electricidad varía considerablemente de un lugar en función de los recursos disponibles y la tecnología de producción utilizada. El precio actual medio de la energía eléctrica [€/MWh] en España, viene establecido para el primer trimestre del 2011 por el

Ministerio de Industria, Comercio y Turismo a través de la Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas [93], fijando su valor en 47,75 €/MWh, o lo que es lo mismo, 4,775 c€/kWh., así, procediendo de igual manera que en el caso del gas natural, y suponiendo un precio para el año 2015 similar al actual mas el IPC correspondiente y una evolución posterior del precio de la electricidad paralela a la del gas natural, obtenemos la influencia del precio de la energía eléctrica en el precio final de producción y distribución del hidrógeno:

Tabla 81. Influencia en % del precio de la energía eléctrica sobre el precio total de producción mediante electrolisis y distribución del hidrógeno en los horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103]

Año	H ₂ [€/MWh]	Electricidad [€/MWh]	%
2015	126	53,48	42,4
2030	120	65,46	54,6
2050	105	90,1	85,8

Esto significa que si por ejemplo el precio de la electricidad en el 2015 aumenta en un 10% respecto al previsto, el precio final de producción y distribución del hidrógeno aumentaría en un 4,24%.

Se observa que el precio de la electricidad en el caso de la electrolisis tiene mayor influencia en el precio final de producción del hidrógeno que el precio del gas natural cuando se produce hidrógeno mediante reformado.

El rango de variación el precio de la energía eléctrica para los tres horizontes temporales se establece a partir de los propuestos para el gas natural:

Tabla 82. Límites superior e inferior de los costes de la energía. Horizontes 2015, 2030 y 2050

Fuente: **Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España, HyWays, 2010 [89]**

	2015		2030		2050	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Energía eléctrica [€/MWh]	18	106	32	130	60	180

6.4.1.3. Infraestructuras

Se prevé que los costes asociados a la infraestructura del hidrógeno bajarán desde los 12.000 € por vehículo actuales hasta los 3.000 € por vehículo de pila de combustible en el año 2020; y hasta 1.000 - 2.000 euros tras el 2020.

Por otro lado, se establecen 3 tamaños de hidrogenera; las características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 83. Tamaño de las hidrogeneras

Fuente: **The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]**

Tamaño	Características		
	Número vehículos [coches/día]	Número dispensadores	Capacidad repostaje [kg/día]
Pequeña	70-100	2	400
Mediana	150-250	4	1000
Grande	450-600	10	2500

El número de estaciones de repostaje de hidrógeno considerado a nivel europeo para un grado intermedio de penetración de los vehículos de pila de combustible, un 25% del total de vehículos en el año 2050), es el propuesto en el informe *McKinsey* [103]:

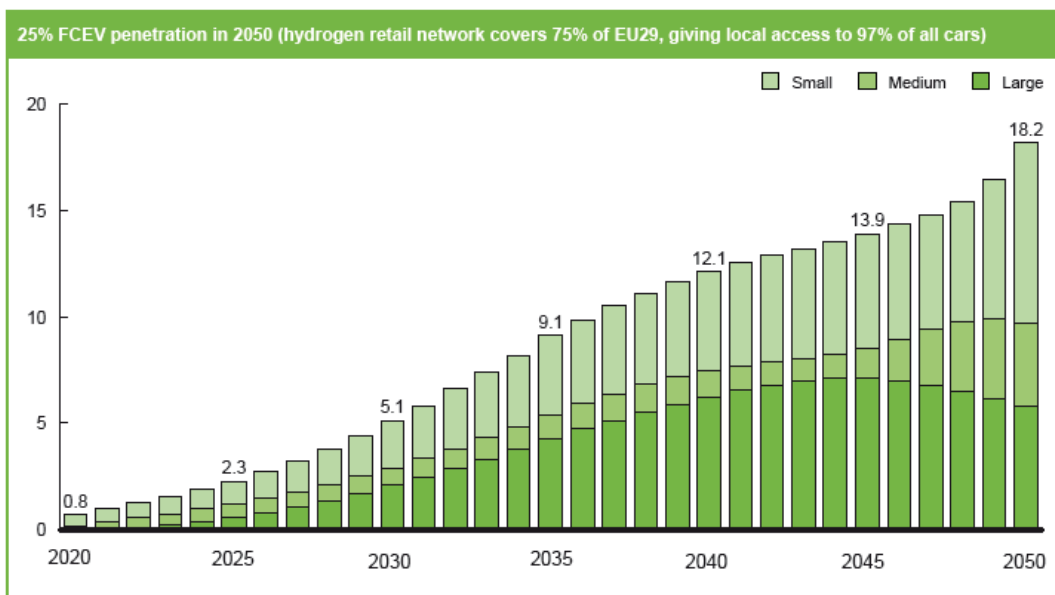


Figura 124. Número de hidrogeneras en Europa por tamaño

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*

Como se puede observar en la gráfica, aumenta el número de estaciones de servicio hasta llegar a 18.200 hidrogeneras en el año 2050. En los primeros años se prevé un crecimiento mayor de las estaciones pequeñas y grandes. A partir del 2040, el número de hidrogeneras de alta capacidad disminuyen en número, ya que al haber ya una infraestructura buena de suministro, no es necesario que haya grandes estaciones, ya que la distancia media entre estaciones no será elevada, y habrá una gran oferta de infraestructura de hidrógeno.

Para un nivel de penetración medio, el número de hidrogeneras en Europa en los diferentes escenarios temporales considerados sería el que se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 84. Número de hidrogenas previstas en Europa en los horizontes temporales 2015, 2030 y 2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*

Año	Número Hidrogenas Europa		
	Pequeña	Mediana	Grande
2015	198	0	0
2030	2250	840	2010
2050	8270	2830	7100

Con el objetivo de extrapolar los datos correspondientes a España, se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Características de los modelos tipo de hidrogena en función de su tamaño (Tabla 83).
- Número de vehículos previstos para el país en los diferentes escenarios temporales y de penetración (Tabla 68 y Tabla 75) y sus prestaciones en cuanto a consumo de hidrógeno (Tabla 66 y Tabla 72). Con esto es posible determinar la cantidad de hidrógeno consumido diaria y anualmente:

Tabla 85. Consumo previsto de hidrógeno en las hidrogenas españolas en los horizontes temporales 2015, 2030 y 2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*

Consumos Hidrógeno en España						
AÑO	Penetración Baja		Penetración Media		Penetración Alta	
	[kg/año]	[kg/día]	[kg/año]	[kg/día]	[kg/año]	[kg/día]
2015	119106	326	595531	1632	1191063	3263
2030	53546314	146702	267914632	734013	535829265	1468025
2050	156176748	427882	780883740	2139408	1561767480	4278815

- Proporción en cuanto a número de estaciones de repostaje pequeñas, medianas y grandes existente en Europa:

Tabla 86. Relación entre el número de hidrogeneras de diferente tamaño en cada uno de los horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*

	Número Hidrogeneras					
	Europa			Relación		
	Pequeña	Mediana	Grande	Pequeña	Mediana	Grande
2015	198	0	0	1	0	0
2030	2250	840	2010	2,68	1	2,39
2050	8270	2830	7100	2,92	1	2,51

A partir de estos datos, las previsiones en cuanto al número de vehículos en España y sus prestaciones y las características de las hidrogeneras en función de su tamaño, es posible determinar la previsión en cuanto al número de hidrogeneras a instalar en España según el grado de penetración de los vehículos de hidrógeno en los diferentes horizontes temporales.

Tabla 87. Número de hidrogeneras previstas en España según el grado de penetración de los vehículos de hidrógeno en los horizontes temporales 2015, 2030 y 2050

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]*

Año	Número Hidrogeneras España								
	Penetración Baja			Penetración Media			Penetración Alta		
	Pequeña	Mediana	Grande	Pequeña	Mediana	Grande	Pequeña	Mediana	Grande
2015	1	0	0	3	0	0	5	0	0
2030	51	19	46	247	92	221	491	183	438
2050	150	51	128	743	254	638	1482	507	1272

En el año 2011 ya hay en España tres estaciones de repostaje de hidrógeno en funcionamiento, una en Zaragoza, otra en Huesca y una tercera en Sevilla. El número calculado de hidrogenas previstas en España que se muestran en la Tabla 87, es independiente de estas instalaciones, pero sólo para el horizonte temporal 2015 debido a su proximidad. Es decir, para el año 2015 y para un grado de penetración bajo, el número de hidrogenas nuevas que se prevé se instalaran hasta la fecha será de 1, y hará un total de 4 si se le suman las tres ya existentes (para un grado de penetración medio y alto, el número de hidrogenas total será pues 6 y 8 respectivamente). Por el contrario, en el 2030 y para el mismo grado de penetración, el número de instalaciones que se habrán construido en total será 51, incluidas las tres actuales.

De acuerdo a los datos obtenidos de *McKinsey* [103] y *DoE* [112] referentes a las hidrogenas, se supondrán para los horizontes temporales indicados los precios que se indican en la siguiente tabla:

Tabla 88. Precio de las hidrogenas en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103], *Analysis of the Transition to Hydrogen Fuel Cell Vehicles and the Potential Hydrogen Energy Infrastructure Requirements. DoE 2008* [112]

Hidrogenas		
Tamaño	Precio 2012-2025 [€]	Precio 2025-2050 [€]
Pequeñas	610.000	365.000
Medianas	1.510.000	910.000
Grandes	3.775.000	2.275.000

6.4.1.4. Subvenciones

Tanto en *McKinsey* [103] como en *DoE* [112], queda de manifiesto que si se quiere generalizar el uso del hidrógeno en el sector transporte, será necesario que las

administraciones públicas proporcionen ayudas tanto para reducir el precio de los vehículos y el hidrógeno, como para construir las infraestructuras necesarias.

Por ello, en la elaboración del análisis de viabilidad serán asumidas una serie de ayudas:

a. Vehículos

En el caso de la adquisición de vehículos se prevé se cuente con unas ayudas mínimas directas a la compra que al menos sean equiparables a las englobadas dentro del marco del Plan de Acción del Vehículo Eléctrico 2010/2012 [116] y que se espera se prolonguen para el caso de los vehículos de hidrógeno hasta que estos se hayan implantado (2020-2025). Estas ayudas son las siguientes:

Tabla 89. Subvenciones previstas para los vehículos eléctricos

Fuente: *Plan de Acción del Vehículo Eléctrico 2010/2012 [116]*

Subvención directa a la compra [€]	
Turismos	25% del valor ó 6.000
Autobuses	25% del valor ó de 15.000 a 30.000 según características
Furgonetas	25% del valor ó de 15.000 a 30.000 según características

No obstante también está previsto que se financie con fondos europeos hasta el 50% de la inversión de proyectos, incluida la adquisición de vehículos, especialmente flotas de demostración y transporte público, que apoyen la incorporación del hidrógeno al sector del transporte hasta la consolidación de este nuevo sistema de transporte (2020-2025).

b. Hidrógeno

En el caso de la adquisición del hidrógeno se basarán en la ausencia de impuestos, *McKinsey* [103], debido a que se trata de un combustible no contaminante y la aplicación de una subvención directa por kilogramo de hidrógeno adoptada del modelo norteamericano, *DoE* [112], según la tabla siguiente, y que se estima será de aplicación hasta el año 2025,

momento en el cual las ayudas son retiradas para ver si el mercado es sostenible más allá de este año.

Tabla 90. Subvenciones previstas para los productores de hidrógeno por parte de la administración pública

Fuente: *Analysis of the Transition to Hydrogen Fuel Cell Vehicles and the Potential Hydrogen Energy Infrastructure Requirements. DoE 2008* [112]

Subvención [€/kg]	
2012-2018	0,5
2018-2025	0,5 - 0,3 (descenso lineal a lo largo de los años)
2025-2050	0

c. Infraestructuras

Las subvenciones consideradas para la construcción de infraestructuras de repostaje de hidrógeno se estiman de acuerdo a una financiación máxima del 50% del proyecto hasta el año 2030:

Tabla 91. Subvenciones previstas para la construcción de estaciones de repostaje de hidrógeno en los diferentes escenarios temporales considerados

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103], *Analysis of the Transition to Hydrogen Fuel Cell Vehicles and the Potential Hydrogen Energy Infrastructure Requirements. DoE 2008* [112]

Subvenciones [€]	
2012-2030	50% inversión
2030-2050	0

6.4.1.5. Otros Factores

Aparte de los anteriormente citados, existe otros factores que también influirán en el coste final de la instalación de repostaje de hidrógeno. Éstos se citan a continuación y tomarán valores estimativos en base a la experiencia:

- Instalación: 15% del precio total de los equipos presentes en la hidrogenera.
- Operación y Mantenimiento: 4% del coste total de la instalación, incluyendo construcción de hidrogeneras y producción y distribución del hidrógeno, con una evolución estable en base al IPC.
- Imprevistos: Se considerará un 1% del coste total de la instalación.
- Salario Operarios: 14.000 €/año.

En una primera aproximación, en el caso de las hidrogeneras, y pese a que es posible que se requiera de mayor formación, se estimarán los mismos salarios que para los operarios de las estaciones de repostaje de carburantes convencionales.

Según el último convenio publicado (2006-2009), el salario mínimo de los operarios de las estaciones de servicio en el año 2011 debe ser de 29,99 €/día, es decir, 6.599 €/año, extras y complementos a parte, y de 14.113 €/año para los encargados. Por lo tanto se estimarán salarios de 14.000 €/año.

A continuación se presenta, para tres turnos diarios, una tabla en la que se recogen el número mínimo de operarios en función del tamaño de las instalaciones:

Tabla 92. Número mínimo de empleados necesarios en las estaciones de repostaje de hidrógeno en función de su tamaño

Nº Empleados mínimo	
Pequeñas	6
Medianas	9
Grandes	18

Tasas Aplicables:

- Para los casos en los que no se considere el IVA, éste tomará el valor del 18% de acuerdo a la normativa vigente.
- La tasa de interés se considerará entre el 5% y el 7% como norma general para la financiación externa. En este caso particular se considera un 5%.
- A la hora de actualizar precios y salarios, en los casos que sea aplicable, se considerará un IPC del 2,875%, obtenido a partir de la media del IPC existente en los últimos 8 años en España.
- Indicar que los impuestos pueden llegar hasta el 30% debido a las aplicaciones sucesivas de los impuestos no reflejables.

6.4.2. Modelo Económico

A partir de las magnitudes obtenidas en el apartado 6.4.1 *Cuaderno de Hipótesis*, es posible determinar para cada horizonte temporal sometido a estudio y para cada uno de los tres niveles de penetración de las nuevas tecnologías del hidrógeno considerados, la inversión necesaria en concepto de adquisición de vehículos y construcción de infraestructuras.

También se analiza la diferencia entre los ingresos y costes que supone la actividad económica de las instalaciones, centrándose en lo que es concretamente la actividad de compra y venta de hidrógeno y los gastos que conlleva el ejercicio de esta actividad.

Estos análisis se realizarán tanto para las inversiones realizadas en el año en estudio en concreto, como para las inversiones acumuladas hasta el horizonte temporal considerado.

Todos los aspectos económico financieros considerados en el apartado 6.4.1 *Cuaderno de Hipótesis* y que contribuyen a la inversión final a realizar y a la actividad económica de las instalaciones, se resumen en la tabla siguiente:

Parametrización de un sistema de transporte sostenible por carretera en función del análisis de los factores determinantes en los nuevos sistemas de tracción de vehículos eléctricos

Tabla 93. Resumen aspectos económicos relativos a la incorporación del sistema de hidrógeno al sector transporte

Grado Penetración	Año			2015			2030			2050		
	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
VEHICULOS												
Número vehículos año de referencia	134	667	1334	28054	140363	280726	40365	201753	403506			
Turismos	2	9	18	81	403	806	117	582	1163			
Autobuses												
Número vehículos acumulados hasta año de referencia	400	2000	4000	421200	2107440	4214880	1228500	6142500	12285000			
Autobuses	5	26	52	1213	6069	12139	3538	17690	35381			
Coste vehículos año de referencia (M€)	5,744	28,024	56,048	859,664	4300,586	8601,172	1142,330	5709,032	11417,857			
Coste vehículos acumulados hasta año de referencia (M€)	16,57	83,444	166,888	12906,106	64574,617	129149,491	34761,816	173809,080	347618,367			
Demanda H2 Flota año de referencia (kg/año)	21030	102315	204630	3566955	17840985	35681970	5133375	25650810	51299145			
Demanda total acumulada hasta año de referencia (kg/año)	60375	304350	608700	53546175	267913575	535829625	156176550	780882750	1561767975			
INFRAESTRUCTURA												
Número hidrogeneras año de referencia	1	1	2	7	37	73	11	54	108			
Pequeñas	1	1	2	3	16	32	5	24	50			
Medianas	0	0	0	1	6	12	2	9	16			
Grandes	0	0	0	3	15	29	4	21	42			
Número hidrogeneras acumulado hasta año de referencia	4	6	8	116	560	1112	329	1635	3261			
Pequeñas	4	6	8	51	247	491	150	743	1482			
Medianas	0	0	0	19	92	183	51	254	507			
Grandes	0	0	0	46	221	438	128	638	1272			
Subvención construcción infraestructuras (M€)	0,398	0,398	0,796	5,354	27,621	53,924	0	0	0			
Subvención acumulada construcción infraestructuras (M€)	0,796	1,194	1,592	42,790	206,058	408,780	0	0	0			
Coste hidrogeneras año de referencia (precio - subvención) (M€)	0,398	0,398	0,796	5,354	27,621	53,924	15,595	78,909	156,620			
Coste hidrogeneras hasta año de referencia (precio - subvención) (M€)	1,592	2,388	3,184	85,581	412,116	817,561	305,827	1968,119	3930,608			
ACTIVIDAD COMPRA-VENTA HIDRÓGENO												
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	10,34%	34,74%	52,11%	95,01%	98,75%	99,57%	99,28%	99,68%	99,98%			
Capacidad de suministro hidrogeneras año de referencia (kg/año)	146000	146000	292000	3540500	18213500	35514500	5110000	25951500	51465000			
Capacidad de suministro hidrogeneras acumuladas hasta año de referencia (kg/año)	584000	876000	1168000	56356000	271304500	538156000	157315000	783363000	1562127000			
Coste de personal hidrogeneras año de referencia (M€/año)	0,084	0,084	0,168	1,134	5,880	11,508	1,680	8,442	16,800			
Coste de personal hidrogeneras hasta año de referencia (M€/año)	0,336	0,504	0,672	18,270	88,032	174,678	51,282	255,192	508,914			
Coste producción + distribución hidrógeno año de referencia (M€/año)	0,540	0,540	1,080	13,100	67,390	131,404	16,352	83,045	164,688			
Coste producción + distribución hidrógeno hasta año de referencia (M€/año)	2,161	3,241	4,322	208,517	1003,827	1991,177	503,408	2506,762	4998,806			
Coste producción + distribución hidrógeno hasta año de referencia (M€/año)	0,016	0,016	0,032	0,214	1,105	2,157	0,624	3,156	6,265			
Coste mantenimiento y operación hidrogeneras año de referencia (M€/año)	0,064	0,096	0,127	3,423	16,485	32,702	12,233	78,725	157,224			
Coste mantenimiento y operación hidrogeneras hasta año de referencia (M€/año)	0,149	0,502	1,507	16,820	89,929	176,805	22,321	113,825	226,394			
Ingresos generados hidrogeneras año de referencia (M€/año)	0,598	3,013	6,026	267,731	1339,568	2679,148	687,177	3435,884	6871,779			
Gastos incurridos hidrogeneras año de referencia (M€/año)	0,640	0,640	1,280	14,448	74,375	145,069	18,656	94,643	187,753			
Gastos incurridos hidrogeneras hasta año de referencia (M€/año)	2,560	3,841	5,121	230,210	1108,343	2198,558	566,923	2840,678	5664,945			

Los principales resultados que se extraen de esta tabla se muestran a continuación de forma más específica.

La inversión requerida para cumplir con las previsiones en cuanto al número de vehículos e instalaciones en los diferentes horizontes temporales con los diferentes grados de penetración de las nuevas tecnologías del hidrógeno en el sector transportes se resume en la Tabla 94.

Tabla 94. Inversión a realizar en cada uno de los años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte

INVERSIÓN AÑO DE REFERENCIA									
Año	2015			2030			2050		
Grado Penetración	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Vehículos (M€)	5,744	28,024	56,048	859,664	4300,586	8601,172	1142,330	5709,032	11417,857
Hidrogeneras (M€)	0,398	0,398	0,796	5,354	27,621	53,924	15,595	78,909	156,620
Inversión total (M€)	6,142	28,422	56,844	865,018	4328,2064	8655,0953	1157,9245	5787,9411	11574,4772
% vehículos respecto al total de inversión	93,52	98,60	98,60	99,38	99,36	99,38	98,65	98,64	98,65
% hidrogeneras respecto al total de inversión	6,48	1,40	1,40	0,62	0,64	0,62	1,35	1,36	1,35

Observando los resultados referidos a la inversión total mostrados en esta tabla y analizando el porcentaje de inversión que suponen los vehículos e instalaciones de repostaje de hidrógeno frente al total, se puede extraer que:

- tomando como referencia el grado de penetración media para cada uno de los años sometidos a estudio, la inversión para el grado de penetración bajo será aproximadamente cinco veces menor, y para un grado de penetración alto será el doble. Estas relaciones coinciden con la relación establecidas para las previsiones en cuanto al número de vehículos para cada uno de los años.
- el mayor salto en cuanto a inversión se produce del año 2015 al 2030, al multiplicarse la inversión por un factor igual a 152 (para grado de penetración bajo es sólo un factor 140). Por el contrario, el salto de inversión del año 2030 a 2050 sólo se multiplica por un factor de 1,3. Ver gráfico siguiente:

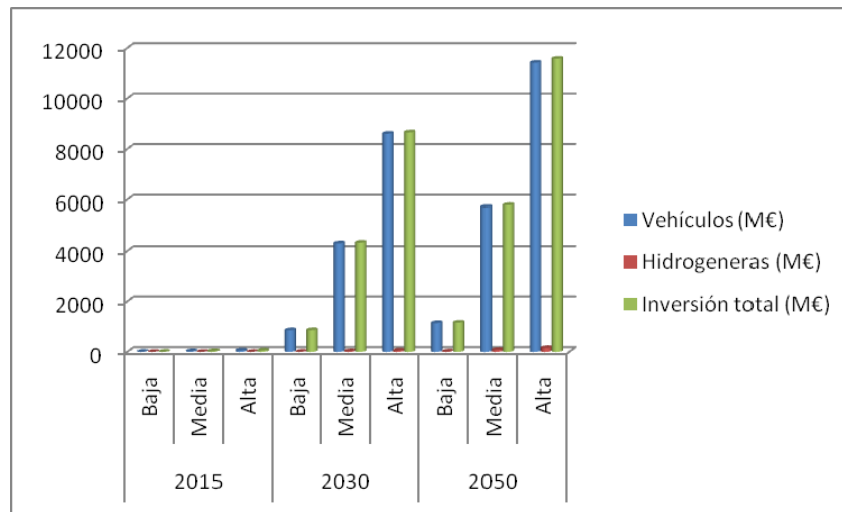


Figura 125. Inversión requerida para cubrir las previsiones en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones

- la inversión en infraestructuras no alcanza el 1,5% de la inversión total requerida, excepto para el caso de penetración baja en el año 2015, en el que alcanza un 6,5%.

Además de la inversión requerida, para cada horizonte temporal establecido es posible obtener una cuenta de resultados de la actividad económica de las hidrogeneras, y que no es otra que el suministro de hidrógeno a los usuarios finales. Para ello se tiene en cuenta, por un lado los ingresos generados por la venta del hidrógeno, y por otro los gastos principales en los que se incurre en la venta: coste de producción ó adquisición y distribución del hidrógeno, coste de personal y coste de operación y mantenimiento de las instalaciones. La diferencia entre ingresos y gastos constituyen el beneficio bruto. Tener en cuenta que en este caso no se tiene en cuenta la financiación por cuenta ajena. Ver siguiente tabla:

Tabla 95. Resumen cuenta resultados de la actividad económica de las hidrogeneras en cada uno de los años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS HIDROGENERAS AÑO DE REFERENCIA									
Año	2015			2030			2050		
Grado Penetración	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Ingresos (M€/año)	0,149	0,502	1,507	16,820	80,945	158,286	22,321	113,825	226,394
Gastos (M€/año)	0,65604	0,656	1,312	14,896	76,680	149,567	18,993	94,643	191,147
Beneficio bruto (M€/año)	-0,5066119	-0,154	0,194	1,924	4,265	8,719	3,328	19,182	35,247
Factor multiplicador gastos-ingresos	0,2277729	0,76546781	1,148	1,129	1,056	1,058	1,175	1,203	1,184

El hecho más destacado que se puede observar en esta tabla es que en los años 2030 y 2050 siempre se da un beneficio bruto igual o mayor a cero, es decir, los gastos nunca son mayores a los ingresos, por lo tanto, en función del tipo de financiación (porcentaje de financiación, tipo de interés del préstamo o periodo de amortización, entre otros factores) para la inversión inicial correspondiente a las instalaciones necesarias, el modelo de negocio sería viable, para los costes de producción ó adquisición y distribución del hidrógeno, coste de personal y coste de operación y mantenimiento de las instalaciones, y los precios de venta a los usuarios finales del hidrógeno previstos en el apartado 6.4.1 *Cuaderno de Hipótesis*, de la presente tesis. En cambio, en el año 2015, el beneficio bruto es negativo siempre que se den los escenarios de penetración baja o media, por lo tanto, el modelo de negocio en estos casos no sería viable. Con las condiciones preestablecidas, en el año 2015 el modelo de negocio sólo sería viable en caso que se diera un grado de penetración alta las tecnologías del hidrógeno.

Además, en la tabla se observa que dentro de los escenarios viables, con los condicionantes preestablecidos el menor margen de beneficios se obtiene para el año 2030, tanto para un grado de penetración alta como media.

En el caso de que se analice la inversión requerida para adquirir los vehículos e instalaciones previstas desde el presente, hasta los horizontes temporales establecidos: 2015, 2030 y 2050, es decir, la cantidad de vehículos y de instalaciones acumuladas hasta los años 2015, 2030 y 2050, en función de que el grado de penetración de las nuevas tecnologías del hidrógeno en el sector transporte sea bajo, medio o alto, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 96:

Tabla 96. Inversión a realizar durante los periodos de tiempo limitados por los diferentes años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte

INVERSIÓN ACUMULADO HASTA AÑO DE REFERENCIA									
Año	2015			2030			2050		
	Grado Penetración	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media
Vehículos (M€)	16,57	83,44	166,89	12906,11	64574,62	129149,49	34761,82	173809,08	347618,37
Hidrogeneras (M€)	1,59	2,39	3,18	132,03	703,95	1403,77	478,58	2382,62	4751,35
Inversión total (M€)	18,16	85,83	170,07	13038,13	65278,57	130553,26	35240,40	176191,70	352369,72
% vehículos respecto al total de inversión	91,23	97,22	98,13	98,99	98,92	98,92	98,64	98,65	98,65
% hidrogeneras respecto al total de inversión	8,77	2,78	1,87	1,01	1,08	1,08	1,36	1,35	1,35

Atendiendo a los datos referentes a la inversión total y a los porcentajes de inversión que suponen los vehículos e instalaciones de repostaje de hidrógeno frente al total, se extraen paralelamente al caso anterior las siguientes conclusiones:

- tomando como referencia el grado de penetración media para cada uno de los años sometidos a estudio, la inversión para el grado de penetración bajo será próximo a cinco veces menor, y para un grado de penetración alto será el doble. Estas relaciones coinciden con la relación establecidas para las previsiones en cuanto al número de vehículos para cada uno de los años.
- el mayor salto en cuanto a inversión se produce del año 2015 al 2030, al multiplicarse la inversión por un factor que oscila entre el 717 y el 767, en función de si el grado de penetración de estas nuevas tecnologías es bajo, ó medio o alto. Por el contrario, el salto de inversión del año 2030 a 2050 sólo se multiplica por un factor de 2,7. Ver gráfico siguiente:

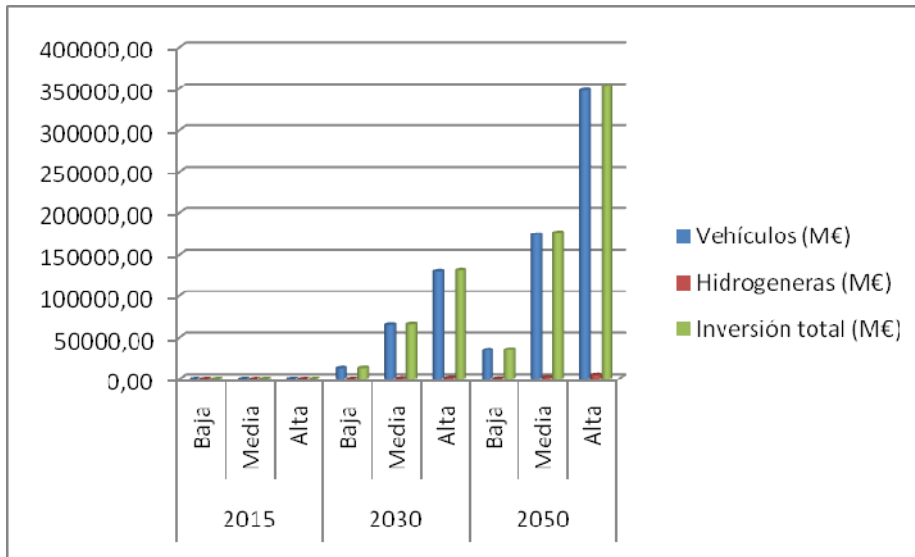


Figura 126. Inversión acumulada requerida para cubrir las previsiones en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones

- la inversión en infraestructuras prácticamente no supera en ninguno de los casos para los horizontes temporales 2030 y 2050 el 1,5% de la inversión total requerida. En el año 2015 este porcentaje de inversión aumenta a 8,8%, 2,8% y 1,9% respectivamente si se trata de grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno bajo, medio o alto.

Analizando la cuenta de resultados simplificada de la actividad económica del número total de hidrogeneras acumuladas en los diferentes horizontes temporales establecidos para cada uno de los grados de penetración de las tecnologías del hidrógeno definidos que se muestra a continuación:

Tabla 97. Resumen cuenta resultados de la actividad económica de las hidrogeneras durante los periodos de tiempo limitados por los diferentes años sometidos a estudio, en función del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS HIDROGENERAS ACUM. HASTA AÑO REFERENCIA									
Año	2015			2030			2050		
Grado Penetración	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta
Ingresos (M€/año)	0,598	3,013	6,026	267,731	1339,568	2679,148	687,177	3435,884	6871,779
Gastos (M€/año)	2,624	3,936	5,248	237,349	1267,907	2528,506	573,833	2857,259	5697,774
Beneficio bruto (M€/año)	-2,026	-0,923	0,778	30,381	71,661	150,642	113,344	578,626	1174,005
Factor multiplicador gastos-ingresos	0,228	0,76546781	1,148	1,128	1,057	1,060	1,198	1,203	1,206

Y teniendo en cuenta que no se han tenido en cuenta las magnitudes correspondientes a la financiación de la inversión inicial correspondiente a la adquisición de las instalaciones y vehículos previstos para cada horizonte temporal y grado de penetración, al igual que ocurre en el caso anterior en el que sólo se analizan los años sometidos a estudio, se aprecia que siempre se obtiene un beneficio bruto igual o mayor a cero en los años 2030 y 2050, mientras que en el año 2015 esto sólo ocurre para un grado de penetración alto (año 2015, grado de penetración bajo y medio, el beneficio bruto es menor a cero). Por lo tanto, excepto para los dos casos marcados en el año 2015, los gastos nunca son mayores a los ingresos, por lo que, en función del tipo de financiación (porcentaje de financiación, tipo de interés del préstamo o periodo de amortización, entre otros factores) para la inversión inicial correspondiente a las instalaciones necesarias, el modelo de negocio sería viable, para los costes de producción ó adquisición y distribución del hidrógeno, coste de personal y coste de operación y mantenimiento de las instalaciones, y los precios de venta a los usuarios finales del hidrógeno previstos en el apartado 6.4.1 *Cuaderno de Hipótesis*, de la presente tesis.

Además, en la tabla se observa que, al igual que en caso anterior, para los modelos *a priori* viables, el menor margen de beneficios se obtiene para el año 2030, tanto para un grado de penetración alta como media.

6.4.2.1. Estudio Económico: Grado de Penetración Bajo de las Tecnologías del Hidrógeno en el Sector Transporte

En este capítulo se realiza el estudio económico específico del escenario que, tras el análisis realizado, se considera va a ser el más probable para el caso de España: grado de penetración bajo de las tecnologías del hidrógeno en el sector automoción.

Este caso de penetración se ha seleccionado principalmente debido a la coyuntura económica en la que se encuentra sumida la economía del país. En las primeras etapas de implantación, será necesario que la administración sea, bien la promotora del lanzamiento de proyectos de demostración, sobre todo de flotas de transporte público, o bien por medio de lanzamiento de convocatorias que financien parte de la inversión requerida, que hemos supuesto alcancen hasta el 50% en la construcción de infraestructuras y adquisición de vehículos. Por lo tanto, como la economía del país no se encuentra en condiciones de realizar grandes dispendios debido a la crisis en la que nos encontramos sumidos, es muy posible que los primeros recortes se reflejen en una menor inversión en aquellos proyectos que no tengan una repercusión a corto plazo, y si a eso unimos el hecho de que la tecnología del hidrógeno es una tecnología cara, se puede prever que el nivel de penetración en el sector transporte será bajo.

Este análisis económico recoge las necesidades de inversión en infraestructuras y la flota de vehículos, y el análisis de la actividad principal de las instalaciones, que no es otra que la compra/producción y venta de hidrógeno a los usuarios finales. Otras actividades que pudieran derivarse de la explotación de este tipo de estaciones de repostaje, como son las tiendas o los lavacoches, no son tenidos en cuenta.

Para ello se aplica la herramienta creada, cuyo funcionamiento se explica en el *ANEXO 4 Herramienta de Valoración*, en cada uno de los tres horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050 para el entorno previsto correspondiente al grado de penetración bajo en el sector transporte de los vehículos con sistemas de propulsión de hidrógeno. En las Tabla 98, Tabla

99 y Tabla 100 se muestra la pantalla de introducción de datos y de resultados intermedios para estos casos.

Tabla 98. Introducción de datos y resultados intermedios obtenidos para el caso seleccionado. Año 2015

2015		
Grado de penetración	Baja	
Número vehículos propios	Valor máximo	
Turismos	134	134
Autobuses	2	2
Precio vehículos propios (M€)	5,744	
Demanda H2 Flota Propia (kg/año)	21030	
Demanda total acumulada 2015 (kg/año)	60375	
Número de hidrogeneras propias	Valor máximo	
Pequeñas	1	1
Medianas	0	0
Grandes	0	0
Precio hidrogeneras propias (M€)	0,398	
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	10,34%	
Capacidad de suministro hidrogeneras propias (kg/año)	146000	
Pequeñas	146000	
Medianas	365000	
Grandes	912500	
Coste de personal (M€/año)	0,084	
Coste producción + distribución hidrógeno (M€/año)	0,540	
Ingresos hidrógeno (M€/año)	0,149	

Tabla 99. Introducción de datos y resultados intermedios obtenidos para el caso seleccionado. Año 2030

2030		
Grado de penetración	Baja	
Número vehículos propios	Valor máximo	
Turismos	28054	28054
Autobuses	81	81
Precio vehículos propios (M€)	859,664	
Demanda H2 Flota Propia (kg/año)	3566955	
Demanda total acumulada 2015 (kg/año)	53546175	
Número de hidrogenas propias	Valor máximo	
Pequeñas	3	3
Medianas	1	1
Grandes	3	3
Precio hidrogenas propias (M€)	5,354	
Grado de uso de las hidrogenas (%)	95,01%	
Capacidad de suministro hidrogenas propias (kg/año)	3540500	
Pequeñas	146000	
Medianas	365000	
Grandes	912500	
Coste de personal (M€/año)	1,134	
Coste producción + distribución hidrógeno (M€/año)	13,100	
Ingresos hidrógeno (M€/año)	16,820	

Tabla 100. Introducción de datos y resultados intermedios obtenidos para el caso seleccionado. Año 2050

2050		
Grado de penetración	Baja	
Número vehículos propios	Valor máximo	
Turismos	40365	40365
Autobuses	117	117
Precio vehículos propios (M€)	1142,3295	
Demanda H2 Flota Propia (kg/año)	5133375	
Demanda total acumulada 2015 (kg/año)	156176550	
Número de hidrogenas propias	Valor máximo	
Pequeñas	5	5
Medianas	2	2
Grandes	4	4
Precio hidrogenas propias (M€)	15,595	
Grado de uso de las hidrogenas (%)	99,28%	
Capacidad de suministro hidrogenas propias (kg/año)	5110000	
Pequeñas	146000	
Medianas	365000	
Grandes	912500	
Coste de personal (M€/año)	1,680	
Coste producción + distribución hidrógeno (M€/año)	16,352	
Ingresos hidrógeno (M€/año)	22,321	

Tras aplicar la herramienta, obtenemos los datos de inversión reflejados en la Tabla 101 y la Tabla 102. Los datos de inversión obtenidos en estas tablas, tanto para vehículos como para hidrogenas, se han obtenido a partir de los costes previstos en los apartados anteriores, e incluyen los descuentos correspondientes a las subvenciones aplicadas: 6.000 € por cada turismo y 30.000 € por cada autobús adquirido hasta el año 2029, y el 50% de los costes en infraestructura hasta el 2030.

Tabla 101. Inversión a realizar en cada uno de los años sometidos a estudio

INVERSIÓN GRADO PENETRACIÓN BAJO				
	Año	2015	2030	2050
Vehículos [M€]		5,744	859,664	1142,330
Hidrogenas [M€]		0,398	5,354	15,595
Inversión total [M€]		6,142	865,018	1157,925
% vehículos respecto al total de inversión		93,520	99,381	98,653
% hidrogenas respecto al total de inversión		6,480	0,619	1,347

Como se observa en la tabla anterior y puede verse gráficamente en la Figura 127, la mayoría de la inversión debe ser realizada para la adquisición de los vehículos con tecnología de pila de combustible.

La inversión privada en infraestructuras, si se compara con la inversión total, entendiendo como tal la suma de inversión en vehículos más infraestructuras, representa un pequeño porcentaje, que sólo en el año 2015 sería algo mayor (6,5%). En los años 2030 y 2050 este porcentaje de inversión es del 0,6% y 1,3% respectivamente.

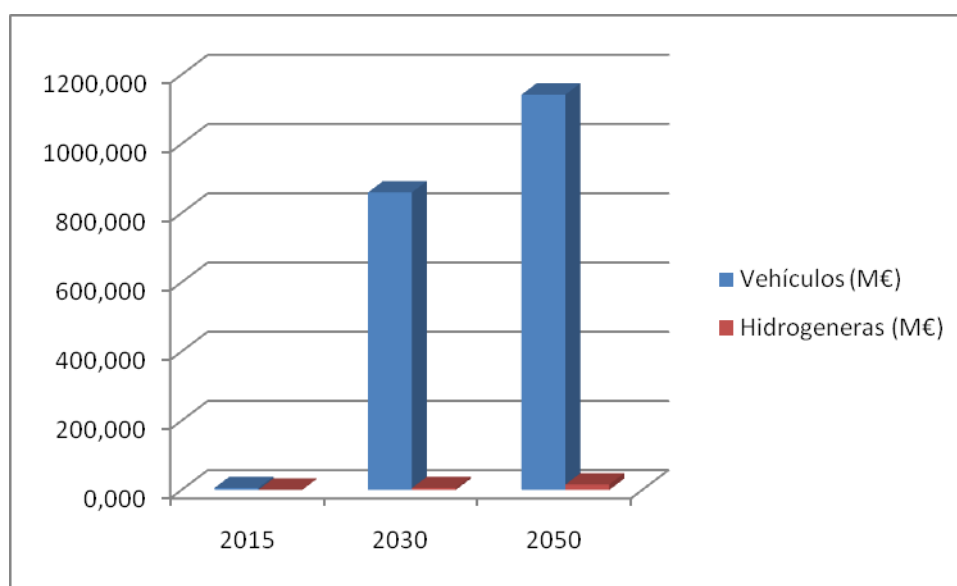


Figura 127. Inversión para grado de penetración bajo en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones

Cuando se analiza la inversión que es necesario acumular para alcanzar las previsiones en cada uno de los horizontes temporales establecidos, se observa una tendencia similar a la obtenida en el análisis concreto de los años 2015, 2030 y 2050:

Tabla 102. Inversión acumulada hasta cada uno de los años sometidos a estudio

INVERSIÓN ACUMULADA GRADO PENETRACIÓN BAJO				
	Hasta Año	2015	2030	2050
Vehículos [M€]		16,570	12906,106	34761,816
Hidrogeneras [M€]		1,592	85,581	305,827
Inversión total [M€]		18,162	12991,687	35067,643
% vehículos respecto al total de inversión		91,234	99,341	99,128
% hidrogeneras respecto al total de inversión		8,766	0,659	0,872

Como se puede observar, las mayores inversiones se deben destinar a la adquisición de vehículos. También se observa cómo proporcionalmente hasta el año 2015 será necesario invertir más en infraestructuras (8,75% de la inversión total), mientras que conforme pase el tiempo esta inversión prácticamente se podrá despreciar respecto al total (la inversión acumulada no alcanza el 1% ni en 2030 ni en 2050). Estos datos se pueden interpretar como

que en la primera etapa, ante la falta de infraestructuras, se tiende a generar una cierta red de hidrógeno que sirva de reclamo a las nuevas flotas de vehículos de pila de combustible.

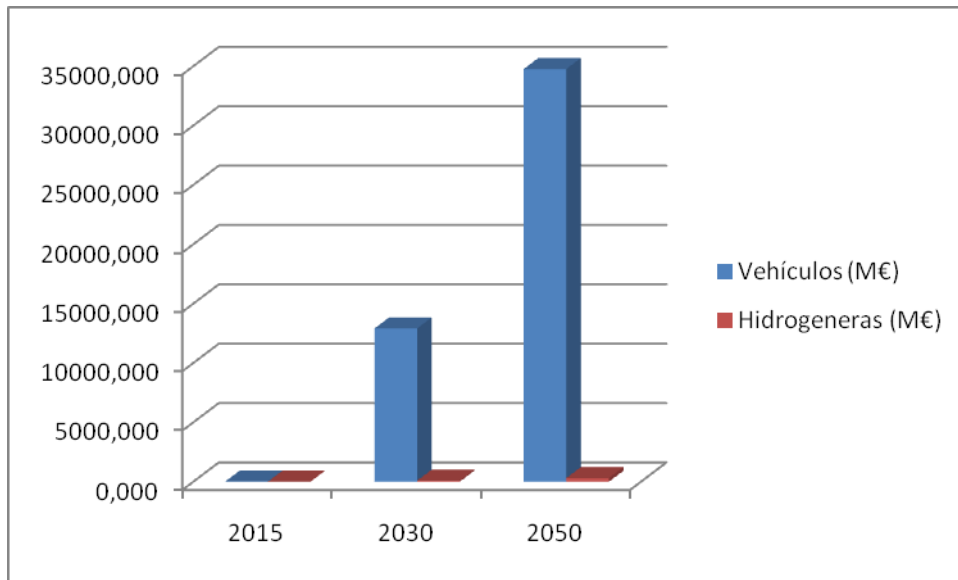


Figura 128. Inversión acumulada para grado de penetración bajo en cuanto a número de vehículos y número de instalaciones

La inversión necesaria para constituir las flotas de vehículos es muy elevada para dejarla en manos de entidades privadas, no obstante, tal y como se ha mencionado en el capítulo referente a las subvenciones para vehículos 6.4.1.4 *Subvenciones*, durante las primeras etapas de implantación (hasta 2030), las iniciativas privadas pueden verse compensadas con ayudas públicas de hasta el 50% del presupuesto de aquellos proyectos de demostración y prueba que favorezcan la implantación de estas nuevas tecnologías.

Si se analiza la actividad económica principal de las instalaciones de suministro de hidrógeno, que no es otra que la compra y venta de hidrógeno, y no se tienen en cuenta ingresos por el desempeño de otras actividades que podrán realizarse en la misma instalación, como una tienda o lavacoches o taller, los resultados obtenidos se reflejan en las siguientes tablas:

En la Tabla 103, se tiene en cuenta solamente la actividad desarrollada en un año por las instalaciones construidas ese mismo año. Como se puede observar, en el año 2015 no se

obtendrían beneficios ya que la suma de gastos es mayor a los ingresos generados por la venta de hidrógeno. En cambio, en los años 2030 y 2050 se obtendrían beneficios.

Tabla 103. Resumen de la cuenta de resultados de la actividad económica de las hidrogeneras en un escenario con una penetración baja de las tecnologías del hidrógeno

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS HIDROGENERAS GRADO DE PENETRACIÓN BAJO			
Año	2015	2030	2050
Ingresos venta hidrógeno [M€/año]	0,149	16,820	22,321
Gastos producción + distribución de hidrógeno [M€/año]	0,540	13,100	16,352
Gastos de mantenimiento instalación [M€/año]	0,016	0,214	0,624
Gastos de personal [M€/año]	0,084	1,134	1,680
Gasto total [M€/año]	0,640	14,448	18,656
Beneficio bruto [M€/año]	-0,491	2,372	3,665
Factor multiplicador gastos-ingresos	0,233	1,164	1,196

Se observa que conforme pasa el tiempo, los beneficios obtenidos son mayores. Esto viene indicado por la variable que se ha denominado *Factor Multiplicador gastos-ingresos*.

La mayor partida de gasto corresponde a la compra/producción del hidrógeno para su posterior suministro al usuario final. Por lo tanto, una hipotética reducción de este gasto contribuiría a una mayor viabilidad del sistema.

En la Tabla 104, se refleja una cuenta de resultados en la que se tienen en cuenta la actividad desarrollada por la totalidad de instalaciones existentes hasta cada uno de los horizontes temporales establecidos. Se tiene en cuenta la actividad del total de instalaciones durante el año en estudio.

Tabla 104. Resumen de la cuenta de resultados de la actividad económica acumulada de las hidrogeneras en un escenario con una penetración baja de las tecnologías del hidrógeno

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS ACUMULADA HIDROGENERAS GRADO DE PENETRACIÓN BAJO			
Hasta Año	2015	2030	2050
Ingresos venta hidrógeno [M€/año]	0,598	267,731	687,177
Gastos producción + distribución de hidrógeno [M€/año]	2,161	208,517	503,408
Gastos de mantenimiento instalación [M€/año]	0,064	3,423	12,233
Gastos de personal [M€/año]	0,336	18,270	51,282
Gasto total [M€/año]	2,560	230,210	566,923
Beneficio bruto [M€/año]	-1,963	37,520	120,254
Factor multiplicador gastos-ingresos	0,2334377	1,1629833	1,2121165

Se repiten las mismas tendencias que en el caso anterior, pero con mayores volúmenes económicos.

Para que el modelo económico del hidrógeno en su aplicación al sector transporte sea económicamente viable, el primer factor requerido es que existan beneficios de la actividad de las instalaciones. No obstante, estos deben ser suficientes para hacer frente a la inversión requerida en la construcción de las infraestructuras y la adquisición de las flotas de automóviles.

En este sentido, si comparamos, por ejemplo, la inversión total requerida en el año 2050, que asciende a 1157,925 millones de euros, y la comparamos con los beneficios brutos que se obtienen teniendo en cuenta todas las instalaciones existentes ese mismo año: 120,254 millones de euros, vemos que estos beneficios no son capaces de cubrir la inversión necesaria. Por lo tanto será necesario tomar medidas, ya sea a través del aumento de la financiación por parte de las administraciones, como la adopción de las ayudas del 50% para la adquisición de vehículos que se han comentado anteriormente, ya sea a través de fórmulas de negocio que permitan aumentar los beneficios.

6.4.3. Análisis de Sensibilidad del Modelo

Una vez que por un lado se han definido las variables de entrada que intervienen en la herramienta de análisis, y por otro se han adoptado las hipótesis de entrada, mediante las cuales se han obtenido unos valores iniciales para cada una de las variables, en este apartado se determinarán cuáles son las variables más críticas. Es decir, se detectarán aquellas variables que produzcan una mayor variación del resultado final del análisis al ver modificado su valor inicial.

Para obtener estos resultados se desarrollan análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad realizado se recoge en el *ANEXO 5. Análisis de Sensibilidad*.

A partir de este análisis de sensibilidad se ha obtenido para la inversión total a realizar y el beneficio bruto, las variables que intervienen y la variación porcentual que produce cada una de ellas en los valores de referencia. El resultado de este análisis se muestra en la Tabla 105 y la Tabla 106, en las que se recogen las variables que mayor influencia ejercen sobre los resultados perseguidos de inversión y beneficio bruto, se identifican porque presentan unos mayores valores porcentuales respecto a los resultados de referencia obtenidos a partir de las hipótesis de entrada. En las tablas aparecen resaltados en verde.

Se aprecia como las variables referidas a la adquisición de vehículos tienen un peso mucho mayor en la inversión total que las variables referidas a la adquisición de infraestructuras. Dentro del conjunto de vehículos, se observa que las variaciones experimentadas al verse modificadas las variables referidas a los autobuses son prácticamente despreciables frente a las variaciones experimentadas por los resultados de inversión cuando se modifican las variables que condicionan el entorno de los turismos. Para realizar el estudio de viabilidad, de entre las variables de mayor influencia se han seleccionado las siguientes:

- Variables de mayor influencia sobre la inversión total a realizar englobando la adquisición de vehículos e infraestructuras:

- Previsión número de turismos
 - Precio de adquisición de los turismos
 - Subvención directa a la adquisición de los turismos
 - Subvención directa para la construcción de hidrogeneras
- Variables de mayor influencia sobre el beneficio bruto obtenido resultado de la actividad de compra/producción – venta de hidrógeno:
- Precio base de venta del hidrógeno
 - Precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno
 - Previsión número de turismos
 - Impuestos a la venta de hidrógeno
 - Impuestos a la producción/compra de hidrógeno
 - Consumo medio de los turismos

Tabla 105. Grado de influencia de las variables que influyen en los resultados finales de inversión necesaria en vehículos e infraestructuras

INVERSIÓN		Inversión Vehículos 2015 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Vehículos 2030 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Vehículos 2050 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Infraestructuras 2015 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Infraestructuras 2030 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Infraestructuras 2050 (M€/año)	% respecto a base	Inversión total 2015 (M€/año)	% respecto a base	Inversión total 2030 (M€/año)	% respecto a base	Inversión total 2050 (M€/año)	% respecto a base
Resultados según hipótesis de entrada		5,744	859,664	1142,330	0,398	5,354	15,595	6,142	865,018	1157,925									
Variable modificada (+20%)																			
Subvención compra turismo (€/vehículo)		5,583	-2,80%	825,999	-3,92%	1093,892	-4,24%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	5,981	-2,62%	831,353	-3,89%	1109,487	-4,18%
Subvención compra autobús (€/vehículo)		5,732	-0,21%	859,178	-0,06%	1141,628	-0,06%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,130	-0,20%	864,532	-0,06%	1157,223	-0,06%
Previsión número turismos		6,628	15,39%	1027,582	19,53%	1482,624	29,79%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	7,026	14,39%	1032,936	19,41%	1498,219	29,39%
Previsión número autobuses		5,744	0,00%	863,782	0,48%	1149,575	0,63%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,142	0,00%	869,136	0,48%	1165,170	0,63%
Precio adquisición turismo (€/vehículo)		6,682	16,33%	1003,862	16,77%	1333,660	16,75%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	7,080	15,27%	1009,216	16,67%	1349,255	16,52%
Precio adquisición autobús (€/vehículo)		5,990	4,28%	863,714	0,47%	1147,010	0,41%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,388	4,01%	869,068	0,47%	1162,605	0,40%
Precio mantenimiento turismo (€/vehículo)		5,878	2,33%	883,229	2,74%	1174,622	2,83%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,276	2,18%	888,583	2,72%	1190,217	2,79%
Precio mantenimiento autobús (€/vehículo)		5,748	0,06%	859,784	0,01%	1142,493	0,01%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,146	0,06%	865,138	0,01%	1158,088	0,01%
Subvención construcción hidrogeneras (€/hidrogenera)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,318	-20,10%	4,283	-20,00%	14,036	-10,00%	6,062	-1,30%	863,947	-0,12%	1156,365	-0,13%
Previsión número de hidrogeneras pequeñas		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,354	0,00%	16,697	7,07%	6,142	0,00%	865,018	0,00%	1159,027	0,10%
Previsión número de hidrogeneras medianas		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,929	10,74%	16,745	7,37%	6,142	0,00%	865,593	0,07%	1159,075	0,10%
Previsión número de hidrogeneras grandes		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	6,672	24,61%	18,230	16,90%	6,142	0,00%	866,336	0,15%	1160,560	0,23%
Precio hidrogeneras pequeñas (€/instalación)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,459	15,33%	5,464	2,05%	15,960	2,34%	6,203	0,99%	865,128	0,01%	1158,290	0,03%
Precio hidrogeneras medianas (€/instalación)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,445	1,70%	15,959	2,33%	6,142	0,00%	865,109	0,01%	1158,289	0,03%
Precio hidrogeneras grandes (€/instalación)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	6,037	12,75%	17,415	11,67%	6,142	0,00%	865,701	0,08%	1159,745	0,16%
Superficie mínima hidrogeneras pequeñas (m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,417	4,67%	5,410	1,04%	15,781	1,19%	6,161	0,30%	865,074	0,01%	1158,111	0,02%
Superficie mínima hidrogeneras medianas (m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,378	0,45%	15,691	0,62%	6,142	0,00%	865,042	0,00%	1158,211	0,01%
Superficie mínima hidrogeneras grandes (m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,462	2,02%	15,883	1,85%	6,142	0,00%	865,126	0,01%	1158,213	0,02%
Precio medio suelo hidrogeneras pequeñas (€/m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,417	4,67%	5,410	1,04%	15,781	1,19%	6,161	0,30%	865,074	0,01%	1158,111	0,02%
Precio medio suelo hidrogeneras medianas (€/m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,378	0,45%	15,691	0,62%	6,142	0,00%	865,042	0,00%	1158,021	0,01%
Precio medio suelo hidrogeneras grandes (€/m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,462	2,02%	15,883	1,85%	6,142	0,00%	865,126	0,01%	1158,213	0,02%

Tabla 106. Grado de influencia de las variables que influyen en beneficio neto resultante de la actividad de compra/producción y venta del hidrógeno

	Total gastos 2015 (M€/año)	% respecto a base	Total gastos 2030 (M€/año)	% respecto a base	Total gastos 2050 (M€/año)	% respecto a base	Total ingresos 2015 (M€/año)	% respecto a base	Total ingresos 2030 (M€/año)	% respecto a base	Total ingresos 2050 (M€/año)	% respecto a base	Beneficio bruto 2015	% respecto a base	Beneficio bruto 2030	% respecto a base	Beneficio bruto 2050	% respecto a base
BENEFICIO BRUTO																		
Resultados según hipótesis de entrada	0,640	14,448	18,656	0,149	16,820	22,321	-0,491	2,372	3,665									
Variable modificada (+20%)																		
Previsión número de hidrogeneras pequeñas	0,640	0,00%	14,448	0,00%	19,802	6,15%	0,149	0,00%	16,395	-2,53%	22,958	2,85%	-0,491	0,00%	1,947	-17,91%	3,155	-13,92%
Previsión número de hidrogeneras medianas	0,640	0,00%	15,948	10,38%	19,996	7,18%	0,149	0,00%	16,332	-2,90%	23,320	4,48%	-0,491	0,00%	0,385	-83,77%	3,325	-9,30%
Previsión número de hidrogeneras grandes	0,640	0,00%	18,129	25,48%	21,993	17,57%	0,149	0,00%	17,246	2,55%	22,860	2,41%	-0,491	0,00%	-0,883	-137,24%	0,927	-74,77%
Capacidad repostaje hidrogeneras pequeñas (kg/día)	0,748	16,88%	14,772	2,24%	19,123	2,50%	0,149	0,00%	16,792	-0,16%	22,337	0,07%	-0,599	22,02%	2,020	-14,83%	3,214	-12,31%
Capacidad repostaje hidrogeneras medianas (kg/día)	0,640	0,00%	14,718	1,87%	19,123	2,50%	0,149	0,00%	16,754	-0,39%	22,428	0,48%	-0,491	0,00%	2,036	-14,15%	3,305	-9,83%
Capacidad repostaje hidrogeneras grandes (kg/día)	0,640	0,00%	16,474	14,02%	20,992	12,52%	0,149	0,00%	16,903	0,49%	22,212	-0,49%	-0,491	0,00%	0,429	-81,90%	1,220	-66,72%
Precio hidrogeneras pequeñas (€/instalación)	0,643	0,38%	14,452	0,03%	18,670	0,08%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,267	-0,18%	3,651	-0,40%
Precio hidrogeneras medianas (€/instalación)	0,640	-0,02%	14,452	0,03%	18,670	0,08%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,06%	2,368	-0,15%	3,651	-0,40%
Precio hidrogeneras grandes (€/instalación)	0,640	-0,02%	14,475	0,19%	18,729	0,39%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,06%	2,345	-1,15%	3,593	-1,99%
Superficie mínima hidrogeneras pequeñas (m2)	0,641	0,12%	14,450	0,02%	18,663	0,04%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,15%	2,370	-0,09%	3,658	-0,20%
Superficie mínima hidrogeneras medianas (m2)	0,640	0,00%	14,449	0,01%	18,667	0,02%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,00%	2,371	-0,04%	3,662	-0,10%
Superficie mínima hidrogeneras grandes (m2)	0,640	0,00%	14,452	0,03%	18,667	0,06%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,00%	2,368	-0,18%	3,654	-0,31%
Precio medio suelo hidrogeneras pequeñas (€/m2)	0,641	0,12%	14,450	0,02%	18,663	0,04%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,15%	2,370	-0,09%	3,658	-0,20%
Precio medio suelo hidrogeneras medianas (€/m2)	0,640	-0,02%	14,449	0,01%	18,660	0,02%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,06%	2,371	-0,04%	3,662	-0,10%
Precio medio suelo hidrogeneras grandes (€/m2)	0,640	0,00%	14,452	0,03%	18,667	0,06%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,00%	2,368	-0,18%	3,654	-0,31%
Subvención producción hidrógeno (€/kg)	0,626	-2,28%	14,236	-1,47%	18,349	-1,64%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,476	-2,98%	2,584	8,96%	3,972	8,36%
Número empleados mínimo hidrogeneras pequeñas	0,654	2,19%	14,490	0,29%	18,726	0,38%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,505	2,85%	2,330	-1,77%	3,595	-1,91%
Número empleados mínimo hidrogeneras medianas	0,640	0,00%	14,476	0,19%	18,712	0,30%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,00%	2,344	-1,18%	3,609	-1,53%
Número empleados mínimo hidrogeneras grandes	0,640	-0,02%	14,616	1,16%	18,880	1,20%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,00%	2,204	-7,08%	3,441	-6,11%
Suelo medio bruto operario instalaciones (€/año)	0,657	6,26%	14,675	1,57%	18,992	1,80%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,507	3,42%	2,145	-9,56%	3,329	-9,17%
Impuestos a la producción de hidrógeno (€/kg)	0,757	18,25%	17,280	19,60%	21,744	21,91%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,607	23,80%	-0,461	-119,42%	-0,423	-111,53%
Precio base producción + distribución (€/kg)	0,763	19,16%	17,280	19,60%	22,233	19,17%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,613	24,99%	-0,461	-119,42%	0,088	-97,59%
Variación precio gas natural (%)	0,640	0,02%	14,452	0,03%	18,660	0,02%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,03%	2,368	-0,16%	3,662	-0,10%
Variación precio energía eléctrica (%)	0,640	0,00%	14,456	0,05%	18,680	0,13%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	0,02%	2,364	-0,33%	3,641	-0,67%
Relación vs. total H2 producido mediante refor. GN (%)	0,640	-0,01%	14,459	-0,01%	18,684	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,491	-0,01%	2,361	0,03%	3,638	0,01%
Costes de mantenimiento y gestión (% inversión instalaciones)	0,643	0,50%	14,491	0,30%	18,781	0,67%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	-0,494	0,65%	2,329	-1,81%	3,541	-3,40%
Previsión número turismos	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,173	15,77%	19,995	18,88%	26,535	18,88%	-0,467	-4,84%	5,547	133,88%	7,879	114,96%
Previsión número autobuses	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,156	4,10%	17,009	1,12%	22,572	1,12%	-0,485	-1,25%	2,561	7,96%	3,916	6,83%
Impuestos a la venta de hidrógeno (€/kg)	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,137	-8,08%	14,129	-16,00%	18,263	-18,18%	-0,503	-2,46%	-0,319	-113,46%	-0,393	-110,72%
Precio base venta de hidrógeno (€/kg)	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,179	20,00%	20,184	20,00%	26,786	20,00%	-0,461	-6,09%	5,736	141,83%	8,130	121,79%
Distancia media recorrida por turismos (km/año)	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,173	15,90%	19,995	18,88%	26,535	18,88%	-0,467	-4,84%	5,547	133,88%	7,879	114,96%
Distancia media recorrida por autobuses (km/año)	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,156	4,10%	17,008	1,12%	22,572	1,12%	-0,485	-1,25%	2,560	7,95%	3,916	6,83%
Consumo medio turismos (kgH ₂ /100km)	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,173	15,90%	19,995	18,88%	26,535	18,88%	-0,467	-4,84%	5,547	133,88%	7,879	114,96%
Consumo medio autobuses (kgH ₂ /100km)	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,156	4,10%	17,008	1,12%	22,572	1,12%	-0,485	-1,25%	2,560	7,95%	3,916	6,83%

6.4.3.1. Variables de Mayor Influencia sobre la Inversión Total a Realizar

En el ANEXO 5. *Análisis de Sensibilidad*, se recoge el estudio de sensibilidad detallado de las variables cuya variación implica un mayor cambio en los resultados de la inversión total a realizar en vehículos e infraestructuras, para lograr la implantación de las tecnologías del hidrógeno en los términos planteados a lo largo de la tesis para los diferentes horizontes temporales establecidos: 2015, 2030 y 2050.

Para realizar el análisis de sensibilidad se han aplicado variaciones del +50%, +30%, +10%, -10%, -30% y -50% a cada una de las variables y en cada uno de los tres horizontes temporales para los tres escenarios de penetración de la tecnología de las pilas de combustible en el sector transporte. Como valores de referencia se han tomado los valores obtenidos a partir de las hipótesis de entrada que se han presentado en el punto 6.4.1 *Cuaderno de Hipótesis* de la tesis.

Para cada una de las variables se obtiene la evolución en la inversión total a realizar en los años 2015, 2030 y 2050 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta). La inversión se muestra tanto en millones de euros, como en variación en porcentaje respecto al valor de referencia.

Las principales observaciones destacables una vez terminado el análisis para cada variable son:

- Previsión número de turismos:
 - El desembolso total a realizar para la implantación del sistema de hidrógeno experimenta una evolución lineal positiva y proporcional a las variaciones planteadas en el *número de turismos de pila de combustible* previstos para cada horizonte temporal y grado de penetración planteados.

- En los horizontes temporales 2030 y 2050, independientemente de que el grado de penetración sea bajo, medio o alto, y debido a que las previsiones respecto al *número de vehículos* son más elevadas, la inversión total a realizar aumenta o disminuye respecto al valor de referencia en los mismos términos que lo hace la variable previsión *número de turistas*. Por ejemplo, si en el año 2030 aumentamos en un 50% el número de vehículos previstos, la inversión total también aumenta prácticamente un 50% (un 48,5% exactamente).
- Por el contrario, el comportamiento de la inversión total a realizar en el horizonte temporal 2015, aunque también evoluciona proporcionalmente con el aumento o disminución respecto al valor de referencia de la variable, no es tan extremo debido a que el número de de vehículos es menor, y por lo tanto la inversión en vehículos ejerce una influencia menor sobre el desembolso total a realizar. Un aumento del 50% de las *previsiones del número de turistas*, en este caso sólo supondrá un aumento del 38% del desembolso total a realizar.
- Las variaciones en el valor total de la inversión a realizar propiciadas por los aumentos o disminuciones del valor de referencia *del número de turistas* para cada horizonte temporal son independientes del grado de penetración de la tecnología planteado. Por ejemplo, una variación del -50% del *número previsto de turistas* en el año 2050, supone una reducción del 48,3% para los tres grados de penetración planteados (baja, media y alta). Este comportamiento sólo se ve alterado en el horizonte temporal 2015, en el que para un grado de penetración bajo las variaciones son algo inferiores (en términos absolutos) que las obtenidas para los grados de penetración medio y alto. Esto se debe a que en este caso en particular el número de vehículos previstos no alcanza la masa crítica necesaria y por lo tanto la inversión en vehículos ejerce una influencia menor sobre el desembolso total a realizar.

- Precio de adquisición de los turismos:
 - La inversión total a realizar en el proceso de implantación del sistema de hidrógeno evoluciona de forma proporcional a las variaciones del *precio de adquisición de los turismos de pila de combustible* planteados en cada horizonte temporal y para cada grado de penetración.
 - Independientemente que el grado de penetración sea bajo, medio o alto, la inversión a realizar sufre variaciones respecto al valor de referencia en torno al 41%, 25% y 8% para aumentos y disminuciones del *valor de adquisición de los turismos* del 50%, 30% y 10% en los tres escenarios temporales considerados. Sólo en el año 2015 el comportamiento se sale un poco de la regla general, ya que para un grado de penetración bajo, las variaciones son algo inferiores (en términos absolutos) que las obtenidas para los grados de penetración medio y alto. La razón de este comportamiento es que el número de vehículos previstos no es lo suficientemente elevado y por lo tanto la inversión en vehículos ejerce una influencia menor sobre el desembolso total a realizar.

- Subvención directa a la adquisición de los turismos:
 - A partir del año 2030 incluido, no se tienen datos para variaciones en negativo del valor inicial, ya que para estos horizontes temporales la *subvención prevista* era igual a 0, y por lo tanto no es posible que esta cantidad sea inferior.
 - La inversión total a realizar evoluciona de forma inversamente proporcional a las variaciones de las *subvenciones directas a la adquisición de los turismos* planteadas respecto al valor de referencia en cada horizonte temporal y para cada grado de penetración considerado. Las variaciones del desembolso a realizar son muy inferiores comparándolas con los desembolsos correspondientes que se han obtenido para las variables *número de turismos* y *precio de adquisición de los turismos*.
 - En los horizontes temporales 2030 y 2050, independientemente de que el grado de penetración sea bajo, medio o alto, y debido a que las previsiones

respecto al número de vehículos son más elevadas, la inversión total a realizar disminuye respecto al valor de referencia en unos porcentajes aproximados del 10%, 6% y 2% para aumentos del 50%, 30% y 10% respectivamente respecto al valor considerado de referencia para la *subvención directa a la compra de turismos*.

- El comportamiento de la inversión total a realizar en el horizonte temporal 2015, aunque también evoluciona de forma inversamente proporcional con el aumento o disminución respecto al valor de referencia de la variable, los porcentajes no son tan elevados debido a que el número de de vehículos es menor y por lo tanto la inversión en vehículos ejerce una influencia menor sobre el desembolso total a realizar. Aumentos y disminuciones del 50%, 30% y 10% respecto al valor de referencia de la variable, producirán respectivamente variaciones en valor absoluto del 9%, 4% y 1,5% del desembolso total a realizar.
- Las variaciones del valor total de la inversión a realizar, propiciadas por los aumentos o disminuciones de la *subvención directa a la adquisición de los turismos* tomada como referencia para cada horizonte temporal, son independientes del grado de penetración de la tecnología planteado. Por ejemplo, una variación del 50% en la subvención prevista para el año 2030, supone una reducción del 9,7% para los tres grados de penetración planteados (baja, media y alta). Este comportamiento sólo se ve alterado en el horizonte temporal 2015, en el que para un grado de penetración bajo las variaciones son algo inferiores (en términos absolutos) que las obtenidas para los grados de penetración medio y alto. Esto se debe a que en este caso particular el número de de vehículos es previstos es pequeño y por lo tanto la inversión en vehículos ejerce una influencia menor sobre la inversión total a realizar.

- Subvención directa para la construcción de hidrogeneras:
 - Para el horizonte temporal 2050, no se tienen datos para variaciones en negativo del valor inicial, ya que para este horizonte la subvención prevista es igual a 0, y por lo tanto no es posible disminuir este valor.
 - La inversión total a realizar evoluciona de forma inversamente proporcional a las variaciones respecto al valor de referencia de las *subvenciones directas para la construcción de hidrogeneras* supuestas para cada horizonte temporal y para cada grado de penetración considerado. Las variaciones del desembolso a realizar son muy inferiores comparándolas con los desembolsos correspondientes a las variables relativas a los turismos.
 - De forma contraria a lo que sucede en las tres variables estudiadas anteriormente, es en los casos en los que el número de vehículos previstos es menor, y por lo tanto la influencia del coste de las infraestructuras tendrá un mayor peso sobre la inversión total a realizar, en los que las variaciones del desembolso total a realizar alcanzan unos valores (en términos absolutos) mayores: 3%, 2% y menos del 1% para variaciones del 50%, 30% y 10% respectivamente en el horizonte temporal 2015. En los horizontes temporales 2030 y 2050, estas variaciones de la inversión, aunque también experimentan una evolución inversamente proporcional a las variaciones planteadas respecto al valor de referencia del valor de la *subvención directa para la construcción de hidrogeneras* (50%, 30% y 10%), en ningún caso superan el 1%, se quedan respectivamente en valores del 0,3%, 0,2% y 0,06% aproximadamente.
 - Las variaciones del valor total de la inversión a realizar, propiciadas por los aumentos o disminuciones de la *subvención directa para la construcción e hidrogeneras* tomada como referencia para cada horizonte temporal, son independientes del grado de penetración de la tecnología planteado. Por ejemplo, una variación del 50% en la *subvención prevista* para el año 2050, supone una reducción de la inversión del 0,34% para los tres grados de penetración planteados (bajo, medio y alto). Este comportamiento sólo se ve alterado en el horizonte temporal 2015, en el que los resultados son diferentes en función del grado de penetración contemplado, siendo mayores

las variaciones cuanto más bajo el grado de penetración. Como ya se ha comentado anteriormente, esto se debe a que en este caso particular el número de de vehículos es previstos es pequeño y por lo tanto la inversión en infraestructuras ejerce una influencia mayor sobre la inversión total a realizar.

- Comparativa de variables

Se ha realizado una comparativa del efecto que produce cada una de estas variables estudiadas sobre los datos iniciales de referencia obtenidos a partir de las hipótesis de entrada.

Se compara en cada horizonte temporal y para cada grado de penetración por separado, la variación en porcentaje, que experimenta la inversión total en vehículos e instalaciones que se requiere para incorporar las tecnologías de la pila de combustible de hidrógeno al sector transporte y que se ha obtenido a partir de los datos de entrada iniciales (Base).

A continuación se muestran las tablas y gráficos correspondientes a cada uno de los casos estudiados. Estos gráficos permiten determinar gráficamente qué efecto causan sobre el valor base de la inversión total en cada grado de penetración diferente en cada uno de los tres años en los que se han fijado los escenarios temporales, los aumentos y disminuciones del valor de las variables, y cuáles de las estudiadas son las más influyentes.

Tabla 107. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO

Inversión total (Variación respecto a base)	2015 -BAJA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	36,54%	22,14%	7,20%	0,00%	-8,01%	-22,14%	-37,09%
Precio de Turismos	38,18%	22,91%	7,64%	0,00%	-8,21%	-22,91%	-38,18%
Subvención Adquisición de Turismos	-6,55%	-3,93%	-1,31%	0,00%	1,41%	3,93%	6,55%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-3,24%	-1,94%	-0,65%	0,00%	0,14%	1,94%	3,24%

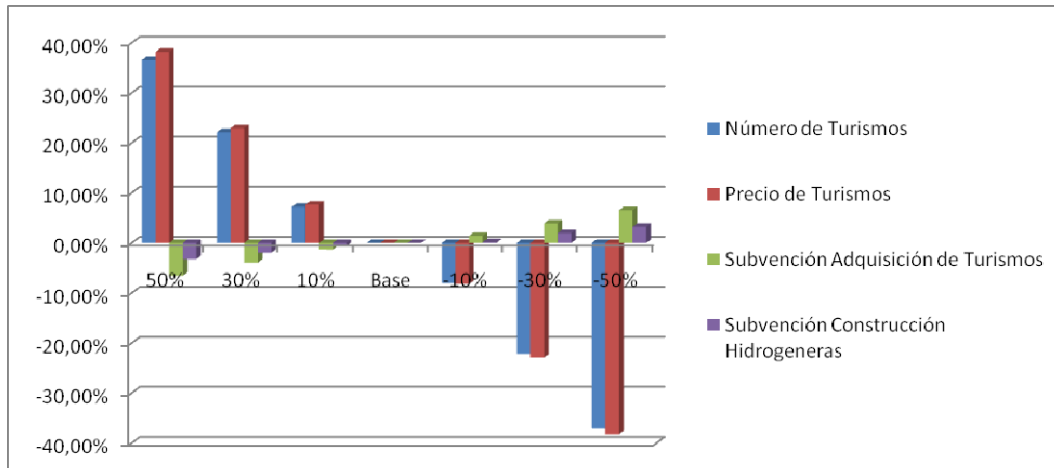


Figura 129. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO

Tabla 108. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO

Inversión total (Variación respecto a base)	2015 -MEDIA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	39,84%	23,93%	8,01%	0,00%	-8,01%	-23,93%	-39,84%
Precio de Turismos	41,07%	24,64%	8,21%	0,00%	-8,21%	-24,64%	-41,07%
Subvención Adquisición de Turismos	-7,04%	-4,22%	-1,41%	0,00%	1,41%	4,22%	7,04%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,70%	-0,42%	-0,14%	0,00%	0,14%	0,42%	0,70%

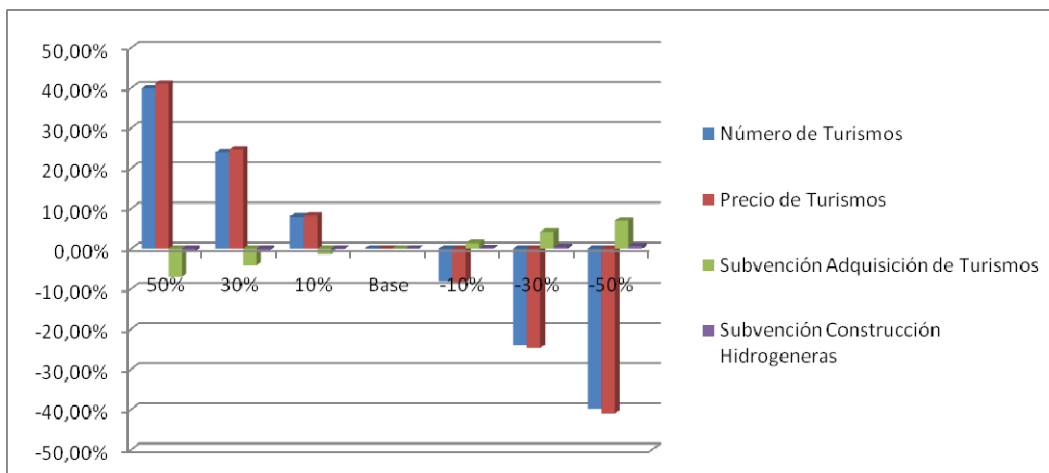


Figura 130. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO

Tabla 109. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO

Inversión total (Variación respecto a base)	2015 -ALTA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	39,84%	23,93%	7,96%	0,00%	-8,01%	-23,93%	-39,90%
Precio de Turismos	41,07%	24,64%	8,21%	0,00%	-8,21%	-24,64%	-41,07%
Subvención Adquisición de Turismos	-7,04%	-4,22%	-1,41%	0,00%	1,41%	4,22%	7,04%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,70%	-0,42%	-0,14%	0,00%	0,14%	0,42%	0,70%

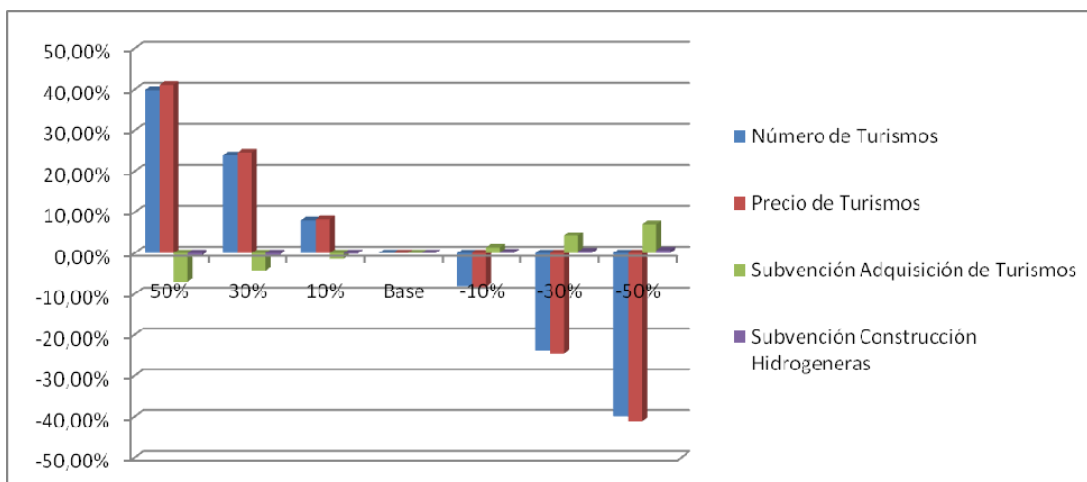


Figura 131. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO

Tabla 110. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO

Inversión total (Variación respecto a base)	2030 -BAJA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	48,48%	29,09%	9,70%	0,00%	-9,70%	-29,09%	-48,49%
Precio de Turismos	41,67%	25,00%	8,33%	0,00%	-8,33%	-25,00%	-41,67%
Subvención Adquisición de Turismos	-9,73%	-5,84%	-1,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,31%	-0,19%	-0,06%	0,00%	0,06%	0,19%	0,31%

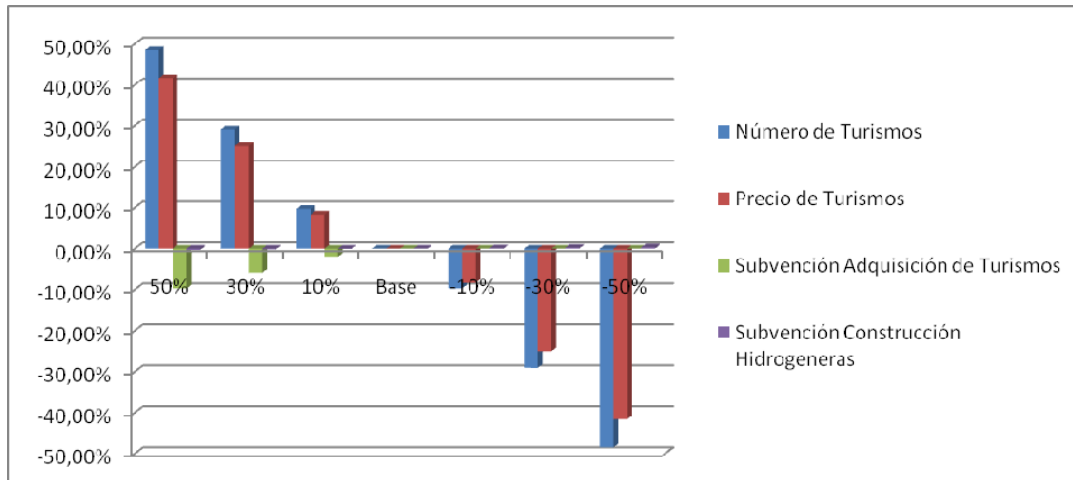


Figura 132. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO

Tabla 111. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO

Inversión total (Variación respecto a base)	2030 - MEDIA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	48,48%	29,09%	9,70%	0,00%	-9,70%	-29,09%	-48,48%
Precio de Turismos	41,67%	25,00%	8,33%	0,00%	-8,33%	-25,00%	-41,67%
Subvención Adquisición de Turismos	-9,73%	-5,84%	-1,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,32%	-0,19%	-0,06%	0,00%	0,06%	0,19%	0,32%

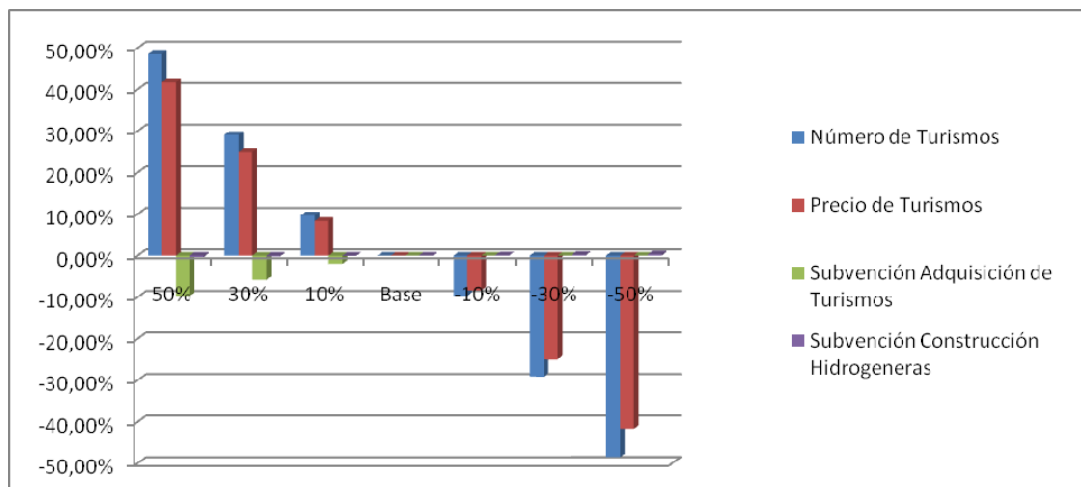


Figura 133. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO

Tabla 112. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO

Inversión total (Variación respecto a base)	2030 -ALTA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	48,49%	29,09%	9,70%	0,00%	-9,70%	-29,09%	-48,49%
Precio de Turismos	41,68%	25,01%	8,34%	0,00%	-8,34%	-25,01%	-41,68%
Subvención Adquisición de Turismos	-9,73%	-5,84%	-1,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,31%	-0,19%	-0,06%	0,00%	0,06%	0,19%	0,31%

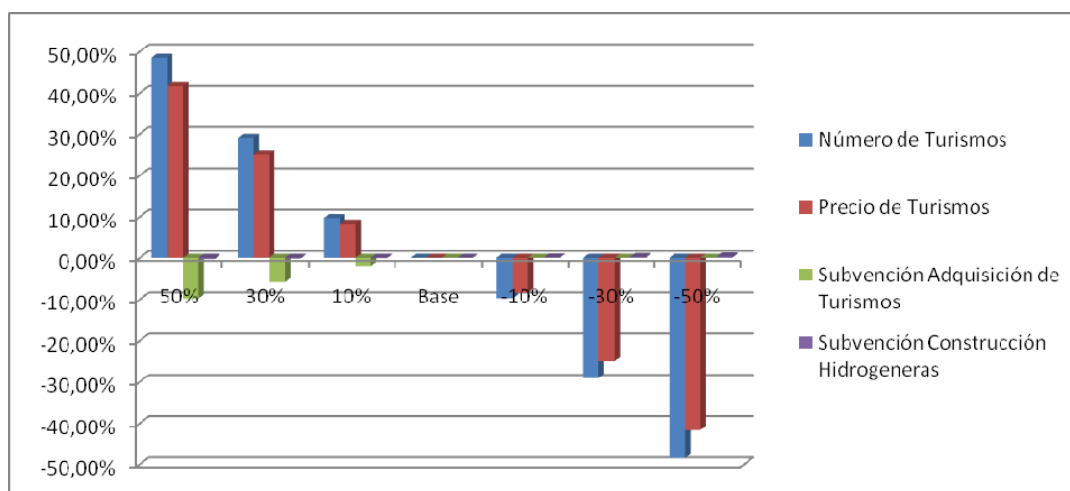


Figura 134. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO

Tabla 113. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO

Inversión total (Variación respecto a base)	2050 -BAJA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	48,28%	28,97%	9,66%	0,00%	-9,66%	-28,97%	-48,28%
Precio de Turismos	41,31%	24,79%	8,26%	0,00%	-8,26%	-24,79%	-41,31%
Subvención Adquisición de Turismos	-10,46%	-6,27%	-2,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,34%	-0,20%	-0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

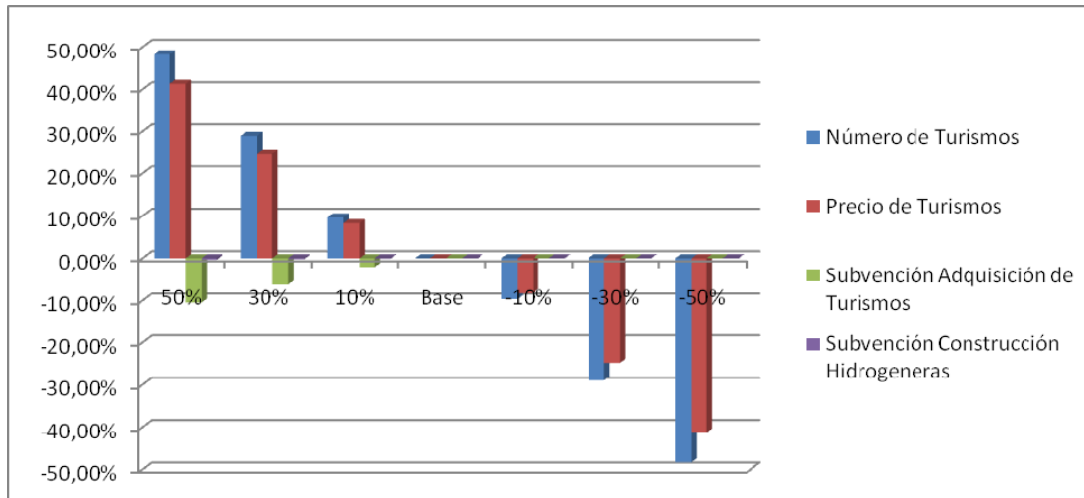


Figura 135. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO

Tabla 114. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO

Inversión total (Variación respecto a base)	2050 -MEDIA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	48,28%	28,97%	9,66%	0,00%	-9,66%	-28,97%	-48,28%
Precio de Turismos	41,31%	24,78%	8,26%	0,00%	-8,26%	-24,78%	-41,31%
Subvención Adquisición de Turismos	-10,46%	-6,27%	-2,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,34%	-0,20%	-0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

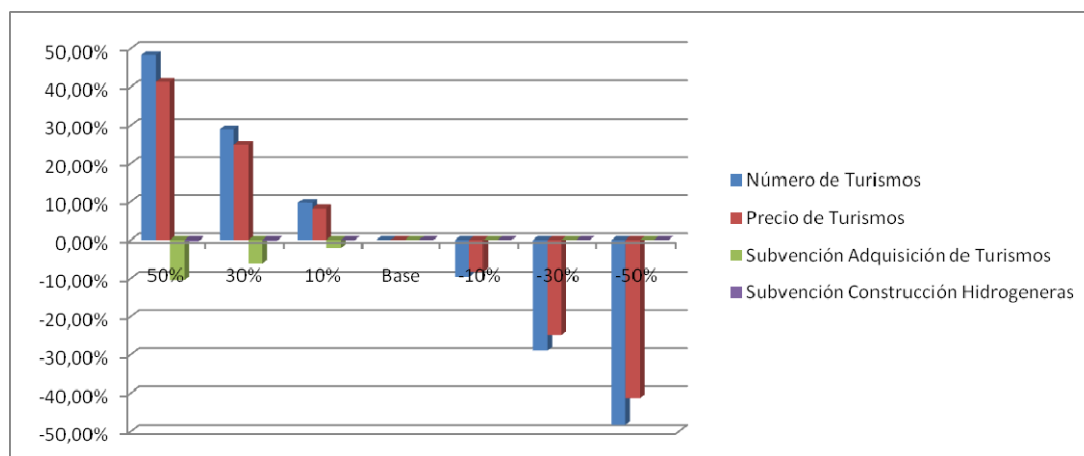


Figura 136. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO

Tabla 115. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO

Inversión total (Variación respecto a base)	2050 -ALTA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Número de Turismos	48,28%	28,97%	9,66%	0,00%	-9,66%	-28,97%	-48,28%
Precio de Turismos	41,31%	24,79%	8,26%	0,00%	-8,26%	-24,79%	-41,31%
Subvención Adquisición de Turismos	-10,46%	-6,28%	-2,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Subvención Construcción Hidrogeneras	-0,34%	-0,20%	-0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

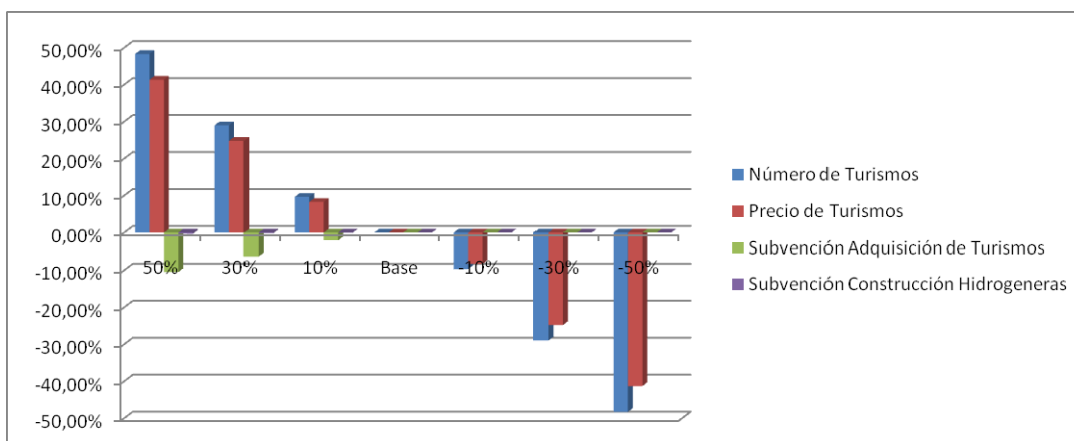


Figura 137. Comparativa del efecto que producen en la inversión total BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO

De estas gráficas podemos extraer las siguientes conclusiones:

- A la hora de determinar la inversión total a realizar en la implantación del un sistema de hidrógeno, las variables número de turismos y precio de turismos, en azul y rojo respectivamente en las gráficas, son las más influyentes.
- De forma contraria, la única de las variables estudiadas que tiene como protagonista a las hidrogeneras: subvención directa para la construcción de hidrogeneras, en morado, prácticamente no produce ninguna variación respecto al valor base de la inversión. En el único caso en el que la inversión se ve modificada de forma considerable, si se compara con el resto de variables estudiadas, es en el horizonte temporal 2015 para un grado de penetración bajo. Este caso es en el que el número previsto de vehículos es más pequeño, y por lo tanto la inversión en infraestructuras es capaz de ejercer una influencia mayor sobre la inversión total a realizar.

- La inversión total a realizar evoluciona de forma directamente proporcional con las variables número de turismos y precio de los turismos, mientras que con las variables subvención adquisición de turismos y subvención construcción hidrogeneras, evoluciona de forma inversamente proporcional. Por lo tanto tendrán efecto contrario sobre la inversión total a realizar.

6.4.3.2. Variables de Mayor Influencia sobre el Beneficio Bruto

En el ANEXO 5. *Análisis de Sensibilidad*, también se recoge el estudio de sensibilidad detallado de las variables cuya variación implica un mayor cambio en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en los términos planteados a lo largo de la tesis para los diferentes horizontes temporales establecidos: 2015, 2030 y 2050.

Al igual que en el caso anterior, para realizar el análisis de sensibilidad se han aplicado variaciones del +50%, +30%, +10%, -10%, -30% y -50% a cada una de las variables y en cada uno de los tres horizontes temporales para los tres escenarios de penetración de la tecnología de las pilas de combustible en el sector transporte. Como valores de referencia se han tomado los valores obtenidos a partir de las hipótesis de entrada que se han presentado en el punto 6.4.1 *Cuaderno de Hipótesis*.

Para cada una de las variables se obtiene la evolución del beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en los años 2015, 2030 y 2050 en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta). El beneficio bruto se muestra tanto en millones de euros, como en variación en porcentaje respecto al valor de referencia.

Las principales observaciones a destacar una vez terminado el análisis para cada variable son:

- Precio base de venta del hidrógeno:
 - El beneficio bruto a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras evoluciona proporcionalmente con las variaciones realizadas al valor de referencia propuesto para la variable *precio de venta del hidrógeno*.
 - En el año 2015, prácticamente sólo para el caso de grado de penetración alto se consiguen obtener beneficios. Aún en este caso, cuando se realizan variaciones del -30% y -50% respecto al valor de referencia de la variable *precio base de venta del hidrógeno*, debido al poco margen de beneficios que existe en este horizonte temporal, se pasa a obtener beneficios negativos. En los años 2030 y 2050, se obtendrán siempre beneficios independientemente del grado de penetración, excepto para variaciones respecto al valor base de la variable de -30% y -50%.
 - En los tres horizontes temporales estudiados, en términos de valor absoluto, las variaciones porcentuales del beneficio respecto al valor de referencia toman valores simétricos para las variaciones de la variable precio base de venta del hidrógeno $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ y $\pm 50\%$. O lo que es lo mismo, las gráficas obtenidas para los tres horizontes temporales son simétricas respecto al valor de referencia (que toma el valor de cero en este caso).
 - Los valores de variación del beneficio bruto a obtener respecto al valor de referencia más elevados se obtienen para un grado de penetración alta en el año 2015, mientras que en los años 2030 y 2050 los mayores porcentaje de variación se obtienen para un grado de penetración baja. A destacar también que en el horizonte temporal 2015 las variaciones del beneficio respecto al valor de referencia son muy diferentes en función de si se trata de un grado de penetración alto, medio o bajo, mientras que conforme el horizonte temporal se aleja en el tiempo, estas variaciones de porcentaje se hacen más constantes para los tres grados de penetración. Por ejemplo, en el horizonte temporal 2015, si aumentamos en un 30% el valor de la variable *precio base de venta del hidrógeno*, se obtendrán porcentajes de variación del beneficio bruto del 9%, 109% y 200% respectivamente para los grados de penetración bajo, medio y alto. Por el contrario, si esta misma variación del valor de la variable lo aplicamos en los años 2030 y 2050 respectivamente

obtendremos los siguientes porcentajes: 213%, 173% y 167% por un lado y 183%, 178% y 176% por el otro.

- Precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno:
 - El beneficio bruto a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras evoluciona de forma inversamente proporcional con las variaciones realizadas al valor de referencia propuesto para la variable *precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno* en los horizontes temporales y para los grados de penetración propuestos.
 - En el año 2015, al igual que ocurre con la variable *precio de venta del hidrógeno*, prácticamente sólo para el caso de grado de penetración alto se consiguen obtener beneficios. Aún en este caso, cuando se realizan variaciones del 30% y del 50% respecto al valor de referencia de la variable, debido al poco margen de beneficios que existe en este horizonte temporal, se pasa a obtener beneficios negativos. En los años 2030 y 2050, se obtendrán siempre beneficios independientemente del grado de penetración, excepto para aumentos del 30% y el 50% del valor de referencia de la variable.
 - Al igual que en la variable *precio de venta del hidrógeno*, en los tres horizontes temporales estudiados, en términos de valor absoluto, las variaciones porcentuales del beneficio respecto al valor de referencia toman valores simétricos para las variaciones de la variable precio base de venta del hidrógeno $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ y $\pm 50\%$. O lo que es lo mismo, las gráficas obtenidas para los tres horizontes temporales son simétricas respecto al valor de referencia (que toma el valor de cero en este caso).
 - En el horizonte temporal 2015, los porcentajes más elevados de variación del beneficio bruto a obtener respecto al valor de referencia se obtienen para un grado de penetración alta, mientras que en los horizontes temporales 2030 y 2050 los mayores porcentajes de variación se obtienen para un grado de penetración baja. Destaca también que en el horizonte temporal 2015 las variaciones del beneficio respecto al valor de referencia son muy diferentes

en función de si se trata de un grado de penetración alto, medio o bajo, mientras que conforme el horizonte temporal se aleja en el tiempo, estas variaciones de porcentaje se hacen más constantes para los tres grados de penetración. Por ejemplo, en el horizonte temporal 2015, si aumentamos en un 30% el valor de la variable *precio de venta del hidrógeno*, se obtendrán porcentajes de variación del beneficio bruto del -37%, -133% y -163% respectivamente para los grados de penetración bajo, medio y alto. Por el contrario, si esta misma variación del valor de la variable lo aplicamos en los años 2030 y 2050 respectivamente obtendremos los siguientes porcentajes: -179%, -141% y -134% por un lado y -146%, -142% y -140% por el otro.

- Previsión número de turistas: El comportamiento de esta variable es similar al que experimenta la variable precio de venta del hidrógeno, por lo tanto, de forma similar al caso anterior:
 - El beneficio bruto a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras evoluciona proporcionalmente con las variaciones realizadas al valor de referencia propuesto para la variable *previsión número de turistas*.
 - En el año 2015, prácticamente sólo para el caso de grado de penetración alto se consiguen obtener beneficios. Aún en este caso, cuando se realizan variaciones del -30% y -50% respecto al valor de referencia de la variable *previsión número de turistas*, debido al poco margen de beneficios que existe en este horizonte temporal, dejan de producirse beneficios, convirtiéndose en un sistema deficitario. En los años 2030 y 2050, se obtendrán siempre beneficios independientemente del grado de penetración, excepto para variaciones respecto al valor base de la *previsión del número de turistas* de -30% y -50%.
 - En los tres horizontes temporales estudiados, en términos de valor absoluto, las variaciones porcentuales del beneficio respecto al valor de referencia toman valores simétricos para las variaciones de la variable precio base de venta del hidrógeno $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ y $\pm 50\%$. O lo que es lo mismo, las gráficas

obtenidas para los tres horizontes temporales son simétricas respecto al valor de referencia (que toma el valor de cero en este caso).

- Los valores más elevados de la variación del beneficio bruto respecto al valor de referencia se obtienen en el año 2015 para un grado de penetración alta, mientras que en los años 2030 y 2050 los mayores porcentajes de variación se obtienen para un grado de penetración baja. A destacar también que en el horizonte temporal 2015 las variaciones del beneficio respecto al valor de referencia son muy diferentes en función de si se trata de un grado de penetración alto, medio o bajo, mientras que conforme el horizonte temporal se aleja en el tiempo, estas variaciones de porcentaje se hacen más constantes para los tres grados de penetración. Por ejemplo, en el horizonte temporal 2015, si aumentamos en un 30% el valor de la variable *previsión número de turismos*, se obtendrán porcentajes de variación del beneficio bruto del 7%, 86% y 157% respectivamente para los grados de penetración bajo, medio y alto. Por el contrario, si esta misma variación del valor de la variable lo aplicamos en los años 2030 y 2050 respectivamente obtendremos los siguientes porcentajes: 201%, 164% y 158% por un lado y 172%, 168% y 166% por el otro.

- Impuestos a la venta de hidrógeno:

- Según las hipótesis de entrada, esta variable tiene un valor igual a cero, por lo que no es posible determinar el efecto que produce la disminución de esta variable respecto a al valor de referencia.
- El beneficio bruto a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras evoluciona de forma inversamente proporcional al aumento del valor de referencia propuesto para la variable *impuestos a la venta de hidrógeno* en los horizontes temporales y para los grados de penetración propuestos.
- En el año 2015, sólo para el caso de grado de penetración alto se consiguen obtener beneficios. Aún en este caso, cuando se realizan variaciones del 50% respecto al valor de referencia de la variable, debido al poco margen de

beneficios que existe en este horizonte temporal, se dejan de obtener beneficios, pasando el sistema a ser deficitario. En los años 2030 y 2050, se obtienen beneficios independientemente del grado de penetración para el caso de referencia y para el caso en el que se aumenta en un 10% el valor del *impuesto*; para aumentos del 30% y el 50% del valor de referencia de la variable, el sistema pasa a ser deficitario independientemente del grado de penetración contemplado.

- En el horizonte temporal 2015, los porcentajes más elevados de variación del beneficio bruto a obtener respecto al valor de referencia se obtienen para un grado de penetración alta, mientras que en los horizontes temporales 2030 y 2050 los mayores porcentaje de variación se obtienen para un grado de penetración baja. A destacar también que en el horizonte temporal 2015 las variaciones del beneficio respecto al valor de referencia son muy diferentes en función de si se trata de un grado de penetración alto, medio o bajo, mientras que conforme el horizonte temporal se aleja en el tiempo, estas variaciones de porcentaje se hacen más constantes para los tres grados de penetración. Por ejemplo, en el horizonte temporal 2015, si aumentamos en un 30% el valor de la variable *impuestos a la venta de hidrógeno*, se obtendrán porcentajes de variación del beneficio bruto del -4%, -44% y -81% respectivamente para los grados de penetración bajo, medio y alto. Por el contrario, si esta misma variación del valor de la variable lo aplicamos en los años 2030 y 2050 respectivamente obtendremos los siguientes porcentajes: -170%, -139% y -132% por un lado y -166%, -162% y -160% por el otro.
- Impuestos a la producción/compra de hidrógeno. El comportamiento de esta variable es similar al experimentado por la variable impuestos a la venta de hidrógeno, así se obtiene:
 - Según las hipótesis de entrada, esta variable tiene un valor igual a cero, por lo que no es posible determinar el efecto que produce la disminución de esta variable respecto al valor de referencia considerado para cada horizonte temporal y grado de penetración contemplado.

- El beneficio bruto a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras evoluciona de forma inversamente proporcional al aumento del valor de referencia propuesto para la variable *impuestos a la producción/compra de hidrógeno* en los horizontes temporales y para los grados de penetración propuestos.
- En el año 2015, sólo para el caso de grado de penetración alto se consiguen obtener beneficios. Aún en este caso, cuando se realizan variaciones del 50% y el 30% respecto al valor de referencia de la variable, debido al poco margen de beneficios que existe en este horizonte temporal, se dejan de obtener beneficios, pasando el sistema a ser deficitario. En los años 2030 y 2050, se obtienen beneficios independientemente del grado de penetración para el caso de referencia y para el caso en el que se aumenta en un 10% el valor del *impuesto*; para aumentos del 30% y el 50% del valor de referencia de la variable, el sistema pasa a ser deficitario independientemente del grado de penetración que se considere.
- En el horizonte temporal 2015, los porcentajes más elevados de variación del beneficio bruto a obtener respecto al valor de referencia se obtienen para un grado de penetración alta, mientras que en los horizontes temporales 2030 y 2050 los mayores porcentaje de variación se obtienen para un grado de penetración baja. A destacar también que en el horizonte temporal 2015 las variaciones del beneficio respecto al valor de referencia son muy diferentes en función de si se trata de un grado de penetración alto, medio o bajo, mientras que conforme el horizonte temporal se aleja en el tiempo, estas variaciones de porcentaje se hacen más constantes para los tres grados de penetración. Por ejemplo, en el horizonte temporal 2015, si aumentamos en un 30% el valor de la variable *impuestos a la producción/compra de hidrógeno*, se obtendrán porcentajes de variación del beneficio bruto del -36%, -127% y -155% respectivamente para los grados de penetración bajo, medio y alto. Por el contrario, si esta misma variación del valor de la variable lo aplicamos en los años 2030 y 2050 respectivamente obtendremos los siguientes porcentajes: -179%, -142% y -134% por un lado y -167%, -162% y -160% por el otro.

- Consumo medio de los turismos: El comportamiento de esta variable es similar al que experimentan las variables precio de venta del hidrógeno y previsión número de turismos, además, esta variable experimenta el mismo comportamiento que la variable Distancia media recorrida por turismos, dando resultados paralelos. Por lo tanto, de forma similar a los casos anteriores:
 - El beneficio bruto a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras evoluciona proporcionalmente con las variaciones realizadas al valor de referencia propuesto para la variable *consumo medio de los turismos* en los horizontes temporales y para los grados de penetración propuestos.
 - En el año 2015, prácticamente sólo para el caso de grado de penetración alto se consiguen obtener beneficios. Aún en este caso, cuando se realizan variaciones del -30% y -50% respecto al valor de referencia de la variable *en estudio*, debido al poco margen de beneficios que existe en este horizonte temporal, dejan de producirse beneficios, convirtiéndose en un sistema deficitario. En los años 2030 y 2050, se obtendrán siempre beneficios independientemente del grado de penetración, excepto para variaciones respecto al valor base del *consumo medio de los turismos*. de -30% y -50%.
 - En los tres horizontes temporales estudiados, en términos de valor absoluto, las variaciones porcentuales del beneficio respecto al valor de referencia toman valores simétricos para las variaciones de la variable precio base de venta del hidrógeno $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ y $\pm 50\%$. O lo que es lo mismo, las gráficas obtenidas para los tres horizontes temporales son simétricas respecto al valor de referencia (que toma el valor de cero en este caso).
 - Los valores más elevados de la variación del beneficio bruto respecto al valor de referencia se obtienen en el año 2015 para un grado de penetración alta, mientras que en los años 2030 y 2050 los mayores porcentajes de variación se obtienen para un grado de penetración baja. A destacar también que en el horizonte temporal 2015 las variaciones del beneficio respecto al valor de referencia son muy diferentes en función de si se trata de un grado de penetración alto, medio o bajo, mientras que conforme el horizonte temporal se aleja en el tiempo, estas variaciones de porcentaje se hacen más

constantes para los tres grados de penetración. Por ejemplo, en el horizonte temporal 2015, si aumentamos en un 30% el valor de la variable *previsión número de turismo*, se obtendrán porcentajes de variación del beneficio bruto del 7%, 86% y 157% respectivamente para los grados de penetración bajo, medio y alto. Por el contrario, si esta misma variación del valor de la variable lo aplicamos en los años 2030 y 2050 respectivamente obtendremos los siguientes porcentajes: 201%, 164% y 158% por un lado y 172%, 168% y 166% por el otro.

- **Comparativa de variables**

Se realiza una comparativa del efecto que produce cada una de estas variables sobre los datos iniciales de referencia obtenidos a partir de las hipótesis de entrada.

Se compara en cada horizonte temporal y para cada grado de penetración por separado, la variación en porcentaje, que experimenta el beneficio bruto resultante exclusivamente de la actividad de compra/producción y venta de hidrógeno que se desarrolla en las hidrogeneras, y que se ha obtenido a partir de los datos de entrada iniciales (Base).

A continuación se muestran las tablas y gráficos correspondientes a cada uno de los casos estudiados. Estos gráficos permiten determinar gráficamente qué efecto causan sobre el valor base de beneficio, los aumentos y disminuciones del valor de las variables, y cuáles de las estudiadas son las más influyentes.

Tabla 116. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015 -BAJA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	15,23%	9,14%	3,05%	0,00%	-3,05%	-9,14%	-15,23%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-62,48%	-37,49%	-12,50%	0,00%	12,50%	37,49%	62,48%
Número de Turismos	12,11%	7,26%	5,49%	0,00%	-5,49%	-7,26%	-12,11%
Impuestos Venta Hidrógeno	-6,15%	-3,69%	-1,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-59,51%	-35,70%	-11,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	12,11%	7,26%	2,42%	0,00%	-2,42%	-7,26%	-12,11%

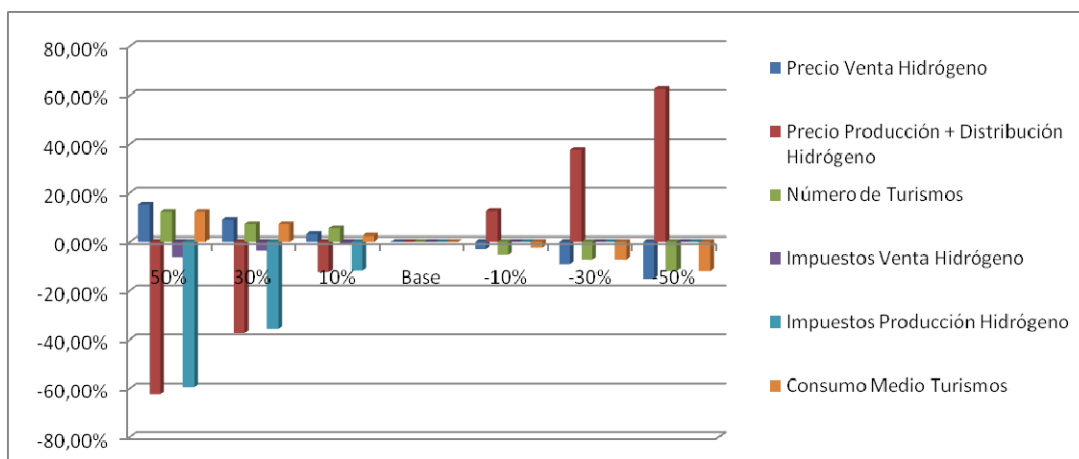


Figura 138. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración BAJO

Tabla 117. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015 -MEDIA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	182,02%	109,21%	36,40%	0,00%	-36,40%	-109,21%	-182,02%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-222,27%	-133,36%	-44,45%	0,00%	44,45%	133,36%	222,27%
Número de Turismos	143,54%	86,12%	36,08%	0,00%	-28,71%	-86,12%	-143,54%
Impuestos Venta Hidrógeno	-73,55%	-44,13%	-14,71%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-211,68%	-127,01%	-42,34%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	143,54%	86,12%	28,71%	0,00%	-28,71%	-86,12%	-143,54%

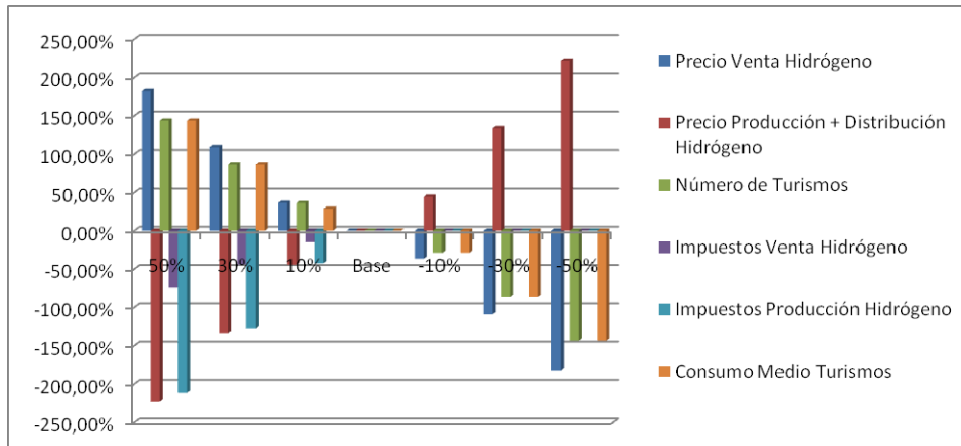


Figura 139. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración MEDIO

Tabla 118. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015 -ALTA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	332,87%	199,72%	66,57%	0,00%	-66,57%	-199,72%	-332,87%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-270,98%	-162,59%	-54,20%	0,00%	54,20%	162,59%	270,98%
Número de Turismos	262,49%	157,50%	77,47%	0,00%	-52,50%	-157,50%	-262,49%
Impuestos Venta Hidrógeno	-134,49%	-80,70%	-26,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-258,07%	-154,84%	-51,61%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	262,49%	157,50%	52,50%	0,00%	-52,50%	-157,50%	-262,49%

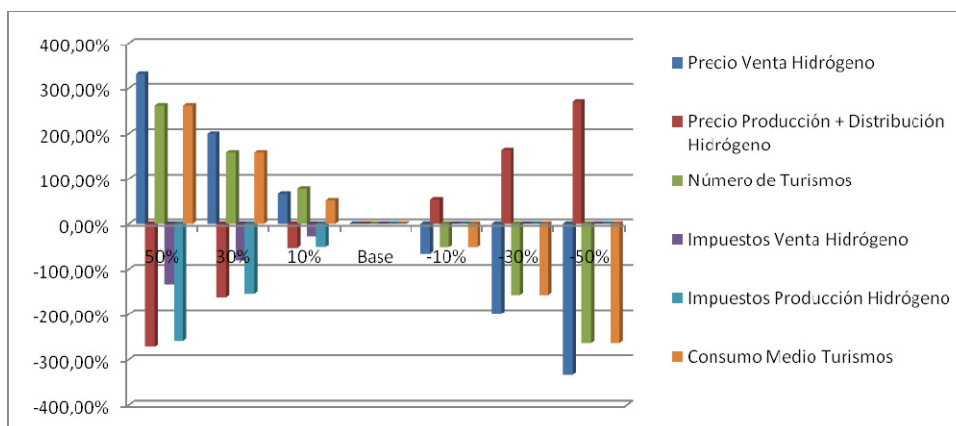


Figura 140. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2015 y grado de penetración ALTO

Tabla 119. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030 -BAJA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	354,57%	212,74%	70,91%	0,00%	-70,91%	-212,74%	-354,57%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-298,54%	-179,12%	-59,71%	0,00%	59,71%	179,12%	298,54%
Número de Turismos	334,69%	200,81%	105,76%	0,00%	-66,94%	-200,81%	-334,69%
Impuestos Venta Hidrógeno	-283,66%	-170,19%	-56,73%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-298,54%	-179,12%	-59,71%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	334,69%	200,81%	66,94%	0,00%	-66,94%	-200,81%	-334,69%

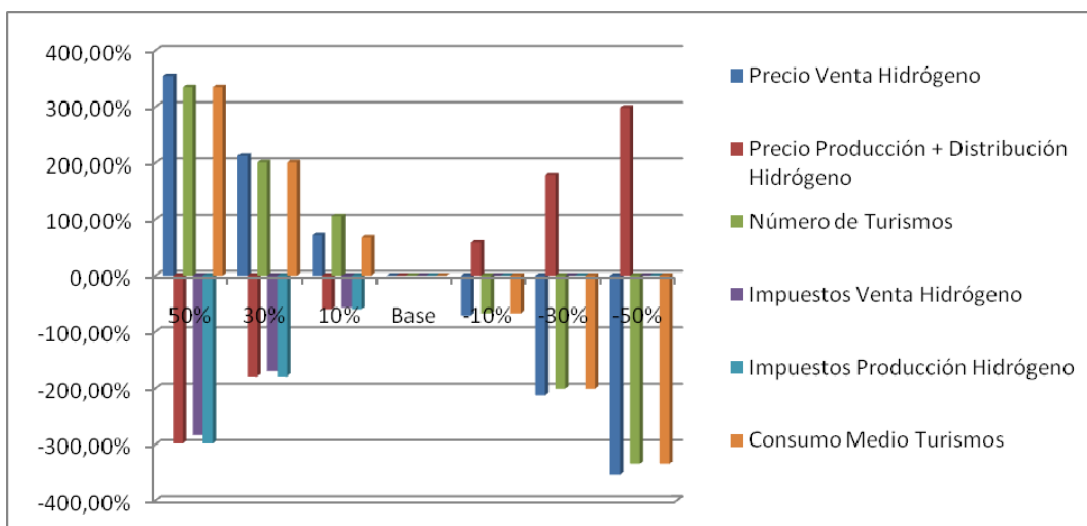


Figura 141. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración BAJO

Tabla 120. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030 -MEDIA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	289,08%	173,45%	57,82%	0,00%	-57,82%	-173,45%	-289,08%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-234,19%	-140,51%	-46,84%	0,00%	46,84%	140,51%	234,19%
Número de Turismos	272,87%	163,72%	54,57%	0,00%	-54,57%	-163,72%	-272,87%
Impuestos Venta Hidrógeno	-231,26%	-138,76%	-46,25%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-234,19%	-140,51%	-46,84%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	272,87%	163,72%	54,57%	0,00%	-54,57%	-163,72%	-272,87%

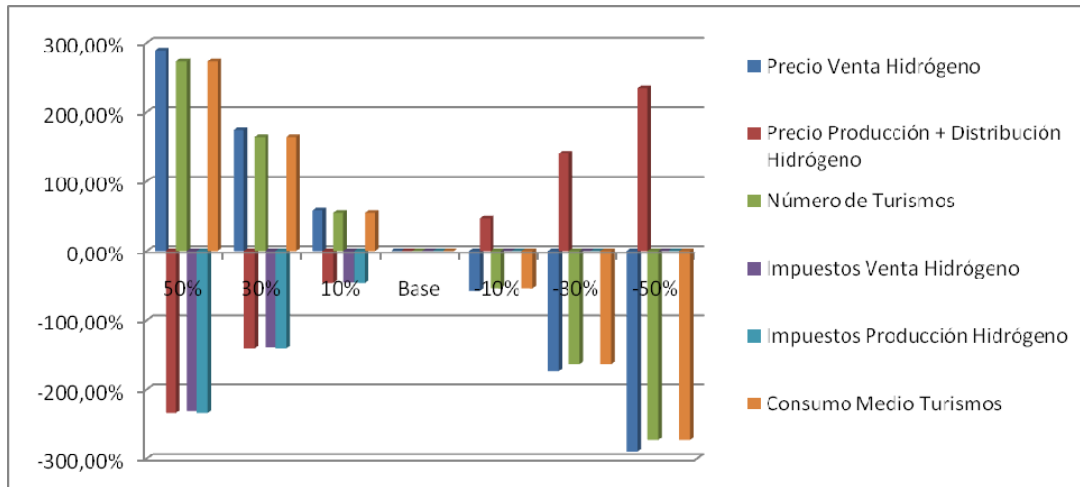


Figura 142. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración MEDIO

Tabla 121. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030 - ALTA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	278,55%	167,13%	55,71%	0,00%	-55,71%	-167,13%	-278,55%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-223,81%	-134,29%	-44,76%	0,00%	44,76%	134,29%	223,81%
Número de Turismos	262,93%	157,76%	52,59%	0,00%	-52,59%	-157,76%	-262,93%
Impuestos Venta Hidrógeno	-222,84%	-133,71%	-44,57%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-223,81%	-134,29%	-44,76%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	262,93%	157,76%	52,59%	0,00%	-52,59%	-157,76%	-262,93%

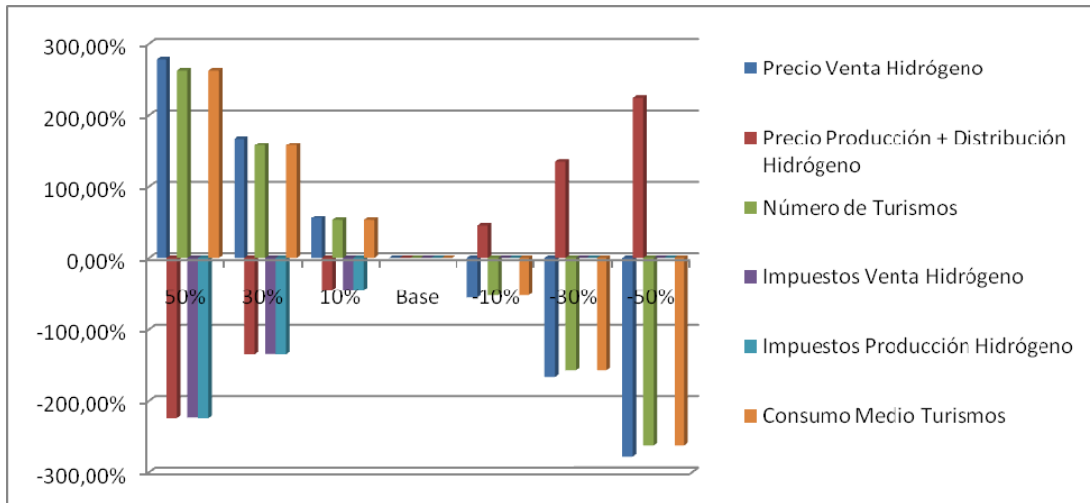


Figura 143. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2030 y grado de penetración ALTO

Tabla 122. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050 -BAJA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	304,48%	182,69%	60,90%	0,00%	-60,90%	-182,69%	-304,48%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-243,96%	-146,38%	-48,79%	0,00%	48,79%	146,38%	243,96%
Número de Turismos	287,41%	172,44%	73,43%	0,00%	-57,48%	-172,44%	-287,41%
Impuestos Venta Hidrógeno	-276,80%	-166,08%	-55,36%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-278,82%	-167,29%	-55,76%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	287,41%	172,44%	57,48%	0,00%	-57,48%	-172,44%	-287,41%

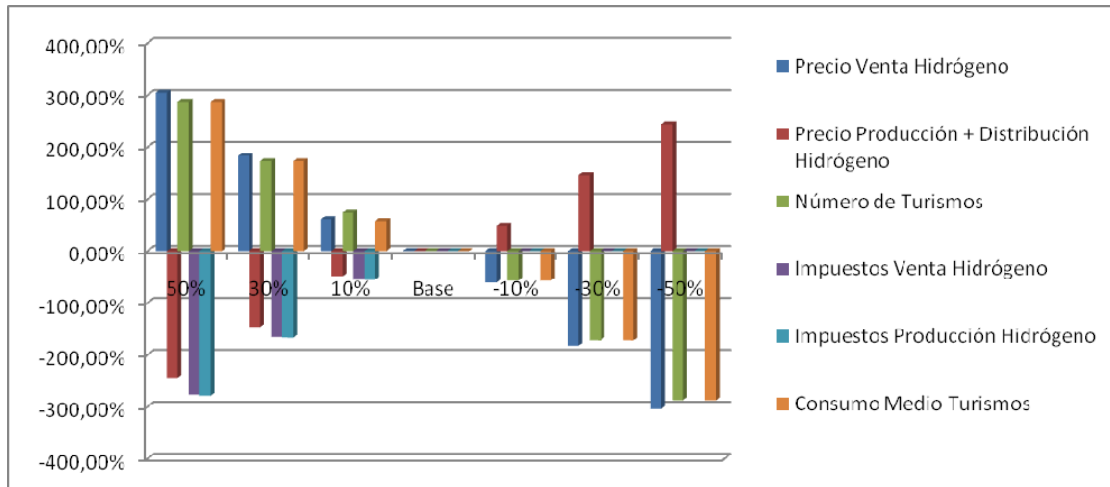


Figura 144. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración BAJO

Tabla 123. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050 -MEDIA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	296,70%	178,02%	59,34%	0,00%	-59,34%	-178,02%	-296,70%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-236,76%	-142,06%	-47,35%	0,00%	47,35%	142,06%	236,76%
Número de Turismos	280,06%	168,04%	56,01%	0,00%	-56,01%	-168,04%	-280,06%
Impuestos Venta Hidrógeno	-269,73%	-161,84%	-53,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-270,58%	-162,35%	-54,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	280,06%	168,04%	56,01%	0,00%	-56,01%	-168,04%	-280,06%

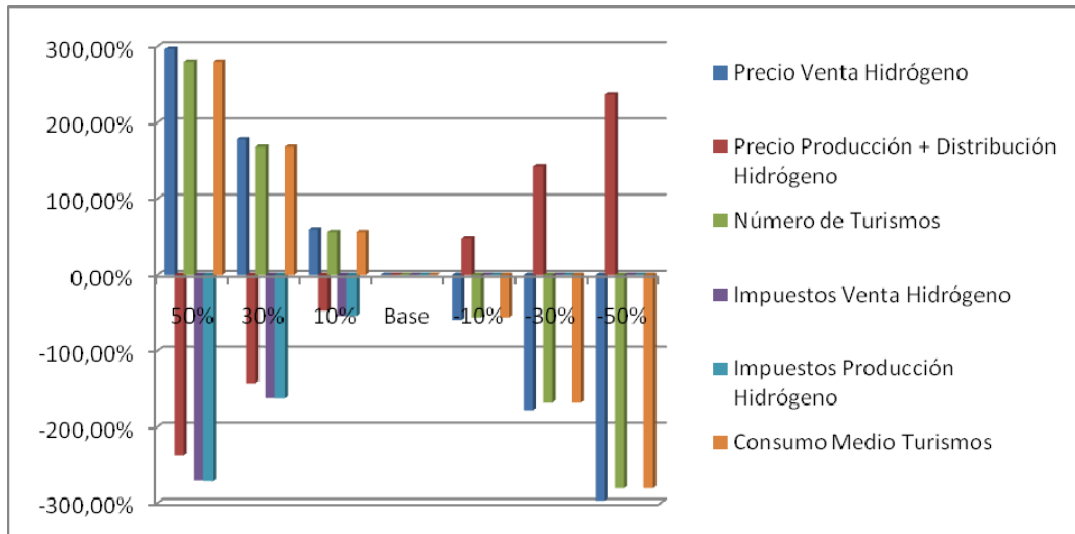


Figura 145. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración MEDIO

Tabla 124. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050 -ALTA						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Precio Venta Hidrógeno	292,94%	175,77%	58,59%	0,00%	-58,59%	-175,77%	-292,94%
Precio Producción + Distribución Hidrógeno	-233,08%	-139,85%	-46,62%	0,00%	46,62%	139,85%	233,08%
Número de Turismos	276,52%	165,91%	70,26%	0,00%	-55,30%	-165,91%	-276,52%
Impuestos Venta Hidrógeno	-266,31%	-159,79%	-53,26%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Impuestos Producción Hidrógeno	-266,37%	-159,82%	-53,27%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Consumo Medio Turismos	276,52%	165,91%	55,30%	0,00%	-55,30%	-165,91%	-276,52%

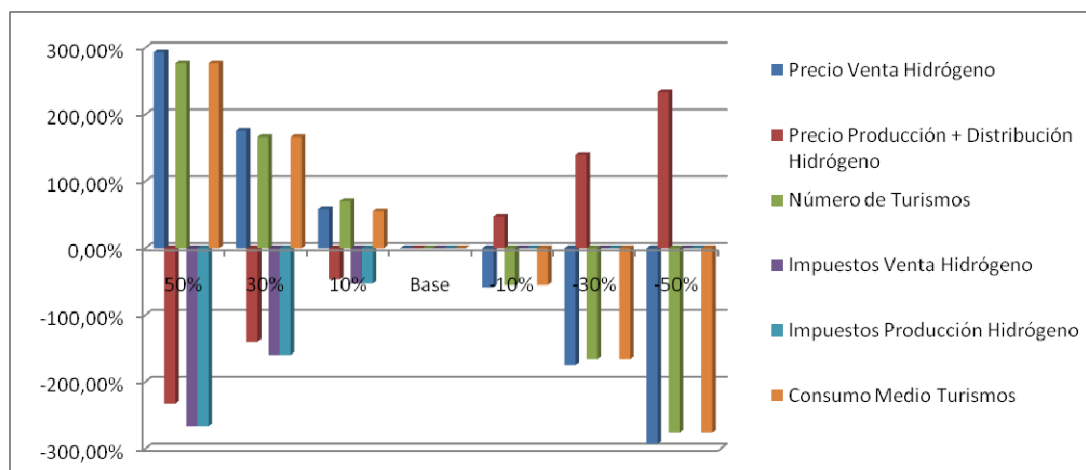


Figura 146. Comparativa del efecto que producen en el beneficio bruto BASE las variables estudiadas. Año 2050 y grado de penetración ALTO

De estas gráficas podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La mayoría de estas variables, que son las más influyentes sobre el beneficio bruto generado por la actividad económica de las hidrogeneras, se refieren a aspectos relacionados con el hidrógeno: precio de venta, precio de producción + distribución, impuestos de venta e impuestos de producción. Por lo tanto se puede concluir que controlar el precio y la seguridad de abastecimiento a las hidrogeneras del hidrógeno va a ser básico a la hora de facilitar la viabilidad de implantación de un sistema de hidrógeno.
- En términos de valor absoluto, y excepto en algún caso en concreto, los porcentajes de variación son muy similares para todas las variables en cada uno de los escenarios analizados.
- En general, se puede destacar el *precio de venta del hidrógeno*, en azul oscuro en las gráficas, como la variable más influyente, excepto para los escenarios: grado de penetración bajo y medio, localizados en el año 2015, en los que las mayores variaciones se experimentan al aumentar o disminuir el valor de referencia de de la variable *precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno*, en color rojo en las gráficas.

- La variable *impuestos producción hidrógeno*, que en los primeros escenarios analizados localizados en el horizonte temporal 2015 tiene una gran importancia, va perdiendo protagonismo conforme avanza el tiempo, en detrimento de las variables *número de turistas y consumo medio turistas*.
- Dentro de la igualdad que existe, la variable *impuestos a la venta del hidrógeno*, en color morado en las gráficas, es la menos influyente (excepto en los escenarios más alejados en el tiempo, en los que empieza a ganar protagonismo debido a que para ese entonces ya se suponen consumos de hidrógeno muy elevados).
- La inversión total a realizar evoluciona de forma directamente proporcional con las variables *precio venta hidrógeno, número de turistas y consumo medio de turistas*, mientras que con las variables *precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno, impuestos a la venta del hidrógeno e impuestos producción hidrógeno*, evoluciona de forma inversamente proporcional. Por lo tanto tendrán efecto contrario sobre el beneficio bruto a obtener por la actividad económica de las hidrogeneras.

6.5. Conclusiones

El análisis de las variables más influyentes a la hora de establecer una infraestructura de recarga para vehículos de hidrógeno proporciona las siguientes conclusiones:

- Se ha creado una herramienta de cálculo con la que es posible determinar, no sólo la inversión requerida en infraestructuras y vehículos para cubrir las previsiones, sino también el beneficio a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras. Así mismo, proporciona la posibilidad de calcular la rentabilidad de la inversión con o sin financiación externa.
- Con el fin de elaborar, a partir de la herramienta propuesta, estudios de viabilidad económicos y estratégicos para determinar la idoneidad o no de implantar un sistema de hidrógeno aplicada al sector transporte en España en los diferentes horizontes temporales previamente fijados: 2015, 2030 y 2050, se han fijado una serie de variables de partida, como lo son el número de vehículos, el precio de los equipos y del hidrógeno o la existencia o no de financiación pública.
- Debido a la coyuntura económica en la que se encuentra sumida España, se prevé que el escenario que se dará es el de grado de penetración bajo de las tecnologías del hidrógeno en el sector automoción:
 - o Las mayores inversiones se deben destinar a la adquisición de vehículos. Proporcionalmente hasta el año 2015 será necesario invertir más en infraestructuras (8,75% de la inversión total), mientras que conforme pase el tiempo esta inversión prácticamente se podrá depreciar respecto al total (la inversión acumulada no alcanza el 1% ni en 2030 ni en 2050). Estos datos se pueden interpretar como que en la primera etapa, ante la falta de infraestructuras, se tiende a generar una cierta red de hidrógeno que sirva de reclamo a las nuevas flotas de vehículos de pila de combustible.

- La inversión necesaria para constituir las flotas de vehículos es muy elevada para dejarla en manos de entidades privadas. Durante las primeras etapas de implantación (hasta 2030), las iniciativas privadas pueden verse compensadas con ayudas públicas de hasta el 50% del presupuesto de aquellos proyectos de demostración y prueba que favorezcan la implantación de estas nuevas tecnologías.
- Se observa que conforme pasa el tiempo, los beneficios obtenidos de la actividad económica desarrollada por las hidrogeneras son mayores.
- La mayor partida de gasto corresponde a la compra/producción del hidrógeno para su posterior suministro al usuario final. Por lo tanto, una hipotética reducción de este gasto contribuiría a una mayor viabilidad del sistema.

Una vez realizado el análisis de sensibilidad sobre las variables que intervienen en la inversión total a realizar y beneficio bruto a obtener, se han obtenido los siguientes resultados:

- Las variables de mayor influencia sobre la inversión total a realizar englobando la adquisición de vehículos e infraestructuras son:
 - Previsión número de turismos
 - Precio de adquisición de los turismos
 - Subvención directa a la adquisición de los turismos
 - Subvención directa para la construcción de hidrogeneras

De éstas, las variables referentes a los turismos: número y precio, son las más influyentes en la inversión en términos de valor absoluto. De forma contraria, la única de las variables estudiadas que tenía como protagonista a las hidrogeneras: *subvención directa para la construcción de hidrogeneras*, prácticamente no produce ninguna variación respecto al valor base de la inversión.

- Las variables de mayor influencia sobre el beneficio bruto obtenido resultado de la actividad de compra/producción – venta de hidrógeno son:
 - Precio base de venta del hidrógeno
 - Precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno
 - Previsión número de turismos
 - Impuestos a la venta de hidrógeno
 - Impuestos a la producción/compra de hidrógeno
 - Consumo medio de los turismos

- La mayoría de estas variables se refieren a aspectos relacionados con el hidrógeno: precio de venta, precio de producción + distribución, impuestos de venta e impuestos de producción. De esto se puede extraer que controlar el precio y el abastecimiento del hidrógeno a las hidrogeneras va a ser un punto esencial a la hora de asegurar cierto grado de viabilidad económica en el proceso de implantación de un sistema de hidrógeno.

- En términos de valor absoluto, y excepto en algún caso en concreto, los porcentajes de variación son muy similares para todas las variables. En ámbito general, se puede destacar el precio de venta del hidrógeno como la variable más influyente (excepto para los escenarios: grado de penetración bajo y medio, localizados en el año 2015, en los que las mayores variaciones se experimentan al aumentar o disminuir el valor de referencia de la variable precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno). Por el contrario, dentro de la igualdad que existe, la variable impuestos a la venta del hidrógeno es la menos influyente (excepto en los escenarios más alejados en el tiempo, en los que empieza a ganar importancia).

*"Los conceptos y principios fundamentales de la ciencia son invenciones libres
del espíritu humano"*

Albert Einstein

CAPÍTULO 7.

Conclusiones

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos más relevantes y se extraen las principales conclusiones. Además, se plantea una serie de futuras líneas de investigación a desarrollar como continuación a los trabajos desarrollados en la presente tesis.

7.1. Resumen y conclusiones

Tras un periodo de crecimiento insostenible de la demanda energética, el sector transporte se ha visto avocado a un periodo de transición en el que la electrificación deberá ir sustituyendo poco a poco a los combustibles fósiles. En este sentido, de entre los diferentes sistemas de tracción eléctricos, se ha identificado al vehículo de hidrógeno y pila de combustible como la alternativa de mayor potencial a medio-largo plazo para sustituir a los vehículos convencionales.

La incorporación de los nuevos sistemas de tracción eléctricos en general, y de pila de combustible en particular, llegan ligados a unos sistemas de diseño flexibles y eficientes, en los que conocer la energía que va a requerir el vehículo en su funcionamiento va a ser fundamental con el fin de obtener el dimensionamiento más eficiente posible del sistema energético y de tracción. Para ello, una vez se conozca el uso al que está destinado el vehículo, en primer lugar se deberá determinar el ciclo de funcionamiento que lo caracteriza, para posteriormente determinar la cantidad de energía que demandará y el sistema de suministro de energía más apropiado. A la hora de dimensionar el sistema energético y de tracción de un vehículo de pila de combustible, se deberán tener en cuenta los diferentes sistemas de almacenamiento energético disponibles, así como sus principales características: densidad de energía, densidad de potencia, vida útil y carácter inductivo o capacitivo.

Ante lo propuesto se puede concluir lo siguiente:

- El consumo energético de los vehículos eléctricos es posible disminuirlo si se selecciona correctamente la arquitectura de la cadena de tracción en función del uso

que se va a hacer del vehículo, se gestiona la energía y si el uso final del vehículo coincide con aquel para el que ha sido diseñado.

Analizando el caso concreto de la implantación de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible, se destacan los siguientes aspectos:

- En los últimos años has surgido un gran número de proyectos relacionados con la implantación de las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible en el transporte. Esto se debe a que este elemento, el más abundante del planeta, puede utilizarse en los vehículos como una alternativa firme a los combustibles fósiles convencionales.
- Se prevé que el despliegue del mercado de vehículos de hidrógeno a nivel mundial tenga lugar en el periodo 2015-2020. Para entonces se espera que la tecnología ya haya alcanzado un grado de madurez suficiente y se dispondrá de cierta experiencia en la operación de flotas de vehículos de hidrógeno, sobre todo en el sector del transporte público, ya que gran parte de los proyectos de demostración desarrollados, estarán relacionados con la puesta en marcha y operación de flotas cautivas de vehículos destinadas al transporte público de pasajeros. El motivo de que esto ocurra así se debe a dos razones fundamentales, la primera es que al tratarse de flotas cautivas, la logística y el control de la flota es mucho más simple, y la segunda es que si se quiere dar a conocer una nueva tecnología de tracción y que el público en general se familiarice con ella y le pierda el “miedo”, hay que convertirla en algo cotidiano y habitual como lo son los transportes públicos.
- Los principales inconvenientes o barreras a superar por parte de las tecnologías del hidrógeno para que adquieran un papel relevante en el sector transporte son las siguientes:
 - La falta de infraestructuras asociadas al hidrógeno, relacionadas con los procesos de producción, distribución, almacenamiento y reabastecimiento de

hidrógeno a flotas de vehículos. Se requiere de un acuerdo entre administraciones públicas y entidades privadas que ponga de manifiesto las responsabilidades de unos y otros a la hora de desarrollar estas infraestructuras, con el objetivo que se puedan cumplir los plazos de tiempo fijados para que se produzca la irrupción de este tipo de vehículos basados en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible.

- El desconocimiento por parte del público en general, que desemboca en un halo de desconfianza hacia las mismas.
- El precio todavía elevado de estas tecnologías que hace inviable la adquisición de un turismo o autobús de pila de combustible o motor de combustión de hidrógeno por parte del público en general. En este sentido, y según previsiones de los fabricantes, se espera que en el año 2015, una vez se inicie la producción en masa de las pilas de combustible y se disponga del apoyo de las administraciones, el precio empezará a mostrarse competitivo con el de los vehículos actuales.

Como ya se ha comentado, paralelamente a la irrupción de nuevos vehículos con sistemas de tracción basados en las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible, se hace necesaria la implantación de nuevas infraestructuras que aseguren el suministro de este nuevo “combustible”. Por lo tanto, se plantea necesario preparar la llegada de estas nuevas infraestructuras al sistema de transporte de forma que la transición a estos nuevos sistemas de tracción, tanto en términos técnicos como económicos, sea lo menos traumática posible.

En el aspecto técnico, a la hora de enfrentarse al reto de diseñar y dimensionar las instalaciones englobadas en un sistema basado en el hidrógeno, no existen, ni una metodología concreta, ni una tendencia compartida en la estructura y tecnologías de las instalaciones de repostaje de hidrógeno existentes. Esto se debe a que el número de proyectos ejecutados sobre estas instalaciones es escaso, y en la mayoría de los casos se ha tratado de proyectos demostrativos y por lo tanto, a medida. Ante esta situación se ha detectado la necesidad de crear una herramienta de cálculo que ayude a dar solución al dimensionado de las instalaciones de repostaje de hidrógeno y la logística que arrastran.

Así pues, en la presente tesis se han llevado a cabo las siguientes acciones:

- Análisis y desarrollo de una herramienta que permita la realización de un diseño optimizado de una nueva infraestructura de distribución de hidrógeno. Para ello se ha realizado la modelización del sistema de transporte. Esta modelización permite conocer el entorno y particularidades en las que deberá localizarse la nueva infraestructura, y ayuda a determinar el tamaño, características y localización de la red de estaciones de repostaje de hidrógeno que minimice las funciones de coste y haga máximas las de operatividad y funcionalidad.
- Análisis y desarrollo de una metodología de cálculo para determinar la demanda diaria de hidrógeno prevista en la instalación o instalaciones de repostaje de hidrógeno. La demanda diaria de hidrógeno es un dato previo imprescindible a determinar la dimensión óptima de dichas instalaciones. Se determinan dos vías posibles de cálculo:
 - Las previsiones de demanda de la flota de vehículos, públicos o privados, que van a utilizar hidrógeno en un horizonte temporal determinado. Opción estimativa que se basa en la asignación de la demanda en función del número de vehículos de cada tipo: turismos, furgonetas, autobuses o camiones.
 - El estudio y diseño de las rutas a seguir por los vehículos, en el caso de tratarse de flotas cautivas o privadas con recorridos conocidos. Al tratarse de recorridos conocidos, se puede realizar un análisis más en profundidad de las rutas seguidas, lo que permite alcanzar unas estimaciones de la demanda mucho más cercanas a la realidad
- A partir de la herramienta generada, se ha realizado un análisis de las variables técnicas más influyentes en el proceso de desarrollo de las instalaciones de suministro de hidrógeno.
- Análisis y desarrollo de una metodología basada en un sistema GIS que permita validar los resultados obtenidos con la herramienta de cálculo resolviendo el

problema de la viabilidad de la construcción del número de instalaciones resultantes con sus características técnicas en las ubicaciones consideradas como óptimas.

Del análisis de variables desarrollado con la herramienta, se extrae la conclusión de que el aspecto más afecta en el proceso de desarrollo de las instalaciones es el sistema elegido para obtener el hidrógeno que se suministrará al usuario final. El tipo de abastecimiento depende de cuatro variables básicas: el coste, la demanda, la ubicación de las instalaciones y la seguridad de abastecimiento.

En el aspecto económico, para determinar la viabilidad económica y estratégica de la inminente introducción de las tecnologías del hidrógeno al sector transporte, en la presente tesis se ha desarrollado una herramienta. Esta herramienta permite determinar la inversión requerida en infraestructuras y vehículos en cada uno de los tres escenarios temporales fijados: 2015, 2030 y 2050; y en base a unos grados de penetración de la tecnología en el sector transporte: bajo, medio y alto.

Esta herramienta permite determinar tanto la inversión requerida en infraestructuras y vehículos para cubrir las previsiones, como el beneficio a obtener como resultado de la actividad económica de las hidrogeneras. Asimismo, proporciona la posibilidad de calcular la rentabilidad de la inversión con o sin financiación externa.

Las variables que se han tenido en cuenta para realizar análisis contenido en la herramienta se engloban en cinco grupos: subvenciones, vehículos, infraestructuras, coste del hidrógeno e ingresos por venta de hidrógeno

Una vez desarrollada la herramienta, se ha realizado el estudio económico para el caso particular de España, para el que se ha previsto, debido a la coyuntura económica actual en la que se encuentra sumida el país, un escenario caracterizado por un grado de penetración bajo de las tecnologías del hidrógeno en el sector automoción. Los resultados y conclusiones obtenidas son los siguientes:

- Las mayores inversiones se deben destinar a la adquisición de vehículos. Proporcionalmente, hasta el año 2015 será necesario invertir más en infraestructuras (8,75% de la inversión total), mientras que conforme pase el tiempo esta inversión prácticamente se podrá depreciar respecto al total (la inversión acumulada no alcanza el 1% ni en 2030 ni en 2050). Estos datos se pueden interpretar como que en la primera etapa, ante la falta de infraestructuras, se tiende a generar una cierta red de hidrógeno que sirva de reclamo a las nuevas flotas de vehículos de pila de combustible.

- La inversión necesaria para constituir las flotas de vehículos es muy elevada para dejarla en manos de entidades privadas. Durante las primeras etapas de implantación (hasta 2030), las iniciativas privadas pueden verse compensadas con ayudas públicas de hasta el 50% del presupuesto de aquellos proyectos de demostración y prueba que favorezcan la implantación de estas nuevas tecnologías.
 - Se observa que conforme pasa el tiempo, los beneficios obtenidos de la actividad económica desarrollada por las hidrogeneras son mayores.
 - La mayor partida de gasto corresponde a la compra/producción del hidrógeno para su posterior suministro al usuario final. Por lo tanto, una hipotética reducción de este gasto contribuiría a una mayor viabilidad del sistema.

Tras el análisis económico se ha realizado el análisis de sensibilidad sobre las variables que intervienen en la inversión total a realizar y beneficio bruto a obtener, obteniendo los siguientes resultados:

- Las variables de mayor influencia sobre la inversión total a realizar englobando la adquisición de vehículos e infraestructuras son:
 - Previsión número de turismos
 - Precio de adquisición de los turismos
 - Subvención directa a la adquisición de los turismos

- Subvención directa para la construcción de hidrogeneras

De estas variables, las referentes a los turismos: número y precio, son las más influyentes en la inversión en términos de valor absoluto. De forma contraria, la única de las variables estudiadas que tenía como protagonista a las hidrogeneras: *subvención directa para la construcción de hidrogeneras*, prácticamente no produce ninguna variación respecto al valor base de la inversión.

- Las variables de mayor influencia sobre el beneficio bruto obtenido resultado de la actividad de compra/producción – venta de hidrógeno son:
 - Precio base de venta del hidrógeno
 - Precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno
 - Previsión número de turismos
 - Impuestos a la venta de hidrógeno
 - Impuestos a la producción/compra de hidrógeno
 - Consumo medio de los turismos

La mayoría de estas variables se refieren a aspectos relacionados con el hidrógeno: precio de venta, precio de producción + distribución, impuestos de venta e impuestos de producción. De esto se puede extraer que controlar el precio y el abastecimiento del hidrógeno a las hidrogeneras va a ser un punto esencial a la hora de asegurar cierto grado de viabilidad económica en el proceso de implantación de un sistema de hidrógeno.

En términos de valor absoluto, y excepto en algún caso en concreto, los porcentajes de variación son muy similares para todas las variables. En ámbito general, se puede destacar el precio de venta del hidrógeno como la variable más influyente (excepto para los escenarios: grado de penetración bajo y medio, localizados en el año 2015, en los que las mayores variaciones se experimentan al aumentar o disminuir el valor de referencia de la variable precio base de producción/compra + distribución del

hidrógeno). Por el contrario, dentro de la igualdad que existe, la variable impuestos a la venta del hidrógeno es la menos influyente (excepto en los escenarios más alejados en el tiempo, en los que empieza a ganar importancia).

7.2. *Futuras Líneas de Investigación*

A continuación se proponen una serie de futuras líneas de investigación, bien complementarias, bien continuación a los trabajos desarrollados en esta tesis:

- Análisis del proceso de implantación que deben seguir estas instalaciones de suministro de hidrógeno. Debe analizarse por un lado cuál debe ser el sistema óptimo de gestión de este tipo de instalaciones, pero debido a las particularidades que presenta el hidrógeno como “combustible” y las condiciones especiales en las que debe realizarse su dispensado, también debe exigirse una certificación de seguridad en cuanto al proceso de instalación, la manipulación del hidrógeno y las operaciones de mantenimiento a desempeñar en instalaciones
- Estudio del marco legal y proposición de un marco regulatorio propio para las instalaciones de hidrógeno. El principal obstáculo que existe actualmente a la hora de legalizar una estación de servicio de hidrógeno es la ausencia de un marco legal específico para este tipo de instalaciones. En estos momentos no existe reglamentación específica europea o nacional al respecto lo cual constituye un problema importante para el despliegue de la infraestructura de repostado de hidrógeno a nivel europeo y nacional. Los aspectos relacionados con la normativa y reglamentación en tecnologías del hidrógeno también van a jugar un papel fundamental en el futuro del hidrógeno en el transporte. Por lo tanto se hace necesaria la creación de un reglamento para instalaciones en la línea marcada por el Reglamento N° 79/2009 relativo a la homologación de los vehículos de motor impulsados por hidrógeno publicado en enero del año 2009.
- Estudio de la planificación y optimización de rutas como instrumento de búsqueda de la sostenibilidad en el transporte, así como la integración del nuevo sistema de transporte basado en el hidrógeno en el sistema actual de movilidad. Este estudio supone complementar los trabajos desarrollados en esta tesis en busca de ahorros

energéticos que contribuyan a la sostenibilidad del sistema de transporte mediante la búsqueda de la optimización de los factores energéticos, económicos y operativos.

- Esta tesis se ha dedicado a analizar de forma global el problema del diseño de la infraestructura del hidrógeno. A partir de aquí surgen las subsecuentes líneas de investigación dedicadas a la investigación y mejora de cada uno de los diferentes sistemas que componen las instalaciones de suministro de hidrógeno.

REFERENCIAS

- [1] P. Almeida, P. D. Silva, *The peak of oil production - Timings and market recognition*, Energy Policy, 2009, Vol. 37, pag. 1267-1276
- [2] A.H. Hajimiragha, C. A. Cañizares, M. W. Fowler, S. Moazeni, A. Elkamel, S. Wonga, Sustainable convergence of electricity and transport sectors in the context of a hydrogen economy, International Journal of Hydrogen Energy, 2011, Vol. 36, pag. 6357-6375
- [3] P. Agnolucci, Hydrogen infrastructure for the transport sector, International Journal of Hydrogen Energy, 2007, Vol. 32, pag. 3526-3544
- [4] P. Forsberg, M. Karlström, On optimal investment strategies for a hydrogen refueling station, International Journal of Hydrogen Energy, 2007, Vol. 32, pag. 647-660
- [5] Holland, John H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, Univ. Michigan Press, 1975.
- [6] Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Educational Publishers Inc, 1989, ISBN: 978-0201157673
- [7] S. Chatterjee, M. Laudat, L. A. Lynch, *Genetic algorithms and their statistical applications: an introduction*. Computational Statistics & Data Analysis, 1996, Vol. 22, pag. 633-651
- [8] G. N. Bullock, M. J. Denham, I. C. Parmee, J. G. Wade. *Developments in the use of the genetic algorithm in engineering design*. Design Studies, 1995, Vol. 16, pag. 507-524
- [9] A. M. Brintrup, J. Ramsden, A. Tiwari, *An interactive genetic algorithm-based framework for handling qualitative criteria in design optimization*. Computers in Industry, 2007, Vol. 58, pag. 279–291
- [10] D. Sadagopan. R. Pitchumani, *Application of genetic algorithms to optimal tailoring of composite materials*. Composites Science and Technology, 1998, Vol. 58, pag. 571-589
- [11] K. C. Tan, L. H. Lee, Q. L. Zhu, K. Ou, *Heuristics methods for vehicle routing problem with time windows*. Artificial Intelligence in Engineering, 2001, Vol. 15, pag. 281-295
- [12] S. Ghorbani, M. Rabbani, *A new multi-objective algorithm for a project selection problem*. Advances in Engineering Software, 2009, Vol. 40, pag. 9-14

- [13] P. Winker, M. Gilli, *Applications of optimization heuristics to estimation and modelling problems*. Computational Statistics & Data Analysis, 2004, Vol 47, pag. 211-223
- [14] J. W. Fowler, P. Wirojanagud, E. S. Gel, *Heuristics for workforce planning with worker differences*. European Journal of Operational Research, 2008, Vol. 190, pag 724-740
- [15] M. G. L. Santarelli, M. Cali, A. Bertolasco *Different fuelling technologies for urban transport bus service in an Italian big town: economic, environmental and social considerations*, Energy Conversion and Management, 2003, Vol 44, pag. 2353-2370
- [16] B. Y. Liaw, M. Dubarry, *From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation*. Journal of Power Sources, 2007, Vol. 174, pag. 76-88
- [17] J. H. Tsai, H. L. Chiang, Y. C. Hsu, B. J. Peng, R. F. Hung, *Development of a local real world driving cycle for motorcycles for emission factor measurements*. Atmospheric Environment, 2005, Vol. 39, pag. 6631-6641
- [18] G. Fontaras, P. Pistikopoulos, Z. Samaras, *Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles*. Atmospheric Environment, 2008, Vol 42, pag. 4023-4035
- [19] L. IntPanis, C. Beckx, S. Broekx, I. DeVlieger, L. Schrooten, B. Degraeuwe, L. Pelkmans. *PM, NO_x and CO₂ emission reductions from speed management policies in Europe*. Transport Policy, 2011, Vol. 18, pag. 32-37
- [20] E. Ericsson, *Variability in urban driving patterns*. Transportation Research - Part D, 2000, Vol. 5, pag. 337-354
- [21] H.Y. Tong, W.T. Hung, C.S. Cheung, *Development of a driving cycle for Hong Kong*. Atmospheric Environment, Atmospheric Environment, 1999, Vol. 33, pag. 2323-2335
- [22] M. Andre, *The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions*. Science of the Total Environment, 2004. Vol. 334-335, pag. 73-84
- [23] J. Lin, D.A. Niemeier, *Regional driving characteristics, regional driving cycles*. Transportation Research - Part D, 2003, Vol. 8, pag. 361-381
- [24] W. T. Hung, K. M. Tam, C. P. Lee, L. Y. Chan, C. S. Cheung, *Comparison of driving characteristics in cities of Pearl River Delta, China*. Atmospheric Environment, 2004, Vol. 39, pag. 615-625

- [25] M. Andre, R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, P. Perret, *Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars*. Atmospheric Environment, 2006, Vol. 40, pag. 5944–5953
- [26] Q. Wang, H. Huo, K. He, Z. Yao, Q. Zhang, *Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities*. Transportation Research - Part D, 2008, Vol. 13, pag. 289-287
- [27] W. Saleh, R. Kumar, H. Kirby, P. Kumar, *Real world driving cycle for motorcycles in Edinburgh*. Transportation research - Part D, 2009, Vol. 14, pag. 326-333
- [28] M. Cea, E. Larrodé, J. Gallego, *Emissions and Consumption Reductions in Heavy-Duty Vehicles by Means Optimized Engines and Fuel Systems*, SAE 2008 World Congress
- [29] F. Ortenzi, M. Chiesa, R. Scarcelli, G. Pede, *Experimental tests of blends of hydrogen and natural gas in light-duty vehicles*, International Journal of Hydrogen Energy, 2008, Vol. 33, pag. 3225-3229
- [30] J. Barkenbus, *Our electric automotive future: CO₂ savings through a disruptive technology*, Policy and Society, 2009, Vol. 27, pag. 399–410
- [31] O. P.R. van Vliet, T. Kruithof, W. C. Turkenburg, A. P. C. Faaij, *Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars*, Journal of Power Sources, 2010, Vol. 195, pag. 6570-6585
- [32] G.J. Offer, D. Howeyb, M. Contestabile, R. Clague, N. P. Brandon, *Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system*, Energy Policy, 2010, Vol. 38, pag. 24-29
- [33] K.T. Chau, Y.S. Wong, *Hybridization of energy sources in electric vehicles*, Energy: Conversion and management, 2001, Vol. 42, pag. 1059-1069
- [34] J. Gallego, E. Larrodé, S. Sánchez, *Análisis de las prestaciones de los autobuses híbridos. Mejoras en el consumo y en las emisiones frente a autobuses con sistema propulsor convencional*, Congreso de Ingeniería del Transporte, CIT 2008
- [35] M. Ouyang, L. Xu, J. Li, L. Lu, D. Gao, Q. Xie, *Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies*, Journal of Power Sources, 2006, Vol. 163, pag. 467-479

- [36] E. Larrodé, J. Gallego, S. Sánchez, *Achieving efficient designs for energy and power systems for electric vehicles*, Advanced Microsystems for Automotive Applications, AMAA 2010
- [37] S. Sánchez, J. Gallego, E. Larrodé, *Análisis de las prestaciones de los autobuses con pila de combustible. Consumo y emisiones frente a autobuses con sistema propulsor tradicional o híbrido*, Congreso Nacional de Pilas de Combustible, CONAPPICE 2008
- [38] S. Sánchez, J. Gallego, E. Larrodé, *Diseño y análisis de vehículos ligeros híbridos propulsados por pila de combustible en entorno urbano*, Congreso Nacional de Pilas de Combustible, CONAPPICE 2010
- [39] S. Sánchez, J. Gallego, E. Larrodé, *Análisis de factores predominantes en la optimización de vehículos ligeros híbridos propulsados por pila de combustible en un sistema de distribución urbana de mercancías*, Congreso Nacional de Pilas de Combustible, CONAPPICE 2012
- [40] A. Mills, S. Al-Hallaj, *Simulation of hydrogen based hybrid systems using Hybrid2*, International Journal of hydrogen Energy, 2004, Vol. 29, pag 991-999
- [41] J.K. Kaldellis, G.Th. Vlachos, *Optimum sizing of an autonomous wind-diesel hybrid system for various representative wind-potential cases*, "Applied Energy" Journal, 2006, Vol. 83, pag. 113-132
- [42] M.A. Elhadidy, S.M. Shaahid, *Optimal sizing of battery storage for hybrid wind-diesel power systems*, Renewable Energy, 1999. Vol. 18, pag 77-86
- [43] J. Ally, T. Pryor, *Accelerating hydrogen implementation by mass production of a hydrogen chassis*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, Vol. 13, pag. 616-624
- [44] J. van Dokkum, *Meeting the challenges in the transport sector*, Journal of Power Sources, 2008, Vol. 181, pag. 378-381
- [45] P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri, *Lithium polymer batteries and proton exchange membrane fuel cells as energy sources in hydrogen electric vehicles*, Journal of Power Sources, 2010, Vol. 195, pag. 7849-7854
- [46] S. Campanari, G. Manzolini, F. García de la Iglesia, *Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations*, Journal of Power Sources, 2009, Vol. 186, pag. 464-477

- [47] J. M. Ogden, *Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study*, International Journal of Hydrogen Energy, 1999, Vol. 24, pag. 709-730
- [48] F. Markert, S. K. Nielsen, J. L. Paulsen, V. Andersen, *Safety aspects of future infrastructure scenarios with hydrogen refueling stations*, International Journal of hydrogen Energy, 2007, Vol. 32, pag. 2227-2234
- [49] M. Wietschel, U. Hasenauer, A. De Groot, *Development of European hydrogen infrastructure scenarios – CO2 reduction potential and infrastructure investment*, Energy Policy, 2006, Vol. 34, pag. 1284-1298
- [50] N. Briguglio, M. Ferraro, L. Andaloro, V. Antonucci, *New simulation tool helping a feasibility study for renewable hydrogen bus fleet in Messina*, International Journal of Hydrogen Energy, 2008, Vol. 33, pag. 3077-3084
- [51] M. Kuby, S. Lim, *The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles*, Socio-Economic Planning Sciences, 2005, Vol. 39, pag. 125-145
- [52] YM. Wang, CC Lin, *Locating road-vehicle refueling stations*, Transportation Research Part E, 2009, Vol. 45, pag. 821-829
- [53] YM. Wang, CR. Wang, *Locating passenger vehicle refueling stations*, Transportation Research Part E, 2010, Vol. 46, pag. 791-801
- [54] YW. Wang, *An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations*, Transportation Research part D, 2007, Vol. 12, pag. 231-237
- [55] YW. Wang, *Locating battery exchange stations to serve tourism transport: A note*, Transportation Research Part D, 2008, Vol. 13, pag. 193-197
- [56] J. Gallego, E. Larrodé, *Efficient allocation in urban environments of recharging stations for electric vehicles*, Advanced Microsystems for Automotive Applications, AMAA 2011
- [57] Z. Lin, J. Ogden, Y. Fan, C.W. Chen, *The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting*, International Journal of Hydrogen Energy, 2008, Vol. 33, pag.3096-3101
- [58] C. Bersani, R. Minciardi, R. sacile, E. Trasforini, *Network planning of fuelling service stations in near-term competitive scenario of the hydrogen economy*, Socio-Economic Planning Sciences, 2009, Vol. 43, pag. 55-71

- [59] J. Kim, I. Moon, Strategic design of hydrogen infrastructure considering cost and safety using multiobjective optimization, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, Vol. 33, pag. 5887-5896
- [60] M.W. Melaina, *Initiating hydrogen infrastructures: preliminary analysis of a sufficient number of initial hydrogen stations in the US*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003, Vol. 28, pag. 743-755
- [61] A. Hugo, P. Rutter, S. Pistikopoulos, A. Amorelli, G. Zoia, *Hydrogen infrastructure strategic planning using multi-objective optimization*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, Vol. 30, pag. 1523-1234
- [62] N. H. Afgan, A. Veziroglu, M. G. Carvalho, *Multi-criteria evaluation of hydrogen system options*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, pag. 3183-3193
- [63] M. Kuby, L. Lines, R. Schultz, Z. Xie, JG. Kim, S. Lim, *Optimization of hydrogen stations in Florida using the Flow-Refueling Location Model*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, Vol. 34, pag. 6045-6064
- [64] K. Stolzenburg, V. Tsatsami, H. Grubel, *Lessons learned from infrastructure operation in the CUTE project*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, Vol. 34, pag. 7114-7124
- [65] J. Zheng, J. Ye, J. Yang, P. Tang, L. Zhao, M. Kern, *An optimized control method for a high utilization ratio and fast filling speed in hydrogen refueling stations*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, Vol. 35, pag. 3011-3035
- [66] S. Maus, J. Hapke, Ch. N. Ranong, E. Wüchner, G. Friedlmeier, D. Wenger, *Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, Vol. 33, pag. 4612-4621
- [67] K. Chaitanya, *Rapid economic growth and industrialization in India, China & Barzil: at what cost?*, 2007
- [68] M. Tsoskounoglou, G. Ayerides, E. Tritopoulou, *El final de la era del petróleo barato*, Icaria Editorial, 2008 y *The end of cheap oil: Current status and prospects*, 2008
- [69] European Commission, 2003.
- [70] *World Energy Outlook 2007*. IEA, 2007. ISBN: 978-9264027305
- [71] A. Raskin, S. Shah, *The Emergence of Hybrid Vehicles*, AllianceBersteis, 2006
- [72] J. Romm, P. Fox-Penner, *Plugging Into The Grid*, 2007

- [73] IBM end-to-end security for smart grids, 2009
- [74] D.Sperling, D.Gordon *Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability*, Oxford University Press Inc 2009, ISBN: 978-0195376647
- [75] P. H. Andersen, J. A. Mathews, M. Rask, *Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles*, Energy Policy, 2009, Vol. 37, pag. 2481-2486.
- [76] European Emissions Standard – EEV. Disponible en web:
<http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm>
- [77] P. Corbo, F.E. Corcione, F. Migliardini, O. Veneri, *Experimental study of a fuel cell power train for road transport application*. Journal of Power Sources, 2005, Vol. 145, pag. 610-619
- [78] P. Corbo, F. Migliardini, O. Veneri, *PEFC stacks as power sources for hybrid propulsion systems*. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, Vol. 34, pag. 4635-4644
- [79] I. Kuribayashi, M. Yokoyama, M. Yamashita, *Battery characteristics with various carbonaceous materials*. Journal of Power Sources, 1995, Vol. 54, pag. 1-5
- [80] Y. Nishi, *Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future*. Journal of Power Sources, 2001, Vol. 100, pag. 101-106
- [81] B. Scrosati, F. Croce, S. Panero, *Progress en lithium polymer battery R&D*. Journal of Power sources, 2001, Vol. 100, pag. 93-100
- [82] E. Karden, S. Ploumen, B. Fricke, T. Miller, K. Snyder, *Energy storage devices for future hybrid electric vehicles*. Journal of Power Sources, 2006, Vol. 168, pag. 2-11
- [83] A. Cooper, J. Furakawa, L. Lam, M. Kellaway, *The UltraBattery - A new battery design for a new beginning in hybrid electric vehicle energy storage*. Journal of Power Sources, 2009, Vol. 188, pag. 642-649
- [84] H. Wenzla, I. Baring-Gould, R. Kaiser, B. Yann Liaw, P. Lundsager, J. Manwell, A.Ruddell, V. Svoboda, *Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery*. Journal of Power Sources, 2005, Vol. 144, pag. 373-384
- [85] E. Karden, S. Ploumen, B. Fricke, T. Miller, K. Snyder, *Energy storage devices for future hybrid electric vehicles*, 2007, Vol. 168, pag. 2-11

- [86] M. Balat, H. Balat, C. Öz, *Progress in bioethanol processing*, Progress in Energy and Combustion Energy, 2008, Vol 34, pag. 551-573
- [87] X. Chen, Y. Sun, Z. Xiu, X. Li, D. Zhang, *Stoichiometric analysis of biological hydrogen production by fermentative bacteria*, International Journal of Hydrogen Energy, 2006, Vol. 31, pag. 539-549
- [88] R. Hino, K. Haga, H. Aita, K. Sekita, *R&D on hydrogen production by high-temperature electrolysis of steam*, Nuclear Engineering and Design, 2004, Vol. 233, pag. 363-375
- [89] Análisis del mapa de ruta del hidrógeno en España. HyWays, 2010.
- [90] A. Matthijsen, E. Kooi, *Safety distances for hydrogen filling stations*, 2006, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 19, pag. 719-723
- [91] M. Schuckert, *Detailed summary of achievements*, CUTE Project, 2006
- [92] Informe mensual de supervisión del mercado mayorista de gas. CNE, noviembre 2010.
- [93] España. Resolución de 31 de enero de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se fija el precio medio de la energía a aplicar en el cálculo de la retribución del servicio de gestión de la demanda de interrumpibilidad ofrecido por los consumidores que adquieren su energía en el mercado de producción durante el primer trimestre de 2011. BOE Núm. 29, Jueves 3 de Febrero de 2011. Sec. III, pág. 11915.
- [94] C. Yang, J. Orden. Steady state model of hydrogen infrastructure for us urban areas. Institute of Transportation Studies, 2006. University of California, Davis.
- [95] K. Haman, E. Stiever, *Literature Review of Hydrogen Production, Storage, Distribution, and Utilization. Technologies: Executive Summary*
- [96] M. Wang, M. Mintz, *Benefits and Costs of Hydrogen Fuels*, Argonne National Laboratory, 2003
- [97] IEA Energy Technology Essentials, 2007
- [98] Alternative Energy Sources. Disponible en web:
<http://watd.wuthering-heights.co.uk/subpages/hydrogen.html>
- [99] Roads2Hycom. Disponible en web:
http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/index.php/Hydrogen_Transport_by_Tube_Trailer

- [100] Supervisión macro estaciones de servicio: informe mensual de precios de los carburantes en España y UE. CNE, febrero 2011.
- [101] European Energy and Transport Trends to 2030. European Commission. Directorate-General for Energy and Transport, 2003.
- [102] Future Transports Fuels. Report of the European Expert Group on Future Transport Fuels. European Commission, enero 2011.
- [103] The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report, 2010.
- [104] O. Ehret, K. Bonhoff. *Introducing Hydrogen as a Future Fuel: Strategies and Activities in Germany*. En actas del WHEC 2010. Editorial Detlef Stolten, Thomas Grube, 2010.
- [105] J. van den Bulk. *A cost- and benefit analysis of combustion cars, electric cars and hydrogen cars in the Netherlands*. 2009.
- [106] Tarifas de agua en España 2009. Precios de los servicios de abastecimiento y de saneamiento. AEAS, enero 2010.
- [107] J. L. LaChance, *Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations*. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, Vol. 34, pag. 5838-5845.
- [108] Bruno Lapillonne. World Energy Technology Outlook 2050 – WETO H2 . European Commission. 2006.
- [109] C. Yang, J. Ogdén. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. International Journal of Hydrogen Energy, 2007. Vol 32, pag. 268-286.
- [110] *Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap Update*. Ballard, diciembre 2008.
- [111] Ebus. Catálogo [en línea]. Disponible en web: <http://www.ebus.com/>
- [112] S. Gronich. *Transition to Hydrogen Fuel Cell Vehicles & The potential Hydrogen Energy Infrastructure Requirements*. DoE. Marzo 2008.
- [113] European Commission. Eurostat. Estadísticas y bases de datos [en línea]: *Stock of vehicles by category at regional level*. Disponible en web: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
(última actualización: 24/02/2011).
- [114] NREL [en línea]. Disponible en web: http://www.nrel.gov/hydrogen/proj_fc_bus_eval.html
- [115] H2mobility. Información del proyecto [en línea]. Disponible en web: <http://www.h2mobility.org/index.html>

- [116] España. Real Decreto 648/2011, de 9 de mayo, por el que se regula la concesión directa de subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos durante 2011, en el marco del Plan de acción 2010-2012 del Plan integral de impulso al vehículo eléctrico en España 2010-2014. BOE Núm.111, Martes 10 de mayo de 2011, Sec. I, pág. 47177.
- [117] PLAZA [en línea]. Disponible en web: <http://www.plazalogistica.com/index.aspx>
- [118] Código Técnico de la Edificación. CTE DB SI
- [119] AENA. Plan Director para el Aeropuerto de Zaragoza 2001
- [120] AENA. Aeropuerto de Zaragoza. Pasajeros 2000-2010. Disponible en web: <http://www.aena-aeropuertos.es/csee/Satellite/Aeropuerto-Zaragoza/es/>
- [121] Estudio de movilidad. Oferta y demanda de movilidad y propuesta para fomentar la movilidad sostenible en la Plataforma logística PLAZA de Zaragoza. Indra. 2010
- [122] INE 2011 [En línea]. Disponible en web: http://www.ine.es/inebmenu/mnu_cifraspob.htm
- [123] Cámara de Zaragoza [En línea]:
http://www.mcrit.com/taximataro/Documentacio/Bons/ZARAGOZA_ESTUDI%20Camara%20Zaragoza%20TAXI%20%28resum%20executiu%29_makejat.pdf

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Autor: Jesús Gallego Navarro

Director: Dr. D. Emilio Larrodé Pellicer, Catedrático del área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza

Zaragoza, septiembre 2012

Tesis doctoral presentada para optar al Título de Doctor correspondiente al programa de doctorado: *Nuevas Tecnologías en Automoción*

Universidad de Zaragoza
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Centro Politécnico Superior
Departamento de Ingeniería Mecánica
Área de Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes



Universidad
Zaragoza

ANEXO 1. Optimización del Sistema de Tracción de Vehículos no Contaminantes

Con el objetivo de obtener desde el punto de vista de la eficiencia energética, la proporción óptima entre sistema de energía principal y auxiliar de un vehículo en función del uso final al que se destine, se ha utilizado una herramienta informática de simulación de vehículos para ensayar diferentes tipos de configuraciones en diferentes escenarios.

Concretamente se pretende dimensionar el sistema principal y auxiliar de un vehículo de pila de combustible y como herramienta de simulación se ha utilizado el programa “*Advisor*”, aplicación que opera en el entorno “*Matlab-Simulink*”, y que mediante la modelización de los diferentes sistemas del vehículo se realizan las simulaciones de diferentes tipos de vehículos en ciclos de naturaleza diversa: urbanos, suburbanos y mixtos.

Advisor comprueba el efecto que causa en el vehículo el cambio de componentes, como motor o baterías, o cualquier otra modificación que sea susceptible de modificar el consumo, las prestaciones o las emisiones contaminantes del vehículo.

El proceso de optimización es el siguiente:

- Justificación del proceso de evolución desde el vehículo convencional hasta el vehículo basado en pila de combustible, pasando por el vehículo híbrido con motor de combustión y por el vehículo eléctrico puro.
- Simulación de vehículos con pila de combustible como sistema principal de energía y diferentes sistemas auxiliares, para seleccionar la configuración más óptima (en este caso batería de lón-litio). La simulación se realiza en diferentes escenarios, cuyo carácter va desde fuertemente urbano hasta completamente suburbano, pasando por varios de tipo intermedio. En cada uno de los escenarios se varía la potencia de los sistemas energéticos primario y auxiliar de cara a obtener la máxima eficiencia energética.
- Obtención de la evolución de la proporción entre potencia del sistema auxiliar y potencia total del vehículo según el tipo de ciclo en el que se simula.

A1.1. *Definición de Constantes*

En este estudio se simulan diferentes tipos de vehículos híbridos, entendiéndose por vehículo híbrido aquel que cuenta con varios tipos de motorización (“vehículo híbrido según motorización”) o varios sistemas de almacenamiento de energía (“vehículo híbrido según sistema energético”).

Para que la comparación entre las diferentes alternativas simuladas sea consistente, se establecen una serie de especificaciones y requerimientos que todos los vehículos deben cumplir. La especificación principal es la relativa a la masa del vehículo: 900 kg de vehículo sin incluir componentes del sistema propulsor. De esta manera, el bajo peso de una determinada configuración redundará en su propio beneficio (a diferencia de si se fijara un peso total para todas las configuraciones). Al total se añaden 120 kg representando un pasajero y su equipaje. También se plantean unos requerimientos de prestaciones que todos los modelos simulados deben cumplir para garantizar que éstos sean comparables. Se exige una autonomía de al menos 500 km, una velocidad máxima no inferior a 160 km/h y un tiempo de aceleración de 0 a 100 km/h no superior a 12 segundos.

Para simular las situaciones diferentes en las que opera un vehículo se utilizan los ciclos de funcionamiento. Para representar los distintos tipos de entorno se han utilizado 6 ciclos de funcionamiento diferentes (Tabla 125, Tabla 126, Tabla 127, Tabla 128, Tabla 129 y Tabla 130).

Tabla 125. Ciclo 1. Urbano

CICLO 1	
Duración	585 s
Distancia	0,61 km
Velocidad máxima	32,19 km/h
Aceleración máxima	1,34 m/s ²

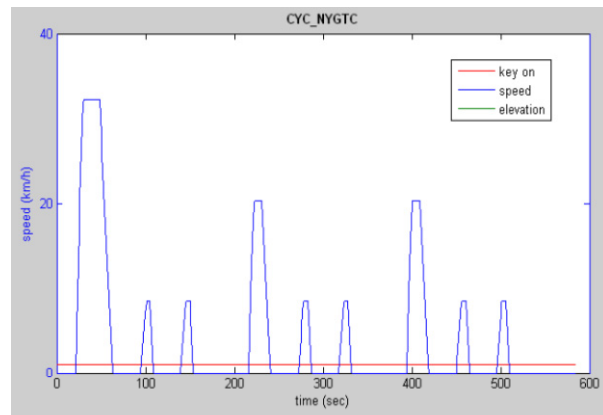


Tabla 126. Ciclo 2. Urbano

CICLO 2	
Duración	195 s
Distancia	0,99 km
Velocidad máxima	50 km/h
Aceleración máxima	1,06 m/s ²

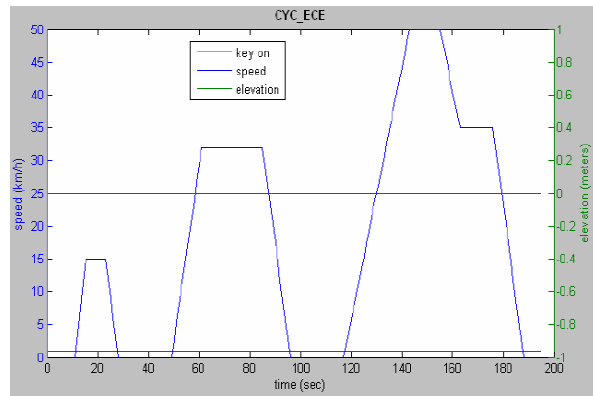


Tabla 127. Ciclo 3. Mixto

CICLO 3 (MIXTO)	
Duración	1225 s
Distancia	10,93 km
Velocidad máxima	120 km/h
Aceleración máxima	1,06 m/s ²

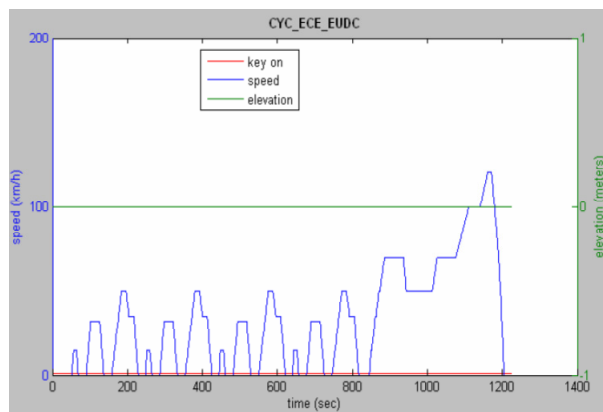
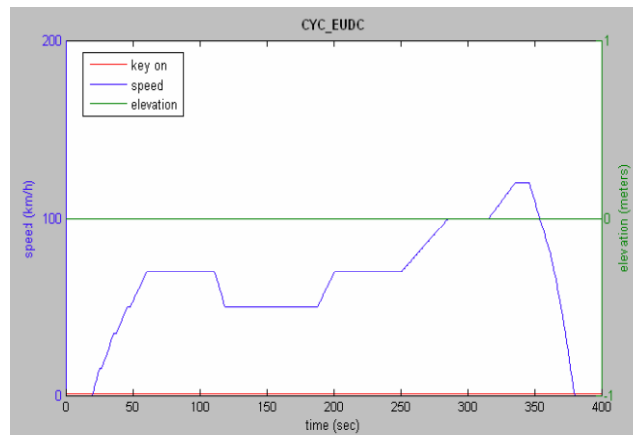
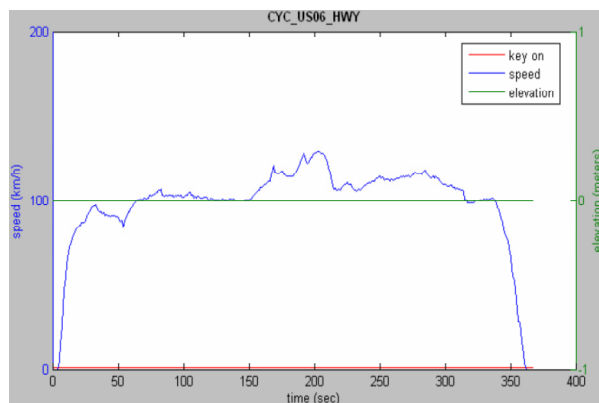


Tabla 128. Ciclo 4. Suburbano

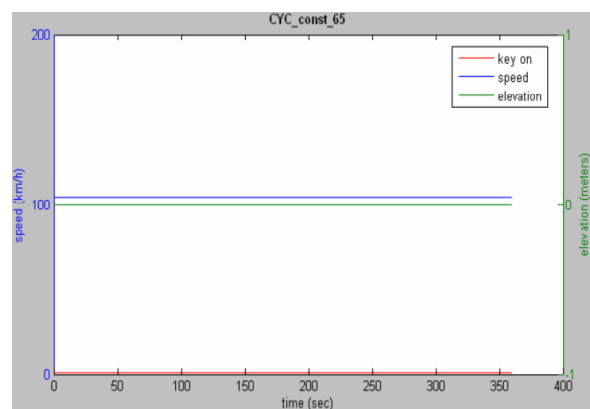
CICLO 4	
Duración	400 s
Distancia	6,95 km
Velocidad máxima	120 km/h
Aceleración máxima	0,83 m/s ²


Tabla 129. Ciclo 5. Suburbano

CICLO 5	
Duración	368 s
Distancia	10,04 km
Velocidad máxima	129,3 km/h
Aceleración máxima	3,08 m/s ²


Tabla 130. Ciclo 6. Suburbano

CICLO 6	
Duración	360 s
Distancia	10,46 km
Velocidad máxima	104,61 km/h
Aceleración máxima	0,0 m/s ²



El Ciclo 1 es el más urbano y el carácter de éstos evoluciona hasta ser completamente suburbano, Ciclo 6, con velocidad elevada y constante.

Para que el vehículo utilizado en las simulaciones sea capaz de recorrer cada uno de los ciclos necesita una cantidad determinada de energía. Dicha energía variará en función de factores como el peso del vehículo o su eficiencia. Puesto que se está tratando de hallar un parámetro relativo al ciclo y tan independiente del vehículo como sea posible, se calculará la energía que se utilizaría idealmente, es decir, la consumida por un vehículo con un 100% de eficiencia. En la se muestra la energía necesaria, expresada en Wh por kilómetro, según el ciclo

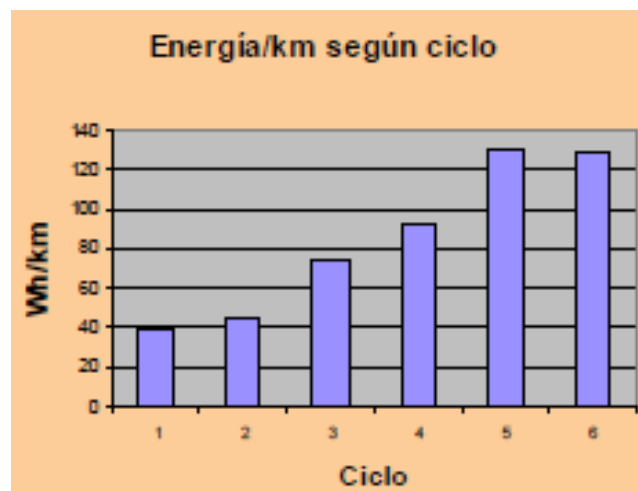


Figura 147. Energía consumida por kilómetro según ciclo recorrido

Se observa una tendencia creciente debida principalmente a que la resistencia aerodinámica aumenta conforme los ciclos son más suburbanos. El valor del Ciclo 5 mayor que el del 6 se explica por las variaciones de velocidad existentes en el Ciclo 5, las cuales provocan un consumo extra, además de alcanzarse, en algunos momentos, velocidades mayores que en el Ciclo 6.

A1.2. *Simulaciones*

En la primera y segunda fase de simulaciones, en las que justifica la elección del vehículo de pila de combustible y se selecciona la mejor opción de vehículo de pila de combustible en función de su sistema auxiliar de energía, se utiliza el ciclo 3 (Tabla 127), cuyo carácter es mixto y, por tanto, es representativo del resto de ciclos.

El proceso seguido con la aplicación informática para cada una de las simulaciones ha consistido en lo siguiente; se selecciona la configuración del vehículo deseada y se imponen las especificaciones técnicas comunes a todas las simulaciones. Se introduce el ciclo de funcionamiento en el que se va a simular y se realiza la primera prueba. Se comprueba si las prestaciones cumplen con los requerimientos y se toma nota del consumo. Se realizan tantas pruebas como sea necesario variando la potencia de los sistemas de energía principal y auxiliar hasta conseguir que el vehículo obtenga un consumo mínimo al mismo tiempo que cumple todos los requerimientos de prestaciones.

El criterio principal para la selección entre las distintas alternativas es la eficiencia energética, si bien también se tendrán en cuenta otras cuestiones tales como los tiempos de repostaje, la eliminación de emisiones contaminantes en el vehículo o aspectos económicos. Puesto que el criterio de la eficiencia se utiliza en repetidas ocasiones de cara a elegir las mejores configuraciones, se ha tomado una unidad común aplicable a todos los tipos de vehículos, independientemente de su sistema energético: el consumo de “litros equivalentes de gasolina”, que representan la energía equivalente a la contenida en un litro de gasolina.

A1.2.1. *Selección tipo cadena de tracción más eficiente*

La primera fase de simulaciones consiste en justificar la evolución desde el vehículo convencional (se incluye para establecer una referencia inicial) hasta el de pila de combustible, pasando por el vehículo híbrido con motor de combustión interna y por el vehículo eléctrico puro. Los principales resultados de las simulaciones, en el ciclo mixto comentado previamente, se muestran en la Tabla 131.

Tabla 131. Principales resultados de la primera fase de simulación

Vehículo		Peso	Aceleración 0 a 100 km/h	Vel. Máx.	Autonomía	Emisiones	η	Consumo
		kg	s	km/h	km	g CO ₂ /km	%	l eq*/100km
Convencional	Otto	1366	12	185,3	516	206	9,8	8,6
	Diesel	1364	12	160,2	514	170	11,8	7,1
Híbrido	Pb-ácido	1594	12	162,5	500	187	10,8	7,8
	Li-Ion	1287	11,9	162,8	500	146	13,8	6,1
Eléctrico	Li-Ion	1647	11,9	164	522	0	42,1	2
	Ni-MH	2579	12	161,6	489	0	30,1	2,8
	Pb-ácido	2710	12	160,7	293,7	0	26,3	3,2
Pila de combustible	Pb-ácido	1752	11,9	160,8	500	0	20	4,2

Se optimiza el vehículo con motor térmico, ciclo Otto y Diesel, cumpliendo todos los requerimientos y se obtienen los datos que aparecen en la tabla. Puesto que tanto consumo como emisiones son elevados y el rendimiento es bajo, se incorpora un motor eléctrico y un sistema de almacenamiento de energía (en este caso baterías de Ión-litio), obteniéndose así un vehículo híbrido.

El vehículo híbrido con motor convencional consigue un rendimiento notablemente superior al vehículo convencional, al tiempo que se reducen las emisiones y el consumo. Puesto que se pretenden eliminar las emisiones y se desea mejorar la eficiencia energética, se elimina el motor térmico y se aumenta el sistema de almacenamiento de energía, teniéndose así un vehículo eléctrico puro.

Se simulan varios tipos de vehículos eléctricos. Se observa, en primer lugar, que utilizando baterías de plomo-ácido como sistema de almacenamiento de energía resulta casi imposible cumplir el requerimiento de autonomía, puesto que al aumentar la cantidad de baterías el peso del vehículo aumenta en gran medida, lo que provoca un aumento en el consumo que a su vez obliga a aumentar aún más el tamaño de las baterías. Se simulan pues modelos con otros tipos de baterías. El requerimiento de autonomía se alcanza sin problemas con las baterías de tipo Ión-Li y Ni-MH, aunque el mayor peso de éstas últimas provoca una menor

eficiencia energética. La configuración que utiliza baterías de lón-Li obtiene muy buenos resultados, si bien resultaría una opción muy costosa debido al elevado coste de este tipo de baterías. En cualquier caso e independientemente del tipo de sistema de almacenamiento que se utilice, se ha conseguido el objetivo de eliminar las emisiones. Los tiempos de recarga son muy elevados, del orden de horas, por lo que se hace necesaria la incorporación de un sistema que sea capaz de recargar las baterías. Se propone el vehículo de pila de combustible.

Los resultados del vehículo de pila de combustible son satisfactorios, puesto que cumple todos los requerimientos planteados y sólo es superado en rendimiento y consumo por el vehículo eléctrico, que se ha desechado por su largo tiempo de recarga; el vehículo de pila de combustible puede realizar una recarga completa en minutos.

A1.2.2. Optimización del sistema de energía de un vehículo de pila de combustible

La segunda fase de simulaciones consiste en ensayar, en el mismo ciclo mixto que la fase anterior, vehículos de pila de combustible diferentes según el sistema auxiliar de energía que utilizan, de cara a seleccionar el sistema óptimo para la tercera fase de simulaciones. En la Tabla 132 se muestran los resultados de los vehículos de pila de combustible con baterías de Ni-MH, lón-Li, plomo-ácido y con ultracapacitores.

Tabla 132. Principales resultados de la segunda fase de simulaciones.

Sistema de almacenamiento	Potencia de la batería	Rendimiento (η)	Consumo
	kW	%	l eq*/100km
Ni-MH	20	21	4
lón-Li	12	27,6	3,1
Pb-ácido	20	20	4,2
ultracapacitor	55	23,4	3,6

La opción energéticamente más óptima es la de baterías de ión-litio, si bien los ultracapacitores consiguen también resultados satisfactorios. El inconveniente de utilizar este tipo de sistema de almacenamiento de energía es que, debido a su baja energía específica, obliga a utilizar una pila de combustible de mayor tamaño. Esta circunstancia, unida a un alto precio por tratarse de una tecnología reciente, lleva a seleccionar como opción óptima el vehículo de pila de combustible con baterías tipo ión-litio.

A1.2.3. Dimensionamiento del sistema energético

La tercera fase de simulaciones consiste en dimensionar los componentes del sistema energético del vehículo seleccionado en la fase anterior de manera que se consiga la máxima eficiencia energética según el ciclo en el que se simule. Se utilizan ahora los 6 ciclos citados previamente, donde el 1 es el más urbano y el 6 es el más suburbano.

Tabla 133. Dimensionamiento óptimo del sistema energético del vehículo

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6
Potencia de la batería [kW]	25	25,5	25	25	28	17
Potencia de la pila de combustible [kW]	5	7	12	17	60	65
Energía proporcionada por la batería [kJ]	242	157	1604	668	1409	300
Energía proporcionada por la pila de combustible [kJ]	560	448	5380	3251	7165	5848

Para representar los resultados, se define un parámetro que consiste en el cociente entre la potencia de las baterías y la potencia total del sistema energético. La Figura 148 muestra las proporciones obtenidas en cada ciclo así como la evolución de este parámetro según sea el tipo de ciclo.

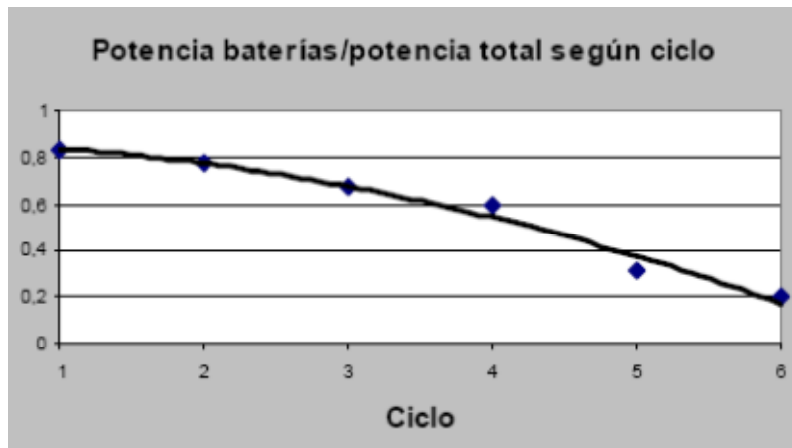


Figura 148. Evolución de la proporción “potencia baterías/potencia total” según el tipo de ciclo.

Se observa que el sistema auxiliar de energía, es decir, la batería, tiene una gran importancia en los ciclos de carácter urbano, debido a la alta variabilidad de la demanda; dicho sistema almacena la energía producida por el sistema principal de energía, la pila de combustible, en los momentos en que la demanda es nula o baja, para liberarla en momentos de elevada sollicitación, típicamente aceleraciones. Este modo de funcionamiento posibilita la utilización de pilas de combustible de potencia relativamente baja, con los consiguientes beneficios en consumo, peso y coste.

Conforme los ciclos adquieren un carácter más suburbano, la importancia del sistema de energía auxiliar disminuye, ya que la demanda pasa a ser más constante, y a su vez el sistema principal aumenta su tamaño, lo que explica la tendencia observada en la gráfica.

Los datos de la gráfica anterior se pueden utilizar como pauta para dimensionamiento en la primera fase del diseño del sistema energético para un vehículo de pila de combustible y sistema auxiliar de energía.

A1.3. Análisis de los Resultados

Para observar en qué medida es importante un correcto dimensionamiento del sistema principal y auxiliar de energía, se han ensayado todos los vehículos (cada uno dimensionado de manera óptima para un ciclo en concreto) en todos los ciclos de funcionamiento. En la Tabla 134 aparecen los consumos, expresados en litros equivalentes de gasolina cada 100 km, de los vehículos dimensionados para un determinado ciclo (filas) en los diferentes ciclos (columnas).

Tabla 134. Consumos en litros equivalentes de gasolina /100km del vehículo i en el ciclo j

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6
Vehículo diseñado para cumplir el ciclo 1	5,7	3	no	no	no	no
Vehículo diseñado para cumplir el ciclo 2	7,3	2,8	no	no	no	no
Vehículo diseñado para cumplir el ciclo3	9,9	3,6	3,1	no	no	no
Vehículo diseñado para cumplir el ciclo4	9,7	4,3	3,3	2,9	no	3,7
Vehículo diseñado para cumplir el ciclo 5	18,2	10,5	4	4,1	4	3,6
Vehículo diseñado para cumplir el ciclo 6	9	4,2	3,5	3,2	no	3,3

Los resultados óptimos aparecen en la diagonal, es decir, en los vehículos simulados en el ciclo para el cual se han optimizado. Las posiciones por encima de la diagonal representan vehículos simulados en ciclos más suburbanos de los que se han utilizado para optimizarlos. Debido al tamaño reducido de sus pilas de combustible, en ocasiones no consiguen completar el ciclo satisfactoriamente; en esos casos aparece “no”. La mayor diferencia de consumo con respecto a la opción óptima se da al simular el vehículo optimizado para el ciclo 5 (suburbano), en el ciclo 2 (urbano), que asciende a 3.75 veces.

En la Tabla 135, con el objetivo de tener un punto de comparación con la situación actual, se muestran los resultados del vehículo convencional, tanto ciclo Otto como Diesel, en todos los

ciclos de funcionamiento. Además aparecen los datos del vehículo de pila de combustible para cada ciclo así como las eficiencias de todos ellos. Los consumos cada 100 km aparecen en litros equivalentes de gasolina:

Tabla 135. Consumos y rendimientos en todos los ciclos

Vehículo		Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6
Otto	Consumo l eq*/100km	43,1	10,8	8,6	7	7,9	7,1
	Eficiencia	1%	4,8%	9,8%	14,8	18,7	20%
Diesel	Consumo l eq*/100km	33,1	8,6	7,1	6,1	7,1	6,1
	Eficiencia	1,3%	6%	11,9%	17%	20,8%	23,7%
Pila de combustible	Consumo l eq*/100km	5,7	2,8	3,1	2,9	4	3,3
	Eficiencia	7,6%	18,5%	27,4%	35,8%	37%	44%

A continuación se muestran gráficamente estos resultados:

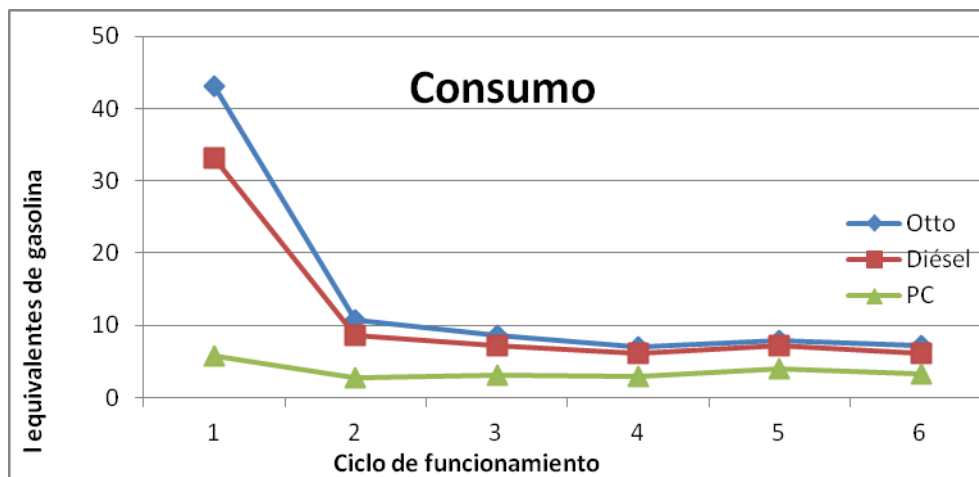


Figura 149. Consumo vehículos pila de combustible vs. tradicionales

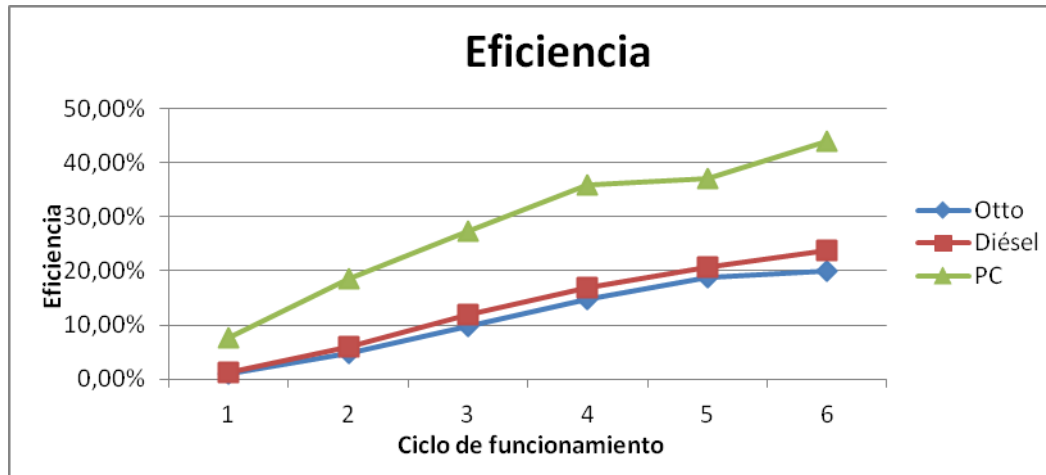


Figura 150. Eficiencia vehículos pila de combustible vs. tradicionales

A1.4. Conclusiones

Del trabajo desarrollado se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Se ha proporcionado un punto de partida en el dimensionamiento del sistema energético de vehículos de pila de combustible.
- La proporción entre potencia del sistema auxiliar y potencia total del vehículo según el tipo de ciclo en el que se simula alcanza valores que varían aproximadamente desde un 80% para el ciclo más urbano hasta un 20% conforme los ciclos adquieren un carácter más suburbano.

La importancia relativa del sistema auxiliar de energía frente al primario es muy alta en ciclos urbanos debido a la variabilidad de la demanda energética para descender hasta valores bajos en ciclos de carretera en los que dicha demanda es casi constante.

- La importancia de realizar un dimensionamiento óptimo acorde con el ciclo de utilización del vehículo es elevada, observándose unas diferencias de consumos de hasta 3,75 veces al comparar, en un ciclo en concreto, un vehículo optimizado para ese ciclo con otro dimensionado para un ciclo distinto, teniendo en cuenta que ambos vehículos cuentan con el mismo tipo de sistema energético y que sólo varía el tamaño de los componentes.
- Los rendimientos de los vehículos de pila de combustible son superiores a los convencionales comercializados actualmente.

ANEXO 2. Sistemas de Almacenamiento de Energía

En este anexo se analizan los sistemas de almacenamiento y producción de energía susceptibles de ser utilizados en vehículos híbridos. Para ello se establece la siguiente clasificación:

- Sistemas primarios o activos: son aquellos que son capaces de proporcionar energía a partir de un proceso termoquímico, físico o mecánico por sí mismos. Un ejemplo lo constituye la pila de combustible.

Tabla 136. Características de sistemas de energía primarios

Sistema	Densidad de energía	Densidad de potencia	Rendimiento
Motor térmico	Depende del combustible almacenado	1 kW/kg (según tipo)	≈ 15%
Pila de combustible	Depende del combustible almacenado	1,4 kW/litro	≈ 60%
Batería máquina	110 Wh/kg	150 W/kg	75%

- Sistemas secundarios o pasivos: son aquellos que se limitan a almacenar energía en una forma determinada y cederla en otro momento en esa misma forma. Es decir, se limitan a tomar y ceder cantidades de energía a modo de reserva. Un ejemplo lo constituyen las baterías convencionales.

Tabla 137. Características de sistemas de energía secundarios

Sistema	Densidad de energía	Densidad de potencia	Vida útil (nº ciclos)
Disco inercia (flywheel)	< 150 Wh/kg	2 kW/kg	ilimitado
Supercondensador	1 - 10 Wh/kg	10 kW/kg	> 500.000
Sistema neumático	60 Wh/kg	Elevado	ilimitado
Sistema hidráulico	10 Wh/kg	1,5 kW/kg	ilimitado
Baterías de plomo-ácido	35 - 50 Wh/kg	150 - 900 W/kg	1000
Baterías otros pares	50 - 220 Wh/kg	30 - 200 W/kg	200 - 2000

A2.1. *Sistemas Primarios o Activos*

A2.1. 1. *Pilas de combustible*

Una pila de combustible es un sistema primario de energía en el cual se produce energía eléctrica en forma de corriente continua a partir de la reacción del hidrógeno y el oxígeno, siendo esta la reacción química inversa a la electrólisis.

Se trata de dispositivos de un alto rendimiento, pudiendo superar el 60%, en contraste con el otro modo también utilizado para obtener energía a partir de hidrógeno; usar un motor de combustión interna, el cual tiene el rendimiento limitado por el ciclo de Carnot y alcanza valores muy inferiores.

Existen varios tipos de pilas de combustible; las de alta temperatura (entre 600°C y 1000°C) suelen utilizar electrolito de óxido sólido (SOFC) y son adecuadas para grandes plantas estacionarias. Las de temperatura intermedia (200°C), que normalmente utilizan electrolito de ácido fosfórico (PAFC) son apropiadas para plantas estacionarias de pequeño tamaño. Las de baja temperatura (entre 60°C y -230°C), que utilizan un electrolito de hidróxido de potasio alcalino (AFC), utilizadas en aplicaciones especiales. Y otras, como la de carbonatos fundidos (MCFC) o las poliméricas, a las que se dedicará especial atención por ser las utilizadas en las aplicaciones de automoción (PEMFC y DMFC).

El desarrollo de las membranas de intercambio de protones (PEM) ha propiciado la utilización de este tipo de dispositivos en vehículos. Se trata de una membrana más pequeña y ligera que las empleadas en el resto de pilas de combustible que opera a unos 60°C – 100°C y por sus dimensiones y peso es apropiada para su uso en automoción.

Tabla 138. Tipos de pila de combustible y sus principales características

Fuente: **Elaboración propia a partir de las fuentes consultadas**

Tipo	Electrolito	Tª operación	Electrodo	Ventajas	Inconvenientes
PEMFC	Membrana intercambio protónico. Nafión®	60-100 °C	Platino	Reducida corrosión y mantenimiento. Baja tª. Arranque rápido	Catalizadores costosos. Sensibles a impurezas en el hidrógeno u otro combustible
DMFC	Membrana intercambio protónico. Nafión®	60-100 °C	Platino	Reducida corrosión y mantenimiento. Baja tª. Arranque rápido	Catalizadores costosos. Sensibles a impurezas en H ₂ u otro combustible
AFC	KOH	90-100 °C	Níquel	Alta eficiencia. Reacción catódica más rápida	Muy sensibles a impurezas y CO ₂
MCFC	Mezcla carbonatos	600-1000 °C	Níquel	Alta eficiencia y catalizadores más baratos	Corrosión. Baja vida útil
PAFC	Ácido fosfórico	175-200 °C	Platino	65% eficiencia en cogeneración. Acepta H ₂ impuro	Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen
SOFC	Zirconia, Ytria	600-1000 °C	Perovskitas	Reducida corrosión y mantenimiento. Alta eficiencia y catalizadores más baratos	Corrosión. Baja vida útil

Una pila de membrana de intercambio de protones o polimérica combina ánodo, cátodo y electrolito en una sola unidad conocida como MEA (*membrane electrode assembly*). El funcionamiento y la descripción son los siguientes (Figura 151):

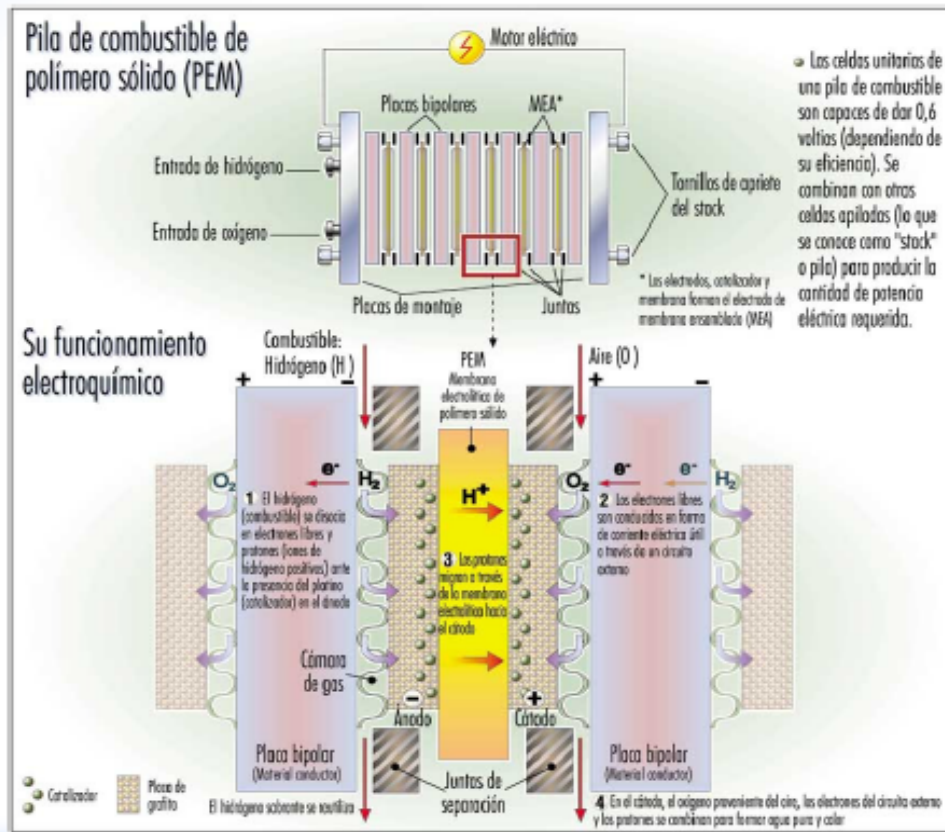


Figura 151. Pila de combustible PEM

En los extremos izquierdo y derecho se observan las láminas que conducen hidrógeno y aire (u oxígeno). Avanzando hacia el centro (según la imagen) aparecen el cátodo en lado aire (derecha) y ánodo en el lado hidrógeno (izquierda). Ambos electrodos son porosos y permiten el paso de aire e hidrógeno hacia la capa de catalizador que hay entre electrodos y membrana.

Dicho catalizador propicia que se produzca la reacción química que genera la corriente eléctrica: el hidrógeno pierde su electrón, que recorre el circuito externo, creando así la corriente externa, y el protón resultante atraviesa la membrana para combinarse con el oxígeno del lado derecho y formar agua.

Hasta ahora se ha explicado el funcionamiento de una sola célula; puesto que cada una de ellas produce una tensión que se sitúa en torno a los 0.7 V, se deben agregar varias de ellas, formando lo que se conoce como pila o "stack" (Figura 152).



Figura 152. Stack de pila de combustible

Fuente: Stack Mark902 de Ballard

A2.1.1.1. Integración en el vehículo y funciones

Se trata de un dispositivo que puede alcanzar cierto peso y volumen, por lo que es preciso tener en cuenta su ubicación a la hora del diseño del vehículo, ya que puede afectar a su reparto de pesos. No obstante, los avances que se producen en el apartado de la potencia específica propician que un vehículo medio - grande pueda impulsarse con apenas 100kg de células de combustible.

No hay que olvidar, aunque no sea el objeto principal de este estudio, que un sistema de pila de combustible siempre va ligado a un sistema de almacenamiento de hidrógeno (o de producción, en algunos casos), por lo que la exigencia total de espacio será mayor que la que plantee únicamente la pila en sí. De hecho, el suministro de hidrógeno es el aspecto que más restricciones plantea, lo que nos lleva a la obligación de considerar conjuntamente pila de combustible y sistema de abastecimiento de hidrógeno a la hora de plantear su integración en el vehículo. A este respecto, la pila de combustible suele ubicarse en el vano motor, mientras que los depósitos de hidrógeno (o el sistema para producirlo) ocupan posiciones más variadas: bajo el piso, en la zona del maletero, o en el techo, cuando el tipo de vehículo lo permita. La unión con el resto de componentes será sólo eléctrica, lo que supone que no hay necesidad de uniones mecánicas, circunstancia que genera una libertad adicional a la hora de posicionar la pila de combustible en el vehículo.

Por otro lado, cabe destacar que es un dispositivo del que todavía se esperan mejoras importantes, esperándose alcanzar en un plazo de sólo unos años los 2kW/litro de potencia específica, así como temperaturas de arranque inferiores a los -25°C.

A2.1.1.2. Valoraciones económicas

El coste de estos componentes se reduce continuamente, debido sobre todo al aumento en la demanda que están experimentando. En la actualidad, un valor aproximado pueden ser unos 60€, aunque se espera que dicha cifra siga reduciéndose, puesto que se espera un muy notable aumento de demanda en los próximos años.

No obstante, hay que tener presente, que una pila de combustible por sí misma no es suficiente; siempre debe ir acompañada por su sistema de aprovisionamiento de hidrógeno. Al comparar, por ejemplo, una batería convencional con una pila de combustible, se tiene que, por un lado, la batería en sí misma es independiente y no necesita dispositivos externos para proporcionar energía (mientras permanezca cargada). Para que dicha comparación fuese seria deberíamos sumar, para el caso de la pila de combustible, peso volumen y coste, tanto de la pila como de su sistema de aprovisionamiento de hidrógeno.

A2.1. 2. Baterías máquina

Las baterías máquina son sistemas de almacenamiento de energía basados en reacciones químicas de oxidación – reducción entre electrodos que necesitan un sistema auxiliar que los mantenga en condiciones adecuadas para su operación.

Se consideran por lo tanto, sistemas primarios de energía, ya que necesitan un aporte externo para funcionar, a diferencia de los sistemas secundarios, que una vez han sido cargados, pueden proporcionar energía sin aporte externo.

Se trata, al igual que una batería convencional, de acumuladores colocados en serie para conseguir el voltaje deseado. Dichos acumuladores están formados por cátodo y ánodo, normalmente inmersos en un baño electrolítico, según el tipo, donde tienen lugar las reacciones químicas de oxidación y reducción que se producen en la carga y descarga del sistema.

Todos los tipos necesitan sistemas auxiliares que mantengan las condiciones de operación dentro de unos valores predeterminados.

Existen varios tipos de baterías máquina en función de los pares que las conforman:

A2.1.2.1. Baterías Na-S

Está formada por electrodo de azufre líquido y un electrolito de sodio, separados por una lámina de "beta – alúmina". Para su correcto funcionamiento debe encontrarse a unos 350 °C y nunca caer por debajo de 200°C por lo que necesita un sistema auxiliar de calentamiento, de ahí que sea considerada una batería máquina.

Tabla 139. Características principales de la batería Na-S

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	110 Wh/kg
Densidad de potencia	150 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	1000 ciclos
Tensión de salida	2,1 V / acumulador
Coste mínimo	125 € /kWh
Tª de operación	350°C

A2.1.2.2. Baterías Na - NiCl

Se trata de una evolución del tipo anterior, ya que deriva de éste, sustituyendo el electrodo positivo de la anterior por otro de Ni-Cl; la constitución de la batería es muy similar, pero sus

condiciones de operación son más favorables, ya que puede operar correctamente a partir de 300°C.

Potencialmente es menos peligrosa en caso de accidente, debido a la naturaleza menos dañina de sus componentes. Necesita, aunque en menos medida que la anterior, un sistema auxiliar que mantenga las condiciones óptimas de operación.

Tabla 140. Características principales de la batería Na-NiCl

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	100 Wh/kg
Densidad de potencia	150 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	1000 ciclos
Tensión de salida	2,1 V / acumulador
Coste mínimo	200 € /kWh
Tª de operación	350°C

A2.1.2.3. Baterías Li-FeS

Se trata de una batería con alto potencial para la acumulación de energía, ya que utiliza litio. Para evitar el peligro potencial que conlleva la utilización de este elemento a temperaturas superiores a 400° C se han llevado a cabo numerosos estudios. Como resultado, estas baterías provocan elevados gastos en seguridad y en conservación de la temperatura adecuada. No obstante, sus elevadas prestaciones contrarrestan los citados inconvenientes.

Su electrodo positivo está formado por Fe-S, el negativo por Al-Li, y utiliza una como electrolito una sal no inflamable.

Tabla 141. Características principales de la batería Li-FeS

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	150 Wh/kg
Densidad de potencia	300 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	1000 ciclos
Tensión de salida	1,75-2,1 V / acumulador
Coste mínimo	160 € /kWh
Tª de operación	450°C

A2.1.2.4. Baterías Li-polímero sólido

Utiliza polímeros conductores, lo que hace posible la fabricación de baterías en estado sólido o de construcción flexible. Están compuestas de un electrodo positivo formado por una lámina de aluminio cubierta con óxido de vanadio, un polímero electrolito separando ambos electrodos, y un electrodo de litio. Son robustas y pueden operar, aunque con menor efectividad, a temperatura ambiente, lo cual disminuye los costes ocasionados por el sistema auxiliar de calentamiento, ya que este será mucho menor que en los anteriores casos.

Tabla 142. Características principales de la batería Li-polímero sólido

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	200 Wh/kg
Densidad de potencia	350 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	1000 ciclos
Tensión de salida	1,75-2,1 V / acumulador
Coste mínimo	200 € /kWh
Tª de operación	80-120°C

A2.1.2.5. Baterías Zn-Br

Se trata de montajes relativamente complicados, donde aparecen diversos depósitos que confluyen en otro dividido por una membrana y un sistema de bombas que desplazan los fluidos (ver imagen al final). Su eficiencia energética es del 75%.

Tabla 143. Características principales de la batería Zn-Br

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	80 Wh/kg
Densidad de potencia	150 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	3000 ciclos
Tensión de salida	1,8 V / acumulador
Coste mínimo	elevado
Tª de operación	15-45°C

A continuación se muestra una imagen del esquema de una de estas baterías (Figura 153):

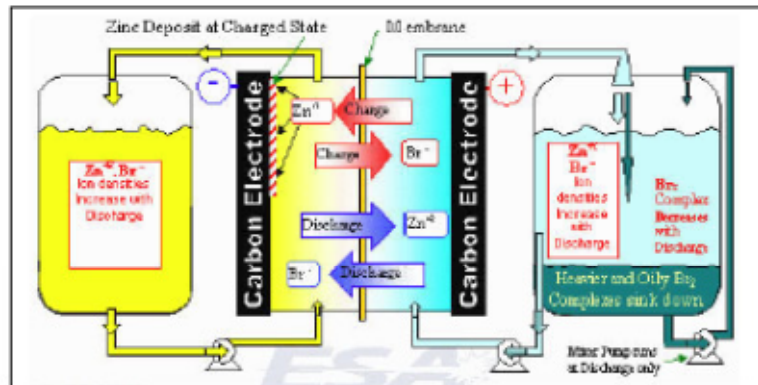


Figura 153. Batería de Cinc - Bromo

A2.1.2.6. Integración en el vehículo y funciones

Para garantizar unas prestaciones mínimas, el número de baterías a incluir es elevado, lo que plantea unas importantes exigencias en cuanto a volumen y peso.

Debido a las recientes normativas de seguridad, no es posible situar las baterías en el vano motor frontal, por lo que una de las soluciones más habitual es situar el grupo de baterías bajo el piso del vehículo. Dicha posición es beneficiosa desde el punto de vista dinámico, ya que el conjunto de baterías puede llegar a suponer una importante parte de la masa total del vehículo, por lo que situarla en una baja cota ayuda a bajar el centro de gravedad.

Además, es preciso que su ubicación sea de fácil acceso, para posibilitar reparaciones o cambios, ya que en el mejor de los casos, son componentes cuya vida útil rara vez excede los 5 años.

Por otra parte, este tipo particular de baterías presenta unas necesidades especiales de temperatura o de movimiento de fluidos, lo cual puede limitar su ubicación. Ésta deberá tener en cuenta la facilidad para conservar altas temperaturas o la disponibilidad de espacio para ubicar los sistemas auxiliares.

Su función principal es la de fuente de energía principal para la tracción del vehículo.

Algunos tipos, gracias a su elevada densidad de potencia, pueden ser utilizados también como sistemas de apoyo al principal, para momentos de elevada demanda, tales como arranques.

La batería de Na-S, aunque puede montarse en vehículos, está más ampliamente extendida para aplicaciones estáticas.

A2.1.2.7. Valoraciones económicas

En general, los costes de estos tipos de batería son elevados, ya que al precio propio de la batería se le debe añadir el de los sistemas auxiliares, lo cual eleva aún más los costes.

Sin embargo, sus elevadas prestaciones hacen que su coste total no sea tan alto.

En el caso concreto de la batería de litio – polímero sólido, la temperatura de operación es cercana a la ambiente, por lo que el coste de dichos sistemas auxiliares será menos influyente.

En general, las baterías tipo máquina ofrecen altas prestaciones pero también a un alto coste. Este coste se debe, en parte, a los sistemas auxiliares necesarios para su correcto funcionamiento. Uno de los aspectos que se intentan mejorar es el de las condiciones de operación. Se trata de que éstas se acerquen lo más posible a la temperatura ambiente, con la consiguiente disminución en auxiliares.

Como ya se ha comentado antes, una de estas baterías (la de litio – polímero sólido) no necesita apenas equipos auxiliares. Si además tenemos en cuenta su reducido coste, unos 125 €/kWh, podemos esperar un elevado desarrollo de esta batería a medio plazo.

A2.1. 3. Motor térmico

Los motores térmicos son sistemas primarios de energía en los cuales se genera energía mecánica –el giro del eje de salida- a partir de la reacción química de un combustible. Son dispositivos con unos rendimientos muy bajos, en torno al 15%, y variables, en función del régimen de giro y la carga del motor.

Es el sistema más ampliamente utilizado en automoción en su versión de cuatro tiempos y también aparece en la mayoría de vehículos híbridos lanzados recientemente. Existen dos tipos principales, en función de su ciclo: los de ciclo Otto utilizan gasolina y su rendimiento suele ser algo inferior a los de ciclo Diesel, cuyo combustible es el gasoil. El funcionamiento consiste en la repetición cíclica de los cuatro tiempos (el motor de dos tiempos no se analiza debido a que su aplicación en automoción es, en este momento, poco relevante). A continuación se describe el funcionamiento de un motor atmosférico de cuatro tiempos de gasolina de inyección indirecta, por ser este tipo el de mayor aplicación en vehículos híbridos:

- Admisión: desciende el pistón con la válvula de admisión abierta para llenar el cilindro de mezcla gasolina-aire.
- Compresión: el pistón sube con todas válvulas cerradas, produciéndose así la compresión de la mezcla.
- Explosión: Unos grados de cigüeñal antes de alcanzarse el punto muerto superior se produce el encendido de la mezcla gracias a la bujía. La mezcla aire-combustible se quema y aumenta de temperatura y volumen, desplazando el pistón hacia abajo, siendo este el único tiempo del motor en el que se genera potencia.
- Escape: el pistón asciende con la válvula de escape abierta y se expulsan los gases de la combustión.

A continuación, una imagen de un motor térmico (Figura 154):

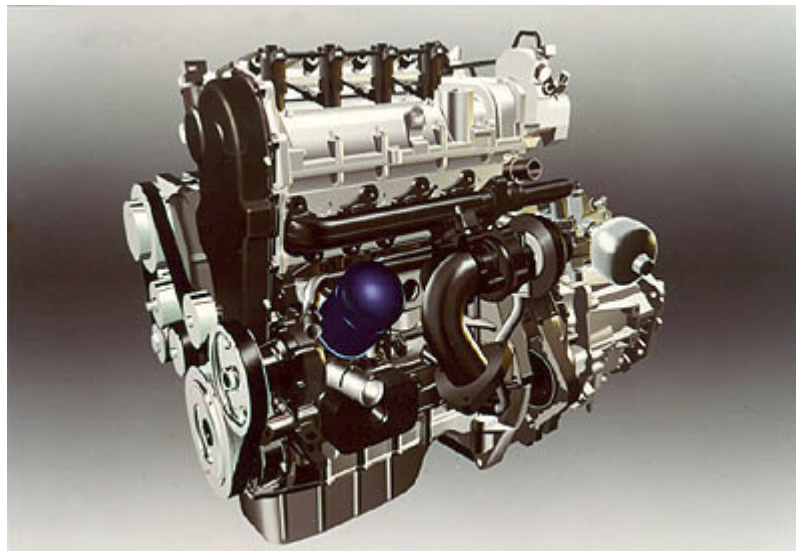


Figura 154. Motor térmico

Tabla 144. Características principales del motor térmico

 Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	Depende del combustible almacenado
Densidad de potencia	1 kW/kg
Rendimiento	20% (según tipo y punto de funcionamiento)
Velocidad giro eje de salida	800-6000 rpm
Coste mínimo	40 €/kW (aprox.)
Emisiones	CO ₂ >100gr CO ₂ /km

A2.1.3.1. Integración en el vehículo y funciones

Se trata de un componente de peso y volumen elevados, por lo que es preciso tener en cuenta su ubicación a la hora del diseño del vehículo, ya que afecta en gran medida al reparto de pesos. Hay que tener en cuenta que, además del bloque motor en sí, también forman parte de él gran cantidad de sistemas auxiliares cuyo volumen total es importante.

Además de las consideraciones del reparto de pesos a la hora de posicionar el motor, también se deben tener en cuenta los aspectos relacionados con la seguridad en caso de accidente, ya que el motor en un bloque muy consistente susceptible de entrar en el habitáculo de seguridad del vehículo.

Otra limitación para su integración en el vehículo está motivada por el hecho de que existe la necesidad de contar con una transmisión mecánica que lo una con el eje motriz, circunstancia que reduce las posibilidades de diseño.

Su función en el vehículo es la de proporcionar la energía suficiente para propulsarlo, así como para alimentar sus sistemas auxiliares.

A2.1.3.2. Valoraciones económicas

Se trata de un componente fabricado en la actualidad a gran escala, por lo que los costes de fabricación de un motor convencional son aceptables. No obstante, su coste depende del modelo y de la calidad de materiales que éste utilice así como el nivel de complejidad tecnológica del mismo.

El argumento anterior se puede interpretar también de forma negativa; así como otros sistemas de producción de energía aún en desarrollo pueden disminuir significativamente sus costes y aumentar sus prestaciones, no se espera un gran avance en costes o en prestaciones en los motores térmicos, puesto que es un componente muy estudiado y desarrollado en el que sólo pueden aparecer mejoras de relativa relevancia.

No obstante, aunque el motor térmico no pueda dar un salto cualitativo como lo puede hacer la pila de combustible en futuras versiones, sí que existen algunos nuevos conceptos que pueden aumentar su competitividad. Algunos de estos avances son la inyección directa a muy alta presión en diesel, la inyección directa con mezcla empobrecida en gasolina, motores cerámicos, turbo y compresor con *by-pass* pilotado, etc.

A2.2. *Sistemas Secundarios o Pasivos*

A2.2.1. *Discos de inercia*

Sistema secundario de almacenamiento de energía en forma de energía cinética, también conocidos como “flywheel”.

Está formado por discos de carbono girando a alta velocidad en el interior de una carcasa. Tanto rotor como estator montan imanes que sirven de rodamientos magnéticos al tiempo que funcionan como medio de carga y descarga del sistema. En el interior se realiza un elevado vacío, que unido a los rodamientos magnéticos reducen la fricción hasta valores muy bajos.

La energía almacenada es proporcional al radio del disco y al cuadrado de la velocidad angular, tal y como se aprecia en la fórmula:

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

[Ec. 57]

Por lo tanto se buscan pequeños radios y altas velocidades angulares, ya que el aumento del radio somete a más tensión al material del disco y crea mayores efectos giroscópicos. La forma ideal de dicho disco es la de sección troncocónica, que iguala la tensión generada por el giro para cualquier radio.

El material más extendido para la fabricación del disco es la fibra de carbono, ya que la relación entre resistencia a tracción y densidad está directamente relacionada con la cantidad de energía acumulable. Por otro lado, esta elección de material también es adecuada desde el punto de vista de la seguridad, ya que en caso de accidente, el composite se desintegra, comportándose como un fluido, en lugar de como fragmentos de sólido. Con esto se consigue disipar mejor la energía.

Para lograr una mayor densidad energética, en ocasiones se procede al pretensado del disco, de forma que soporte mayores velocidades de giro.

Se prefiere utilizar grupos de dos discos girando en sentido contrario para cancelar los citados efectos giroscópicos.

Tabla 145. Características principales de los discos de inercia

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	< 150 Wh/kg
Densidad de potencia	2 kW/kg
Nº ciclos	Ilimitados
Velocidad de giro	1,8 V / acumulador
Vida útil	30 años (aprox.)

A continuación, algunas figuras esquemáticas del sistema (Figura 155):

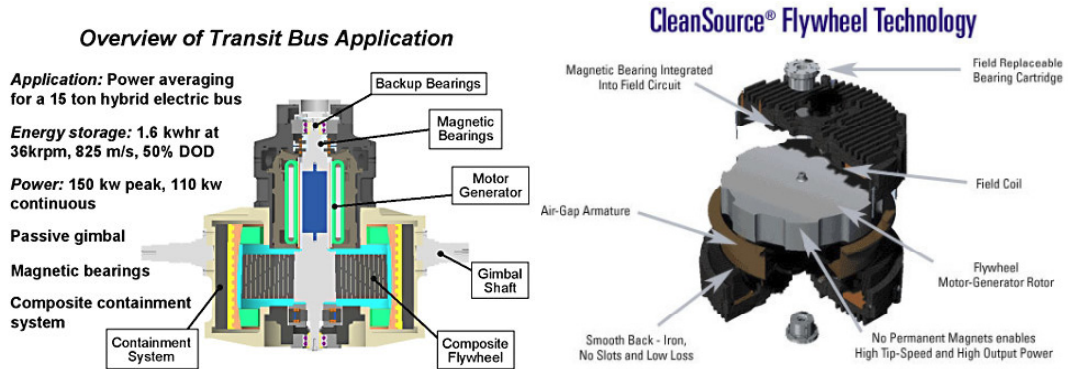


Figura 155. Disco de inercia

A2.2.2.1. Integración en el vehículo y funciones

La integración en el vehículo de un *flywheel* no debe plantear excesivos problemas, ya que existe cierta libertad por el hecho de que su conexión con el resto del sistema de tracción se limita a cableado. Por otra parte, su contenido peso y tamaño tampoco crean limitaciones de posición en el vehículo.

Un aspecto que sí que puede influir es el de la seguridad en caso de accidente y liberación incontrolada de toda su energía cinética; en este aspecto, para los sistemas cuyas carcasas no sean capaces de retener en su interior toda la energía, conviene posicionarlos en los lugares que puedan resultar menos dañinos en el vehículo.

Con relación a este aspecto, se trabaja en sistemas que dirijan los fragmentos del disco en todas direcciones, para aumentar el área de impacto en la carcasa y así reducir su intensidad, así como carcasas interiores con capacidad de rotación para absorber energía en caso de accidente.

La función principal de este sistema en un vehículo es la de generar o absorber grandes cantidades de potencia en cortos periodos de tiempo, ya que para periodos largos de utilización, las pérdidas son apreciables.

Debido a su elevada velocidad de carga y descarga, puede utilizarse conjuntamente con una célula de combustible, supliendo las carencias de ésta en momentos de elevada demanda. También es muy útil para recuperar la energía proveniente del frenado regenerativo. Otra alternativa, ya usada en tranvías híbridos, es la de recargas rápidas en estaciones.

El modo de operación de este tipo de sistemas es el siguiente: para su carga absorbe energía y actúa como motor, incrementando su velocidad angular. Cuando genera energía actúa como alternador, disminuyendo su velocidad angular.

Se concibe principalmente como medio auxiliar de almacenamiento de energía, aunque cabe la posibilidad de hacerlo funcionar como sistema principal de almacenamiento, utilizando versiones avanzadas con una velocidad de rotación de 200.000 rpm que proporcionarían autonomías cercanas a 500 km.

A2.2.2.2. Valoraciones económicas

El coste de estos sistemas es muy alto en la actualidad, lo que le impide ser una alternativa real. Esto se debe a que se trata de una tecnología menos madura que la de las baterías, por ejemplo, y que el hecho de tratar con velocidades angulares tan elevadas exige gran calidad y cuidado, tanto en materiales como en diseños y a la hora de practicar experimentos.

A2.2.2. Ultracapacitores

Sistema auxiliar de energía basado en condensadores de altas prestaciones.

Los supercapacitores o ultracapacitores (también conocidos como “*electrochemical double layer capacitors*, *EDLC*, condensadores electroquímicos de doble capa” son condensadores en los que los electrodos están fabricados en materiales basados en carbono poroso, de alta densidad de superficie, el cual forma una fina capa de frontera con el electrolito, generando así un condensador de bajo voltaje pero de alta capacidad. Los prefijos “ultra” y “super” responden a la elevada superficie conseguida, normalmente por encima de los 2.000 m²/g.

El electrolito puede ser orgánico o una solución de sales, el cual proporciona alta densidad de energía, o ser un ácido acuoso, el cual proporciona elevada capacidad y potencia.

Los electrodos pueden estar hechos de carbono o de óxido de metal, siendo la fibra de carbono activada el material preferido en un 85% de los casos.

Habitualmente se asocian varias células en serie o en paralelo creando un módulo con el fin de conseguir el voltaje o la capacidad deseados, ya que todavía no se pueden conseguir altas tensiones por célula. Esta circunstancia hace disminuir la eficiencia volumétrica.

Su funcionamiento se basa, como cualquier condensador, en mantener dos electrodos cargados con polaridades opuestas, creando así un campo eléctrico que almacena la energía. En el momento de su carga toma energía del exterior en forma de corriente eléctrica

y se genera el campo eléctrico que almacena la energía. Cuando se descarga, genera corriente eléctrica que proporciona al exterior y dicho campo eléctrico desaparece.

Tabla 146. Características principales del supercondensador

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	1-10 Wh/kg
Densidad de potencia	10kW/kg (aprox.)
Capacidad	1-1000F (previsión)
Intensidad máxima	<500 A
Nº ciclos	> 500.000
Tiempo carga o descarga	0.3 – 30 s
Eficiencia carga o descarga	85 - 95 %
Vida útil	> 10 años (aprox.)

A2.2.2.1. Integración en el vehículo y funciones

Debido a su pequeño tamaño y a la ausencia de conexiones mecánicas, no plantea grandes exigencias en cuanto a su integración en el vehículo. Además, debido a su casi nulo mantenimiento no tiene la necesidad de ser colocado en lugares accesibles, tal y como sucede con las baterías, por lo que existe casi total libertad a la hora de ubicarlo en el vehículo.

Algunos fabricantes lo han colocado tras los respaldos de los asientos traseros, aprovechando su reducido tamaño y peso.

Su función principal es la de satisfacer demandas puntuales y elevadas de potencia, ya que su limitada densidad de energía los hace inviables, al menos a corto plazo, como dispositivos de almacenamiento para todas las necesidades del vehículo

Este tipo demandas son las siguientes:

- Freno regenerativo: es capaz de absorber toda la energía generada, debido a su alta densidad de potencia, a su alta eficiencia de carga y descarga y a que puede soportar intensidades del orden de cientos de amperios.
- Aceleraciones puntuales: por ser capaz de liberar su energía en periodos de tiempo muy cortos y con alta eficiencia.
- Ciclos con gran número de paradas y arranques: ya que combinando los dos tipos anteriores de utilización, unido a su gran vida útil, consiguen eficiencias energéticas totales cercanas al 50% en caso de estar asociados con pila de combustible como fuente principal.
- Asociado con una pila de combustible: se puede conectar directamente a la pila de combustible, ya que su tensión es proporcional al estado de carga. Da respuesta a las fluctuaciones de tensión de la pila, haciendo a su vez que ésta trabaje de una manera más regular y eficiente.

Su papel, salvo en excepciones, es el funcionar como sistema de almacenamiento auxiliar.

A continuación, al tratarse de los sistemas de almacenamiento de mayor aplicación en los vehículos, se recogen las diferencias principales entre los ultracapacitores y las baterías.

Tabla 147. Características Ultracapacitores vs. Baterías

 Fuente: **Elaboración propia**

Ultracapacitor	Batería
Mayor densidad de potencia y menor densidad de energía	Menor densidad de potencia y mayor densidad de energía
Puede suministrar pulsos frecuentes de energía sin efectos residuales	Su vida útil disminuye si se utiliza para suministrar pulsos de energía
Recarga extremadamente rápida	Recarga lenta. Se pueden dañar si se cargan de forma rápida
Vida útil de varios miles de ciclos de carga/descarga	Vida útil de apenas unos cientos de ciclos de carga/descarga
Puede ser almacenado totalmente descargado	Se daña de forma irreversible si se descarga en exceso
Amplio rango de temperaturas de funcionamiento	Funcionamiento deficiente por debajo de los -10°C
La capacidad se puede calcular fácilmente en tiempo real	Difícil de calcular la capacidad

A2.2.2.2. Valoraciones económicas

En la actualidad el coste se sitúa por encima de las baterías convencionales de ácido y plomo, aunque por debajo de otro tipo de baterías como, por ejemplo, las de Ni-MH.

Sin embargo, su eficiencia en carga y descarga, su casi nulo mantenimiento y su mejor operación en frío hace que pueda resultar mejor que las baterías Ni-MH.

En cualquier caso, su elección depende de los requerimientos, ya que en cuanto a densidad de potencia supera a todos los tipos de batería.

Su coste de mantenimiento es muy reducido - casi nulo - y su coste de fin de uso es menor que el de las baterías. Por lo tanto, su valoración económica puede ser positiva en casos en los que la inversión inicial es superior a otras alternativas.

A2.2.3. Sistema neumático (aire comprimido)

Sistema que acumula energía en forma de aire a alta presión.

Cosiste básicamente en un depósito destinado a contener el aire a alta presión. Para poder funcionar debe estar asociado con un compresor, capaz de introducir el aire a presión, y con un motor de aire comprimido o con una máquina reversible capaz de sustituir a las dos anteriores.

Su modo de funcionamiento es el siguiente: en momentos de carga, el compresor debe ser accionado externamente para conseguir introducir aire a presión en el depósito o bien el aire presurizado es introducido directamente; en momentos de descarga, el aire a presión liberado acciona el motor de aire comprimido, proporcionando así energía al exterior.

Tabla 148. Características principales del sistema neumático

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	60 Wh/kg
Presiones tanques	300 bar
Peso tanques vacíos	0.4 kg/litro
Volumen aire	100 litros/tanque
Peso motor de aire	40 kg (según tamaño)

La densidad de potencia de los tanques se sabe que es elevada, por lo que la limitación en una demanda elevada y puntual la imponen otros elementos del sistema, normalmente el motor de aire.

A2.2.3.1. Integración en el vehículo y funciones

Para lograr una buena integración del sistema en el vehículo se debe tener en cuenta de qué tipo de vehículo se trata, ya que la ubicación del sistema condicionará la estabilidad y el reparto de pesos.

Puesto que se trata normalmente de sistemas alargados, su disposición habitual es horizontal y transversal, normalmente en la parte trasera del vehículo, o en el techo, en caso de que sea posible.

Debido a tratarse de un sistema que opera en condiciones de alta presión, contará con los pertinentes sistemas de seguridad. Sin embargo, en este caso, al tratarse de aire comprimido, gas no explosivo, las normativas de seguridad no suponen un inconveniente de importancia. Su función podría ser similar a la de un acumulador hidráulico, es decir, absorbiendo o generando grandes cantidades de potencia en cortos periodos de tiempo; sin embargo, a diferencia de los acumuladores hidráulicos, este sistema también se muestra capaz de proporcionar energía suficiente como para impulsar un vehículo durante una distancia significativa.

De hecho, se han desarrollado ya vehículos urbanos donde la tecnología queda probada, alcanzándose autonomías de 200 km con repostajes de apenas 3 minutos.

Su modo de operación es el que sigue: en los momentos de carga del sistema, un compresor es accionado gracias a la energía aportada de manera externa al sistema, el cual introduce el aire a alta presión en el depósito; en momentos de descarga el depósito se vacía y el motor de aire a presión lo aprovecha para proporcionar energía al exterior.

Su función principal será, por tanto, la de sistema de almacenamiento de energía auxiliar, aunque también existen en la actualidad proyectos completamente desarrollados de vehículos que lo utilizan como fuente principal de energía.

A2.2.3.2. Valoraciones económicas

El sistema está formado por elementos neumáticos, cuyo mercado está ampliamente desarrollado por su utilización en múltiples campos, por lo que el coste de los elementos es aceptable.

Además, dichos componentes, que no son muy complejos, gozan de bastante robustez, lo que posibilita que el coste de mantenimiento sea bajo.

Su economía de utilización es reseñable, ya que el consumo de aire en ciclo urbano durante 100 km es de 1€ aproximadamente (para el caso de vehículos experimentales ligeros)

Como inconvenientes aparecen la necesidad de sistemas auxiliares para la producción de calor, con su coste y consumo correspondientes.

Por otro lado, el hecho de que el escape de aire se produzca a temperaturas cercanas a 0 °C elimina la necesidad de un sistema de aire acondicionado.

Esta tecnología aparece como prometedora para solucionar los problemas de movilidad en un ámbito urbano; sin embargo, no ha experimentado el desarrollo esperado.

A2.2.4. Sistema hidráulico

Sistema que acumula energía en forma de aceite a alta presión.

Cosiste en un sistema con un depósito capaz de operar a altas presiones dentro del cual una membrana altamente deformable separa el aceite de un gas, normalmente nitrógeno, que es el que se comprime al llenarse el depósito.

Conjuntamente se monta una bomba / motor hidráulico, que permite almacenar y generar energía según sea la situación de excedencia o de necesidad de energía. También debe existir otro depósito de baja presión, del cual se toma el aceite cuando el sistema se carga y al cual se devuelve el aceite cuando el sistema se descarga.

Tabla 149. Características principales del sistema hidráulico

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Presión del depósito	350 bar
Capacidad de energía	>160 Wh/unidad completa (aprox)
Capacidad de potencia	280 kW/unidad completa (aprox)
Peso del conjunto	180 kg/unidad completa (aprox)

Los datos de densidad de potencia son elevados, de manera que una unidad tipo como a la que se hace referencia en la anterior tabla es capaz de impulsar un vehículo de unos 4500 kg desde 0 hasta unos 45 km/h sin necesidad de aporte externo de energía.

El tamaño varía según los casos, pero en general suele ser demasiado voluminoso para ser montado en vehículos turismos o urbanos convencionales.

A2.2.4.1. Integración en el vehículo y funciones

Para conseguir una integración correcta del sistema en el vehículo se debe tener en cuenta el tipo de vehículo en cuestión, ya que su ubicación condicionará la estabilidad y el reparto de pesos.

El tamaño y peso de estos sistemas, como ya se ha comentado, es excesivo para vehículos urbanos o de turismo, por lo que su aplicación más adecuada es en pequeños camiones, tales como flotas de reparto, cuyo ciclo de funcionamiento es propicio, con gran número de arranques y paradas.

Puesto que se trata normalmente de sistemas alargados, su disposición habitual es horizontal y transversal o longitudinal, según cada caso. De cualquier manera, siempre están sujetos a la restricción de estar acoplados mecánicamente, por lo que su posición más habitual es cerca de la transmisión.

Debido a tratarse de un sistema que opera en condiciones de alta presión, contará con los pertinentes sistemas de seguridad.

Su función principal es similar a la de un *flywheel* o a la de una batería de alta descarga, es decir, la de proporcionar o absorber altas cantidades de potencia en periodos cortos de tiempo, ya que es incapaz de impulsar el vehículo durante largas distancias.

Una diferencia importante entre este sistema y un *flywheel* o una batería, es la existencia de conexión mecánica entre el sistema hidráulico y el tren de rodadura. Normalmente, la conexión se realiza mediante un embrague, el cual acopla el sistema hidráulico en momentos de carga y descarga y lo desacopla el resto del tiempo.

Su modo de operación es en paralelo y, debido a sus características, se utiliza siempre como acumulador de la energía obtenida en frenado regenerativo. Dicha energía es utilizada para la siguiente aceleración, sustituyendo al sistema principal durante el arranque hasta una velocidad aproximada de unos 45 km/h. El sistema es capaz de ofrecer un alto par desde muy bajas velocidades de giro (a veces superiores a los 1.000 Nm).

El sistema suele conseguir unos ahorros de energía del 30%, una reducción de emisiones del 30% y una disminución del desgaste del sistema de frenado de un 50%, cuando es utilizado en ciclos con elevado número de paradas y arranques.

Su modo de operación es el siguiente: en los momentos de carga del sistema, durante el frenado, la bomba hidráulica es accionada gracias a la energía aportada de manera externa al sistema, la cual introduce el aceite a alta presión en el depósito de alta presión; en momentos de descarga el proceso es el inverso; el depósito de alta presión se vacía, el de baja presión se llena y la bomba actúa como motor, liberando así al exterior la energía acumulada.

Por lo tanto, su papel en el vehículo será el de sistema auxiliar de almacenamiento de energía.

A2.2.4.2. Valoraciones económicas

Este sistema está formado por componentes hidráulicos cuyo mercado está suficientemente extendido debido a sus múltiples aplicaciones en otros campos, lo cual propicia que el coste de dichos componentes sea aceptable.

Además, al tratarse de dispositivos robustos, el mantenimiento es mínimo, lo cual contribuye a que su coste de operación sea muy contenido.

Si a todo esto le añadimos los beneficios antes comentados en cuanto a ahorro de combustible, reducción de emisiones contaminantes y reducción de desgaste del sistema de frenos, el periodo normal de recuperación de la inversión (en comparación con la situación de no montar este sistema) suele ser menor de 3 años.

A2.2.5. Baterías tipo plomo-ácido

Sistema de almacenamiento de energía basado en reacciones químicas de oxidación – reducción con electrodos de plomo y electrolito ácido.

Se trata de acumuladores colocados en serie para conseguir el voltaje deseado. Dichos acumuladores están formados por cátodo y ánodo inmersos en un baño electrolítico donde tienen lugar las reacciones químicas de oxidación y reducción que se producen en la carga y descarga del sistema. Para evitar el contacto directo entre los dos electrodos se utilizan separadores.

Existen varios tipos de baterías de plomo – ácido, consecuencia de los avances que han ido produciéndose en esta tecnología:

A2.2.5.1. Baterías de plomo – ácido convencionales

Son baterías similares a las que se comenzaron a fabricar a principios del siglo pasado, en las que sus mayores avances se limitan a la reducción de peso en componentes como la carcasa. Sus electrodos son láminas planas, aunque existen versiones de electrodos tubulares que, aunque aprovechan peor el espacio, aumentan su ciclo de vida respecto a las anteriores de 3 a 5 años.

Necesitan sistemas de venteo para evacuar el hidrógeno producido en momentos de altas exigencias.

Tabla 150. Características principales de la batería de plomo-ácido convencional

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	35 Wh/kg
Densidad de potencia	150 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	1000 ciclos
Tensión de salida	2,1 V/acumulador
Coste mínimo	50 € /kWh

A2.2.5.2. Baterías de plomo – ácido avanzadas

Son una versión mejorada de las anteriores, en las que se han optimizado peso y volumen en las partes inactivas. Se incluyen reactivos sólidos que optimizan la estructura del óxido de plomo, así como reducciones en el grosor de dichos electrodos, aunque sin disminuir su resistencia mecánica. Además se favorece la agitación del electrolito evitando la estratificación de éste.

Estas mejoras favorecen la retención del material del electrodo positivo en descargas rápidas, por lo que mejoran las características generales de la batería.

Tabla 151. Características principales de la batería de plomo-ácido avanzada

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	45 Wh/kg
Densidad de potencia	250 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	1500 ciclos
Tensión de salida	2,1 V/acumulador
Coste mínimo	170 € /kWh

A2.2.5.3. Baterías de plomo – ácido reguladas por válvula

También conocidas como “*valve regulated lead acid, VRLA*”, basan su mejora respecto a las convencionales en el uso de una válvula que sólo permite el venteo de gases producidos en situaciones de alta exigencia cuando la situación es extrema. Además tienen un diseño de electrolito en el que se busca reducir la expulsión de gases mediante la utilización de catalizadores que recombinan oxígeno e hidrógeno en agua.

Esto las hace más seguras, ya que sus expulsiones de hidrógeno son poco habituales, al tiempo que mejora alguna de sus características.

Tabla 152. Características principales de la batería de plomo-ácido regulada por válvula

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	50 Wh/kg
Densidad de potencia	>150 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	>700 ciclos
Tensión de salida	2,1 V/acumulador
Coste mínimo	130 € /kWh

A2.2.5.4. Baterías de plomo – ácido de lámina de metal

Esta versión utiliza como electrodo unas láminas de un grosor muy bajo dispone en forma de espiral. Separadores y electrolito se disponen de igual forma, entre electrodos positivo y negativo, los cuales están separados por distancias inferiores a 1 mm. La superficie de electrodos es muy alta, al tiempo que el aprovechamiento del espacio es elevado. Además, sus resistencia interna se consigue reducir hasta valores del orden de 0.5 mΩ.

Todo esto le confiere unas características diferentes a otras baterías con el mismo par.

Tabla 153. Características principales de la batería de plomo-ácido de lámina de metal
Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	30 Wh/kg
Densidad de potencia	900 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	>500 ciclos
Tensión de salida	2,1 V/acumulador

A2.2.5.5. Integración en el vehículo y funciones

Para garantizar unas prestaciones mínimas, el número de baterías a incluir es elevado, lo que plantea unas importantes exigencias en cuanto a volumen y peso.

Debido a las recientes normativas de seguridad, no es posible situar las baterías en el vano motor frontal, por lo que una de las soluciones más habitual es situar el grupo de baterías bajo el piso del vehículo.

Dicha posición es beneficiosa desde el punto de vista dinámico, ya que el conjunto de baterías puede llegar a suponer una importante parte de la masa total del vehículo, por lo que situarla en una baja cota ayuda a bajar el centro de gravedad.

Además, es preciso que su ubicación sea de fácil acceso, para posibilitar reparaciones o cambios, ya que en el mejor de los casos, son componentes cuya vida útil rara vez excede los 5 años.

Su función principal es la de fuente de energía principal para la tracción del vehículo en los tres primeros casos.

Sin embargo, las de tipo lámina en espiral, debido a su muy elevada densidad de potencia y baja densidad de energía, son más adecuadas para su utilización como batería auxiliar en momentos de alta demanda, como por ejemplo, arranques.

En general, la mejora del tipo convencional desde sus primeras versiones, a principios del siglo pasado, no ha sido muy amplia; sin embargo, por seguir siendo la opción de menor coste, continúa apareciendo como batería de tracción en algunos vehículos actuales.

A2.2.5.6. Valoraciones económicas

La industria de la batería de plomo – ácido cuenta ya con una vida que ronda el siglo, por lo que se posee un alto conocimiento al respecto, lo cual conlleva que los problemas que pueden aparecer en su uso se saben tratar adecuadamente, consiguiéndose así unos costes de mantenimiento aceptables.

No obstante, en el aspecto económico es clave la vida útil de la batería, ya que su sustitución conlleva unos costes muy elevados. Este es el aspecto por el cual otros sistemas de almacenamiento de energía alternativos, de mayor coste inicial pero menor mantenimiento y mayor vida útil están convirtiéndose en alternativas reales a las baterías.

Debido a que la industria de la batería de plomo es considerablemente madura, tal y como se ha comentado ya, su coste es el más bajo de todas las opciones existentes en la actualidad, con unos 50 €/kWh.

A2.2.6. Baterías de otros pares

Sistema de almacenamiento de energía basado en reacciones químicas de oxidación - reducción con electrodos y electrolito diferentes de plomo y ácido y que pueden operar sin la necesidad de un sistema auxiliar.

Se trata, al igual que en las baterías de plomo, de acumuladores normalmente colocados en serie para conseguir el voltaje deseado. Dichos acumuladores están formados por cátodo, ánodo y electrolito donde tienen lugar las reacciones químicas de oxidación y reducción que se producen en la carga y descarga del sistema.

Existen múltiples tipos de baterías en función de los materiales que actúan como ánodo y cátodo. Algunos de ellos son los que se enumeran a continuación (Existen otros tipos que también presentan características interesantes, como por ejemplo las de Níquel – Cadmio, que no aparecen debido a estar su uso en retroceso debido a su alta toxicidad):

A2.2.6.1. Baterías de Ión - Litio

Son de construcción muy similar a las del tipo Litio – polímero sólido, con electrodos en forma de láminas que pueden estar enrolladas y con separadores entre las láminas. En el caso de las de tipo Ión-litio se sustituye el electrodo negativo de litio por otro de grafito u óxido de estaño.

Tabla 154. Características principales de la batería de Ión-litio

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	50-150 Wh/kg
Densidad de potencia	120-150 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	>1000 ciclos
Tensión de salida	3,6 V/acumulador
Coste aprox.	200 €/kWh

Su tensión de salida es muy elevada en comparación con otros pares, lo cual permite obtener voltajes elevados con números reducidos de unidades en serie.

A2.2.6.2. Baterías de Níquel - metal hidruro (Ni – MH)

Es el tipo de batería que está sustituyendo a las basadas en Níquel – Cadmio, por sus mejores prestaciones y por su ausencia de toxicidad. El electrodo negativo está compuesto de un complejo aleado de metal hidruro compactado en una sustancia conductora. El electrolito es de hidróxido de potasio y el electrodo positivo de hidróxido de níquel. Tolerancia a cargas y descargas bruscas, lo que le confiere robustez de operación.

Tabla 155. Características principales de la batería de níquel-metal hidruro

 Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	80 Wh/kg
Densidad de potencia	200 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	>2000 ciclos
Tensión de salida	1,23 V/acumulador
Coste aprox.	150 € /kWh

A2.2.6.3. Baterías de metal - aire:

En primer lugar, se debe mencionar que aunque no se han incluido dentro de la calificación de “máquinas batería”, no son un tipo de batería similar a los anteriores; por un lado, según sea su modo de recarga, pueden incluso llegar a considerarse como baterías de un solo uso. Por otro lado, debido a que el electrolito se deteriora en caso de exposición prolongada al aire y a que es sensible a los cambios en la humedad y concentración de CO₂, se hace necesario cierto tratamiento de limpieza en el aire que contienen dentro. Esta última circunstancia las aproxima más a las consideradas baterías máquina.

Existen diferentes tipos en función del metal usado como electrodo. Los más habituales son Cinc, Aluminio, Magnesio y Litio, aunque son sólo los dos primeros los que mejor se adaptan a su utilización en vehículos.

Están compuestas del ánodo de metal, un fino cátodo de aire y un electrolito alcalino de base agua, como por ejemplo, hidruro de potasio. Su recarga puede ser eléctrica o mecánica, sustitución de electrodos. En el caso del tipo de aluminio, el electrodo debe ser repuesto cada poco de tiempo y sus restos evacuados.

Durante su uso, el cátodo de aire absorbe oxígeno del aire mientras se descarga y lo libera durante la carga.

Por lo general sus potencias específicas son muy bajas y su carga difícil y poco eficiente, en contraste con sus elevadas energías específicas.

Tabla 156. Características principales de la batería de aluminio-aire

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	220 Wh/kg
Densidad de potencia	30 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	200 ciclos
Tensión de salida	1,5 V/acumulador
Coste aprox.	100 €/kWh

Tabla 157. Características principales de la batería de cinc-aire

Fuente: **Elaboración propia a partir de la bibliografía consultada**

CARACTERÍSTICAS	VALORES HABITUALES
Densidad de energía	200 Wh/kg
Densidad de potencia	80-140 W/kg
Nº ciclos al 80% de descarga	200 ciclos
Tensión de salida	1,65 V/acumulador
Coste aprox.	90 €/kWh

A2.2.6.4. Integración en el vehículo y funciones

Para garantizar unas prestaciones mínimas, el número de baterías a incluir es elevado, lo que plantea unas importantes exigencias en cuanto a volumen y peso.

Debido a las recientes normativas de seguridad, no es posible situar las baterías en el vano motor frontal, por lo que una de las soluciones más habitual es situar el grupo de baterías bajo el piso del vehículo. Dicha posición es beneficiosa desde el punto de vista dinámico, ya que el conjunto de baterías puede llegar a suponer una importante parte de la masa total del vehículo, por lo que situarla en una baja cota ayuda a bajar el centro de gravedad.

Además, es preciso que su ubicación sea de fácil acceso, para posibilitar reparaciones o cambios, ya que baterías como las de metal aire necesitaran ser repuestas a lo largo de la vida útil del vehículo, ya que sus ciclos de vida son muy cortos, en comparación con otras baterías. Además, en caso de realizar recargas mecánicas, es decir, sustitución de

electrodos, y a veces electrolito, el vehículo debe estar concebido para tal efecto, de manera que facilite dicha operación situando sus baterías en el lugar más propicio.

Su función principal es la de fuente de energía principal para la tracción del vehículo, en el caso de las baterías de aire, debido a su elevada energía específica.

Sin embargo, su reducida densidad de potencia hace que necesiten trabajar en paralelo con otra batería (o dispositivo) que genere la potencia necesaria en momentos de alta demanda, así como para aprovechar la energía obtenida mediante frenado regenerativo.

Por otro lado, tanto las baterías de lón - litio como las de Níquel - metal hidruro, puesto que ofrecen elevados valores en ambas características, pueden ser utilizadas sin otros dispositivos auxiliares.

A2.2.6.5. Valoraciones económicas

Los costes de estos tipos de baterías son relativamente bajos, aunque en el caso de las baterías de aire, sus bajos número de ciclos hacen que su coste total aumente.

No obstante, hay que tener en cuenta que el coste de fin de uso de estas baterías es muy bajo, ya que sus componentes no son de difícil tratamiento.

Por otro lado, las baterías de lón - litio, a pesar de no contar con densidades de energía tan elevadas, su densidad de potencia las hace muy interesantes.

Además, con un número de ciclos superior a 1000, en algunos casos muy superiores, no cuentan la desventaja de corta vida, por lo que el coste total las posiciona en un lugar próximo a otras baterías más utilizadas, como por ejemplo las de plomo ácido. Al igual que las baterías de aire, no plantean problemas en cuanto a su reciclado.

Las del tipo Níquel - metal hidruro presentan costes comparables a las de ión litio, si bien sus características, a excepción de potencia específica, son algo inferiores.

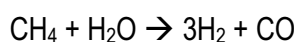
ANEXO 3. Sistemas de Producción de Hidrógeno

En el presente anexo se enumeran los principales métodos para la producción de hidrógeno.

A3.1. Reformado con vapor de hidrocarburos

El reformado con vapor (*steam reforming*) es el método usado de forma más habitual para producir gases enriquecidos en hidrógeno. El reformado con vapor del metano, el reformado de metanol y el reformado de la gasolina están basados en los mismos principios con modificación de las condiciones de operación, dependiendo de la relación de carbono de la materia prima utilizada. Las altas temperaturas del vapor separan el hidrógeno de los átomos de carbono.

El reformado con vapor catalítico de metano es un proceso bien conocido y disponible comercialmente para la producción de hidrógeno. En Estados Unidos, la mayor parte del hidrógeno producido (por encima del 90%) es vía reformado de vapor. La producción de hidrógeno se realiza en varios pasos: reformado con vapor, reacción de desplazamiento del gas de agua y purificación del hidrógeno.

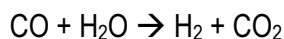


Se trata de una reacción endotérmica. Las altas temperaturas y las bajas presiones favorecen la producción de monóxido de carbono e hidrógeno. Si bien la presión suele venir determinada por los requerimientos del uso final del hidrógeno, siempre se precisan elevadas temperaturas para alcanzar una conversión aceptable. Las condiciones de operación suelen rondar los 870°C a una presión de 30bar. Las necesidades de calor externo para que se produzca la reacción provienen frecuentemente de la combustión de una fracción del gas natural entrante (por encima del 25%) o la combustión de los gases residuales, tal como purgas de gas procedentes del sistema de purificación del hidrógeno.

Generalmente las materias primas son pretratadas para eliminar el azufre, que desactiva el níquel del catalizador. Los lechos catalíticos son recubiertos para su protección con óxidos de zinc o carbón activo para pretratar el gas natural e hidrodeshulfurar los hidrocarburos líquidos. Comercialmente la relación vapor de agua-carbono está entre dos y tres.

La transferencia de calor a los reactantes se realiza indirectamente a través de un intercambiador de calor. El metano y el vapor reaccionan en cilindros recubiertos de catalizador. El reformado de metano produce un gas de síntesis (*syngas*) con una relación 3:1 H₂/CO. La relación anterior decrece hasta 2:1 para materias primas menos ricas en hidrógeno como las naftas.

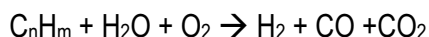
Después de la etapa de reformado, el gas de síntesis resultante es enviado a uno ó más reactores de desplazamiento, donde se incrementa el rendimiento vía reacción de desplazamiento del gas de agua, que convierte el CO a H₂.



Esta reacción es favorecida a temperaturas inferiores a los 600°C y puede llevarse a cabo a temperaturas tan bajas como 200°C con catalizadores suficientemente activos. La eficiencia del proceso de reformado de gas natural es de un 76%, considerando el reformado y la reacción de desplazamiento.

Finalmente, el hidrógeno es separado de la mezcla con el grado de pureza requerida para su aplicación en pilas de combustible, superior al 99,99%. El sistema más utilizado para la purificación del hidrógeno es el PSA (*multi-bed pressure swing adsorption*) para eliminar agua, CO₂, CH₄, N₂ y el CO que se producen el reactor de desplazamiento.

La oxidación parcial de hidrocarburos pesados involucra la adición de oxígeno y vapor de agua. Las cantidades de los mismos son controladas cuidadosamente para ajustar la velocidad de oxidación de los hidrocarburos. En general, la reacción puede escribirse como:



A3.2. Gasificación del carbón

Las plantas de gasificación de carbón son muy diferentes de los sistemas basados en el reformado con vapor. Esta diferencia no sólo se encuentra en el propio reactor de gasificación, sino también en el equipo auxiliar utilizado para la manipulación del carbón, la eliminación del azufre, el tratamiento del agua y la separación del aire. La complejidad de la planta hace que únicamente las instalaciones de gran tamaño se encuentren justificadas económicamente.

Generalmente, la gasificación es utilizada para producir gas de síntesis desde aceites residuales o carbón. También se puede utilizar el coque de petróleo. Otras materias primas incluyen, subproductos de refinería, y biomasa.

Además de producirse la reacción de gasificación de la materia carbonada, se producen una variedad de reacciones secundarias tales como el *hidrocracking*, gasificación del vapor, reformado de hidrocarburos y reacciones de desplazamiento del gas.

Para la gasificación de líquidos y sólidos, las materias primas reaccionan con el oxígeno o aire bajo severas condiciones de operación (1.150 a 1.425°C y 30 a 82bar). En la planta de producción de hidrógeno, existe una unidad de separación de aire corriente arriba. Utilizando oxígeno en lugar de aire se evita el paso de eliminación de nitrógeno corriente abajo.

En algunos diseños, se inyecta vapor de agua a temperaturas de operación moderadas para suprimir la formación de carbón en los gasificadores. El gas de síntesis a elevada temperatura puede ser enfriado directamente con agua (en la parte inferior del gasificador) o indirectamente en un intercambiador de calor residual o una combinación de ambos. El gas ácido producido (H_2S y CO) debe ser recuperado de la corriente de hidrógeno antes de introducirse en el proceso de purificación.

Cuando se gasifican hidrocarburos pesados, es necesario eliminar el hollín (carbón de alimentación no convertido), cenizas y cualquier metal (típicamente vanadio y níquel) que están presentes en las materias primas. Las cenizas extraídas pueden utilizarse nuevamente

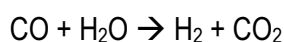
en el gasificador, aunque el reciclado puede estar limitado cuando los niveles de cenizas y metales presentes en las materias primas son elevados. Pasos adicionales de preparación y manipulación de las materias primas son necesarios además del proceso básico de gasificación, para el carbón, el coque de petróleo y otros sólidos tales como la biomasa.

A3.3. Reformado autotérmico del petróleo y el gas natural

Oxidación parcial se denomina al proceso de quemar hidrocarburos con reducida cantidad de oxígeno. El reformado autotérmico incluye etapas del reformado con vapor de agua y de la oxidación parcial, y se utiliza con algunos hidrocarburos pesados. La reacción total es exotérmica, con lo cual se desprende calor. La temperatura en el reactor es de 950-1.100°C y la presión por encima de los 100 bar. Se puede producir H₂ a partir del CO producido. Después de la etapa de reformado, se necesita purificar el gas resultante para eliminar el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y otros subproductos no deseados. La complejidad del proceso de purificación depende de la técnica de reformado utilizada y de la aplicación final del hidrógeno producido. La necesidad de purificar los gases supone un coste adicional para la planta y reduce la eficiencia.

A3.3.1. Reacción de desplazamiento

El reformado autotérmico produce gas con un alto contenido en monóxido de carbono, CO. Por lo tanto se hace necesario someter al gas al proceso de desplazamiento para así incrementar el contenido en hidrógeno. La reacción de desplazamiento es la siguiente:



La reacción de desplazamiento consta de dos etapas mediante las que se alcanza la reacción completa entre el CO y el vapor. En la primera etapa, el vapor se añade a alta temperatura (300-500°C), en la segunda, baja la temperatura (200°C). Se utilizan diferentes catalizadores para cada etapa.

A3.3.2. Secuestro de CO₂

Todos los procesos descritos anteriormente producen CO₂ junto al H₂. La tecnología más convencional para separar el hidrógeno del CO₂, es utilizar procesos de absorción basados en aminas.

Tecnologías para el secuestro:

- Post-combustión: se considera como un primer paso para la captura a gran escala del CO₂. Éste se extrae del flujo de gases de escape después de la combustión. Esta tecnología se puede aplicar a las instalaciones existentes.
- Precombustión: por la conversión del gas natural en hidrógeno y CO₂ (descarbonización). El CO₂ se comprime para su almacenamiento y el hidrógeno se mezcla con aire para la combustión, por lo que se emite sólo nitrógeno y agua.
- Oxyfuel: el oxígeno se separa del aire y después se quema con los hidrocarburos, lo que produce unos gases de escape con alta concentración de CO.

Métodos basados en membranas selectivas o sorbentes están aún en desarrollo.

Para impedir la emisión del CO₂ a la atmósfera, debe ser depositado de forma permanente.

Mecanismos geológicos de almacenamiento:

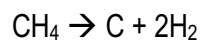
- Almacenamiento geológico: algunas opciones proporcionan energía adicional.
- Almacenamiento en formaciones salinas.
- Desplazamiento del metano en vetas de carbón.
- Almacenamiento en yacimientos agotados de gas o petróleo.
- Desplazamiento del petróleo.
- Acuíferos vacíos de agua
- Inyección y disolución del CO₂ en la columna de agua (normalmente por debajo de los 1.000 m) por medio de un gasoducto o utilizando barcos.

- Deposición del CO₂, por medio de gasoductos fijos o plataformas, en el fondo de los océanos a profundidades superiores a los 3.000m, donde el CO₂ es más denso que el agua y se supone formaría un *lago* que podría retrasar su disolución en el medio que lo rodea.

La captura y almacenamiento del CO₂ se sigue presentado como una opción con gran potencial para conseguir una reducción de los costes totales de la contención de las emisiones de gases de efecto invernadero. Se plantea que la extensión de su uso dependerá de la madurez técnica, de los costes, del potencial total, de la difusión y transferencia de la tecnología a los países en vías de desarrollo, de aspectos legales y de las condiciones ambientales.

A3.4. Disociación térmica de hidrocarburos

Mediante el calentamiento de hidrocarburos a muy altas temperaturas, en ausencia de oxígeno, es posible separar el hidrógeno del carbono. La utilización de este proceso se ve supeditada a la captura permanente de carbono, para así lograr una producción de hidrógeno libre de emisiones de gases causantes del efecto invernadero. La fórmula para este proceso, utilizando metano como combustible, es la siguiente:



Obteniendo dos moles de hidrógeno por cada uno de metano.

A3.5. Negro de carbón y generación de hidrógeno

El negro de carbón es un carbono muy puro que es utilizado en la producción de neumáticos y como material reductor en la industria metalúrgica. No puede ser considerado un contenedor permanente de carbono fósil, ya que finalmente termina oxidándose y debe ser

liberado a la atmósfera. Aunque el polvo de negro de carbón debe ser almacenado de manera segura, éste requiere muchas menos consideraciones y espacio que el CO₂ gaseoso.

La compañía noruega *Kvaerner*, en los años 1980, desarrolló un proceso llamado “*Kvaerner Carbon Black & Hydrogen Process*” (*KCB&H*). La primera planta comercial basada en este proceso comenzó la producción en junio del año 1999. El gas resultante con este proceso está libre de CO₂, mientras que los métodos tradicionales de producción para negro de carbón son altamente contaminantes. El co-producto del proceso es hidrógeno.

Se trata de un proceso pirolítico, en el que en un reactor temperaturas muy elevadas el hidrocarburo (por ejemplo, metano) se descompone en hidrógeno y carbono según la reacción:



A3.6. Plasmatrón

Esta tecnología ha sido desarrollada por investigadores del *Instituto de Tecnología de Massachussets* y se basa en la utilización del plasma (estado energético de la materia a alta temperatura con elevada concentración de iones) para la producción de hidrógeno a través del reformado de metano. La ventaja de los reformadores de plasma reside en que puede funcionar con cualquier forma de hidrocarburo, incluidas las fracciones pesadas del petróleo. Además, el reformador de plasma puede funcionar en modo pirolítico (degradación térmica de material orgánico sin la presencia de aire ni oxígeno como ocurre en el *Kvaerner Carbon Black & Hydrogen Process*), transformando el carbono en hollín, proceso que elimina la formación de CO₂. La tecnología de plasma permite diseños de los reformadores más compactos y ligeros que los tradicionales, ya que la reacción se produce más rápidamente.

El plasmatrón funciona a temperaturas que llegan a superar los 2.000°C. Se obtienen rendimientos de hidrógeno que oscilan entre el 80-90%. La principal desventaja que presenta el reformador de plasma es su alta dependencia de la energía eléctrica.

A3.7. Método Electrolítico

La electrólisis del agua es una tecnología conocida, en la que se lleva investigando muchos años. De forma teórica se puede afirmar que la electrólisis del agua se produce cuando se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en un electrolito:

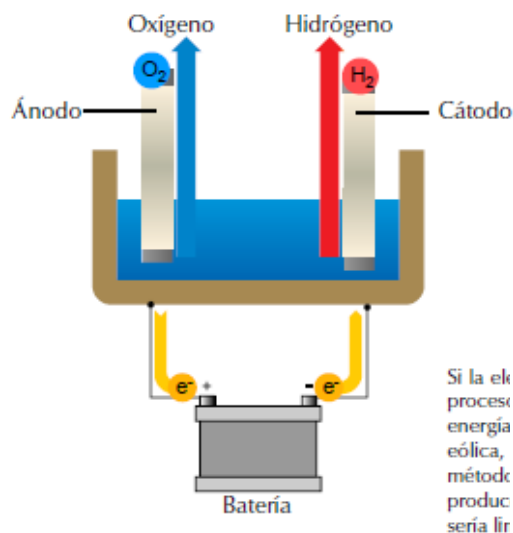
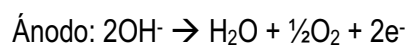
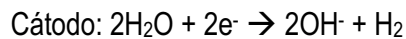


Figura 156. Esquema del proceso de Electrólisis

Fuente: *Linde AG*

La ventaja de este proceso es la generación de un combustible de hidrógeno de alta pureza, libre de impurezas. Químicamente la electrólisis del agua es la inversa de la reacción de generación de electricidad que se produce en una pila de combustible.

Físicamente, el diseño de un electrolizador es muy parecido al de una pila de combustible, con dos electrodos inmersos en un electrolito de solución acuosa. La reacción puede llevarse a cabo en dos “medias pilas” separadas por un electrolito de membrana impermeable al gas. Pese a que hoy aún es más costoso el hidrógeno proveniente de la electrólisis que el que se obtiene del reformado de gas natural, el agua es un recurso abundante y renovable, por lo que los avances tecnológicos que se están produciendo en las renovables permitirán a muy corto plazo producir hidrógeno a través de la electrólisis aprovechando los excedentes energéticos de las centrales eólicas, hidroeléctricas o fotovoltaicas, entre otras, de modo que permitirá competir con los costes de producción del reformado de gas natural, al mismo tiempo que se logrará de forma más limpia.

La energía nuclear presenta aplicaciones en la obtención del hidrógeno. Así, por ejemplo las centrales nucleares podrían inicialmente conectarse, durante la fase de valle de la demanda eléctrica, a plantas de electrólisis de agua para la producción de hidrógeno y oxígeno; de esta forma se haría posible el mantenimiento de grandes centrales nucleares en su régimen de producción óptimo. Como se ha comentado anteriormente, esta solución también podría aplicarse a otras plantas de producción eléctrica (centrales hidroeléctricas, solares, etc.).

La electrólisis requiere por tanto una cantidad intensiva de energía. La potencia consumida es próxima a los 50 kWh/kg de hidrógeno. Las unidades de electrolisis operan a relativamente baja presión (10 atm), siendo necesarias mayores presiones para distribuir el hidrógeno a gaseoductos o vehículos industriales, comparado con las otras dos tecnologías de producción.

A3.7.1. Electrolizador alcalino

La electrólisis permite la obtención de hidrógeno en el cátodo y de oxígeno en el ánodo. La electrólisis alcalina del agua es la tecnología más comúnmente utilizada.

En un electrolizador alcalino, el electrolito es una solución concentrada de KOH en agua al 25% de concentración, y el transporte de carga se produce a través de la difusión de iones

OH⁻ desde el cátodo al ánodo. El hidrógeno es producido en el cátodo con casi un 100% de pureza y bajas presiones. Oxígeno y agua son los subproductos que han de ser eliminados antes del dispensado.

La producción de hidrógeno mediante la utilización de electrolizadores alcalinos está fuertemente arraigada en Noruega. En *Norsk Hydro*, se estuvo llevando a cabo la electrólisis del agua de forma industrial para la producción de amoníaco, desde el año 1928 hasta el 1988.

Norsk Hydro Electrolysers (NHE) es actualmente uno de los productores de electrolizadores alcalinos más importantes del mundo. Algunos de los electrolizadores de *NHE* alcanzan una eficacia del 80%. Las altas eficiencias son importantes, ya que el gasto económico en energía, aproximadamente 4,5 kWh/Nm³H₂, significa un importante porcentaje de los gastos totales de una planta de electrólisis. Los electrolizadores son más efectivos a un índice bajo de producción, debido a la baja densidad de corriente. La economía de operación óptima dependerá de la densidad de corriente, del coste de fabricación de los materiales y de la demanda de producción del hidrógeno.

Por ejemplo, *NHE* y *Gesellschaft für Hochleistungswasserelektrolyseure (GHW)* desarrollaron un electrolizador compacto que es capaz de producir el hidrógeno equivalente a la energía suministrada por una estación de servicio de gasolina estándar. Estos electrolizadores a alta presión, y como producto se obtiene hidrógeno a presión moderada, 30 bar.

Otro de los principales productores de electrolizadores, *Stuart Energy*, ha creado el prototipo de un pequeño electrolizador para uso en garajes particulares, el cual incorpora su propio compresor.

A3.7.2. Electrolizador de membrana polimérica

Se denominan electrolizadores de membrana polimérica aquellos que como electrolito utilizan membranas poliméricas de intercambio protónico (PEM). Gran parte del desarrollo tecnológico que se realiza en las pilas de combustible de membrana polimérica (PEMFC)

puede transferirse a los electrolizadores, que se beneficiarán de la futura producción masiva de PEMFC.

Actualmente se venden un gran número de electrolizadores de membrana polimérica, pese a que se trata de una tecnología relativamente nueva, si la comparamos con la empleada en los electrolizadores alcalinos. Los electrolizadores PEM poseen unos factores de eficiencia teórica que alcanzan el 94%. Los electrolizadores PEM funcionan óptimamente con los sistemas de energía renovable, en los que la cantidad de corriente suministrada es variable.

Los electrolizadores de membrana polimérica se adaptan mejor a plantas pequeñas, especialmente a aquellas que cuentan con unas corrientes de salida variables, mientras que la utilización los electrolizadores se recomienda en grandes sistemas conectados a la red de energía.

A3.7.3. Electrolizador de vapor

Un tercer tipo de electrolizador es el electrolizador de vapor. En ellos se emplean electrolitos cerámicos conductores de iones. Se basan en el mismo procedimiento que un electrolizador tradicional, pero con vapor de agua a altas temperaturas (como el que se registra en el vapor de agua procedente de la refrigeración de un reactor nuclear) permite obtener más hidrógeno, explicaron los científicos, logrando alcanzar una alta eficiencia.

El *Lawrence Livermore National Laboratory*, ha sido el protagonista del desarrollo de uno de estos electrolizadores de vapor, con diseño tubular. Éste cuenta con la particularidad de que puede también funcionar en un *stack* de pila de combustible.

Otro electrolizador de vapor es el pequeño electrolizador de origen alemán *Hot Elly*; este sistema puede alcanzar una eficiencia del 92%.

A3.8. Descomposición termoquímica del agua

En este método, el agua y una o más sustancias químicas reaccionan mientras se proporciona calor a alta temperatura. De ello resulta hidrógeno y oxígeno con algún otro componente. La temperatura necesaria para el proceso puede tener su origen en el calor generado en reactores nucleares ó en concentradores de calor de la luz solar.

A3.9. Gasificación de la biomasa

El hidrógeno puede obtenerse de los subproductos de los bosques, madera y leña principalmente, de la paja, de los residuos sólidos urbanos y de las aguas residuales mediante la gasificación térmica de esta biomasa. La cantidad de hidrógeno presente en la biomasa oscila entre el 6 y el 6,5 por ciento en peso, frente el prácticamente 25 por ciento del gas natural.

El proceso de gasificación de la biomasa consiste básicamente en someter a la biomasa a un proceso de combustión incompleta entre 700 y 1.200°C, y guarda cierta similitud al proceso de obtención a partir de combustibles fósiles. El producto resultante es un gas combustible compuesto fundamentalmente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono. Llegado a este punto, se introduce vapor para reformar el metano a hidrógeno y monóxido de carbono. El monóxido de carbono se somete entonces a la reacción de desplazamiento obteniendo un mayor nivel de hidrógeno. Como subproducto de este proceso se obtiene dióxido de carbono, pero este dióxido de carbono producido a partir de la biomasa se considera neutral respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que no aumentan la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. No obstante, una alternativa es utilizarlo para el cultivo de algas que luego, además, volverán a ser biomasa y se convertirán en biocombustible, de forma que estaríamos emitiendo un dióxido de carbono previamente emitido y capturado, es decir, no aumentarían las emisiones de dióxido de carbono por utilizar estos biocombustibles o por la gasificación de la biomasa.

La mezcla de gases también puede utilizarse en pilas de combustible para la producción de electricidad. Estos sistemas que integran pilas de combustible alcanzan eficiencias prácticamente del 30%, valores que no son posibles de alcanzar con los procesos convencionales para la producción de energía eléctrica a partir de biomasa o residuos.

Existen reactores de gasificación que permiten producción de metanol a partir de biomasa. La mayoría de estos se pueden utilizar en producción de hidrógeno, y especialmente aquellos que utilizan aire en vez de oxígeno son viables económicamente.

La biomasa puede someterse a otro proceso, la pirolisis, transformándola de este modo en un biocombustible. Al igual que los combustibles fósiles tradicionales, este combustible puede ser convertido posteriormente en hidrógeno y dióxido de carbono mediante reformado.

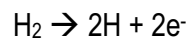
Una de las ventajas que presenta este biocombustible, es que reduce la necesidad de transportar la biomasa. Pequeñas instalaciones capaces de realizar la pirolisis se localizarían cerca de los centros de producción de la biomasa, y el biocombustible generado se transportaría a la estación generadora de hidrógeno mediante camión cisterna. El combustible se almacenaría en la estación y reformado a hidrógeno cuando fuera necesario. Este aspecto, además de la venta de subproductos, puede hacer competitiva la producción de hidrógeno con biomasa, respecto a la producción mediante reformado de gas natural en grandes plantas. Donde no existe infraestructura para el gas natural, el bio-hidrógeno resulta más económico que el hidrógeno obtenido a partir del gas natural.

A3.10. Producción biológica

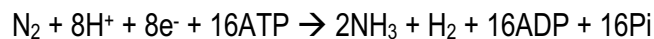
La producción biológica de hidrógeno se debe principalmente a la presencia en las células de enzimas como la hidrogenasa y la nitrogenasa.

La hidrogenasa está ampliamente distribuida en los microorganismos anaeróbicos. Ésta tiene diversos orígenes filogenéticos y produce el hidrógeno tanto irreversible como reversiblemente, dependiendo de las condiciones medioambientales en las que se encuentre, siendo reversible sólo en condiciones de anaerobiosis estricta. Esta enzima se ha clasificado

en tres grupos principales: Fe-hidrogenasa, Ni-Fe-hidrogenasa e hidrogenasa libre de metales. La Fe-hidrogenasa, una de las más conocidas, tiene como función remover los equivalentes (H^+) excesivos en los anaerobios estrictos y puede ser inhibida por la presencia de oxígeno o por altas concentraciones de su producto hidrógeno. Se sabe que la reacción catalizada por la hidrogenasa tiene la forma:



La nitrogenasa está presente en gran cantidad de microorganismos fijadores de nitrógeno, puede producir hidrógeno en una reacción irreversible de forma continua, incluso con saturación de producto (atmósfera al 100% H_2). Esta enzima es empleada para reducir el N_2 a NH_3 ; sin embargo, cuando hay ausencia de N_2 , reduce los H^+ a hidrógeno consumiendo 4 moles de ATP. Se ha encontrado que además del N_2 , el O_2 y el NH_4^+ pueden inhibirla.



Se han realizado numerosos estudios a nivel molecular con estas enzimas para el mejoramiento de la producción de hidrógeno. Además, se han llevado a cabo estudios estequiométricos en diversos microorganismos, con el fin de aclarar las vías metabólicas utilizadas en la producción de hidrógeno. Es común el estudio en especies del género *Clostridium* para determinar los rendimientos máximos teóricos de la conversión de glucosa en hidrógeno en condiciones anaerobias.

En las siguiente figuras se muestran dos de las posibles rutas metabólicas del hidrógeno para *Clostridium butyricum*. Una de estas rutas es el rompimiento del piruvato en CO_2 y H_2 , el cual es catalizado por la enzima piruvato ferredoxin-ferredoxinóxido-reductasa. En esta ruta una parte de los electrones es transferida a protones para producir hidrógeno y el resto a NAD^+ para generar $NADH_2$; luego este $NADH_2$, y el generado en la glucólisis, es usado en la segunda ruta para producir hidrógeno por medio de la hidrogenasa.

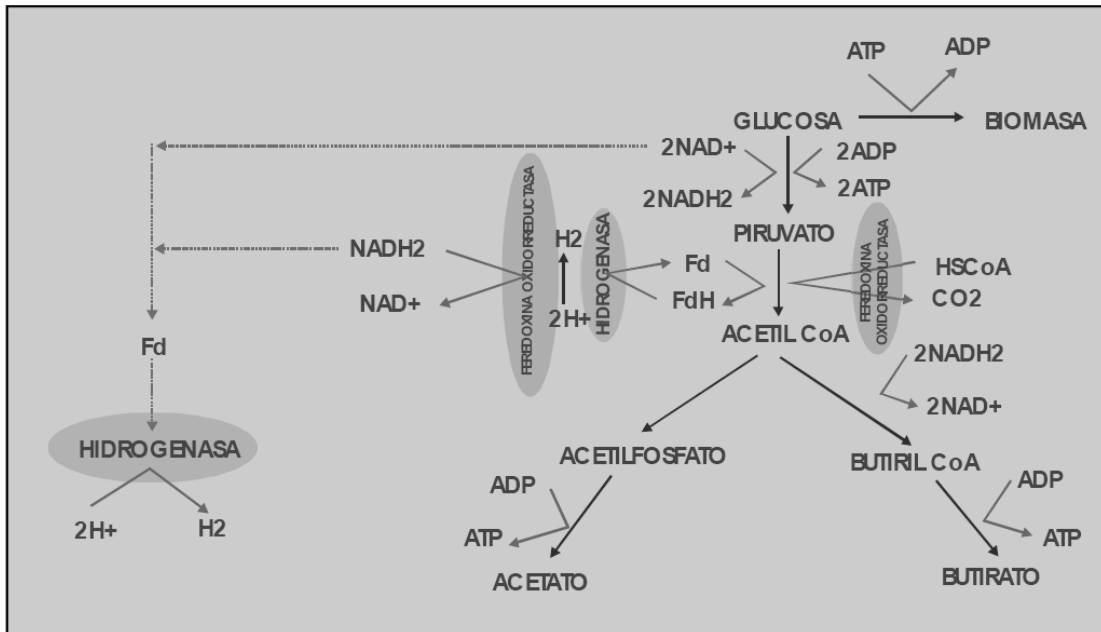


Figura 157. Ruta metabólica del hidrógeno en *Clostridium butyricum*

Fuente: X. Chen, 2006 [87]

También se han hecho estudios sobre *Klebsiella pneumonia*, un microorganismo anaerobio facultativo capaz de producir hidrógeno en cantidades significativas involucrando en su metabolismo tanto la hidrogenasa como la nitrogenasa. Las posibles rutas metabólicas para la producción de hidrógeno en *Klebsiella pneumoniae* a partir de glucosa se pueden observar en la siguiente figura. En estas rutas el rompimiento del acetil-CoA es catalizado por dos enzimas llamadas piruvato-formiato-liasa y piruvato-deshidrogenasa. En la primera ruta, una parte del piruvato, catalizado por la enzima piruvato formato-liasa, produce ácido fórmico; luego la enzima formiato-hidrogenoliasa rompe este ácido para producir hidrógeno. En la segunda ruta, los electrones generados en el rompimiento del piruvato catalizado por la piruvato deshidrogenasa son transferidos a la ferredoxina y luego a H^+ para generar hidrógeno por medio de la hidrogenasa y el resto de los electrones son transferidos a NAD^+ para producir $NADH_2$. En la última ruta, una porción del $NADH_2$ es transferido a la nitrogenasa para generar hidrógeno y el resto es oxidado por el oxígeno para sintetizar ATP a través de la cadena respiratoria.

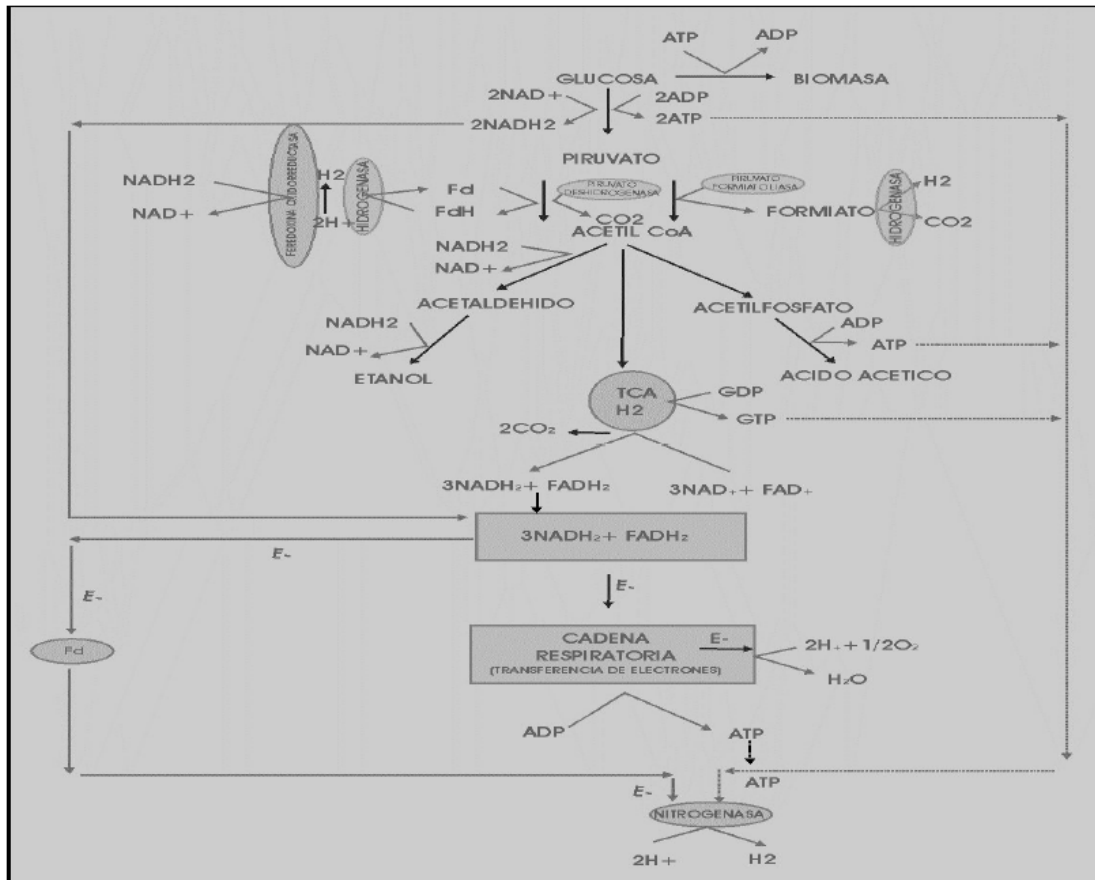


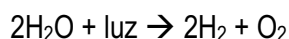
Figura 158. Ruta metabólica de *Klebsiella pneumoniae* a partir de glucosa

Fuente: X. Chen, 2006 [87]

De este modo existen cinco métodos para la producción de biohidrógeno:

A3.10.1. Biofotólisis directa

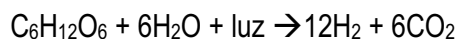
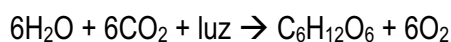
Éste es un proceso de producción de hidrógeno y oxígeno fotosintéticamente a partir de agua y luz solar. En él se usan algunos microorganismos que constituyen las algas verdes, las cuales requieren de un tiempo de incubación anaeróbica en oscuridad para inducir la síntesis o la actividad de enzimas involucradas en el metabolismo del hidrógeno, como las hidrogenasas reversibles e irreversibles. Éstas canalizan la producción de dos protones (2H^+) a hidrógeno gaseoso (H_2) mediante la siguiente reacción:



Las hidrogenasas hacen parte de una maquinaria genética y enzimática en el transporte de electrones para generar hidrógeno y producir ATP durante la fotosíntesis. Teniendo en cuenta que la hidrogenasa en este proceso no es tolerante al oxígeno y que el proceso genera los dos gases en forma simultánea (hidrógeno y oxígeno), no es viable a lo largo del tiempo, sino se hacen ciertas modificaciones. Una de estas posibles modificaciones es una separación tempo-espacial, donde primero el CO₂ es fijado en sustratos ricos en hidrógeno durante la fotosíntesis normal y luego se incuba el alga anaeróticamente con luz, produciéndose hidrógeno gaseoso. Lo anterior se debe realizar teniendo en cuenta que la incubación del alga se tiene que hacer en un medio libre de nutrientes que contengan azufre, para evitar la producción de oxígeno por parte del fotosistema II, pues la ausencia de este elemento impide la formación de este complejo enzimático]. Estos estudios se han hecho principalmente con *Chlamydomonas reinhardtii*.

A3.10.2. Biofotólisis indirecta

Se lleva a cabo por cianobacterias y algas verdeazules, donde a partir del proceso fotosintético el CO₂ es fijado a sustratos ricos en hidrógeno endógeno generando luego hidrógeno molecular cuando estos microorganismos se incuban en condiciones anaerobias.



En el proceso se requiere un sistema de cultivo inicial para la fotosíntesis normal y otro sistema aparte para la generación de hidrógeno. Las cianobacterias poseen varias enzimas involucradas directamente en el metabolismo del hidrógeno. La más importante, la nitrogenasa, cataliza la producción de hidrógeno en el proceso de fijación del nitrógeno. Otra enzima es la hidrogenasa captadora, la cual oxida el hidrógeno que sintetiza la nitrogenasa y,

por último, están las hidrogenasas bidireccionales que tienen la habilidad de oxidar y sintetizar hidrógeno.

La producción de hidrógeno por cianobacterias ha sido estudiada por cerca de tres décadas y se ha revelado que la eficiente fotoconversión de agua en hidrógeno es influenciada por muchos factores, siendo la intensidad de luz el más importante. Las tasas de producción de hidrógeno son muy variadas y dependen de las especies de cianobacterias involucradas y de las condiciones del proceso; sin embargo el interés en este proceso ha decaído debido a las bajas tasas de producción encontradas de 13 μ L/mg(peso seco/h). Además existen desventajas en la producción de hidrógeno con cianobacterias, que se deben fundamentalmente a que es necesario remover el O₂ producido, pues éste actúa también como inhibidor de la nitrogenasa y la hidrogenasa.

A3.10.3. Fotofermentación

En este proceso se utilizan bacterias púrpuras no sulfurosas que producen hidrógeno, catalizado por la nitrogenasa bajo condiciones deficientes en N₂, usando luz y compuestos reducidos, como ácidos orgánicos, que muchas veces están contenidos en sustancias de desecho.



En este proceso también interviene la hidrogenasa captadora de hidrógeno, la cual compete por el hidrógeno disponible en el medio, reduciendo la actividad de la nitrogenasa al quedar sin sustrato. Uno de los parámetros que más afectan la fotofermentación es la intensidad de luz, pues un incremento en ésta se ha visto que afecta de forma simultánea la velocidad de producción y el rendimiento del hidrógeno.

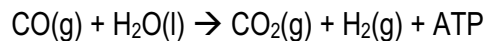
Se ha visto que las tasas de producción de hidrógeno son más altas cuando las células son inmovilizadas que cuando están suspendidas en la fase líquida. Son diversos los tipos de biorreactores desarrollados (foto-biorreactores) en este sistema. Se han evaluado

configuraciones tubulares, de panel de platos y de columna de burbujeo, obteniéndose diferentes resultados en la producción de hidrógeno, debido a las diferencias en la agitación e intensidad de la luz, parámetros cruciales para este método de producción.

La mayoría de los procesos utilizados en fotofermentación se han llevado a cabo con microorganismos del género *Rhodobacter* en lotes (algunas veces con inmovilización celular) y con menor frecuencia en continuo. Entre los resultados reportados más destacables de tasas de producción de hidrógeno por este microorganismo están 0,009 L/L*h y 0,008 L/L*h a un pH de 5 y una temperatura de 35 °C.

A3.10.4. Reacción de intercambio gaseoso

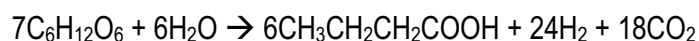
Ciertas bacterias fotoheterotróficas, dentro de la superfamilia *Rhodospirillaceae*, pueden crecer en oscuridad usando CO como única fuente de carbono para generar ATP, con la liberación de H₂ y CO₂.



En estos microorganismos, la producción de hidrógeno es mediada por reacciones enzimáticas, las cuales se dan a temperaturas y presiones bajas (ambientales). La enzima que se encarga de atrapar el CO y oxidarlo es la óxidoreductasa-CO-deshidrogenasa (CODH), y es parte de un complejo enzimático unido a la membrana]. Este proceso puede ser muy prometedor al poder utilizar gases que contengan CO, para removerlo y producir hidrógeno. Se han hecho algunas propuestas para el diseño de biorreactores que permitan este proceso. Sin embargo, aún se debe mejorar la transferencia de masa que es una de las limitaciones del mismo.

A3.10.5. Fermentación oscura

La producción de hidrógeno por este método está dada por bacterias anaeróbicas que crecen en oscuridad y usan sustratos ricos en carbohidratos. Los subproductos de la fermentación lo constituyen los ácidos acético (máximo teórico de 4 mol H₂/mol glucosa) y butírico (máximo teórico de 3.4 mol H₂/mol glucosa), con lo que los rendimientos prácticos de hidrógeno en la fermentación oscura están alrededor de 2 mol H₂/mol glucosa.



Las fermentaciones se llevan a cabo a diferentes temperaturas, desde mesófilas (25-40°C), hasta termófilas (>50°C), produciéndose biogás que contiene H₂, CO₂, CO, H₂S y, en algunos casos, CH₄. Las especies bacterianas que producen hidrógeno por este sistema, y que son más conocidas, son las que corresponden a los géneros *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium*.

La producción de hidrógeno por estas bacterias depende de condiciones del proceso como pH, tiempo de retención hidráulica (HRT) y presión parcial del gas. La formación de los productos obedece a las condiciones ambientales en las cuales los microorganismos crecen. Productos como etanol, butanol y lactato, contienen hidrógeno que todavía no se ha liberado; así, para maximizar la cantidad de hidrógeno, el metabolismo de la bacteria debe enfocarse hacia la producción de ácidos grasos volátiles (VFA).

La producción de biohidrógeno por fermentación oscura se puede llevar a cabo tanto con cultivos puros, con gran variedad de cepas de microorganismos, como con cultivos mixtos que por lo general provienen de productos de desecho. Ambos tipos de cultivos sirven como inóculos para la fermentación.

A3.11. Producción de hidrógeno a partir de energía solar

De cara a un futuro basado en un desarrollo sostenible, el vector energético hidrógeno, producido a partir de energías renovables, está adquiriendo cada vez más protagonismo. Y dentro de este campo, el hidrógeno producido con energía solar se presenta como una manera adecuada de almacenar, en forma de energía química, la energía procedente del sol. Con ello se consigue subsanar uno de los principales obstáculos para el aprovechamiento de la energía solar, su carácter intermitente, ya que, aunque existen métodos de almacenamiento de dicha energía, todos ellos presentan muy bajo rendimiento.

Los métodos para producir hidrógeno con energía solar se agrupan en tres grandes conjuntos: procesos fotoquímicos, electroquímicos y termoquímicos, aunque también existen combinaciones de los anteriores (fotoelectrólisis, electrólisis a alta temperatura del vapor, etc.), recogidos en la siguiente figura:

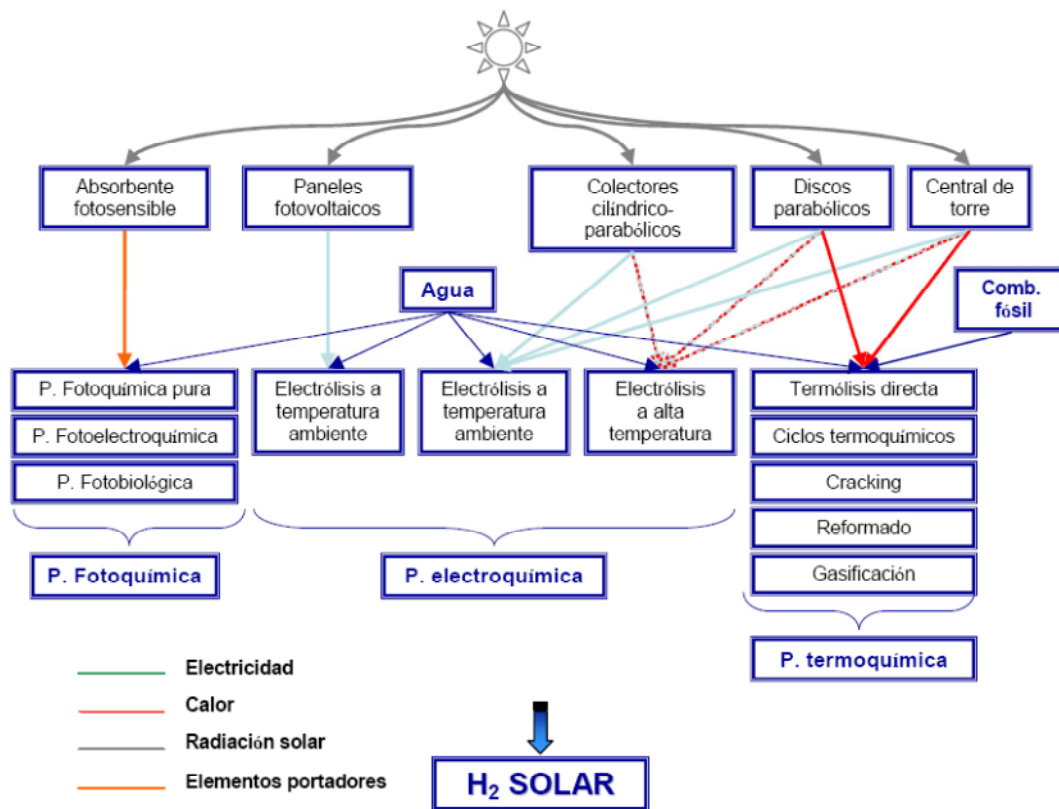


Figura 159. Métodos de producción de hidrógeno solar

Fuente: *Laboratorio energético del hidrógeno*

De todos estos métodos, los que mayor posibilidad de desarrollo presentan por su potencial de energía a suministrar son los que hacen uso de energía solar concentrada:

- La electrólisis a alta temperatura del vapor de agua, suministrando el calor y la electricidad a partir de colectores cilíndrico-parabólicos, discos parabólicos e instalaciones de torre central. Este método, frente a la electrólisis a temperatura ambiente, presenta la ventaja de requerir una entrada de energía eléctrica menor.
- Los métodos termoquímicos, entre los que se incluyen: termólisis directa del agua, ciclos termoquímicos, generalmente de dos pasos, basados en la reducción de óxidos metálicos, así como el *cracking*, el reformado y la gasificación de hidrocarburos. Estos procesos utilizan la radiación solar concentrada como fuente calorífica de alta temperatura para llevar a cabo una reacción endotérmica. Para conseguir razones de concentración elevadas se hace uso de dos de las tres configuraciones ópticas más comunes: discos parabólicos y sistemas de torre, ya que con colectores cilíndrico-parabólicos no se alcanza el nivel necesario de temperatura.

El rendimiento global, o rendimiento de conversión de energía solar a energía química, es un parámetro adecuado para evaluar el potencial industrial de un proceso y, en el caso de energía solar de alta temperatura, adquiere especial importancia. Cuanto mayor sea dicho rendimiento, menor será el área de colectores necesaria para producir una cantidad dada de hidrógeno y, consecuentemente, menores serán los costes en los que se incurra para el sistema de concentración solar, que normalmente corresponden a la mitad de la inversión total del conjunto de la planta solar-química.

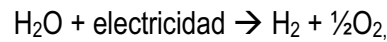
A3.12. *Concentración de la luz solar*

La concentración de la luz solar se consigue mediante dispositivos ópticos que reciben el nombre genérico de colectores de concentración. Estos colectores constan de un receptor y del concentrador propiamente dicho. La luz incide sobre el concentrador y es reflejada hacia

el receptor, que es el elemento del sistema donde la radiación se absorbe y se convierte en otro tipo de energía, en general energía térmica o química.

A3.12.1. Producción de hidrógeno por electrólisis a alta temperatura del vapor de agua

El proceso de electrólisis:



puede ocurrir tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, en cuyo caso, en lugar de agua, lo que se tiene es vapor. Este segundo método presenta la ventaja de requerir una entrada de energía eléctrica menor, lo cual se explica de forma gráfica en la siguiente figura, que muestra la dependencia del proceso de electrólisis con la temperatura.

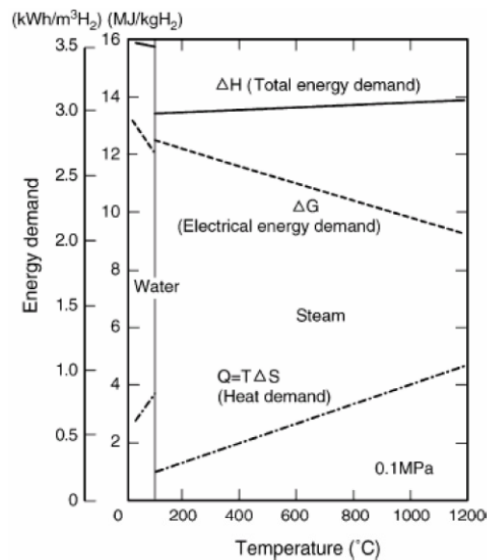


Figura 160. Demanda de energía para la electrólisis del agua y de vapor

Fuente: R. Hino, 2004 [88]

La energía total que se requiere (ΔH) para la disociación, bien sea de agua o de vapor, es la suma de la energía libre de Gibbs (ΔG) y de una cierta cantidad de energía calorífica ($T \cdot \Delta S$).

La demanda de energía eléctrica, ΔG , disminuye conforme aumenta la temperatura. Es por ello que la electrólisis del vapor puede producir hidrógeno con una potencia eléctrica menor que la que se requiere para el caso del agua a temperaturas inferiores.

En la figura que sigue se muestra de forma esquemática el acoplamiento entre una central termosolar de torre y una planta de electrólisis a alta temperatura del vapor. Esta configuración se ve favorecida, frente a la electrólisis a temperatura ambiente, por un menor coste energético global, lo cual tiene una explicación sencilla; la energía que se suministra en forma de calor no está sometida al límite impuesto por el rendimiento del ciclo ideal de Carnot en la conversión de energía térmica a electricidad. Esta ventaja también va a ser aprovechada por los métodos termoquímicos de producción de hidrógeno.

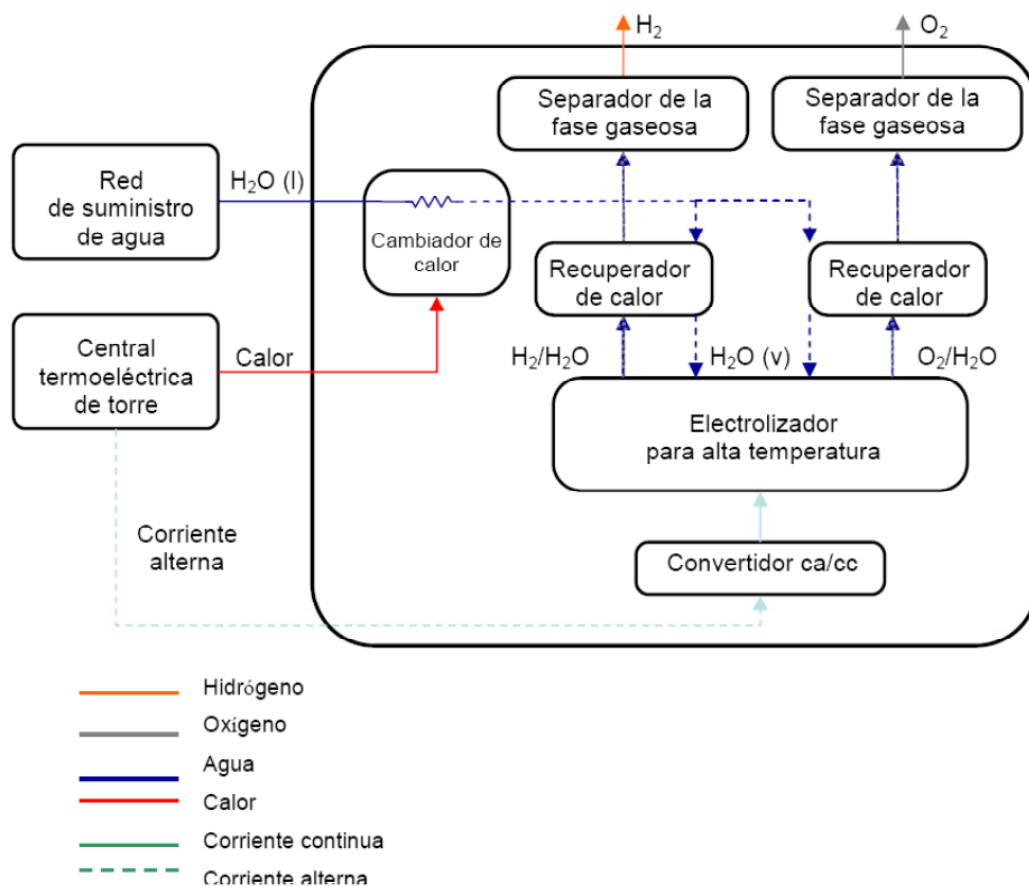


Figura 161- Planta de producción de hidrógeno solar por electrólisis a alta temperatura del vapor

Fuente: *Laboratorio energético del hidrógeno*

A3.13. Producción termoquímica de hidrógeno a partir de energía solar

La producción termoquímica de hidrógeno hace uso de una fuente calorífica de alta temperatura para llevar a cabo una reacción endotérmica. Es por ello que la investigación inicial en este campo estuvo muy ligada al desarrollo de la energía nuclear. Los ciclos termoquímicos no son exclusivamente nucleares, ni exclusivamente solares ya que, en general, se pueden acoplar a ambas fuentes de energía. Puede afirmarse, no obstante, que los que se utilizan con reactores nucleares presentan la característica de emplear temperaturas “moderadas” (no superiores a 1.000K), que garantizan un funcionamiento seguro del reactor.

En el caso solar, la limitación de temperatura no es tan restrictiva, aunque siempre existen problemas constructivos y de materiales. Para conseguir elevadas temperaturas se utilizan preferentemente centrales de torre y discos parabólicos, dispositivos que se incluyen dentro de la categoría de colectores concentradores de enfoque. Estos colectores de concentración se diferencian de los fijos o semi-fijos en que poseen un mecanismo de seguimiento del sol; de esta forma, el concentrador siempre está orientado hacia el disco solar y la radiación directa incide perpendicularmente sobre el mismo.

Los reactores termoquímicos para producir hidrógeno utilizan normalmente receptores tipo cavidad, en los que la radiación solar concentrada entra por una pequeña apertura y sufre reflexiones múltiples antes de ser absorbida. Cuanto mayor es la razón de concentración, mayor es la temperatura que se alcanza en el receptor, pero también es mayor el coste de la instalación solar. La búsqueda de un óptimo pasa por un estudio de las temperaturas necesarias para cada aplicación, en este caso, los cinco procesos termoquímicos para obtener hidrógeno a partir de energía solar son:

- Termólisis directa
- Ciclos termoquímicos
- Cracking
- Reformado

- Gasificación

Todos ellos presentan una reacción endotérmica con un umbral de temperatura.

Se citan a continuación las principales características de los procesos termoquímicos considerados de forma independiente, es decir, sin tener en cuenta el subsistema solar.

La materia prima a partir de la que se obtiene el hidrógeno es agua en el caso de la termólisis y los ciclos termoquímicos, combustibles fósiles para el *cracking*, y una combinación de combustible fósil y vapor de agua para el caso de gasificación y reformado.

A3.13.1. Hidrógeno a partir de agua por termólisis solar

La termólisis del agua es una reacción de disociación que ocurre en un único paso:



Aunque esta reacción es aparentemente muy sencilla, presenta dos graves inconvenientes que dificultan su desarrollo. Por un lado, las elevadas temperaturas que se precisan para conseguir un grado de disociación razonable (superiores a 2.500K), dan lugar a problemas de materiales y a un aumento de las pérdidas por re-radiación, disminuyendo la eficiencia de absorción. Por otro, la necesidad de una técnica efectiva de separación del hidrógeno y el oxígeno, para evitar una mezcla explosiva. Estos dos inconvenientes son la causa de que no exista de momento ninguna planta piloto en la que se realice la descomposición directa del agua.

A3.13.2. Hidrógeno a partir de agua mediante ciclos termoquímicos solares

Los altos flujos de radiación que se consiguen con los sistemas ópticos para concentración solar dan lugar a temperaturas estacionarias por encima de los 3.000K, que permiten que la conversión de la energía solar a energía térmica se realice a temperaturas del orden de los 2.000K y superiores, que son las que se emplean en los ciclos termoquímicos de dos pasos que se basan en la reducción de un óxido metálico.

El primer paso, endotérmico, es la reducción, mediante energía solar, del óxido metálico (M_xO_y). Como se observa, esta reducción puede ser al metal o a un óxido metálico de menor valencia. También se puede realizar una carbo-reducción del óxido metálico, utilizando como agente reductor carbón o gas natural. El segundo paso, que no requiere de energía solar, es la hidrólisis exotérmica del agua, acompañada de la oxidación del metal, para formar el hidrógeno y el correspondiente óxido metálico. Ya se ha comprobado experimentalmente que la reacción de separación de la molécula de agua ocurre de forma exotérmica y con una tasa de realización razonable cuando se burbujea vapor a través del metal fundido, a temperaturas del orden de 700K.

La reacción neta es $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$ pero, puesto que el hidrógeno y el oxígeno se forman en pasos diferentes, no es necesaria una separación de los mismos a altas temperaturas.

En la figura bajo esta línea se muestran diferentes ciclos termoquímicos solares de dos pasos.

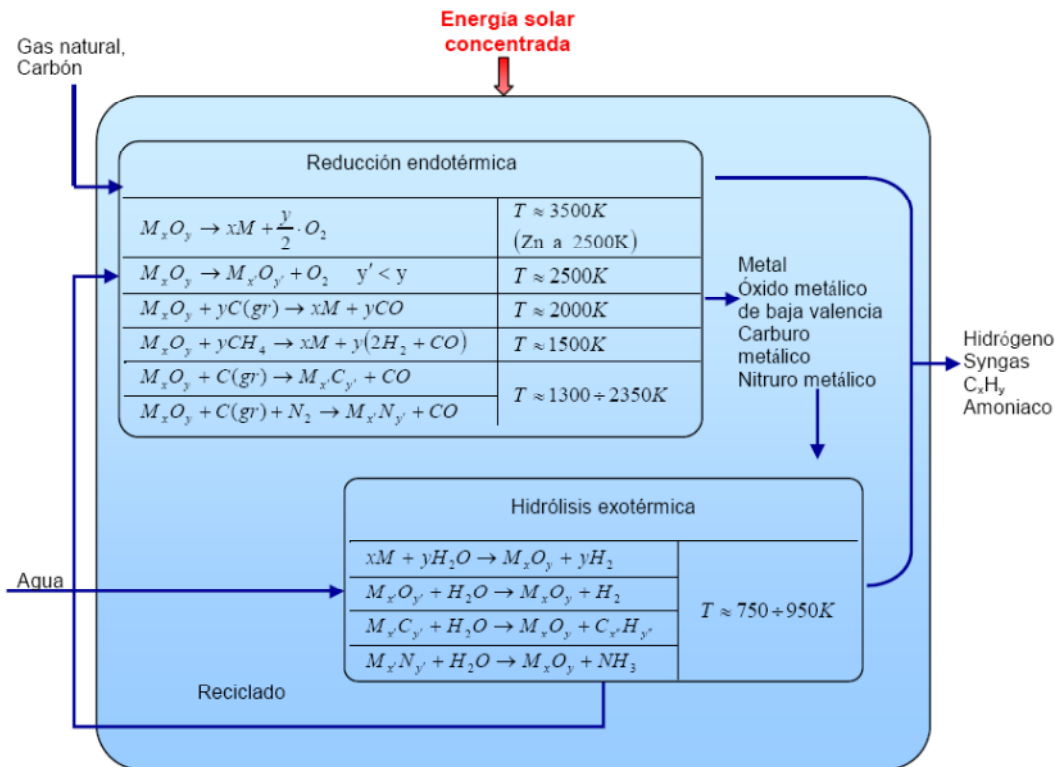
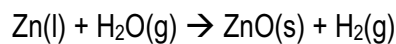
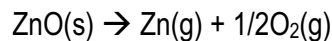


Figura 162. Ciclos termoquímicos solares de dos pasos para producir hidrógeno

Fuente: *Laboratorio energético del hidrógeno*

El par redox que se perfila actualmente como más apropiado para el ciclo termoquímico de dos pasos es el del óxido de zinc y zinc:



A3.13.3. Hidrógeno a partir de la descarbonización de combustibles fósiles

Se pueden considerar básicamente tres métodos para la obtención de hidrógeno a partir de combustible fósil: *cracking*, reformado y gasificación. El primero hace referencia a la descomposición térmica de gas natural, petróleo y otros hidrocarburos, siendo su reacción

global la que se observa en la siguiente figura. En la misma figura aparece también la reacción química representativa de la gasificación y el reformado, ambos en este caso con vapor. El reformado se practica sobre gas natural, petróleo y otros hidrocarburos ligeros, mientras que la gasificación es típica del carbón e hidrocarburos pesados.

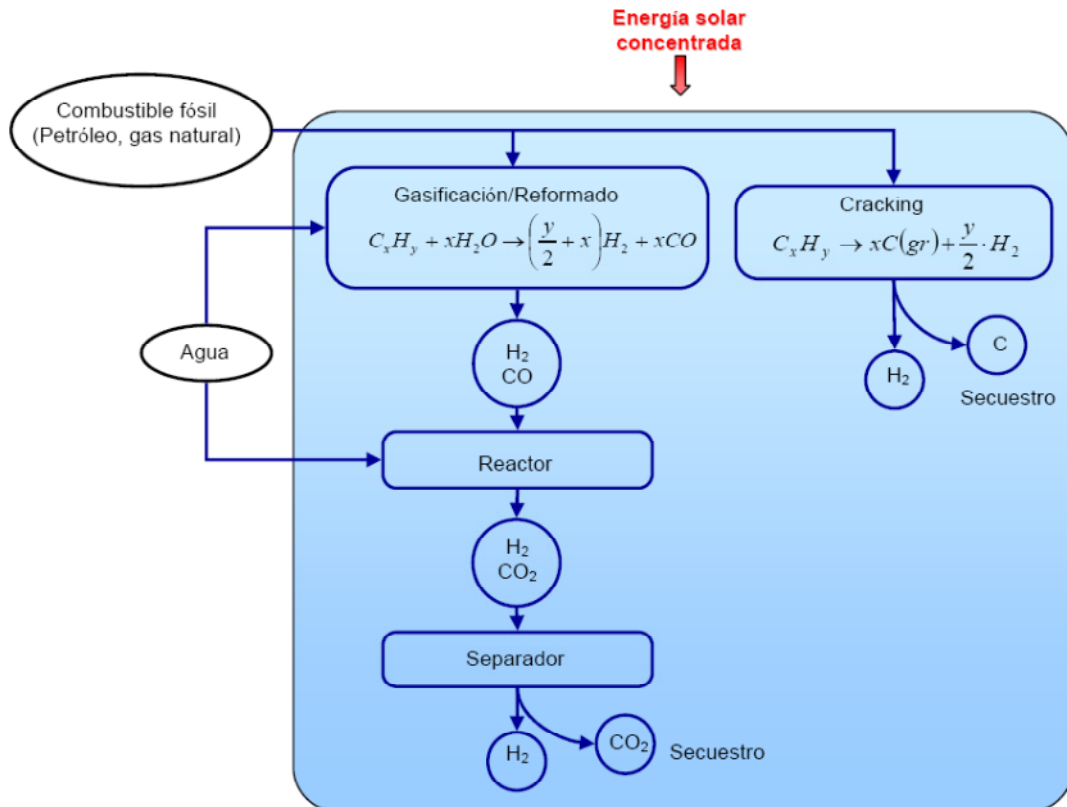


Figura 163. Producción termoquímica de hidrógeno, a partir de combustibles fósiles y agua

Fuente: *Laboratorio energético del hidrógeno*

Muchos de estos procesos se realizan a escala industrial, suministrando el calor de proceso quemando una parte significativa del combustible fósil de partida. Si la combustión es interna, existe una contaminación de los productos gaseosos, mientras que, si es externa, se produce una pérdida de rendimiento debido a las irreversibilidades asociadas a la transferencia indirecta de calor. La utilización de la energía solar como fuente de calor del proceso ofrece ciertas ventajas, entre otras, evitar la descarga de sustancias contaminantes a la atmósfera.

A3.14. Producción de hidrógeno a partir de energía eólica

Al igual que ocurre con la energía solar, el hidrógeno producido con energía eólica se presenta como una manera adecuada de almacenar, en forma de energía química, la energía procedente del viento. La propiedad intrínseca de las energías renovables es que se dispone de ellas únicamente en el momento en el que existe el recurso. En el sector eólico, el precio de venta de la energía generada está influenciado por la curva de la demanda. Por este motivo, se plantea una estrategia que permita almacenar la energía generada durante la noche para venderla a un precio mayor al que marca el mercado en el instante en el que se dispone del recurso eólico.

Para producir hidrógeno con energía eólica se utilizan procesos electroquímicos, en los que la energía requerida sea suministrada por esta fuente renovable.

A la hora de producir hidrógeno, el aprovechamiento óptimo de esta energía para así mantener su carácter renovable es disponer de un electrolizador en un parque eólico, así la energía contenida en el viento se transformará en hidrógeno. El mejor momento para realizar dicha transformación es cuando el precio de venta de la energía eólica, así como la demanda nacional, es bajo, es decir, durante la noche.

El hidrógeno obtenido se comprime para hacer más fácil su almacenamiento en un volumen más pequeño, mientras que el oxígeno, que no tiene contenido energético, se libera a la atmósfera, de la que ya es componente.

El hidrógeno se mantiene almacenado en recipientes a presión hasta el momento en el que debe emplearse para generar energía eléctrica en situaciones de demanda o necesidad de gestión.

Uniendo las turbinas eólicas a la producción de hidrógeno, se crea una sinergia que sistemáticamente reduce los inconvenientes de ambos procesos por separado. La intermitencia en la generación eólica se subsana almacenando el combustible para que

pueda ser usado en cualquier momento, mientras que al mismo tiempo, este método, supone una forma de obtención de hidrógeno, totalmente amigable con el medio ambiente.

En la Figura 164 se muestra el esquema de un sistema de producción de hidrógeno mediante aerogeneradores eólicos y su posterior utilización.

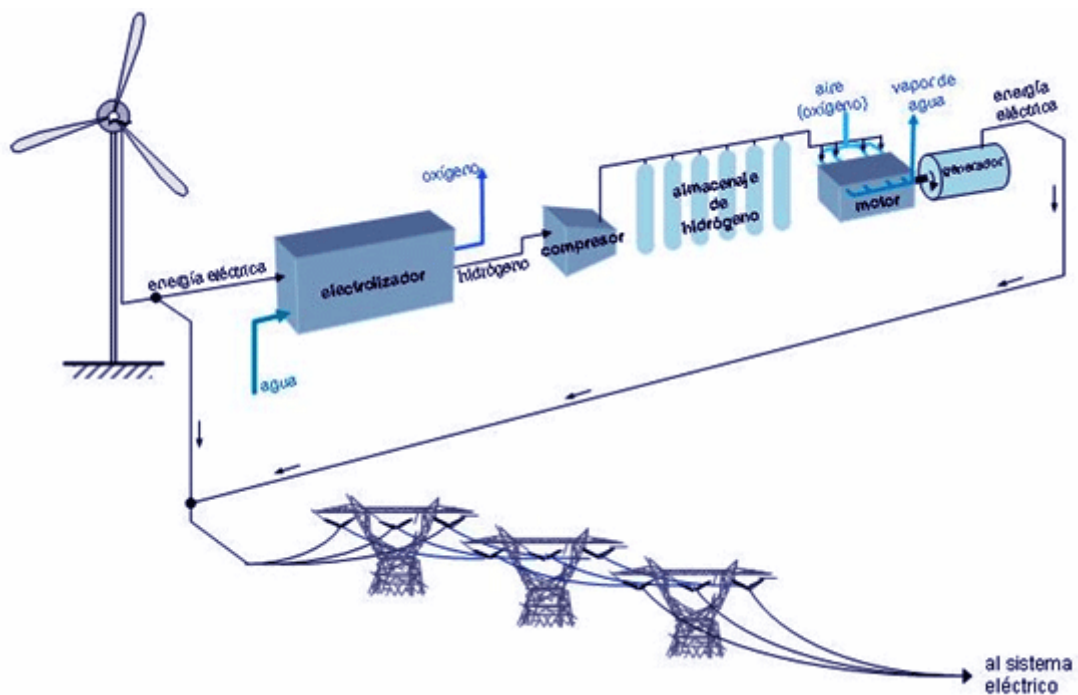


Figura 164. Sistema de producción de hidrógeno mediante aerogeneradores eólicos

Fuente: Parque Eólico Experimental Sotavento

ANEXO 4. Herramienta de Valoración

La herramienta de valoración la constituye una aplicación Excel creada para determinar la inversión necesaria para incorporar una infraestructura para el hidrógeno al sector transporte español. Esta inversión se determina para tres escenarios temporales concretos: 2015, 2030 y 2050 y para tres niveles de penetración diferentes para esta nueva tecnología, uno bajo, otro medio y un tercero alto, siguiendo las líneas marcadas en cuanto a escenarios de penetración a nivel europeo por *McKinsey* [103].

A la hora de determinar la inversión requerida y la viabilidad económica para una apuesta privada por esta nueva tecnología aplicada al transporte, se cuenta con cinco apartados principales, cada uno de ellos condicionados por una serie de variables: Subvenciones, Vehículos, Infraestructuras, Coste del hidrógeno e Ingresos por venta de hidrógeno. Estos apartados constituyen en sí las entradas de la Herramienta de Valoración.

La herramienta permite obtener la inversión necesaria para el periodo deseado, los ingresos y gastos previstos y las subvenciones, con el fin de obtener un balance económico anual. De igual modo, proporciona la posibilidad de calcular la rentabilidad de la inversión con o sin financiación externa.

A4.1. *Subvenciones*

En este apartado se recogen las subvenciones que se prevé estén en vigor en los diferentes horizontes temporales considerados.

Como referencia se toman las subvenciones obtenidas en el apartado 6.4.1.4 *Subvenciones*, a partir de las siguientes fuentes: *McKinsey* [103] y *DoE* [112] para las ayudas previstas para la producción y compra de hidrógeno y la construcción de las infraestructuras, y el Plan de Acción del Vehículo Eléctrico 2010/2012 [116], como referencia para las ayudas directas se prevé, como mínimo, se aprueben en España para la compra de vehículos de pila de combustible de hidrógeno.

Estas subvenciones, resumidas en el cuadro siguiente (que constituye el apartado subvenciones), son las que se toman como cantidades base en la herramienta. No obstante son sensibles a ser modificadas, viéndose a su vez modificadas en el resto de apartados en los que interviene esta variable.

TURISMOS	
Subvenciones (€)	
2012-2029	6000
2030-2050	0

AUTOBUSES	
Subvenciones (€)	
2012-2029	30000
2030-2050	0

INFRAESTRUCTURAS	
Subvenciones (€)	
2012-2030	50% inversión
2030-2050	0

PRODUCCIÓN H2	
Subvención (€/kg)	
2012-2018	0,5
2018-2025	0,3
2025-2050	0,3

Figura 165. Apartado SUBVENCIONES de la aplicación Excel: Herramienta de Valoración

Fuente: **The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010 [103]; Analysis of the Transition to Hydrogen Fuel Cell Vehicles and the Potential Hydrogen Energy Infrastructure Requirements. U.S. Department of Energy. 2008 [112]; Plan de Acción del Vehículo Eléctrico 2010/2012 [116]**

A4.2. Vehículos

En este apartado se tienen en cuenta las previsiones en cuanto al número de vehículos, dividiendo los vehículos en dos grupos: turismos y autobuses, ya que se espera que sea en estos dos tipos de vehículos, debido a su uso como vehículos de transporte público, donde antes se adopte la tecnología del hidrógeno para su impulsión.

En el apartado 6.4.1.1 *Vehículos*, se recogen las fuentes y el procedimiento seguido para determinar el número de vehículos para los diferentes horizontes temporales que se prevé circularan por las carreteras españolas, así como cuál será el número en función del grado de penetración de esta nueva tecnología, prestando especial atención al hecho de que la coyuntura económica en la que se encuentra sumida el país hace que las condiciones particulares para España sean diferentes a las que puedan tener otros países europeos tomados como referencia, como puede ser Alemania. De igual modo se obtienen los precios previstos para estos vehículos de pila de combustible en los diferentes horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050.

Así, en el apartado VEHÍCULOS de la aplicación Excel: Herramienta de Valoración, aparecen resumidas en tablas las variables que influyen en este apartado.

Los valores mostrados en azul en la aplicación, y que se refieren a estas variables, asumen el valor de referencia obtenido en el apartado 6.4.1.1 *Vehículos*, pero pueden ser modificados, modificándose así en el resto de apartados en los que intervienen.

Las variables tenidas en cuenta en este apartado se refieren a:

- Las características técnicas y prestaciones propias de los vehículos: vida útil, distancia media recorrida y el consumo medio.

Tabla 158. Características técnicas y prestaciones asumidas para los turismos durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Vida útil (años)	15
Distancia media recorrida (km/año)	12000
Consumo medio (kg/100km)	1

Tabla 159. Características técnicas y prestaciones asumidas para los autobuses durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Vida útil (años)	10
Distancia media recorrida (km/año)	33000
Consumo medio (kg/100km)	7,5

- El coste medio asumido tanto para los turismos como para los autobuses, tanto de adquisición, como de mantenimiento, para los tres escenarios temporales considerados (se considerarán constantes independientemente del grado de penetración de la tecnología).

Tabla 160. Costes medios de adquisición y mantenimiento asumidos para los turismos durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Coste vehículos segmento medio (C,D)		
Año	Adquisición (€)	Mantenimiento (€)
2015	35000	5000
2030	25700	4200
2050	23700	4000

Tabla 161. Costes medios de adquisición y mantenimiento asumidos para los autobuses durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Coste vehículos segmento medio (C,D)		
Año	Adquisición (€)	Mantenimiento (€)
2015	615000	9000
2030	250000	7400
2050	200000	7000

- Las subvenciones con las que se contará a la hora de adquirir un vehículo.

Tabla 162. Subvenciones asumidas a la hora de adquirir un turismo durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Subvenciones (€)	
2012-2029	6000
2030-2050	0

Tabla 163. Subvenciones asumidas a la hora de adquirir un autobús durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Subvenciones (€)	
2012-2029	30000
2030-2050	0

- El número de vehículos con tecnología de pila de combustible se prevé se incorporen al campo automovilístico de España en ese año, en función del grado de penetración de la tecnología de la pila de combustible en el sector transporte. En este caso, como se conoce el número de vehículos acumulados en los diferentes horizontes temporales (2015, 2030 y 2050), para los tres grados de penetración considerados, en el caso español se han calculado aplicando los ratios correspondientes obtenidos en el punto 6.4.1.1 *Vehículos*, se utilizará una progresión lineal para determinar los vehículos/año que se asumen para cada año de estudio. Ver Figura 166, Figura 167 y Figura 168.

A partir de estas variables es posible obtener como resultado de este apartado de la aplicación el coste unitario tomado como referencia, tanto para turismos como para autobuses (en euros) y el coste anual, en millones de euros, que supondría la incorporación al campo automovilístico del total de vehículos previstos para cada horizonte temporal, en cada uno de los tres escenarios de penetración contemplados.

Estos resultados, para los valores de referencia considerados, se muestran en las tres siguientes capturas, que para cada uno de los escenarios de penetración considerados,

reflejan la inversión que es necesario dedicar a la adquisición de vehículos para cumplir con la previsiones en cuanto al número de vehículos provistos con esta nueva tecnología en los diferentes horizontes temporales analizados: 2015, 2030 y 2050 fijados en el apartado 6.4.1.1

Vehículos:

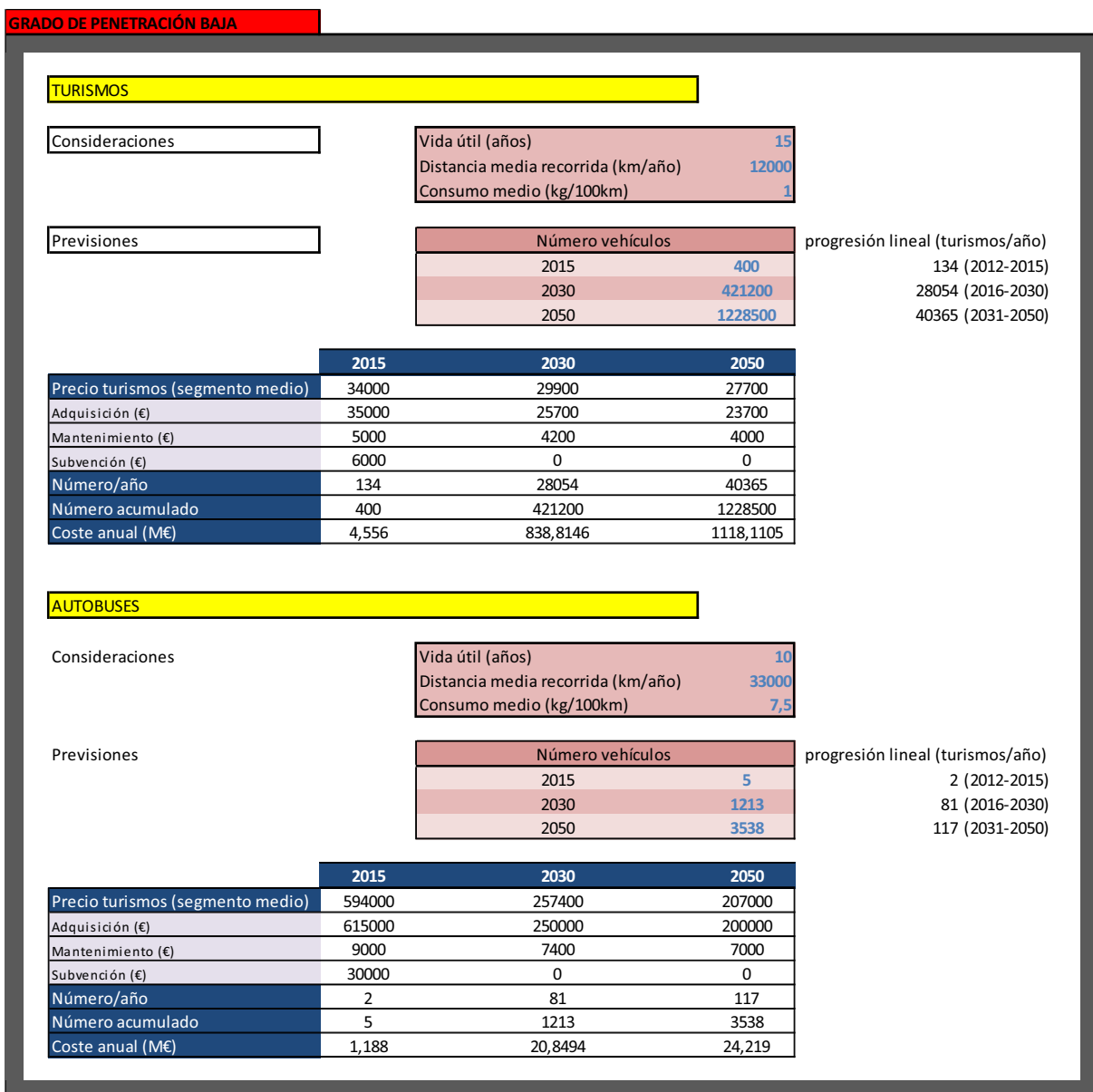


Figura 166. Apartado VEHÍCULOS-Grado de penetración baja

GRADO DE PENETRACIÓN MEDIA**TURISMOS**

Consideraciones	Vida útil (años)	15
	Distancia media recorrida (km/año)	12000
	Consumo medio (kg/100km)	1

Previsiones	Número vehículos	
	2015	2000
	2030	2107440
	2050	6142500

progresión lineal (turismos/año)
667 (2012-2015)
140363 (2016-2030)
201753 (2031-2050)

	2015	2030	2050
Precio turismos (segmento medio)	34000	29900	27700
Adquisición (€)	35000	25700	23700
Mantenimiento (€)	5000	4200	4000
Subvención (€)	6000	0	0
Número/año	667	140363	201753
Número acumulado	2000	2107440	6142500
Coste anual (M€)	22,678	4196,8537	5588,5581

AUTOBUSES

Consideraciones	Vida útil (años)	10
	Distancia media recorrida (km/año)	33000
	Consumo medio (kg/100km)	7,5

Previsiones	Número vehículos	
	2015	26
	2030	6069
	2050	17690

progresión lineal (turismos/año)
9 (2012-2015)
403 (2016-2030)
582 (2031-2050)

	2015	2030	2050
Precio turismos (segmento medio)	594000	257400	207000
Adquisición (€)	615000	250000	200000
Mantenimiento (€)	9000	7400	7000
Subvención (€)	30000	0	0
Número/año	9	403	582
Número acumulado	26	6069	17690
Coste anual (M€)	5,346	103,7322	120,474

Figura 167. Apartado VEHÍCULOS-Grado de penetración media

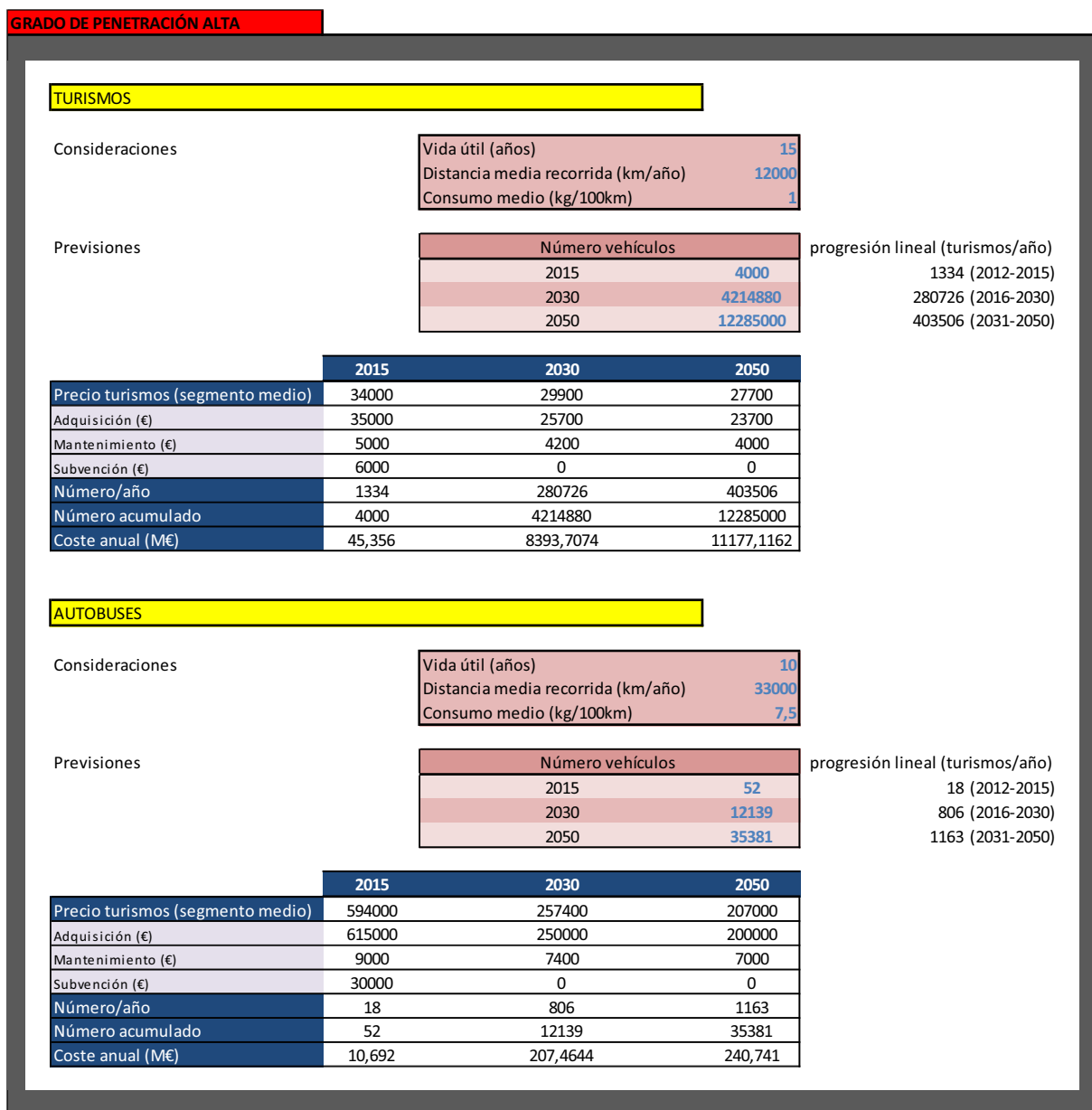


Figura 168. Apartado VEHÍCULOS-Grado de penetración alta

A4.3. *Infraestructuras*

En este apartado de la herramienta, se recogen las previsiones existentes en cuanto a las instalaciones requeridas que se prevé serán necesarias para que den servicio, en los tres escenarios temporales sometidos a estudio, a los vehículos de pila de combustible se espera circulen en España en cada uno de los niveles contemplados de penetración de esta nueva tecnología.

En el apartado 6.4.1.3 *Infraestructuras*, se recogen las fuentes y el procedimiento seguido para determinar el número de estaciones de servicio de hidrógeno requeridas para dar servicio a los vehículos que se prevé circulen en los diferentes horizontes temporales, así como cuál será el número en función del grado de penetración de esta nueva tecnología. De igual modo se reflejan los precios previstos para estas instalaciones en función de su tamaño en los diferentes horizontes temporales: 2015, 2030 y 2050.

Así, en el apartado INFRAESTRUCTURAS de la aplicación Excel: Herramienta de Análisis de Viabilidad, aparecen resumidas en tablas las variables que influyen en este apartado.

Los valores mostrados en azul en la herramienta, y que se refieren a estas variables, asumen el valor de referencia obtenido en el apartado 6.4.1.3 *Infraestructuras*, pero pueden ser modificados, modificándose así en el resto de apartados en los que influyen.

Las variables tenidas en cuenta en este apartado se refieren a:

- El precio previsto para las instalaciones de repostaje de hidrógeno (hidrogeneras), en función de su tamaño, en los diferentes horizontes temporales. El precio establecido como base se ha obtenido a partir de fuentes indicadas en el apartado 6.4.1.3 *Infraestructuras*:

Tabla 164. Precio previsto para las instalaciones de suministro de hidrógeno o hidrogeneras durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Hidrogeneras		
Tamaño	Precio 2012-2025(M€)	Precio 2025-2050(M€)
Pequeñas	0,61	0,365
Medianas	1,51	0,91
Grandes	3,775	2,275

- El tamaño de las instalaciones. El tamaño de estas instalaciones se establece en función del número de vehículos a los que puede abastecer, el número de dispensadores con el que cuentan o la capacidad de repostaje de las mismas. Las magnitudes establecidas en la herramienta para estas variables son las establecidas por McKinsey [103]; y se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 165. Características de las hidrogeneras en función de su tamaño

Fuente: *The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. McKinsey Report. 2010* [103]

Tamaño	Características		
	Número vehículos (coches/día)	Número dispensadores	Capacidad repostaje (kg/día)
Pequeña	70-100	2	400
Mediana	150-250	4	1000
Grande	450-600	10	2500

- Coste de los terrenos dedicados a las instalaciones de repostaje de hidrógeno. Para ello se establece la superficie mínima requerida para establecer una instalación en función de su tamaño (siguiendo los criterios indicados en la Tabla 165), y el precio medio por metro cuadrado se prevé tenga el suelo. El precio del suelo se considerará constante durante todo el periodo de estudio considerado 2015-2050

Tabla 166. Coste de los terrenos dedicados a albergar las hidrogeneras

Coste terrenos			
Tamaño	Superficie (m ²)	Precio medio (€/m ²)	Coste (M€)
Pequeñas	620	300	0,186
Medianas	800	300	0,24
Grandes	1200	300	0,36

- Número de empleados mínimo necesarios para sacar adelante el trabajo en cada una de las instalaciones de repostaje de hidrógeno, en función de su tamaño. Se supone que las instalaciones dan servicio 24 horas al día

Tabla 167. Número de empleados mínimo en las hidrogeneras en función del tamaño

Nº Empleados mínimo	
Pequeñas	6
Medianas	9
Grandes	18

- Sueldo bruto medio de los operarios de las hidrogeneras. Esta cuantía se considera contante a lo largo del periodo de estudio 2015-2050

Tabla 168. Sueldo bruto medio de un operario de estación de servicio

Sueldo operarios (€/año)
14000

- Consumo anual medio de hidrógeno por vehículo en función de los kilómetros recorridos anualmente y el consumo medio a los 100 kilómetros, diferenciando entre turismos y autobuses. En la herramienta, estas variables dependen de las variables introducidas en el apartado VEHÍCULOS.

Tabla 169. Consumos de hidrógeno asumidos para los turismos

Consumo anual por turismo (kg/año)	
Distancia media recorrida (km/año)	12000
Consumo medio (kg/100km)	1
Consumo medio (kg/año)	120

Tabla 170. Consumos de hidrógeno asumidos para los autobuses

Consumo anual por autobus (kg/año)	
Distancia media recorrida (km/año)	33000
Consumo medio (kg/100km)	7,5
Consumo medio (kg/año)	2475

- Las subvenciones con las que se contará a la hora de adquirir un vehículo. Esta variable es modificable en el apartado SUBVENCIONES.

Tabla 171. Subvenciones asumidas a la hora de construir una instalación de suministro de hidrógeno durante los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Subvenciones (€)	
2012-2030	50% inversión
2030-2050	0

- El número de hidrogeneras se prevé se incorporen a la red de infraestructuras del hidrógeno de España en ese año, en función del grado de penetración de la tecnología de la pila de combustible en el sector transporte y el tamaño de éstas. En este caso, como se conoce el número de instalaciones acumuladas en los diferentes horizontes temporales (2015, 2030 y 2050) para los tres grados de penetración considerados, se utilizará una progresión lineal para determinar los instalaciones/año que se asumen como máximo para cada año de estudio. Ver Figura 169, Figura 170 y Figura 171.

A partir de estas variables, para cada uno de los tres horizontes temporales estudiados y en cada uno de los tres escenarios de penetración contemplados, es posible obtener como resultado de este apartado de la aplicación:

- el coste anual que supondría la construcción de hasta el número máximo de instalaciones fijadas para cada año
- el número total de hidrogenas construidas en cada año
- la capacidad de suministro anual de las hidrogenas instaladas en ese año
- el número de hidrogenas acumuladas por tamaños hasta ese momento
- la inversión total que han supuesto la instalación de ese número acumulado de hidrogenas
- la capacidad de suministro de hidrógeno que tienen en total el número acumulado de hidrogenas hasta el momento
- la demanda de hidrógeno anual de los vehículos incorporados al campo automovilístico español en el año en estudio
- la demanda de hidrógeno anual del total de vehículos de pila de combustible adquiridos hasta el año en estudio
- grado de uso de las hidrogenas, obtenido a partir de la relación entre la capacidad de suministro de hidrógeno que tienen el total de hidrogenas acumuladas y la demanda total de hidrógeno del total de vehículos adquiridos hasta la fecha en estudio.

Estos resultados se muestran en las tres siguientes capturas:

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

GRADO DE PENETRACIÓN BAJA

	Penetración Baja			Nº Hidrogeneras España			Nuevas instalaciones/año		
	Pequeña	Mediana	Grande	Pequeña	Mediana	Grande	Pequeña	Mediana	Grande
2010	3	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	4	0	0	1	0	0	1	0	0
2030	51	19	46	3	1	3	3	1	3
2050	150	51	128	5	2	4	5	2	4

	2015	2030	2050
Coste hidrogeneras (M€/año)	0,398	5,354	15,595
Coste construcción (M€/año)	0,796	10,708	15,595
Número pequeñas	1	3	5
Número medianas	0	1	2
Número grandes	0	3	4
Número total de hidrogeneras/año	1	7	11
Subvención (M€/año)	0,398	5,354	0
Capacidad de suministro hidrogeneras/año (kg/año)	146000	3540500	5110000
Hidrogeneras acumuladas	4	116	329
Número pequeñas	4	51	150
Número medianas	0	19	51
Número grandes	0	46	128
Coste hidrogeneras acumuladas (M€/año)	1,592	85,5805	305,827
Capacidad de suministro hidrogeneras acumuladas (kg/año)	584000	56356000	157315000
Número turismos/año	134	28054	40365
Número autobuses/año	2	81	117
Demanda hidrógeno vehículos anuales/año (kg/año)	21030	3566955	5133375
Número turismos acumulados	400	421200	1228500
Número autobuses acumulados	5	1213	3538
Demanda hidrógeno vehículos acumulados/año (kg/año)	60375	53546175	156176550
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	10,34%	95,01%	99,28%

Figura 169. Apartado INFRAESTRUCTURAS-Grado de penetración baja

GRADO DE PENETRACIÓN MEDIA

	Penetración Media			Nº Hidrogeneras España		
	Pequeña	Mediana	Grande	Pequeña	Mediana	Grande
2010	3	0	0	0	0	0
2015	6	0	0	1	0	0
2030	247	92	221	16	6	15
2050	743	254	638	24	9	21

	2015	2030	2050
Coste hidrogeneras (M€/año)	0,398	27,621	78,909
Coste construcción (M€/año)	0,796	55,241	78,909
Número pequeñas	1	16	24
Número medianas	0	6	9
Número grandes	0	15	21
Número total de hidrogeneras/año	1	37	54
Subvención (M€/año)	0,398	27,621	0,000
Capacidad de suministro hidrogeneras/año (kg/año)	146000	18213500	25951500
Hidrogeneras acumulado	6	593	1635
Número pequeñas	6	247	743
Número medianas	0	92	254
Número grandes	0	254	638
Coste hidrogeneras acumuladas (M€/año)	2,388	455,594	1924,642
Capacidad de suministro hidrogeneras acumulado (kg/año)	876000	301417000	783363000
Número turistas/año	667	140363	201753
Número autobuses/año	9	403	582
Demanda hidrógeno vehiculos anuales/año (kg/año)	102315	17840985	25650810
Número turistas acumulados	2000	2107440	6142500
Número autobuses acumulados	26	6069	17690
Demanda hidrógeno vehiculos acumulados/año (kg/año)	304350	267913575	780882750
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	34,74%	88,88%	99,68%

Figura 170. Apartado INFRAESTRUCTURAS-Grado de penetración media

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

GRADO DE PENETRACIÓN ALTA

	Penetración Alta			Nº Hidrogeneras España		
	Pequeña	Mediana	Grande	Pequeña	Mediana	Grande
2010	3	0	0	0	0	0
2015	8	0	0	2	0	0
2030	491	183	438	32	12	29
2050	1482	507	1272	50	16	42

	2015	2030	2050
Coste hidrogeneras (M€/año)	0,796	53,9235	156,62
Coste construcción (M€/año)	1,592	107,847	156,62
Número pequeñas	2	32	50
Número medianas	0	12	16
Número grandes	0	29	42
Número total de hidrogeneras/año	2	73	108
Subvención (M€/año)	0,796	53,9235	0
Capacidad de suministro hidrogeneras/año (kg/año)	292000	35514500	51465000
Hidrogeneras acumulado	8	1181	3261
Número pequeñas	8	491	1482
Número medianas	0	183	507
Número grandes	0	507	1272
Coste hidrogeneras acumuladas (M€/año)	3,184	908,468	3839,7
Capacidad de suministro hidrogeneras acumulado (kg/año)	1168000	601118500	1562127000
Número turismos/año	1334	280726	403506
Número autobuses/año	18	806	1163
Demanda hidrógeno vehículos anuales/año (kg/año)	204630	35681970	51299145
Número turismos acumulados	4000	4214880	12285000
Número autobuses acumulados	52	12139	35381
Demanda hidrógeno vehículos acumulados/año (kg/año)	608700	535829625	1561767975
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	52,11%	89,14%	99,98%

Figura 171. Apartado INFRAESTRUCTURAS-Grado de penetración alta

A4.4. *Coste del Hidrógeno*

En este apartado se tienen en cuenta aquellos aspectos que influyen en el precio de obtención del hidrógeno que será suministrado en las hidrogeneras. En esta aplicación sólo se tendrán en cuenta dos medios de producción de hidrógeno, por ser considerados los de uso más generalizado: el reformado de gas natural y la electrolisis del agua

En el apartado 6.4.1.2 *Precio del Hidrógeno*, se recogen las fuentes y el procedimiento seguido para determinar el precio del hidrógeno en los diferentes horizontes temporales analizados en función del procedimiento de producción y por consiguiente la energía primaria utilizada en cada uno de los procesos: gas natural o electricidad.

De este modo, en el apartado COSTE H2 de la aplicación Excel: Herramienta de Valoración, aparecen resumidas en tablas las variables que influyen en este apartado.

Los valores mostrados en azul en la aplicación, y que se refieren a estas variables, asumen el valor de referencia obtenido en el apartado 6.4.1.2 *Precio del Hidrógeno*, pero pueden ser modificados, modificándose así en el resto de apartados en los que intervienen.

Las variables tenidas en cuenta en este apartado se refieren a:

- El precio de adquisición del hidrógeno correspondiente a los tres horizontes temporales sometidos a estudio: 2015, 2030 y 2050, y que incluirá el costo de producción (centralizada o distribuida) y distribución del hidrógeno hasta la instalación de repostaje de hidrógeno, en el caso de que se produzca en una localización diferente a donde se consuma, y que será el precio mínimo que una hidrogenera tendrá que pagar por cada kilogramo de hidrógeno

Tabla 172. Precio base de producción más distribución del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Precio base producción + distribución (€/kg)	
2015	4,2
2030	4
2050	3,5

- Las subvenciones con las que se prevé podrán contar las hidrogeneras a la hora de la compra o producción propia del hidrógeno objeto usuarios. Esta variable es modificable en el apartado SUBVENCIONES. La subvención prevista en el periodo 2018-2025 está previsto disminuya desde los 0,5€/kg a los 0,3€/kg de forma lineal, experimentando una disminución de 0,028571€/kg anual durante el periodo

Tabla 173. Subvenciones previstas para la producción del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Subvención (€/kg)	
2012-2018	0,5
2018-2025	0,3
2025-2050	0,3

variación lineal 0,028571

- Los impuestos con los que está previsto se grabe a este nuevo combustible. Al tratarse de un combustible verde, libre emisiones de gases de efecto invernadero, se supondrá que de acuerdo con lo establecido por *McKinsey* [103] y el *DoE* [112], se vea bonificado con la exención de impuestos, al menos en estas primeras etapas

Tabla 174. Impuestos previstos para el hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Impuestos (€/kg)	
2012-2050	0

- Influencia en porcentaje del precio de las energías utilizadas en los procesos de reformado del gas natural y de electrolisis del agua en el precio base de producción

del hidrógeno en los tres horizontes temporales sometidos a estudio. Esta variable se utiliza para calcular lo sensible que se mostrará el precio final del hidrógeno a las variaciones del precio del gas natural y la energía eléctrica

Tabla 175. Influencia en % del precio del gas natural y la energía eléctrica en el precio de producción del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Influencia en % del precio de las energías en el precio de producción del H2		
	% GN	% Electricidad
2015	15,4	42,4
2030	26,1	54,6
2050	53,3	85,8

- Precios máximos y mínimos entre los que se prevé oscile el precio del gas natural y la energía eléctrica en los horizontes temporales estudiados: 2015, 2030 y 2050, así como las variaciones en porcentaje que suponen estos precios extremos respecto al precio base previsto. Estas variables serán utilizadas para fijar unos valores máximos y mínimos a la sensibilidad con que se mostrará el precio final del hidrógeno a las variaciones del precio del gas natural y la energía eléctrica

Tabla 176. Precio base y valores máximos y mínimos que se espera puedan tomar el gas natural y la energía eléctrica en los escenarios temporales estudiados: 2015, 2030 y 2050

	Precio de la Energía								
	2015			2030			2050		
	mínimo	base previsto	máximo	mínimo	base previsto	máximo	mínimo	base previsto	máximo
Gas Natural (€/MWh)	12,32	19,38	38,08	15,68	31,36	62,72	21,28	56	114,24
%	-36,43%	0,00%	96,49%	-50,00%	0,00%	100,00%	-62,00%	0,00%	104,00%
Electricidad (€/MWh)	18	53,48	106	32	65,46	130	60	90,1	180
%	-66,34%	0,00%	98,20%	-51,12%	0,00%	98,59%	-33,41%	0,00%	99,78%

A partir de estas variables, para cada uno de los tres horizontes temporales estudiados, es posible obtener los siguientes resultados de este apartado de la aplicación:

- Coste del hidrógeno, incluyendo costes de producción y distribución, que se obtiene restándole al precio base previsto, las ayudas se espera se proporciones a nivel institucional, sumándole los impuestos correspondientes y aplicando las correcciones debidas a la variación del precio del gas natural y la energía eléctrica respecto al precio base previsto inicialmente para estas fuentes de energía. Este precio también variará en función de que sistema de producción de hidrógeno es el más empleado en cada uno de los horizontes temporales estudiados: el reformado de gas natural o la electrolisis del agua
- Coste anual del hidrógeno demandado por las hidrogeneras que se han instalado el año en estudio
- Coste anual del hidrógeno demandado por el total acumulado de hidrogeneras instaladas hasta la fecha en estudio

Estos resultados se muestran en la siguiente captura de la aplicación:

	2015	2030	2050
Precio final producción y distribución (€/kg)	3,7	3,7	3,2
Producción +distribución (€/kg)	4,2	4	3,5
Producción mediante reformado gas natural (%)	80%	50%	20%
Variación precio Gas Natural (%)	0,00%	0,00%	0,00%
Producción mediante electrolisis (%)	20%	50%	80%
Variación precio Electricidad (%)	0,00%	0,00%	0,00%
Subvención (€/kg)	0,5	0,3	0,3
Impuestos (€/kg)	0	0	0
Coste anual para hidrogeneras anuales (M€/año)	0,5402	67,38995	83,0448
Capacidad de suministro hidrogeneras/año (kg/año)	146000	18213500	25951500
Coste anual para hidrogeneras acumuladas (M€/año)	2,701	1115,2429	2506,7616
Capacidad de suministro hidrogeneras acumuladas (kg/año)	730000	301417000	783363000

* Según límites fijados en la tabla *Precio de la Energía*

* Según límites fijados en la tabla *Precio de la Energía*

Figura 172. Apartado COSTE H2 de la aplicación

A4.5. *Ingresos Provenientes de la Venta del Hidrógeno*

En este apartado se tienen en cuenta aquellos aspectos que influyen en el precio de venta del hidrógeno que será suministrado en las hidrogeneras. Este factor es importante ya que a partir de este valor y del precio de obtención del hidrógeno visto en el apartado anterior se obtiene el beneficio bruto obtenido de la actividad económica de una hidrogenera centrada en la venta exclusiva de hidrógeno. Luego esta actividad se puede ver cumplimentada con otras, como tiendas o lavaderos de coches, pero es análisis de éstas no son cometido del presente estudio.

En el apartado 6.4.1.2 *Precio del Hidrógeno*, se recoge las fuentes y el procedimiento seguido para determinar el precio de venta del hidrógeno al usuario final en los diferentes horizontes temporales analizados.

De este modo, en el apartado INGRESOS H2 de la Herramienta de Valoración, aparecen resumidas en tablas las variables que influyen en este apartado.

Los valores mostrados en azul en la aplicación, y que se refieren a estas variables, asumen el valor de referencia obtenido en el apartado 6.4.1.2 *Precio del Hidrógeno*, pero pueden ser modificados, modificándose así en el resto de apartados en los que intervienen.

Las variables tenidas en cuenta en este apartado se refieren a:

- El precio base de venta del hidrógeno a los usuarios finales correspondiente a los tres horizontes temporales sometidos a estudio: 2015, 2030 y 2050. Se trata del precio mínimo al que se prevé vendan las hidrogeneras su hidrógeno.

Tabla 177. Precio base de venta del hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Precio base venta hidrógeno (€/kg)	
2015	9,9
2030	5
2050	4,4

- Los impuestos con los que está previsto se grabe a este nuevo combustible. Al tratarse de un combustible verde, libre emisiones de gases de efecto invernadero, se supondrá que de acuerdo con lo establecido por *McKinsey* [103] y el *DoE* [112], se vea bonificado con la exención de impuestos, al menos en estas primeras etapas.

Tabla 178. Impuestos previstos para el hidrógeno en los escenarios temporales considerados: 2015, 2030 y 2050

Impuestos (€/kg)	
2012-2050	0

- Consumo anual medio de hidrógeno por vehículo en función de los kilómetros recorridos anualmente y el consumo medio a los 100 kilómetros, diferenciando entre turismos y autobuses. En la herramienta, estas variables dependen de las variables introducidas en el apartado VEHÍCULOS.

Tabla 179. Consumos de hidrógeno asumidos para los turismos

Consumo anual por Turismo (kg/año)	
Distancia media recorrida (km/año)	12000
Consumo medio (kg/100km)	1
Consumo medio (kg/año)	120

Tabla 180. Consumos de hidrógeno asumidos para los autobuses

Consumo anual por Autobús (kg/año)	
Distancia media recorrida (km/año)	33000
Consumo medio (kg/100km)	7,5
Consumo medio (kg/año)	2475

A partir de estas variables, para cada uno de los tres horizontes temporales estudiados, es posible obtener los siguientes resultados:

- Ingresos obtenidos de la venta del hidrógeno, que se obtiene sumándole al precio base de venta del hidrógeno los impuestos correspondientes
- Ingresos anuales obtenidos como resultado de la venta del hidrógeno demandado por los usuarios finales en las hidrogeneras que se han instalado el año en estudio. Obtenidos a partir de los consumos previstos para los vehículos en los horizontes temporales estudiados
- Ingresos anuales obtenidos como resultado de la venta del hidrógeno demandado por el total acumulado de hidrogeneras instaladas hasta la fecha en estudio. Obtenidos a partir de los consumos previstos para los vehículos en los horizontes temporales estudiados

Estos resultados se muestran en la siguiente captura de la aplicación:

	2015	2030	2050
Ingresos (€/kg)	9,9	5	4,4
Impuestos (€/kg)	0	0	0
Venta al público (€/kg)	9,9	5	4,4
Ingresos anuales vehículos anuales (M€/año)	1,968516	89,105925	112,852674
Número turismos/año	667	140363	201753
Número autobuses/año	48	395	581
Ingresos anuales vehículos acumulados (M€/año)	3,76836	327,996675	929,7441
Número turismos acumulados/año	2000	2107440	6142500
Número autobuses acumulados/año	144	6069	17690

Figura 173. Apartado INGRESOS H2 de la aplicación Excel: Herramienta de Análisis de Viabilidad

A4.6. *Herramienta*

La herramienta propiamente dicha define para cada uno de los horizontes temporales establecidos: 2015, 2030 y 2050 la inversión necesaria para introducir en el sistema de transporte las nuevas tecnologías del hidrógeno de acuerdo a los condicionantes y valores atribuidos a las variables que se han definido hasta el momento para cada uno de los grados de penetración definidos.

Los valores mostrados en azul en este apartado de la aplicación pueden ser modificados, pero dentro de unas opciones o intervalos que han sido fijados en los apartados anteriores de la herramienta.

Esta herramienta, para cada uno de los horizontes temporales que se han definido: 2015, 2030 y 2050, se divide en dos partes principales, una primera en la que se establece la inversión total requerida para instaurar la infraestructura del hidrógeno en el sistema actual, y otra que opcionalmente permite calcular la rentabilidad de la inversión a partir de una financiación externa parcial o total.

A4.6.1. *Inversión*

La parte correspondiente a la obtención de la inversión total a realizar viene mostrada en las cuatro tablas siguientes, en las que se refleja un ejemplo para el año 2015: en la Tabla 181, de introducción de datos y resultados intermedios, se selecciona el grado deseado de penetración de la tecnología para realizar el análisis y el número de vehículos e hidrogenas a adquirir o construir en el horizonte temporal correspondiente, de acuerdo a los valores máximos obtenidos anteriormente. A partir de estos datos y con las variables definidas en los apartados anteriores se obtienen una serie de resultados intermedios.

En el caso mostrado se ha seleccionado un grado de penetración alta, para el que ya se han definido en los apartados anteriores el número máximo de vehículos propios que es posible adquirir y el número máximo de hidrogenas a construir para mantenerse dentro de las

previsiones definidas para cada horizonte temporal y grado de penetración establecidos. Los valores correspondientes a la demanda total acumulada por la flota de vehículos total prevista en el año en estudio, el grado de uso de las hidrogeneras y la capacidad de suministro de las hidrogeneras en función del tamaño también son resultados que han sido definidos en los apartados anteriores de la aplicación.

De este modo, una vez se ha seleccionado el número de vehículos propios de cada tipo y el número de hidrogeneras de cada tamaño a incorporar a la fase de estudio de la inversión (recordar que nunca podrán superar los valores máximos fijados previamente), se obtienen los siguientes resultados:

- Precio de los vehículos adquiridos en nuestro sistema de hidrógeno
- Demanda de hidrógeno generada por nuestra flota de vehículos
- Precio de las hidrogeneras incorporadas a nuestra infraestructura del hidrógeno
- Capacidad de suministro del total de las hidrogeneras incorporadas
- Coste del personal necesario para operar las nuevas instalaciones
- Coste que le supone a la hidrogenera el obtener el hidrógeno que suministrará a sus usuarios. Viene definido por la capacidad de suministro de las hidrogeneras multiplicada por el precio base de producción y distribución del hidrógeno (calculado en COSTE H₂).
- Ingresos brutos debido a la venta del hidrógeno en las hidrogeneras. Viene definido por el producto de la capacidad de suministro de las hidrogeneras, el precio base de venta del hidrógeno al usuario final (calculado en INGRESOS H₂) y el grado de uso de las hidrogeneras, que representa que deberá asumir la instalación por la no venta del total de hidrógeno almacenado.

Tabla 181. Introducción de datos y resultados intermedios para obtener la inversión requerida. Año 2015

2015		
Grado de penetración	Alta	
Número vehículos propios	Valor máximo	
Turismos	1334	1334
Autobuses	18	18
Precio vehículos propios (M€)	56,048	
Demanda H2 Flota Propia (kg/año)	204630	
Demanda total acumulada 2015 (kg/año)	608700	
Número de hidrogenas propias	Valor máximo	
Pequeñas	2	2
Medianas	0	0
Grandes	0	0
Precio hidrogenas propias (M€)	0,796	
Grado de uso de las hidrogenas (%)	52,11%	
Capacidad de suministro hidrogenas propias (kg/año)	292000	
Pequeñas	146000	
Medianas	365000	
Grandes	912500	
Coste de personal (M€/año)	0,168	
Coste producción + distribución hidrógeno (M€/año)	1,080	
Ingresos hidrógeno (M€/año)	1,507	

A continuación se muestran unas tablas que recogen de forma resumida la inversión que es necesario realizar en concepto de adquisición de vehículos y construcción de infraestructuras. En la Tabla 182 se muestra la inversión a realizar en el año en estudio, de acuerdo a las premisas introducidas en la tabla anterior; y en la Tabla 183 la inversión total que se ha tenido que realizar hasta el año en estudio para cumplir con las previsiones fijadas en los apartados anteriores de acuerdo con *McKinsey* [103].

Tabla 182. Resumen de la inversión requerida. Año 2015

INVERSIÓN	2015
Vehículos (M€)	56,048
Hidrogenas (M€)	0,796
TOTAL	56,844

Tabla 183. Resumen de la inversión requerida. Acumulado hasta año 2015

ACUMULADO HASTA 2015	
Vehículos (M€)	166,888
Hidrogeneras (M€)	3,184
TOTAL	170,072

En la Tabla 184 se muestra la cuenta de resultado correspondiente a la actividad económica a desarrollar, que coincide con la actividad de compra y venta de hidrógeno, por el total de las hidrogeneras instaladas hasta el año en estudio, en este caso el 2015. La cuenta de resultados correspondiente a las hidrogeneras propias construidas exclusivamente en el año sometido a estudio se puede ver en la Figura 174, incluida en el apartado A4.6.2. *Financiación.*

Tabla 184. Cuenta de resultados consecuencia de la actividad de la venta de la demanda total acumulada de hidrógeno 2015

INGRESOS	6,026
Venta hidrógeno (€)	6,026
Otras subvenciones (M€)	0,000
Otros Ingresos (€)	0,000
GASTOS	3,052
Producción + distribución de H2 (€)	2,252
Operación y mantenimiento (€)	0,127
Personal (€)	0,672
Imprevistos (€)	0,000
Otros gastos (€)	0,000

A continuación se muestran las tablas correspondientes a la parte de inversión de unos ejemplos desarrollados en los horizontes temporales 2030 (Tabla 185 - Tabla 188) y 2050 (Tabla 189 - Tabla 192). Como se apreciará, se actúa del mismo modo que para el ejemplo anterior.

Ejemplo horizonte temporal 2030:

Tabla 185. Introducción de datos y resultados intermedios para obtener la inversión requerida. Año 2030

2030		
Grado de penetración	Baja	
Número vehículos propios	Valor máximo	
Turismos	28054	28054
Autobuses	81	81
Precio vehículos propios (M€)	859,664	
Demanda H2 Flota Propia (kg/año)	3566955	
Demanda total acumulada 2015 (kg/año)	53546175	
Número de hidrogeneras propias	Valor máximo	
Pequeñas	3	3
Medianas	1	1
Grandes	3	3
Precio hidrogeneras propias (M€)	5,354	
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	95,01%	
Capacidad de suministro hidrogeneras propias (kg/año)	3540500	
Pequeñas	146000	
Medianas	365000	
Grandes	912500	
Coste de personal (M€/año)	1,134	
Coste producción + distribución hidrógeno (M€/año)	13,100	
Ingresos hidrógeno (M€/año)	16,820	

Tabla 186. Resumen de la inversión requerida. Año 2030

INVERSIÓN	2030
Vehículos (M€)	859,664
Hidrogeneras (M€)	5,354
TOTAL	865,018

Tabla 187. Resumen de la inversión requerida. Acumulado hasta año 2030

ACUMULADO HASTA 2030	
Vehículos (M€)	12906,1062
Hidrogeneras (M€)	85,581
TOTAL	12991,687

Tabla 188. Cuenta de resultados consecuencia de la actividad de la venta de la demanda total acumulada de hidrógeno 2030

INGRESOS	267,731
Venta hidrógeno (€)	267,731
Otras subvenciones (M€)	0,000
Otros Ingresos (€)	0,000
GASTOS	219,814
Producción + distribución de H2 (€)	198,121
Operación y mantenimiento (€)	3,423
Personal (€)	18,270
Imprevistos (€)	0,000
Otros gastos (€)	0,000

Ejemplo horizonte temporal 2050:

Tabla 189. Introducción de datos y resultados intermedios para obtener la inversión requerida. Año 2050

2050		
Grado de penetración	Media	
Número vehículos propios		Valor máximo
Turismos	201753	201753
Autobuses	582	582
Precio vehículos propios (M€)	5709,0321	
Demanda H2 Flota Propia (kg/año)	25650810	
Demanda total acumulada 2015 (kg/año)	780882750	
Número de hidrogeneras propias		Valor máximo
Pequeñas	24	24
Medianas	9	9
Grandes	21	21
Precio hidrogeneras propias (M€)	78,909	
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	99,68%	
Capacidad de suministro hidrogeneras propias (kg/año)	25951500	
Pequeñas	146000	
Medianas	365000	
Grandes	912500	
Coste de personal (M€/año)	8,442	
Coste producción + distribución hidrógeno (M€/año)	83,045	
Ingresos hidrógeno (M€/año)	113,825	

Tabla 190. Resumen de la inversión requerida. Año 2050

INVERSIÓN	2050
Vehículos (M€)	5709,0321
Hidrogeneras (M€)	78,909
TOTAL	5787,9411

Tabla 191. Resumen de la inversión requerida. Acumulado hasta año 2050

ACUMULADO HASTA 2050	
Vehículos (M€)	173809,08
Hidrogeneras (M€)	1968,119
TOTAL	175777,199

Tabla 192. Cuenta de resultados consecuencia de la actividad de la venta de la demanda total acumulada de hidrógeno 2050

INGRESOS	3435,884
Venta hidrógeno (€)	3435,884
Otras subvenciones (M€)	0,000
Otros Ingresos (€)	0,000
GASTOS	2832,742
Producción + distribución de H2 (€)	2498,825
Operación y mantenimiento (€)	78,725
Personal (€)	255,192
Imprevistos (€)	0,000
Otros gastos (€)	0,000

A4.6.2. Financiación

La aplicación brinda la posibilidad de estudiar la rentabilidad de la inversión a realizar.

En primer lugar se debe indicar la inversión que debe considerarse en la cuenta de resultados. Esta inversión puede oscilar desde el 100%, si toda la inversión va a ser acometida desde agentes privados, hasta el 0% si se hace cargo la administración del total de la inversión.

Una vez definido el porcentaje de inversión a considerar en la cuenta de resultados se debe definir qué parte de la inversión corresponde a fondos propios y cuál a fondos ajenos, así como el plazo de amortización del préstamo y el tipo de interés.

Además deben indicarse otros indicadores como son los costes de mantenimiento y gestión de las instalaciones, reflejados en porcentaje respecto a la facturación anual, el valor del IPC y otros factor porcentual que cubra bien los imprevistos, bien el resto de gastos que puedan originarse del normal funcionamiento de las instalaciones.

En la siguiente tabla se recoge el cuadro a cumplimentar en la aplicación que recoge estas variables comentadas.

Tabla 193. Cuadro de variables de financiación

Inversión (M€)	12,397
Inversión considerada en la cuenta de resultados	90,00%
Fondos propios	20,00%
Fondos ajenos	80,00%
% máximo	
Años máximo	20
Plazo de la amortización	10
Plazo de la financiación ajena (años)	20
Tipo de interés	5,00%
Vida útil instalación (años)	20
Costes de mantenimiento y gestión (% facturación anual)	4%
Otros gastos	0%
IPC	2,875%
Impuesto de sociedades	0
Deducción impuesto sociedades	0

Una vez fijadas estas variables se genera una cuenta de resultados y un análisis de rentabilidad que se muestran en la captura que se muestra en la Figura 174, correspondiente al ejemplo de inversión para el año 2015 mostrado en el apartado anterior. Las cantidades correspondientes a amortizaciones, intereses y desembolsos con las que se calculan beneficio bruto, beneficio antes de intereses e impuestos (BAIT), beneficios antes de impuestos y después de intereses (BAT), beneficio neto y cash flow, necesarios para calcular la rentabilidad de la inversión (TIR), se obtienen a partir de un cuadro de financiación que se genera en la aplicación para cada horizonte temporal, y que se muestra en la Figura 175. Este cuadro de financiación en principio está fijado para que genere cuotas constantes y sólo habría que modificar los valores del porcentaje del coste de apertura y de cierre anticipado del préstamo.

Las capturas mostradas en la Figura 176 y Figura 177 muestran la cuenta de resultados y rentabilidad correspondientes a los ejemplos mostrados anteriormente para los horizontes temporales 2030 y 2050 respectivamente.

Cuotas constantes

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	0	1	2	3	4	5	6	7
TOTAL	30,131	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507
INGRESOS								
Venta hidrógeno (M€)	0,000	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507	1,507
Otras subvenciones (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Otros Ingresos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
GASTOS	0,032	1,280	1,280	1,280	1,280	1,280	1,280	1,280
Producción + distribución de H2 (M€)	0,000	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
Operación y mantenimiento (M€)	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Personal (M€)	0,000	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168	0,168
Imprevistos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Otros gastos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BENEFICIO BRUTO	4,494	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226	0,226
Amortizaciones	2,842	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284
BAIT	1,652	-0,058	-0,058	-0,058	-0,058	-0,058	-0,058	-0,058
Intereses	1,566	0,147	0,124	0,120	0,116	0,111	0,107	0,102
BAT	0,085	-0,205	-0,182	-0,178	-0,174	-0,169	-0,164	-0,160
Impuestos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Deducciones	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Beneficio neto	0,085	-0,205	-0,182	-0,178	-0,174	-0,169	-0,164	-0,160
Amortizaciones	0,000	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284	0,284
Desembolso	0,284	0,303	0,077	0,081	0,085	0,090	0,099	0,104
Cash-Flow	-0,284	0,002	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
TIR	-4%							

Figura 174. Cuenta de resultados y de rentabilidad correspondiente al horizonte temporal 2015

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

ENTRADA DE DATOS	
Importe (M€)	2,84
Entrada (M€)	0,28
Valor Préstamo (M€)	2,56
TIN	5,00%
Plazo (Años)	20
C. a. (Coste apertura)	0,75%
C. a. (Coste cierre anticipado)	1,00%
Pre/Post	0
Vf	0
Periodicidad	1

(M€)

0,02

10% autofinanciación. Cuotas constantes

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	0	2	3	4	5	6	7
Capital amortizado	0,000	0,077	0,081	0,085	0,090	0,094	0,099
Amortización acumulada	0,000	0,077	0,159	0,244	0,333	0,427	0,526
Capital pendiente	2,558	2,481	2,399	2,314	2,225	2,131	2,032
Intereses	0,000	0,147	0,124	0,120	0,116	0,111	0,107
Cuota anual	0,224	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205	0,205

Figura 175. Cuadro de financiación correspondiente al horizonte temporal 2015

Cuotas constantes											
	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037			
	0	1	2	3	4	5	6	7			
TOTAL	0	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805
INGRESOS	3536,098	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805
Venta hidrógeno (M€)	0,000	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805	176,805
Otras subvenciones (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Otros Ingresos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
GASTOS	2862,730	143,126	143,126	143,126	143,126	143,126	143,126	143,126	143,126	143,126	143,126
Producción + distribución de H2 (M€)	0,000	131,404	131,404	131,404	131,404	131,404	131,404	131,404	131,404	131,404	131,404
Operación y mantenimiento (M€)	4,497	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214
Personal (M€)	230,160	11,508	11,508	11,508	11,508	11,508	11,508	11,508	11,508	11,508	11,508
Imprevistos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Otros gastos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BENEFICIO BRUTO	673,367	33,679	33,679	33,679	33,679	33,679	33,679	33,679	33,679	33,679	33,679
Amortizaciones	259,505	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951
BAIT	413,862	7,729	7,729	7,729	7,729	7,729	7,729	7,729	7,729	7,729	7,729
Intereses	127,127	11,937	10,066	9,737	9,391	9,027	8,646	8,245	8,245	8,245	8,245
BAT	286,735	-4,209	-2,338	-2,008	-1,662	-1,299	-0,917	-0,516	-0,516	-0,516	-0,516
Impuestos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Deducciones	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Beneficio neto	286,735	-4,209	-2,338	-2,008	-1,662	-1,299	-0,917	-0,516	-0,917	-0,516	-0,516
Amortizaciones	0,000	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951	25,951
Desembolso	51,901	6,278	6,592	6,922	7,268	7,632	8,013	8,414	8,013	8,414	8,414
Cash-Flow	-51,901	15,463	17,020	17,020	17,020	17,020	17,020	17,020	17,020	17,020	17,020
TIR											14%

Figura 176. Cuenta de resultados y de rentabilidad correspondiente al horizonte temporal 2030

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Cuotas constantes

	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057
	0	1	2	3	4	5	6	7
TOTAL	0	226,394	226,394	226,394	226,394	226,394	226,394	226,394
INGRESOS	4527,879	4527,879	4527,879	4527,879	4527,879	4527,879	4527,879	4527,879
Venta hidrógeno (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Otras subvenciones (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Otros Ingresos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
GASTOS	3,156	184,644	184,644	184,644	184,644	184,644	184,644	184,644
Producción + distribución de H2 (M€)	0,000	164,688	164,688	164,688	164,688	164,688	164,688	164,688
Operación y mantenimiento (M€)	3,156	3,156	3,156	3,156	3,156	3,156	3,156	3,156
Personal (M€)	0,000	16,800	16,800	16,800	16,800	16,800	16,800	16,800
Imprevistos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Otros gastos (M€)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BENEFICIO BRUTO	-3,156	41,750	41,750	41,750	41,750	41,750	41,750	41,750
Amortizaciones	28,940	28,940	28,940	28,940	28,940	28,940	28,940	28,940
BAIT	542,438	542,438	542,438	542,438	542,438	542,438	542,438	542,438
Intereses	-3,156	13,312	11,226	10,858	10,472	10,067	9,641	9,195
BAT	400,668	-0,502	1,584	1,952	2,338	2,743	3,168	3,615
Impuestos	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Deducciones	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Beneficio neto	400,668	-0,502	1,584	1,952	2,338	2,743	3,168	3,615
Amortizaciones	0,000	28,940	28,940	28,940	28,940	28,940	28,940	28,940
Desembolso	59,616	7,002	7,352	7,719	8,105	8,511	8,936	9,383
Cash-Flow	-57,879	21,436	23,172	23,172	23,172	23,172	23,172	23,172
TIR	17%							

Figura 177. Cuenta de resultados y de rentabilidad correspondiente al horizonte temporal 2050

ANEXO 5. Análisis de Sensibilidad

En este caso, análisis de sensibilidad se definirá como:

- Cálculo de la inversión requerida para incorporar una infraestructura del hidrógeno al sector transporte al cambiar el valor de una variable.
- Cálculo del beneficio bruto resultante de la actividad de compra y venta del hidrógeno en las instalaciones de repostaje

A continuación se enumeran las variables que intervienen en el proceso de obtención de la inversión a realizar en los vehículos e infraestructuras del hidrógeno, y las variables que influyen en la actividad de compra/producción y venta del hidrógeno en las instalaciones. Estas variables se repetirán para cada horizonte temporal y cada grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte:

VEHÍCULOS:

- Subvención directa a la compra de un turismo 2015 (€/vehículo)
- Subvención directa a la compra de un turismo 2030 (€/vehículo)
- Subvención directa a la compra de un turismo 2050 (€/vehículo)
- Subvención directa a la compra de un autobús 2015 (€/vehículo)
- Subvención directa a la compra de un autobús 2030 (€/vehículo)
- Subvención directa a la compra de un autobús 2050 (€/vehículo)
- Subvención directa para la construcción de hidrogenas 2015 (€/hidrogena)
- Subvención directa para la construcción de hidrogenas 2030 (€/hidrogena)
- Subvención directa para la construcción de hidrogenas 2050 (€/hidrogena)
- Subvención producción de hidrógeno 2015 (€/kg)
- Subvención producción de hidrógeno 2030 (€/kg)
- Subvención producción de hidrógeno 2050 (€/kg)
- Previsión número turismos 2015 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número autobuses 2015 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número turismos 2030 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número autobuses 2030 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número turismos 2050 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número autobuses 2050 (grado penetración bajo, medio y alto)

- Precio adquisición turismo segmento medio (C,D) 2015 (€/vehículo)
- Precio adquisición autobús 2015 (€/vehículo)
- Precio adquisición turismo segmento medio (C,D) 2030 (€/vehículo)
- Precio adquisición autobús 2030 (€/vehículo)
- Precio adquisición turismo segmento medio (C,D) 2050 (€/vehículo)
- Precio adquisición autobús 2050 (€/vehículo)
- Precio mantenimiento vida del turismo 2015 (€/vehículo)
- Precio mantenimiento vida del autobús 2015 (€/vehículo)
- Precio mantenimiento vida del turismo 2030 (€/vehículo)
- Precio mantenimiento vida del autobús 2030 (€/vehículo)
- Precio mantenimiento vida del turismo 2050 (€/vehículo)
- Precio mantenimiento vida del autobús 2050 (€/vehículo)

HIDROGENERAS:

- Previsión número de hidrogenas pequeñas 2015 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas medianas 2015 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas grandes 2015 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas pequeñas 2030 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas medianas 2030 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas grandes 2030 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas pequeñas 2050 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas medianas 2050 (grado penetración bajo, medio y alto)
- Previsión número de hidrogenas grandes 2050 (grado penetración bajo, medio y alto)

- Precio construcción hidrogenas pequeñas 2015 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas medianas 2015 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas grandes 2015 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas pequeñas 2030 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas medianas 2030 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas grandes 2030 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas pequeñas 2050 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas medianas 2050 (€/instalación)
- Precio construcción hidrogenas grandes 2050 (€/instalación)
- Superficie mínima necesaria para hidrogenas pequeñas (m²)
- Superficie mínima necesaria para hidrogenas medianas (m²)
- Superficie mínima necesaria para hidrogenas grandes (m²)
- Precio medio del suelo hidrogenas pequeñas (€/m²)
- Precio medio del suelo hidrogenas medianas (€/m²)
- Precio medio del suelo hidrogenas grandes (€/m²)
- Número de empleados mínimo hidrogenas pequeñas
- Número de empleados mínimo hidrogenas medianas
- Número de empleados mínimo hidrogenas grandes
- Sueldo medio bruto operario instalaciones (€/año)
- Capacidad de repostaje hidrogenas pequeñas (kg/día)
- Capacidad de repostaje hidrogenas medianas (kg/día)
- Capacidad de repostaje hidrogenas grandes (kg/día)

COSTES HIDRÓGENO:

- Impuestos a la producción de hidrógeno (€/kg)
- Precio base producción + distribución 2015 (€/kg)
- Precio base producción + distribución 2030 (€/kg)
- Precio base producción + distribución 2050 (€/kg)
- Variación precio gas natural 2015 (%)
- Variación precio gas natural 2030 (%)
- Variación precio gas natural 2050 (%)
- Variación precio energía eléctrica 2015 (%)

- Variación precio energía eléctrica 2030 (%)
- Variación precio energía eléctrica 2050 (%)
- Relación frente al total de la cantidad de hidrógeno que se produce mediante reformado gas natural 2015 (%)
- Relación frente al total de la cantidad de hidrógeno que se produce mediante reformado gas natural 2030 (%)
- Relación frente al total de la cantidad de hidrógeno que se produce mediante reformado gas natural 2050 (%)
- Costes de mantenimiento y gestión (% inversión instalaciones)

VENTA HIDRÓGENO:

- Impuestos a la venta de hidrógeno (€/kg)
- Precio base venta de hidrógeno 2015 (€/kg)
- Precio base venta de hidrógeno 2030 (€/kg)
- Precio base venta de hidrógeno 2050 (€/kg)
- Distancia media recorrida por turismos (km/año)
- Distancia media recorrida por autobuses (km/año)
- Consumo medio turismos (kgH₂/100km)
- Consumo medio autobuses (kgH₂/100km)

Para localizar las variables que más influyen en el los resultados finales de inversión necesaria en vehículos e infraestructuras y beneficio neto resultante de la actividad de compra/producción y venta del hidrógeno, se procede del siguiente modo:

a. Se tomarán como referencia los resultados obtenidos en el apartado 6.4.2.1 *Estudio Económico: Grado de Penetración Bajo de las Tecnologías del Hidrógeno en el Sector Transporte* de la presente tesis. Como las variables para cada uno de los grados de penetración son las mismas, para ver el efecto que tienen sobre el resultado final es suficiente con analizar uno de los casos.

Este análisis inicial se realizará únicamente para los datos obtenidos en cada uno de los años sometidos a estudio, no para los datos acumulados hasta 2015, 2030 y 2050.

b. Con el fin de comparar el efecto que produce la variación de las diferentes variables, y partiendo de los valores fijados para cada una en las hipótesis de entrada, se incorpora cada una de las variables en un 20% y se calcula el porcentaje de variación sobre los resultados tomados como referencia. En los casos en los que el valor de la variable sea cero inicialmente (por ejemplo, las subvenciones directas para la construcción de hidrogeneras a partir de año 2030), se adoptan aquellos valores que se estiman más adecuados justificados por la experiencia.

A continuación se indican los valores adoptados para aquellas variables que tenían 0 como valor inicial:

- Subvención directa adquisición de turismos 2030-2050: 1.200 €/vehículo. Estos 1.200 € corresponden con el aumento correspondiente del 20% que ha experimentado el valor de la subvención en el año 2015.
- Subvención autobuses adquisición de autobuses 2030-2050: 6.000 €/vehículos. Estos 6.000 € corresponden con el aumento correspondiente del 20% que ha experimentado el valor de la subvención en el año 2015.
- Impuesto a la producción/obtención de hidrógeno 2012-2050: 0,8 €/kgH₂. Se ha adoptado este valor que es aproximadamente el 20% del precio medio base de producción/obtención del hidrógeno.
- Impuesto a la venta de hidrógeno 2012-2050: 0,8 €/kgH₂. Se ha adoptado el mismo valor que para el impuesto de producción/obtención de hidrógeno.

El resultado de este análisis se muestra en la Tabla 194 y la Tabla 195, en las que se recogen para la inversión total a realizar y el beneficio bruto respectivamente, las variables que intervienen y la variación porcentual que produce cada una de ellas en los valores de referencia.

Las variables que mayor influencia ejercen sobre los resultados perseguidos de inversión y beneficio bruto, se identifican porque presentan unos mayores valores porcentuales respecto a los resultados de referencia obtenidos a partir de las hipótesis de entrada. En las tablas aparecen resaltados en verde.

Tabla 194. Grado de influencia de las variables que influyen en los resultados finales de inversión necesaria en vehículos e infraestructuras

INVERSIÓN		Inversión Vehículos 2015 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Vehículos 2030 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Vehículos 2050 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Infraestructuras 2015 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Infraestructuras 2030 (M€/año)	% respecto a base	Inversión Infraestructuras 2050 (M€/año)	% respecto a base	Inversión total 2015 (M€/año)	% respecto a base	Inversión total 2030 (M€/año)	% respecto a base	Inversión total 2050 (M€/año)	% respecto a base
Resultados según hipótesis de entrada		5,744		859,664		1142,330		0,398		5,354		15,595		6,142		865,018		1157,925	
Variable modificada (+20%)																			
Subvención compra turismo (€/vehículo)		5,583	-2,80%	825,999	-3,92%	1093,892	-4,24%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	5,981	-2,62%	831,353	-3,89%	1109,487	-4,18%
Subvención compra autobús (€/vehículo)		5,732	-0,21%	859,178	-0,06%	1141,628	-0,06%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,130	-0,20%	864,532	-0,06%	1157,223	-0,06%
Previsión número turismos		6,628	15,39%	1027,582	19,53%	1482,624	29,79%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	7,026	14,39%	1032,936	19,41%	1498,219	29,39%
Previsión número autobuses		5,744	0,00%	863,782	0,48%	1149,575	0,63%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,142	0,00%	869,136	0,48%	1165,170	0,63%
Precio adquisición turismo (€/vehículo)		6,682	16,33%	1003,862	16,77%	1333,660	16,75%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	7,080	15,27%	1009,216	16,67%	1349,255	16,52%
Precio adquisición autobús (€/vehículo)		5,990	4,28%	863,714	0,47%	1147,010	0,41%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,388	4,01%	869,068	0,47%	1162,605	0,40%
Precio mantenimiento turismo (€/vehículo)		5,878	2,33%	883,229	2,74%	1174,622	2,83%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,276	2,18%	888,583	2,72%	1190,217	2,79%
Precio mantenimiento autobús (€/vehículo)		5,748	0,06%	859,784	0,01%	1142,493	0,01%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	6,146	0,06%	865,138	0,01%	1158,088	0,01%
Subvención construcción hidrogeneras (€/hidrogenera)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,318	-20,10%	4,283	-20,00%	14,036	-10,00%	6,062	-1,30%	863,947	-0,12%	1156,365	-0,13%
Previsión número de hidrogeneras pequeñas		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,354	0,00%	16,697	7,07%	6,142	0,00%	865,018	0,00%	1159,027	0,10%
Previsión número de hidrogeneras medianas		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,929	10,74%	16,745	7,37%	6,142	0,00%	865,593	0,07%	1159,075	0,10%
Previsión número de hidrogeneras grandes		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	6,672	24,61%	18,230	16,90%	6,142	0,00%	866,336	0,15%	1160,560	0,23%
Precio hidrogeneras pequeñas (€/instalación)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,459	15,33%	5,464	2,05%	15,960	2,34%	6,203	0,99%	865,128	0,01%	1158,290	0,03%
Precio hidrogeneras medianas (€/instalación)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,445	1,70%	15,959	2,33%	6,142	0,00%	865,109	0,01%	1158,289	0,03%
Precio hidrogeneras grandes (€/instalación)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	6,037	12,75%	17,415	11,67%	6,142	0,00%	865,701	0,08%	1159,745	0,16%
Superficie mínima hidrogeneras pequeñas (m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,417	4,67%	5,410	1,04%	15,781	1,19%	6,161	0,30%	865,074	0,01%	1158,111	0,02%
Superficie mínima hidrogeneras medianas (m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,378	0,45%	15,691	0,62%	6,142	0,00%	865,042	0,00%	1158,021	0,01%
Superficie mínima hidrogeneras grandes (m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,462	2,02%	15,883	1,85%	6,142	0,00%	865,126	0,01%	1158,213	0,02%
Precio medio suelo hidrogeneras pequeñas (€/m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,417	4,67%	5,410	1,04%	15,781	1,19%	6,161	0,30%	865,074	0,01%	1158,111	0,02%
Precio medio suelo hidrogeneras medianas (€/m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,378	0,45%	15,691	0,62%	6,142	0,00%	865,042	0,00%	1158,021	0,01%
Precio medio suelo hidrogeneras grandes (€/m2)		x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	0,398	0,00%	5,462	2,02%	15,883	1,85%	6,142	0,00%	865,126	0,01%	1158,213	0,02%

Tabla 195. Grado de influencia de las variables que influyen en beneficio neto resultante de la actividad de compra/producción y venta de hidrógeno

BENEFICIO BRUTO												
Resultados según hipótesis de entrada												
Variable modificada (+20%)	0,640	14,448	18,656	0,149	16,820	22,321	-0,491	2,372	3,665	% respecto a base	% respecto a base	
Previsión número de hidrogeneras pequeñas	0,640	0,00%	14,448	0,00%	16,332	-2,53%	22,958	2,85%	1,947	-17,91%	3,155	-13,92%
Previsión número de hidrogeneras medianas	0,640	0,00%	15,948	10,38%	19,986	19,986	19,986	0,00%	16,332	-2,90%	23,320	4,48%
Previsión número de hidrogeneras grandes	0,640	0,00%	18,129	25,48%	21,933	17,57%	0,149	0,00%	17,246	2,53%	22,860	2,41%
Capacidad repostaje hidrogeneras pequeñas (kg/día)	0,748	16,88%	14,772	2,24%	19,123	2,50%	0,149	0,00%	16,792	-0,16%	22,337	0,07%
Capacidad repostaje hidrogeneras medianas (kg/día)	0,640	0,00%	14,718	1,87%	19,123	2,50%	0,149	0,00%	16,754	-0,39%	22,428	0,48%
Capacidad repostaje hidrogeneras grandes (kg/día)	0,640	0,00%	16,474	14,02%	20,992	12,52%	0,149	0,00%	16,903	0,49%	22,212	-0,49%
Precio hidrogeneras pequeñas (€/instalación)	0,643	0,38%	14,452	0,03%	18,670	0,08%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Precio hidrogeneras medianas (€/instalación)	0,640	-0,02%	14,452	0,03%	18,670	0,08%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Precio hidrogeneras grandes (€/instalación)	0,640	-0,02%	14,475	0,19%	18,729	0,39%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Superficie mínima hidrogeneras pequeñas (m2)	0,641	0,12%	14,450	0,02%	18,663	0,04%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Superficie mínima hidrogeneras medianas (m2)	0,640	0,00%	14,449	0,01%	18,660	0,02%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Superficie mínima hidrogeneras grandes (m2)	0,640	0,00%	14,452	0,03%	18,667	0,06%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Precio medio suelo hidrogeneras pequeñas (€/m2)	0,641	0,12%	14,450	0,02%	18,663	0,04%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Precio medio suelo hidrogeneras medianas (€/m2)	0,640	-0,02%	14,449	0,01%	18,660	0,02%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Precio medio suelo hidrogeneras grandes (€/m2)	0,640	0,00%	14,452	0,03%	18,667	0,06%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Subvención producción hidrógeno (€/kg)	0,626	-2,28%	14,236	-1,47%	18,349	-1,64%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Número empleados mínimo hidrogeneras pequeñas	0,654	2,19%	14,490	0,29%	18,726	0,38%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Número empleados mínimo hidrogeneras medianas	0,640	0,00%	14,476	0,19%	18,712	0,30%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Número empleados mínimo hidrogeneras grandes	0,640	-0,02%	14,616	1,16%	18,880	1,20%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Suelo medio bruto operativo instalaciones (€/año)	0,657	2,62%	14,675	1,57%	18,992	1,80%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Impuestos a la producción de hidrógeno (€/kg)	0,757	18,25%	17,280	19,60%	22,744	21,91%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Precio base producción + distribución (€/kg)	0,763	19,16%	17,280	19,60%	22,233	19,17%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Variación precio gas natural (%)	0,640	0,02%	14,452	0,03%	18,660	0,02%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Variación precio energía eléctrica (%)	0,640	0,02%	14,456	0,05%	18,680	0,13%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Relación vs. total H2 producido mediante refor. GN (%)	0,640	-0,01%	14,459	-0,01%	18,684	0,00%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Costes de mantenimiento y gestión (% inversión instalaciones)	0,643	0,50%	14,491	0,30%	18,781	0,67%	x	0,00%	x	0,00%	x	0,00%
Previsión número turismo	x	0,00%	x	0,00%	17,3	15,77%	19,995	18,88%	-0,467	-4,84%	5,547	114,96%
Previsión número autobuses	x	0,00%	x	0,00%	17,009	4,10%	17,009	1,12%	22,572	1,12%	22,572	1,12%
Impuestos a la venta de hidrógeno (€/kg)	x	0,00%	x	0,00%	x	-8,08%	x	0,00%	18,263	-18,18%	-0,503	-0,319
Precio base venta de hidrógeno (€/kg)	x	0,00%	x	0,00%	x	20,00%	x	0,00%	26,786	20,00%	-0,461	-6,09%
Distancia media recorrida por turismo (km/año)	x	0,00%	x	0,00%	x	15,90%	x	0,00%	18,885	18,88%	-0,467	-4,84%
Distancia media recorrida por autobuses (km/año)	x	0,00%	x	0,00%	x	17,008	4,10%	17,008	1,12%	22,572	1,12%	2,560
Consumo medio turismo (kgH ₂ /100km)	x	0,00%	x	0,00%	x	19,995	18,88%	26,535	18,88%	-0,467	-4,84%	7,879
Consumo medio autobuses (kgH ₂ /100km)	x	0,00%	x	0,00%	x	17,008	4,10%	17,008	1,12%	22,572	1,12%	2,560

Se aprecia como las variables referidas a la adquisición de vehículos tienen un peso mucho mayor en la inversión total que las variables referidas a la adquisición de infraestructuras. Dentro del conjunto de vehículos, se observa que las variaciones experimentadas al verse modificadas las variables referidas a los autobuses son prácticamente despreciables frente a las variaciones experimentadas por los resultados de inversión cuando se modifican las variables que condicionan el entorno de los turismos. Para realizar el estudio de viabilidad, de entre las variables de mayor influencia se han seleccionado las siguientes:

- Variables de mayor influencia sobre la inversión total a realizar englobando la adquisición de vehículos e infraestructuras:

Pese a lo indicado en el párrafo anterior, se seleccionará una variable referente a las infraestructuras para comprobar el comportamiento de estas frente a las que se refieren a los vehículos (se ha seleccionado la variable Subvención directa para la construcción de hidrogenas, ya que de las de mayor influencia es la que influye en los tres escenarios temporales). Por lo tanto, las variables seleccionadas son las siguientes:

- Previsión número de turismos
 - Precio de adquisición de los turismos
 - Subvención directa a la adquisición de los turismos
 - Subvención directa para la construcción de hidrogenas
-
- Variables de mayor influencia sobre el beneficio bruto obtenido resultado de la actividad de compra/producción – venta de hidrógeno:
 - Precio base de venta del hidrógeno
 - Precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno
 - Previsión número de turismos
 - Impuestos a la venta de hidrógeno
 - Impuestos a la producción/compra de hidrógeno
 - Consumo medio de los turismos

A5.1. *Variables de Mayor Influencia sobre la Inversión Total a Realizar*

A continuación se realiza el estudio de sensibilidad de las variables cuya variación implica un mayor cambio en los resultados de la inversión total a realizar en vehículos e infraestructuras, para lograr la implantación de las tecnologías del hidrógeno en los términos planteados a lo largo de la tesis para los diferentes horizontes temporales establecidos: 2015, 2030 y 2050.

Para realizar el análisis de sensibilidad se han aplicado variaciones del +50%, +30%, +10%, -10%, -30% y -50% a cada una de las variables y en cada uno de los tres horizontes temporales para los tres escenarios de penetración de la tecnología de las pilas de combustible en el sector transporte. Como valores de referencia se han tomado los valores obtenidos a partir de las hipótesis de entrada que se han presentado en el punto 6.4.1. *Cuaderno de Hipótesis* de la presente tesis.

A5.1.1. *Previsión número de turismos*

En la Tabla 202 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Previsión Número de Turismos*.

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2015 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus respectivas tablas de datos, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 196. Inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* y el grado de penetración en el año 2015

Inversión total (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	8,386	7,502	6,584	6,142	5,666	4,782	3,864
M€ - MEDIA	39,744	35,222	30,700	28,422	26,144	21,622	17,100
M€ - ALTA	79,488	70,444	61,366	56,844	52,288	43,244	34,166

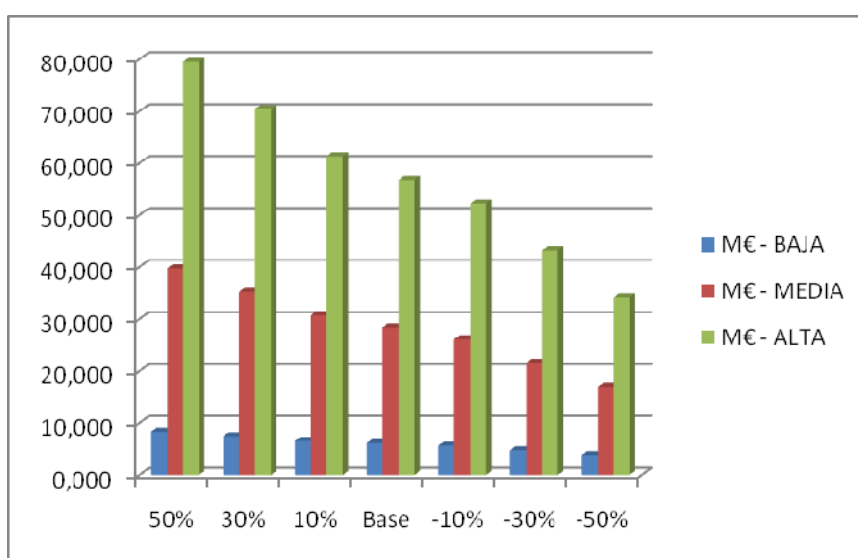


Figura 178. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2015

Tabla 197. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2015

Inversión total (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	36,54%	22,14%	7,20%	0,00%	-8,01%	-22,14%	-37,09%
Variación % - MEDIA	39,84%	23,93%	8,01%	0,00%	-8,01%	-23,93%	-39,84%
Variación % - ALTA	39,84%	23,93%	7,96%	0,00%	-8,01%	-23,93%	-39,90%

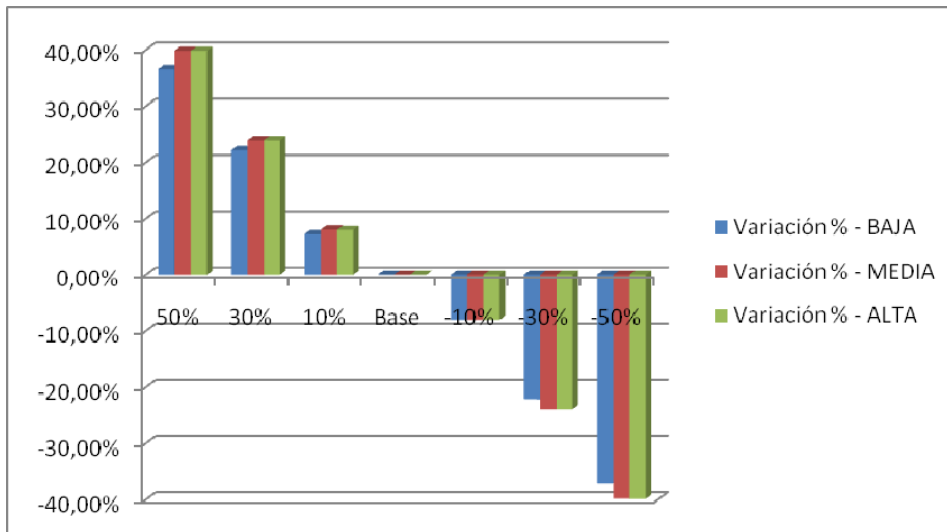


Figura 179. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2015

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2030 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus respectivas tablas, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 198. Inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* y el grado de penetración en el año 2030

Inversión total (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	1284,395	1116,656	948,888	865,018	781,119	613,380	445,611
M€ - MEDIA	6426,618	5587,266	4747,883	4328,206	3908,530	3069,147	2229,795
M€ - ALTA	12851,919	11173,184	9494,448	8655,095	7815,713	6136,977	4458,242

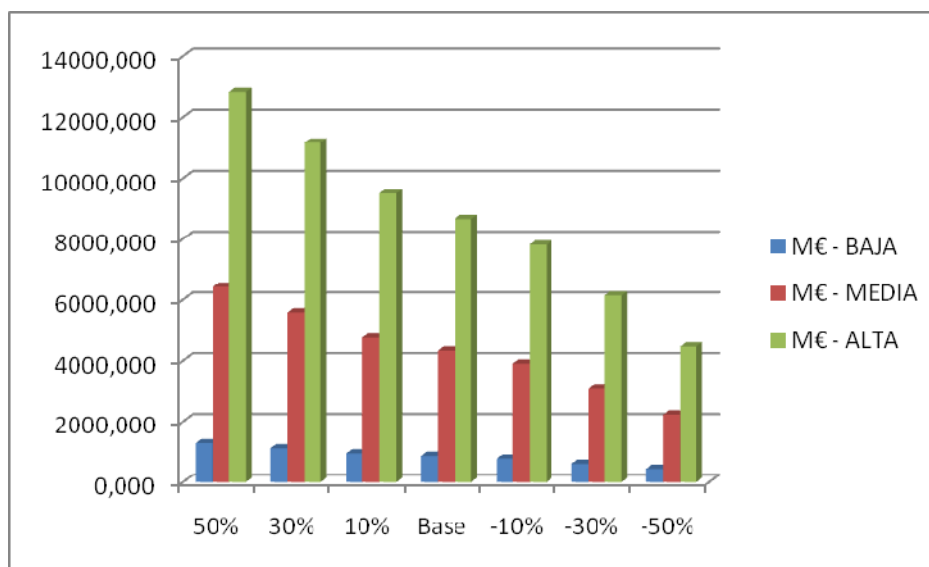


Figura 180. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2030

Tabla 199. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2030

Inversión total (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	48,48%	29,09%	9,70%	0,00%	-9,70%	-29,09%	-48,49%
Variación % - MEDIA	48,48%	29,09%	9,70%	0,00%	-9,70%	-29,09%	-48,48%
Variación % - ALTA	48,49%	29,09%	9,70%	0,00%	-9,70%	-29,09%	-48,49%

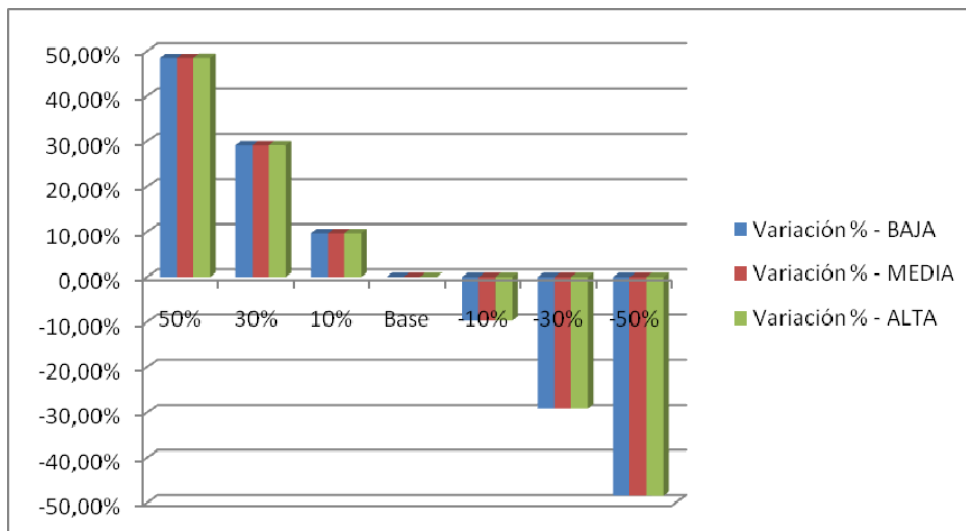


Figura 181. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2030

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2050 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus respectivas tablas, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 200. Inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* y el grado de penetración en el año 2050

Inversión total (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	1716,980	1493,358	1269,736	1157,925	1046,113	822,491	598,869
M€ - MEDIA	8582,220	7464,509	6346,797	5787,941	5229,085	4111,374	2993,662
M€ - ALTA	17163,035	14927,612	12692,189	11574,477	10456,766	8221,342	5985,919

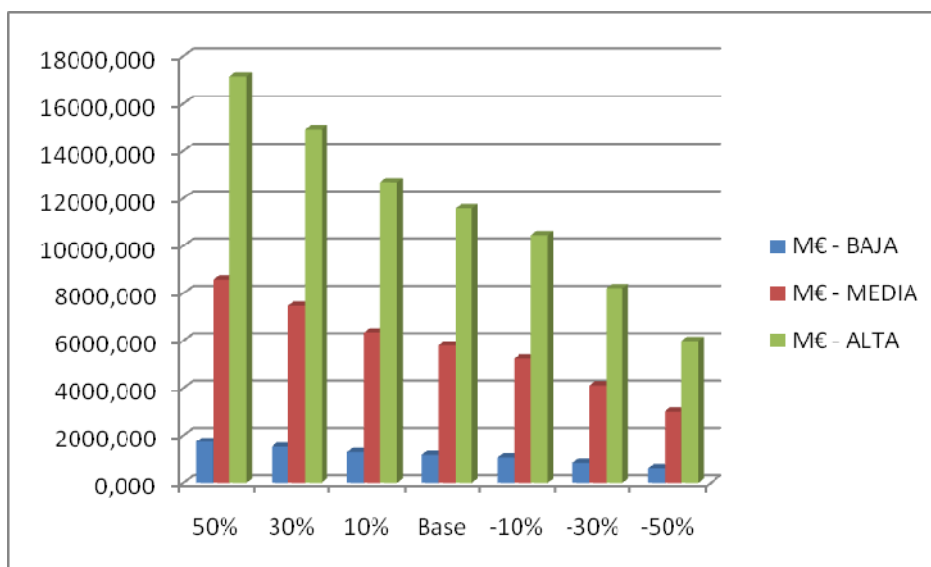


Figura 182. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2050

Tabla 201. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2050

Inversión total (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	48,28%	28,97%	9,66%	0,00%	-9,66%	-28,97%	-48,28%
Variación % - MEDIA	48,28%	28,97%	9,66%	0,00%	-9,66%	-28,97%	-48,28%
Variación % - ALTA	48,28%	28,97%	9,66%	0,00%	-9,66%	-28,97%	-48,28%

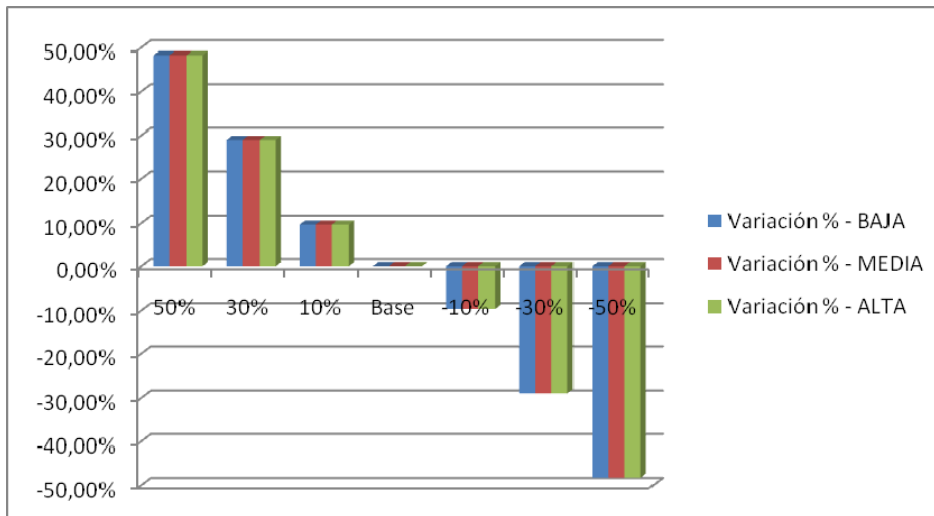


Figura 183. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión del Número de Turismos en el año 2050*

En la Figura 178, Figura 180 y Figura 182 se observa que a mayor número de turistas, mayor es la inversión total a realizar.

En la Figura 179, Figura 181 y Figura 183 se puede ver como las variaciones respecto a los valores de referencia se mantienen prácticamente constantes independientemente del grado de penetración considerado.

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Tabla 202. Análisis de la variable Previsión del Número de Turismos

Grado Penetración	Año	2015			2030			2050											
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta									
		Valor % respecto a base	Valor % respecto a base	Valor % respecto a base	Valor % respecto a base	Valor % respecto a base	Valor % respecto a base	Valor % respecto a base	Valor % respecto a base	Valor % respecto a base									
50%	Vehículos (M€)	7,988	39,07%	39,346	40,40%	78,692	40,40%	1279,041	48,78%	6398,998	48,79%	12797,996	48,79%	1701,385	48,94%	8503,311	48,94%	17006,415	48,95%
	Inversión total (M€)	8,386	36,54%	39,744	39,84%	79,488	39,84%	1284,395	48,48%	6426,618	48,48%	12851,919	48,49%	1716,980	48,28%	8582,220	48,28%	17163,035	48,28%
	% vehículos respecto al total de inversión	95,25		99,00		99,00		99,58		99,57		99,58		99,09		99,08		99,09	
30%	Vehículos (M€)	7,104	23,68%	34,824	24,26%	69,648	24,26%	1111,302	29,27%	5559,645	29,28%	11119,260	29,28%	1477,763	29,36%	7385,600	29,37%	14770,992	29,37%
	Inversión total (M€)	7,502	22,14%	35,222	23,93%	70,444	23,93%	1116,656	29,09%	5587,266	29,09%	11173,184	29,09%	1493,358	28,97%	7464,509	28,97%	14927,612	28,97%
	% vehículos respecto al total de inversión	94,69		98,87		98,87		99,52		99,51		99,52		98,96		98,94		98,95	
10%	Vehículos (M€)	6,186	7,69%	30,302	8,13%	60,570	8,07%	943,534	9,76%	4720,262	9,76%	9440,525	9,76%	1254,141	9,79%	6267,888	9,79%	12535,569	9,79%
	Inversión total (M€)	6,584	7,20%	30,700	8,01%	61,366	7,96%	948,888	9,70%	4747,883	9,70%	9494,448	9,70%	1269,736	9,66%	6346,797	9,66%	12692,189	9,66%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,96		98,70		98,70		99,44		99,42		99,43		98,77		98,76		98,77	
Referencia	Vehículos (M€)	5,744	0,00%	28,024	0,00%	56,048	0,00%	859,664	0,00%	4300,586	0,00%	8601,172	0,00%	1142,330	0,00%	5709,032	0,00%	11417,857	0,00%
	Inversión total (M€)	6,142	0,00%	28,422	0,00%	56,844	0,00%	865,018	0,00%	4328,206	0,00%	8655,095	0,00%	1157,925	0,00%	5787,941	0,00%	11574,477	0,00%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,52		98,60		98,60		99,38		99,36		99,38		98,65		98,64		98,65	
-10%	Vehículos (M€)	5,268	-8,29%	25,746	-8,13%	51,492	-8,13%	775,765	-9,76%	3880,910	-9,76%	7761,789	-9,76%	1030,518	-9,79%	5150,176	-9,79%	10300,146	-9,79%
	Inversión total (M€)	5,666	-7,75%	26,144	-8,01%	52,288	-8,01%	781,119	-9,70%	3908,530	-9,70%	7815,713	-9,70%	1046,113	-9,66%	5229,085	-9,66%	10456,766	-9,66%
	% vehículos respecto al total de inversión	92,98		98,48		98,48		99,31		99,29		99,31		98,51		98,49		98,50	
-30%	Vehículos (M€)	4,384	-23,68%	21,224	-24,26%	42,448	-24,26%	608,026	-29,27%	3041,527	-29,28%	6083,054	-29,28%	806,896	-29,36%	4032,465	-29,37%	8064,722	-29,37%
	Inversión total (M€)	4,782	-22,14%	21,622	-23,93%	43,244	-23,93%	613,380	-29,09%	3069,147	-29,09%	6136,977	-29,09%	822,491	-28,97%	4111,374	-28,97%	8221,342	-28,97%
	% vehículos respecto al total de inversión	91,68		98,16		98,16		99,13		99,10		99,12		98,10		98,08		98,09	
-50%	Vehículos (M€)	3,466	-39,66%	16,702	-40,40%	33,370	-40,46%	440,257	-48,79%	2202,174	-48,79%	4404,318	-48,79%	583,274	-48,94%	2914,753	-48,94%	5829,299	-48,95%
	Inversión total (M€)	3,864	-37,09%	17,100	-39,84%	34,166	-39,90%	445,611	-48,49%	2229,795	-48,48%	4458,242	-48,49%	598,869	-48,28%	2993,662	-48,28%	5985,919	-48,28%
	% vehículos respecto al total de inversión	89,70		97,67		97,67		98,80		98,76		98,79		97,40		97,36		97,38	

A5.1.2. Precio de adquisición de los turismos

En la Tabla 209 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Previsión Precio de Adquisición de los Turismos*.

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2015 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 203. Inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* y el grado de penetración en el año 2015

Inversión total (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	8,487	7,549	6,611	6,142	5,673	4,735	3,797
M€ - MEDIA	40,095	35,426	30,757	28,422	26,088	21,419	16,750
M€ - ALTA	80,189	70,851	61,513	56,844	52,175	42,837	33,499

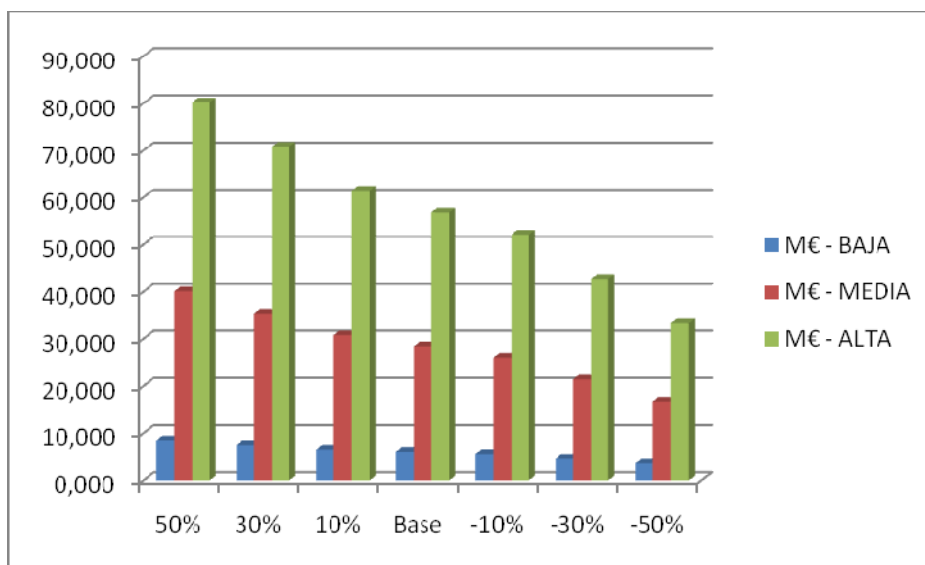


Figura 184. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2015

Tabla 204. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2015

Inversión total (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	38,18%	22,91%	7,64%	0,00%	-8,21%	-22,91%	-38,18%
Variación % - MEDIA	41,07%	24,64%	8,21%	0,00%	-8,21%	-24,64%	-41,07%
Variación % - ALTA	41,07%	24,64%	8,21%	0,00%	-8,21%	-24,64%	-41,07%

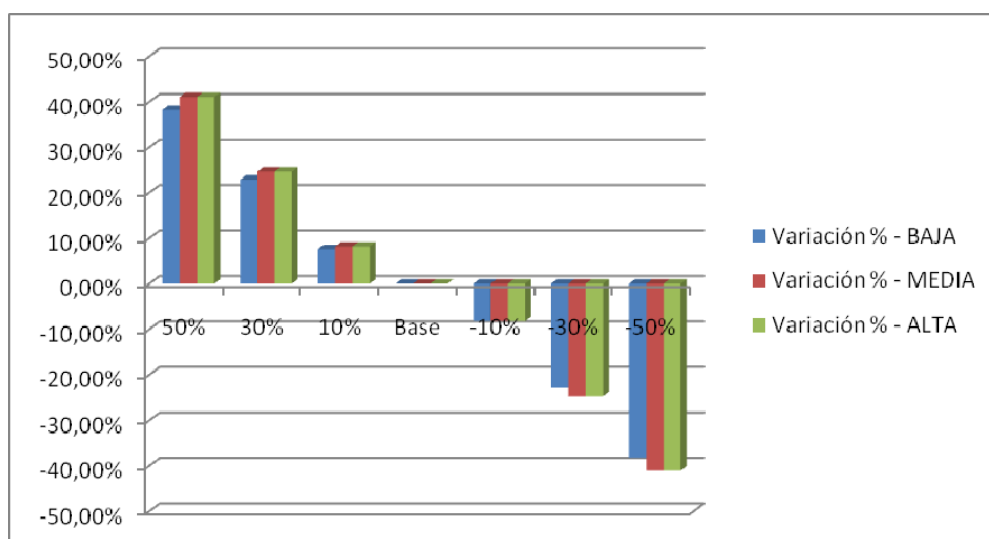


Figura 185. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2015

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2030 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 205. Inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* y el grado de penetración en el año 2030

Inversión total (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	1225,512	1081,314	937,117	865,018	792,919	648,722	504,524
M€ - MEDIA	6131,871	5410,405	4688,939	4328,206	3967,473	3246,008	2524,542
M€ - ALTA	12262,424	10819,493	9376,561	8655,095	7933,629	6490,698	5047,766

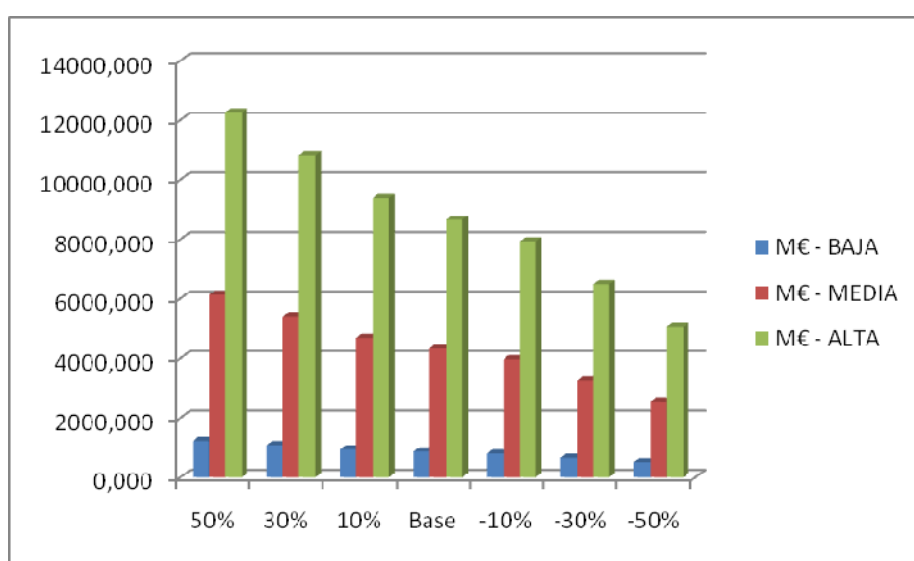


Figura 186. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2030

Tabla 206. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2030

Inversión total (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	41,67%	25,00%	8,33%	0,00%	-8,33%	-25,00%	-41,67%
Variación % - MEDIA	41,67%	25,00%	8,33%	0,00%	-8,33%	-25,00%	-41,67%
Variación % - ALTA	41,68%	25,01%	8,34%	0,00%	-8,34%	-25,01%	-41,68%

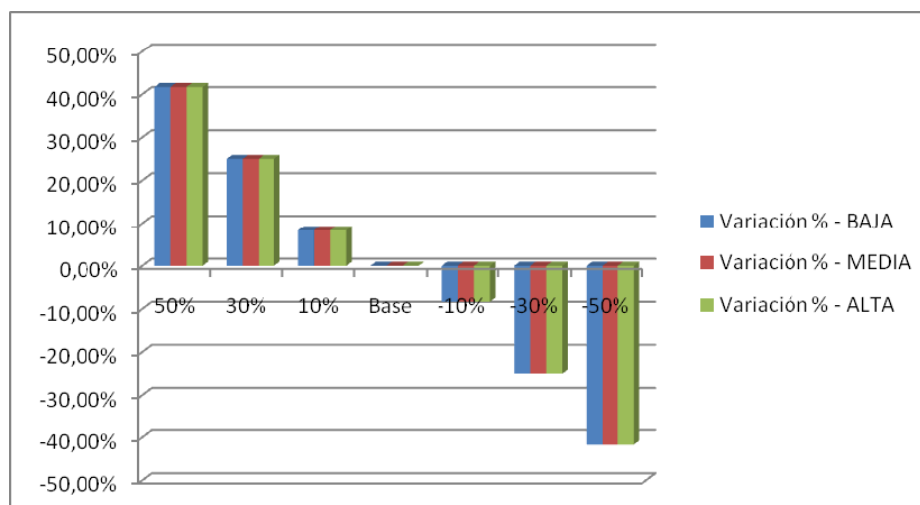


Figura 187. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2030

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2050 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 207. Inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* y el grado de penetración en el año 2050

Inversión total (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	1636,250	1444,920	1253,590	1157,925	1062,259	870,929	679,599
M€ - MEDIA	8178,714	7222,405	6266,096	5787,941	5309,786	4353,477	3397,168
M€ - ALTA	16356,023	14443,405	12530,786	11574,477	10618,168	8705,550	6792,931

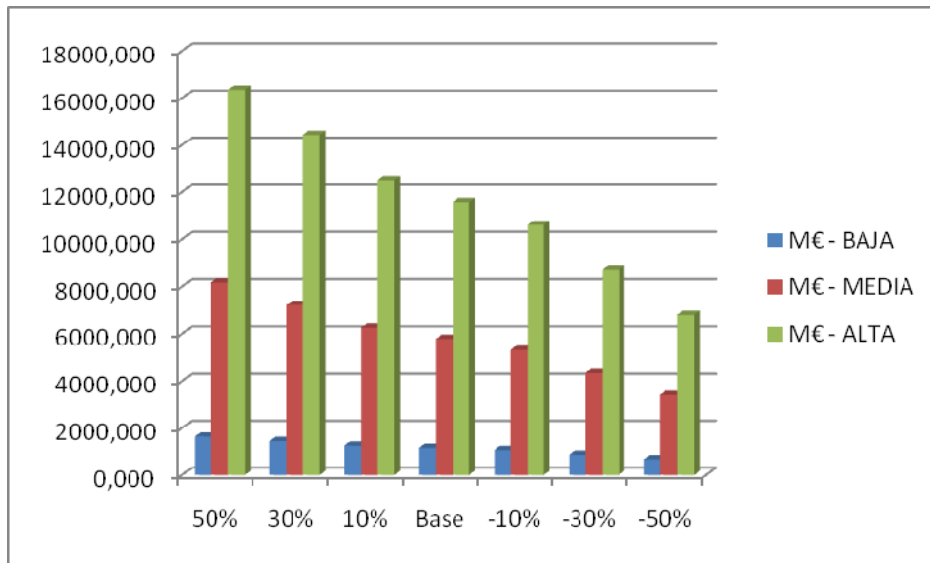


Figura 188. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2050

Tabla 208. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2050

Inversión total (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	41,31%	24,79%	8,26%	0,00%	-8,26%	-24,79%	-41,31%
Variación % - MEDIA	41,31%	24,78%	8,26%	0,00%	-8,26%	-24,78%	-41,31%
Variación % - ALTA	41,31%	24,79%	8,26%	0,00%	-8,26%	-24,79%	-41,31%

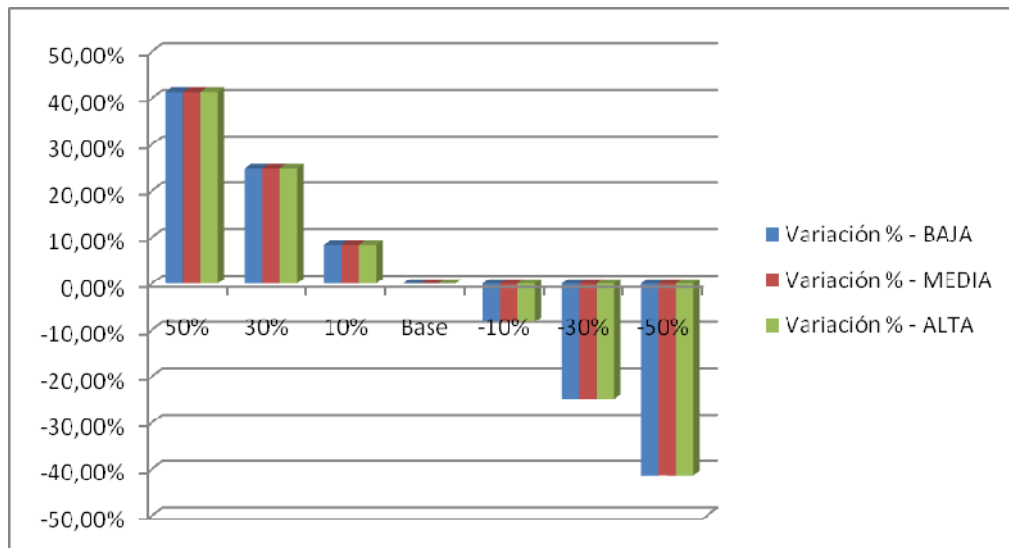


Figura 189. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2050

En la Figura 184, Figura 186 y Figura 188 se observa que a mayor precio de adquisición de los turismos, mayor es la inversión total a realizar.

En la Figura 185, Figura 187 y Figura 189 se puede ver como las variaciones respecto a los valores de referencia se mantienen prácticamente constantes independientemente del grado de penetración considerado.

Tabla 209. Análisis de la variable Previsión de los Turismos

	Año	2015						2030											
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta							
		Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base						
Grado Penetración																			
50%	Vehículos (M€)	8,089	40,83%	39,697	41,65%	79,393	41,65%	1220,158	41,93%	6104,250	41,94%	12208,501	41,94%	1620,655	41,87%	8099,805	41,88%	16199,403	41,88%
	Inversión total (M€)	8,487	38,18%	40,095	41,07%	80,189	41,07%	1225,512	41,67%	6131,871	41,67%	12262,424	41,68%	1636,250	41,31%	8178,714	41,31%	16356,023	41,31%
	% vehículos respecto al total de inversión	95,31		99,01		99,01		99,56		99,55		99,56		99,05		99,04		99,04	
30%	Vehículos (M€)	7,151	24,50%	35,028	24,99%	70,055	24,99%	1075,960	25,16%	5382,785	25,16%	10765,569	25,16%	1429,325	25,12%	7143,496	25,13%	14286,785	25,13%
	Inversión total (M€)	7,549	22,91%	35,426	24,64%	70,851	24,64%	1081,314	25,00%	5410,405	25,00%	10819,493	25,01%	1444,920	24,79%	7222,405	24,78%	14443,405	24,79%
	% vehículos respecto al total de inversión	94,73		98,88		98,88		99,50		99,49		99,50		98,92		98,91		98,92	
10%	Vehículos (M€)	6,213	8,17%	30,359	8,33%	60,717	8,33%	931,763	8,39%	4661,319	8,39%	9322,638	8,39%	1237,995	8,37%	6187,187	8,38%	12374,166	8,38%
	Inversión total (M€)	6,611	7,64%	30,757	8,21%	61,513	8,21%	937,117	8,33%	4688,939	8,33%	9376,561	8,34%	1253,590	8,26%	6266,096	8,26%	12530,786	8,26%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,98		98,71		98,71		99,43		99,41		99,42		98,76		98,74		98,75	
Referencia	Vehículos (M€)	5,744	0,00%	28,024	0,00%	56,048	0,00%	859,664	0,00%	4300,586	0,00%	8601,172	0,00%	1142,330	0,00%	5709,032	0,00%	11417,857	0,00%
	Inversión total (M€)	6,142	0,00%	28,422	0,00%	56,844	0,00%	865,018	0,00%	4328,206	0,00%	8655,095	0,00%	1157,925	0,00%	5787,941	0,00%	11574,477	0,00%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,52		98,60		98,60		99,38		99,36		99,38		98,65		98,64		98,65	
-10%	Vehículos (M€)	5,275	-8,17%	25,690	-8,33%	51,379	-8,33%	787,565	-8,39%	3939,853	-8,39%	7879,706	-8,39%	1046,664	-8,37%	5230,877	-8,38%	10461,548	-8,38%
	Inversión total (M€)	5,673	-7,64%	26,088	-8,21%	52,175	-8,21%	792,919	-8,33%	3967,473	-8,33%	7933,629	-8,34%	1062,259	-8,26%	5309,786	-8,26%	10618,168	-8,26%
	% vehículos respecto al total de inversión	92,98		98,47		98,47		99,32		99,30		99,32		98,53		98,51		98,52	
-30%	Vehículos (M€)	4,337	-24,50%	21,021	-24,99%	42,041	-24,99%	643,368	-25,16%	3218,387	-25,16%	6436,774	-25,16%	855,334	-25,12%	4274,568	-25,13%	8548,930	-25,13%
	Inversión total (M€)	4,735	-22,91%	21,419	-24,64%	42,837	-24,64%	648,722	-25,00%	3246,008	-25,00%	6490,698	-25,01%	870,929	-24,79%	4353,477	-24,78%	8705,550	-24,79%
	% vehículos respecto al total de inversión	91,59		98,14		98,14		99,17		99,15		99,17		98,21		98,19		98,20	
-50%	Vehículos (M€)	3,399	-40,83%	16,352	-41,65%	32,703	-41,65%	499,170	-41,93%	2496,921	-41,94%	4993,843	-41,94%	664,004	-41,87%	3318,259	-41,88%	6636,311	-41,88%
	Inversión total (M€)	3,797	-38,18%	16,750	-41,07%	33,499	-41,07%	504,524	-41,67%	2524,542	-41,67%	5047,766	-41,68%	679,599	-41,31%	3397,168	-41,31%	6792,931	-41,31%
	% vehículos respecto al total de inversión	89,52		97,62		97,62		98,94		98,91		98,93		97,71		97,68		97,69	

A5.1.3. Subvención directa a la adquisición de los turismos

En la Tabla 216 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos*.

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2015 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 210. Inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* y el grado de penetración en el año 2015

Inversión total (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	5,740	5,901	6,062	6,142	6,222	6,383	6,544
M€ - MEDIA	26,421	27,221	28,022	28,422	28,822	29,623	30,423
M€ - ALTA	52,842	54,443	56,044	56,844	57,644	59,245	60,846

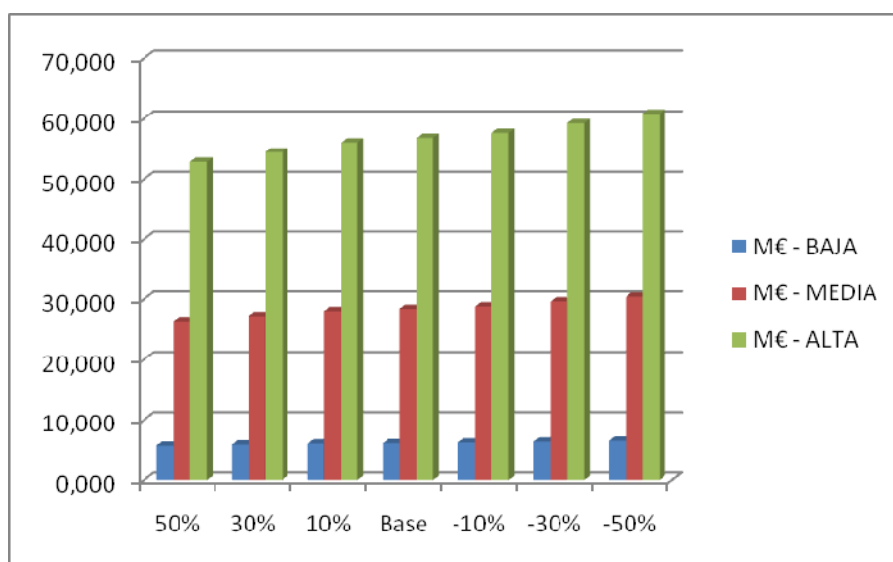


Figura 190. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2015

Tabla 211. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2015

Inversión total (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-6,55%	-3,93%	-1,31%	0,00%	1,41%	3,93%	6,55%
Variación % - MEDIA	-7,04%	-4,22%	-1,41%	0,00%	1,41%	4,22%	7,04%
Variación % - ALTA	-7,04%	-4,22%	-1,41%	0,00%	1,41%	4,22%	7,04%

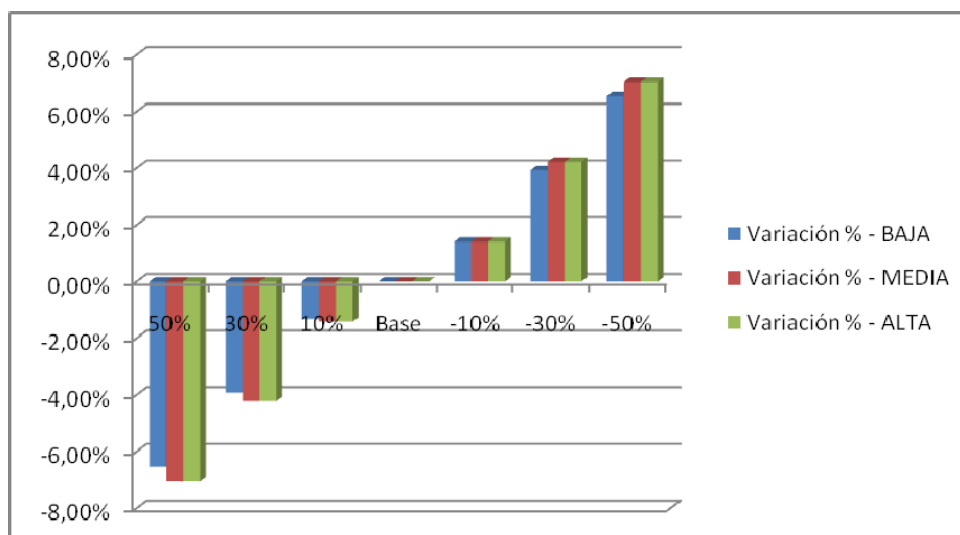


Figura 191. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2015

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2030 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 212. Inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* y el grado de penetración en el año 2030

Inversión total (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	780,856	814,521	848,186	865,018	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	3907,117	4075,553	4243,989	4328,206	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	7812,917	8149,789	8486,660	8655,095	0,000	0,000	0,000

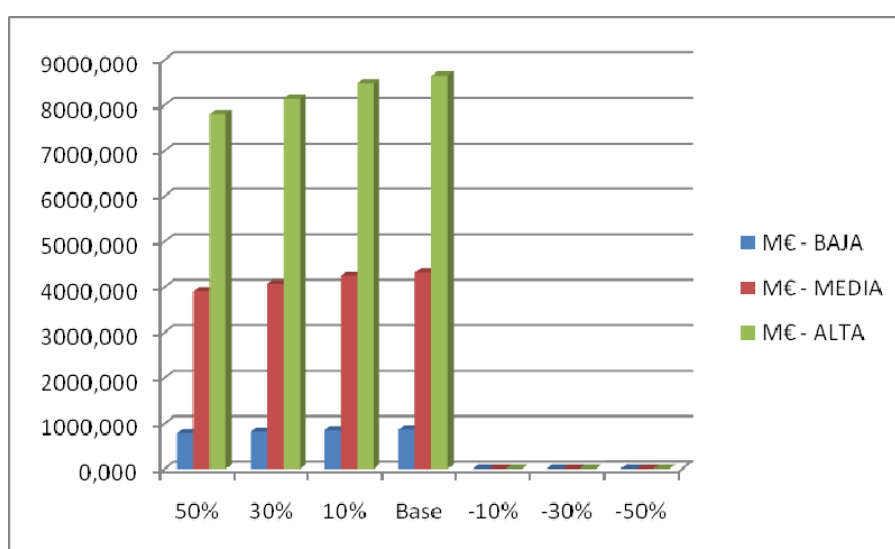


Figura 192. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2030

Tabla 213. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2030

Inversión total (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-9,73%	-5,84%	-1,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	-9,73%	-5,84%	-1,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-9,73%	-5,84%	-1,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

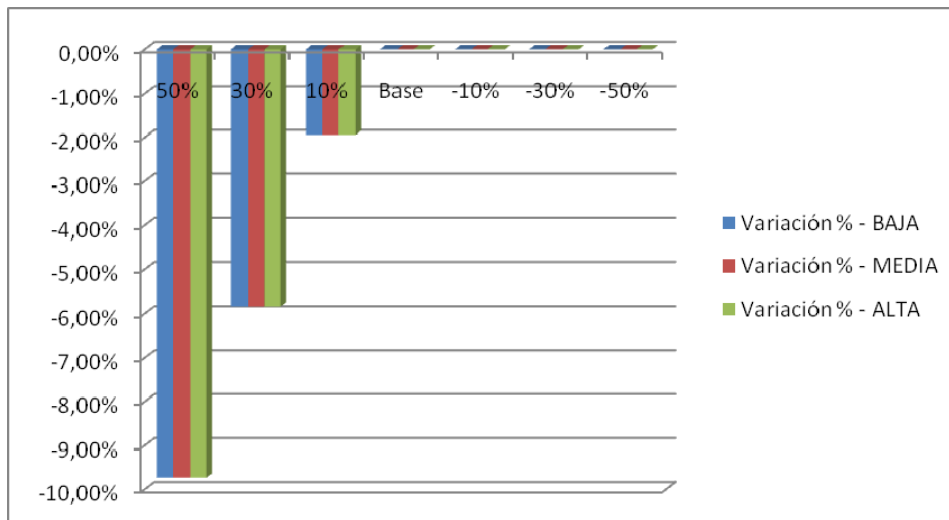


Figura 193. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2030

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2050 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 214. Inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* y el grado de penetración en el año 2050

Inversión total (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	1036,830	1085,268	1133,706	1157,925	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	5182,682	5424,786	5666,889	5787,941	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	10363,959	10848,166	11332,374	11574,477	0,000	0,000	0,000

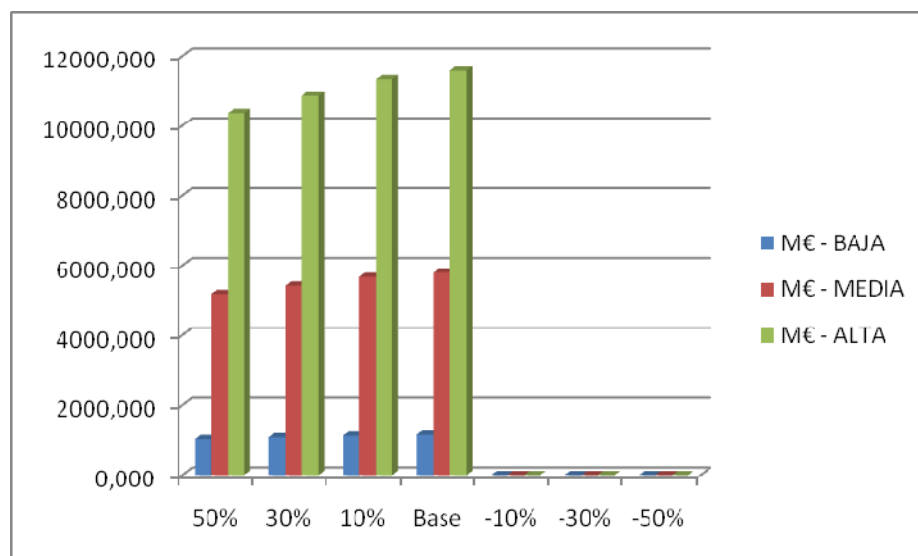


Figura 194. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Previsión Precio de Turismos* en el año 2050

Tabla 215. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2050

Inversión total (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-10,46%	-6,27%	-2,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	-10,46%	-6,27%	-2,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-10,46%	-6,28%	-2,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

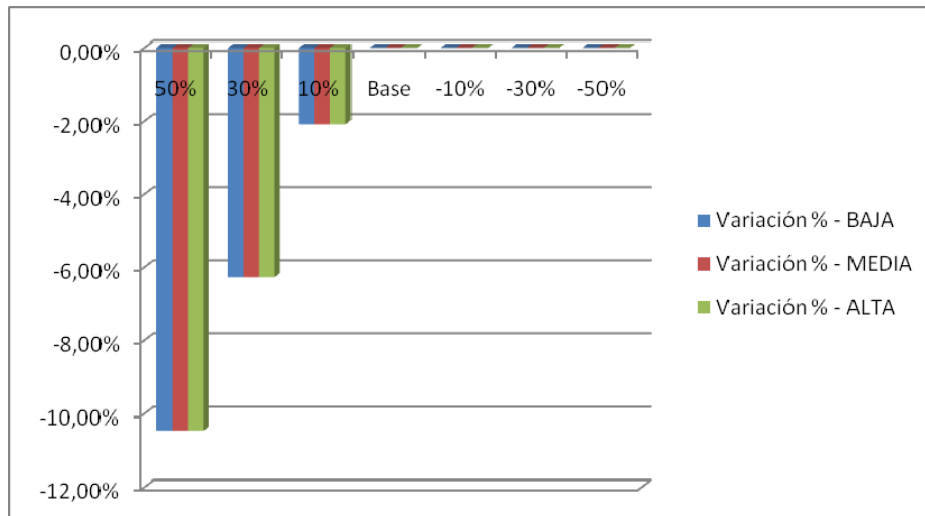


Figura 195. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa a la Adquisición de los Turismos* en el año 2050

A partir del año 2030 incluido, no se tienen datos para variaciones en negativo del valor inicial, ya que para estos horizontes temporales la subvención prevista era igual a 0, y por lo tanto no es posible disminuir esta cantidad.

En la Figura 190, Figura 192 y Figura 194 se observa que a mayor subvención directa a la adquisición de los turismos, menor es la inversión total a realizar.

En la Figura 191, Figura 193 y Figura 195 se puede ver como las variaciones respecto a los valores de referencia se mantienen prácticamente constantes independientemente del grado de penetración considerado.

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Tabla 216. Análisis de la variable Subvención Directa a la Adquisición de Turismos

INVERSIÓN: Subvención Adquisición de Turismos	Año	2015						2020						2050					
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta	
		Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base
50%	Vehículos (M€)	5,342	-7,00%	26,023	-7,14%	52,046	-7,14%	775,502	-9,79%	3879,497	-9,79%	7758,994	-9,79%	1021,235	-10,60%	5103,773	-10,60%	10207,339	-10,60%
	Inversión total (M€)	5,740	-6,55%	26,421	-7,04%	52,842	-7,04%	780,856	-9,73%	3907,117	-9,73%	7812,917	-9,73%	1036,830	-10,46%	5182,682	-10,46%	10363,959	-10,46%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,07		98,49		98,49		99,31		99,29		99,31		98,50		98,48		98,49	
30%	Vehículos (M€)	5,503	-4,20%	26,823	-4,28%	53,647	-4,28%	809,167	-5,87%	4047,933	-5,87%	8095,865	-5,87%	1069,673	-6,36%	5345,877	-6,36%	10691,546	-6,36%
	Inversión total (M€)	5,901	-3,93%	27,221	-4,22%	54,443	-4,22%	814,521	-5,84%	4075,553	-5,84%	8149,789	-5,84%	1085,268	-6,27%	5424,786	-6,27%	10848,166	-6,28%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,26		98,54		98,54		99,34		99,32		99,34		98,56		98,55		98,56	
10%	Vehículos (M€)	5,664	-1,40%	27,624	-1,43%	55,248	-1,43%	842,832	-1,96%	4216,368	-1,96%	8432,736	-1,96%	1118,111	-2,12%	5587,980	-2,12%	11175,754	-2,12%
	Inversión total (M€)	6,062	-1,31%	28,022	-1,41%	56,044	-1,41%	848,186	-1,95%	4243,989	-1,95%	8486,660	-1,95%	1133,706	-2,09%	5666,889	-2,09%	11332,374	-2,09%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,43		98,58		98,58		99,37		99,35		99,36		98,62		98,61		98,62	
Referencia	Vehículos (M€)	5,744	0,00%	28,024	0,00%	56,048	0,00%	859,664	0,00%	4300,586	0,00%	8601,172	0,00%	1142,330	0,00%	5709,032	0,00%	11417,857	0,00%
	Inversión total (M€)	6,142	0,00%	28,422	0,00%	56,844	0,00%	865,018	0,00%	4328,206	0,00%	8655,095	0,00%	1157,925	0,00%	5787,941	0,00%	11574,477	0,00%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,52		98,60		98,60		99,38		99,36		99,38		98,65		98,64		98,65	
-10%	Vehículos (M€)	5,824	1,40%	28,424	1,43%	56,848	1,43%												
	Inversión total (M€)	6,222	1,31%	28,822	1,41%	57,644	1,41%												
	% vehículos respecto al total de inversión	93,60		98,62		98,62													
-30%	Vehículos (M€)	5,985	4,20%	29,225	4,28%	58,449	4,28%												
	Inversión total (M€)	6,383	3,93%	29,623	4,22%	59,245	4,22%												
	% vehículos respecto al total de inversión	93,76		98,66		98,66													
-50%	Vehículos (M€)	6,146	7,00%	30,025	7,14%	60,050	7,14%												
	Inversión total (M€)	6,544	6,55%	30,423	7,04%	60,846	7,04%												
	% vehículos respecto al total de inversión	93,92		98,69		98,69													

A5.1.4. Subvención directa para la construcción de hidrogeneras

En la Tabla 223 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras*.

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2015 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 217. Inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* y el grado de penetración en el año 2015

Inversión total (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	5,943	6,023	6,102	6,142	6,182	6,261	6,341
M€ - MEDIA	28,223	28,303	28,382	28,422	28,462	28,541	28,621
M€ - ALTA	56,446	56,605	56,764	56,844	56,924	57,083	57,242

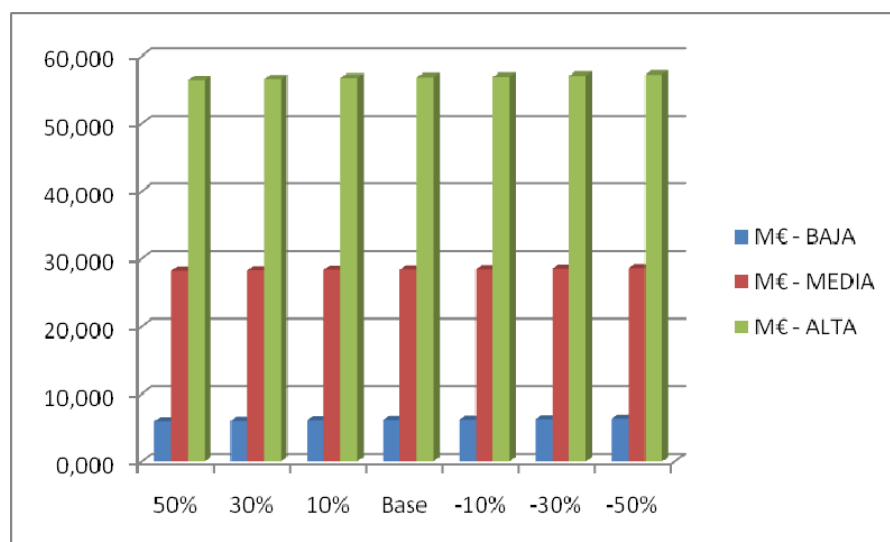


Figura 196. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2015

Tabla 218. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2015

Inversión total (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-3,24%	-1,94%	-0,65%	0,00%	0,14%	1,94%	3,24%
Variación % - MEDIA	-0,70%	-0,42%	-0,14%	0,00%	0,14%	0,42%	0,70%
Variación % - ALTA	-0,70%	-0,42%	-0,14%	0,00%	0,14%	0,42%	0,70%

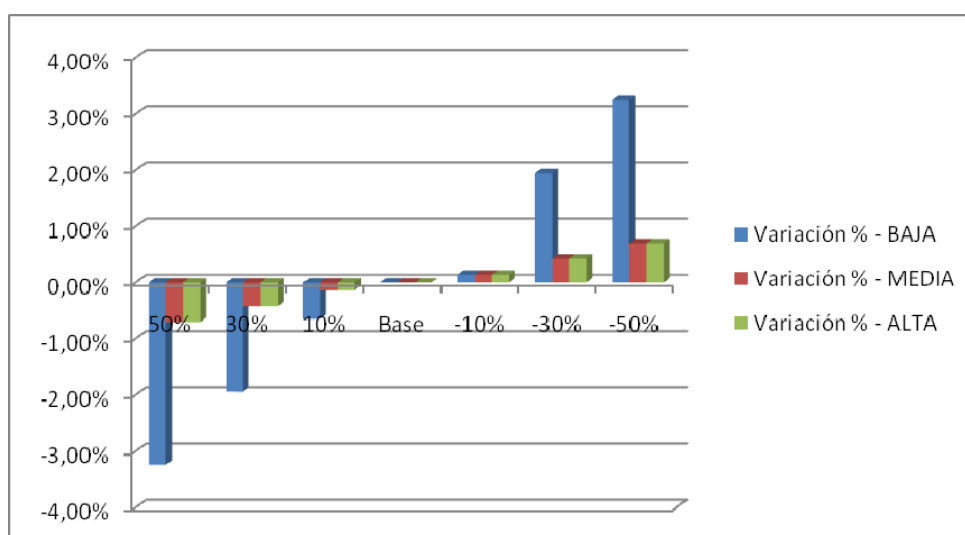


Figura 197. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2015

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2030 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 219. Inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* y el grado de penetración en el año 2030

Inversión total (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	862,341	863,412	864,483	865,018	865,553	866,624	867,695
M€ - MEDIA	4314,396	4319,920	4325,444	4328,206	4330,968	4336,493	4342,017
M€ - ALTA	8628,134	8638,918	8649,703	8655,095	8660,488	8671,272	8682,057

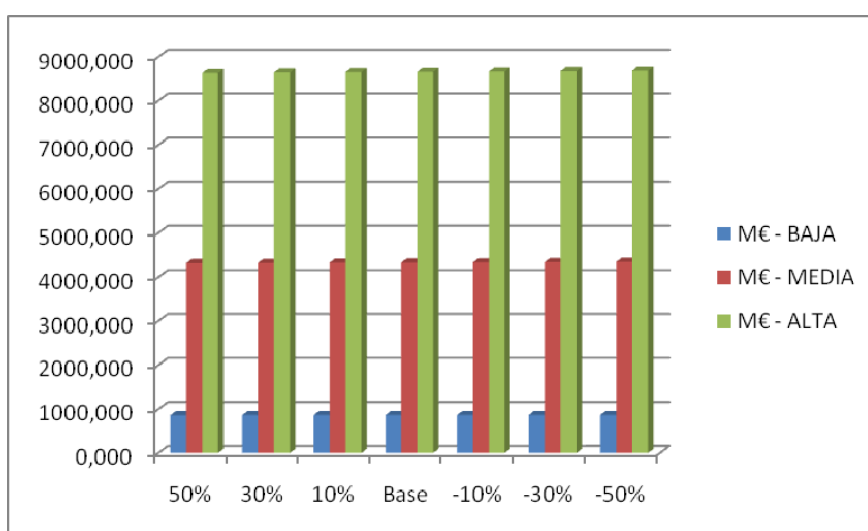


Figura 198. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2030

Tabla 220. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2030

Inversión total (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-0,31%	-0,19%	-0,06%	0,00%	0,06%	0,19%	0,31%
Variación % - MEDIA	-0,32%	-0,19%	-0,06%	0,00%	0,06%	0,19%	0,32%
Variación % - ALTA	-0,31%	-0,19%	-0,06%	0,00%	0,06%	0,19%	0,31%

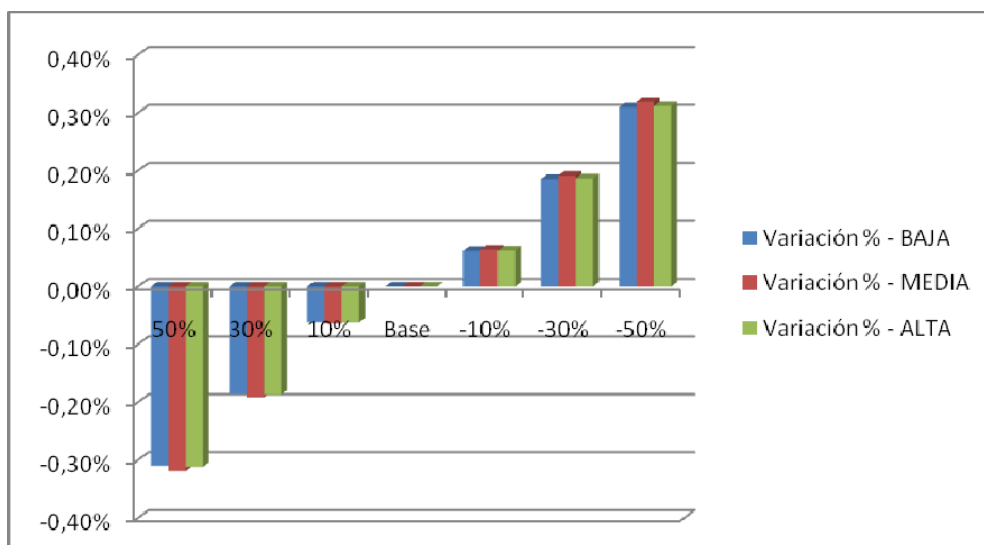


Figura 199. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2030

La evolución en la inversión total a realizar en el año 2050 en infraestructuras y vehículos en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra la inversión requerida en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia después.

Tabla 221. Inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* y el grado de penetración en el año 2050

Inversión total (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	1154,026	1155,585	1157,145	1157,925	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	5768,214	5776,105	5783,996	5787,941	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	11535,322	11550,984	11566,646	11574,477	0,000	0,000	0,000

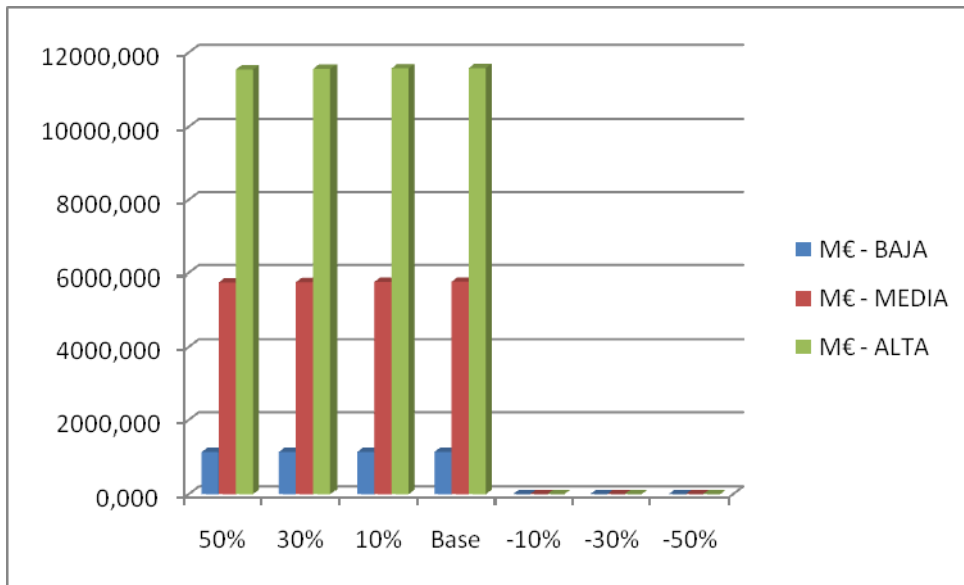


Figura 200. Evolución de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2050

Tabla 222. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2050

Inversión total (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-0,34%	-0,20%	-0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	-0,34%	-0,20%	-0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-0,34%	-0,20%	-0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

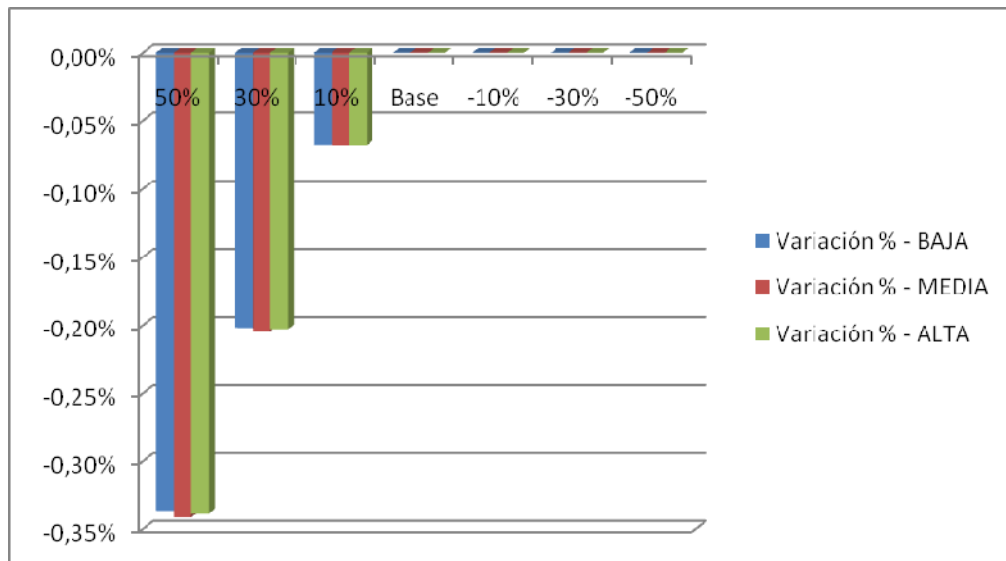


Figura 201. Variación respecto al valor de referencia de la inversión total a realizar en función de la variable *Subvención Directa para la Construcción de Hidrogeneras* en el año 2050

Para el horizonte temporal 2050, no se tienen datos para variaciones en negativo del valor inicial, ya que para este horizonte la subvención prevista es igual a 0, y por lo tanto no es posible disminuir este valor.

En las Figura 196, Figura 198 y Figura 200 se observa que a mayor subvención directa para la construcción de hidrogeneras, menor es la inversión total a realizar.

En las Figura 197, Figura 199 y Figura 201 se puede ver como las variaciones respecto a los valores de referencia se mantienen prácticamente constantes independientemente del grado de penetración considerado.

Tabla 223. Análisis de la variable Subvención Directa a la Construcción de Hidrogeneras

	Año	2015						2050											
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta							
		Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base						
50%	Hidrogeneras (M€)	0,199	-50,00%	0,199	-50,00%	0,398	-50,00%	2,677	-50,00%	13,810	-50,00%	26,962	-50,00%	11,696	-25,00%	59,182	-25,00%	117,465	-25,00%
	Inversión total (M€)	5,943	-3,24%	28,223	-0,70%	56,446	-0,70%	862,341	-0,31%	4314,396	-0,31%	8628,134	-0,31%	1154,026	-0,34%	5768,214	-0,34%	11535,322	-0,34%
	% vehículos respecto al total de inversión	96,65		99,29		99,29		99,69		99,68		99,69		98,99		98,97		98,98	
30%	Hidrogeneras (M€)	0,279	-30,00%	0,279	-30,00%	0,557	-30,00%	3,748	-30,00%	19,334	-30,00%	37,746	-30,00%	13,256	-15,00%	67,073	-15,00%	133,127	-15,00%
	Inversión total (M€)	6,023	-1,94%	28,303	-0,42%	56,605	-0,42%	863,412	-0,19%	4319,920	-0,19%	8638,918	-0,19%	1155,585	-0,20%	5776,105	-0,20%	11550,984	-0,20%
	% vehículos respecto al total de inversión	95,37		99,02		99,02		99,57		99,55		99,56		98,85		98,84		98,85	
10%	Hidrogeneras (M€)	0,358	-10,00%	0,358	-10,00%	0,716	-10,00%	4,819	-10,00%	24,858	-10,00%	48,531	-10,00%	14,815	-5,00%	74,964	-5,00%	148,789	-5,00%
	Inversión total (M€)	6,102	-0,65%	28,382	-0,14%	56,764	-0,14%	864,483	-0,06%	4325,444	-0,06%	8649,703	-0,06%	1157,145	-0,07%	5783,996	-0,07%	11566,646	-0,07%
	% vehículos respecto al total de inversión	94,13		98,74		98,74		99,44		99,43		99,44		98,72		98,70		98,71	
Referencia	Hidrogeneras (M€)	0,398	0,00%	0,398	0,00%	0,796	0,00%	5,354	0,00%	27,621	0,00%	53,924	0,00%	15,595	0,00%	78,909	0,00%	156,620	0,00%
	Inversión total (M€)	6,142	0,00%	28,422	0,00%	56,844	0,00%	865,018	0,00%	4328,206	0,00%	8655,095	0,00%	1157,925	0,00%	5787,941	0,00%	11574,477	0,00%
	% vehículos respecto al total de inversión	93,52		98,60		98,60		99,38		99,36		99,38		98,65		98,64		98,65	
-10%	Hidrogeneras (M€)	0,438	10,00%	0,438	10,00%	0,876	10,00%	5,889	10,00%	30,383	10,00%	59,316	10,00%						
	Inversión total (M€)	6,182	0,65%	28,462	0,14%	56,924	0,14%	865,553	0,06%	4330,968	0,06%	8660,488	0,06%						
	% vehículos respecto al total de inversión	92,92		98,46		98,46		99,32		99,30		99,32							
-30%	Hidrogeneras (M€)	0,517	30,00%	0,517	30,00%	1,035	30,00%	6,960	30,00%	35,907	30,00%	70,101	30,00%						
	Inversión total (M€)	6,261	1,94%	28,541	0,42%	57,083	0,42%	866,624	0,19%	4336,493	0,19%	8671,272	0,19%						
	% vehículos respecto al total de inversión	91,74		98,19		98,19		99,20		99,17		99,19							
-50%	Hidrogeneras (M€)	0,597	50,00%	0,597	50,00%	1,194	50,00%	8,031	50,00%	41,431	50,00%	80,885	50,00%						
	Inversión total (M€)	6,341	3,24%	28,621	0,70%	57,242	0,70%	867,695	0,31%	4342,017	0,32%	8682,057	0,31%						
	% vehículos respecto al total de inversión	90,59		97,91		97,91		99,07		99,05		99,07							

A5.2. Variables de Mayor Influencia sobre el Beneficio Bruto

A5.2.1. Precio base de venta del hidrógeno

En la Tabla 230 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno*.

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2015, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 224. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2015

Beneficio Bruto (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-0,416	-0,446	-0,476	-0,491	-0,506	-0,536	-0,565
M€ - MEDIA	0,113	0,013	-0,088	-0,138	-0,188	-0,289	-0,389
M€ - ALTA	0,980	0,678	0,377	0,226	0,076	-0,226	-0,527

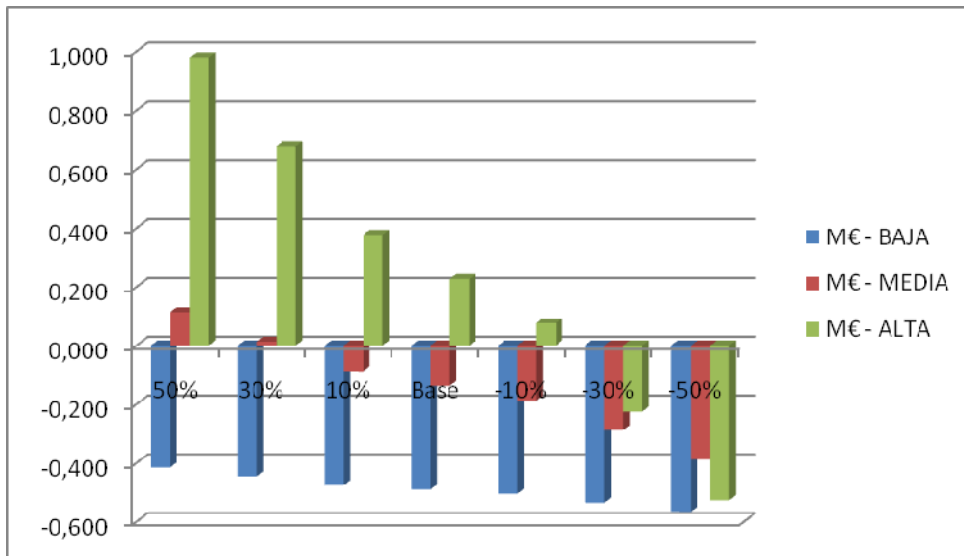


Figura 202. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2015

Tabla 225. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2015

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	15,23%	9,14%	3,05%	0,00%	-36,40%	-9,14%	-15,23%
Variación % - MEDIA	182,02%	109,21%	36,40%	0,00%	-36,40%	-109,21%	-182,02%
Variación % - ALTA	332,87%	199,72%	66,57%	0,00%	-66,57%	-199,72%	-332,87%

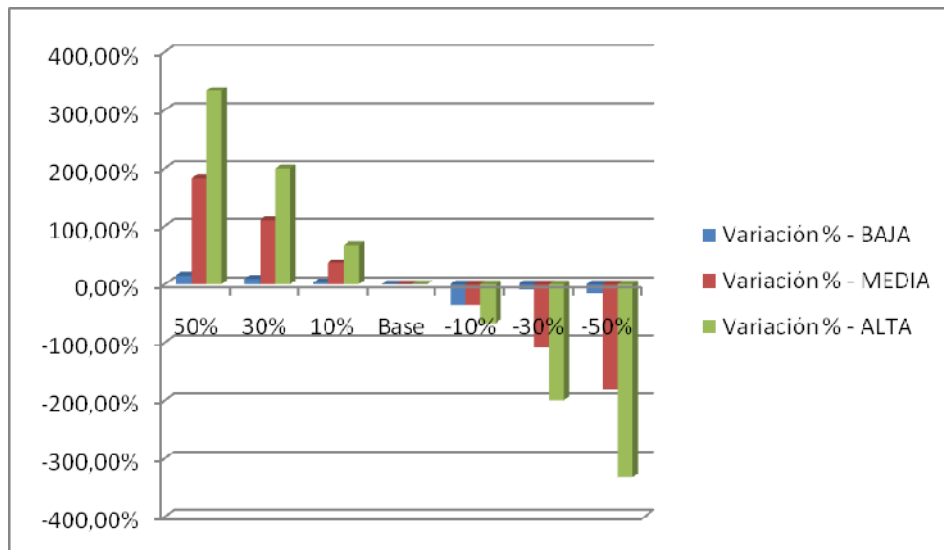


Figura 203. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2015

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2030, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 226. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2030

Beneficio Bruto (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	10,782	7,418	4,054	2,372	0,690	-2,674	-6,038
M€ - MEDIA	60,519	42,533	24,547	15,555	6,562	-11,424	-29,410
M€ - ALTA	120,139	84,778	49,417	31,736	14,056	-21,305	-56,666

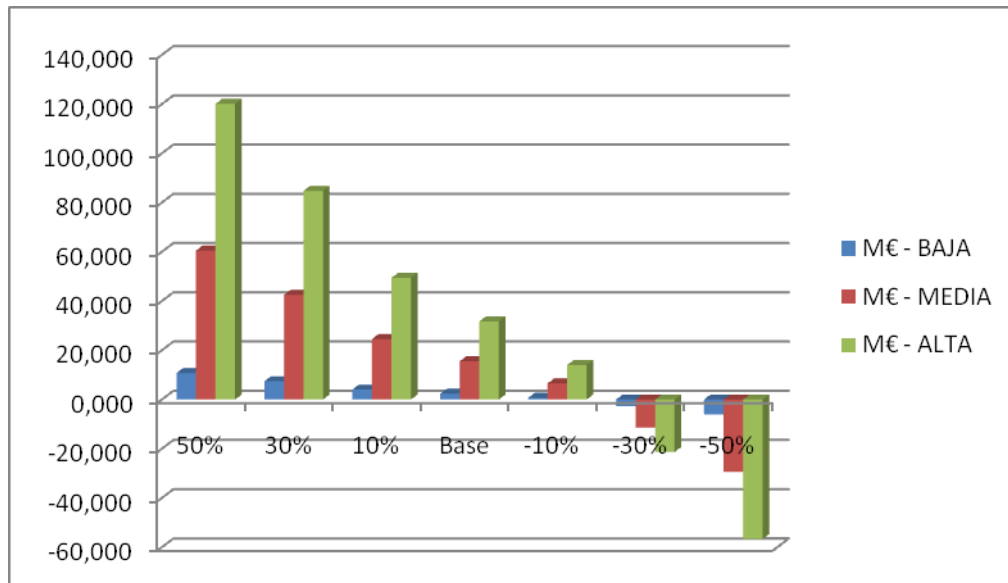


Figura 204. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2030

Tabla 227. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2030

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	354,57%	212,74%	70,91%	0,00%	-70,91%	-212,74%	-354,57%
Variación % - MEDIA	289,08%	173,45%	57,82%	0,00%	-57,82%	-173,45%	-289,08%
Variación % - ALTA	278,55%	167,13%	55,71%	0,00%	-55,71%	-167,13%	-278,55%

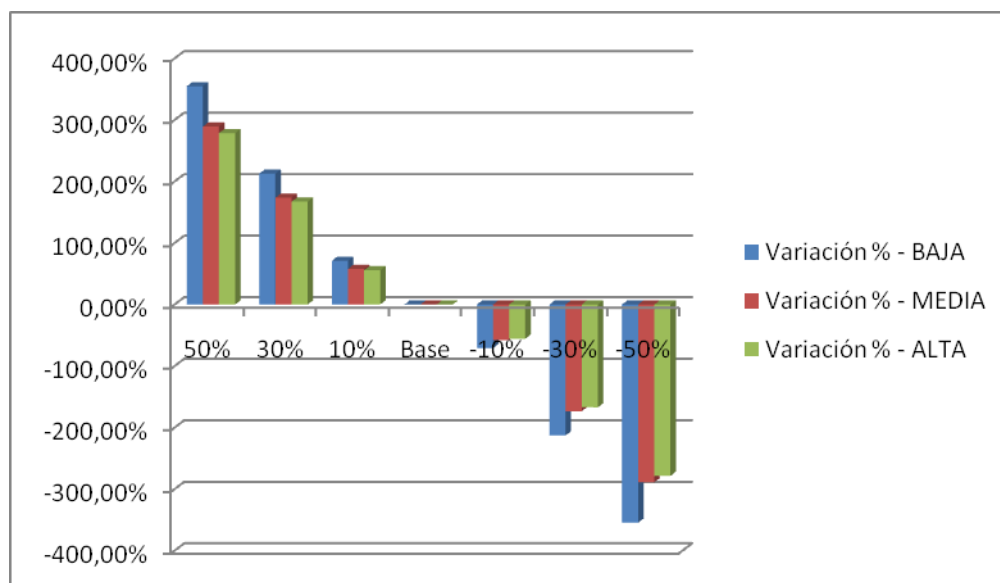


Figura 205. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2030

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2050, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 228. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2050

Beneficio Bruto (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	14,826	10,362	5,898	3,665	1,433	-3,031	-7,495
M€ - MEDIA	76,094	53,329	30,564	19,182	7,799	-14,966	-37,731
M€ - ALTA	151,838	106,559	61,281	38,641	16,002	-29,277	-74,556

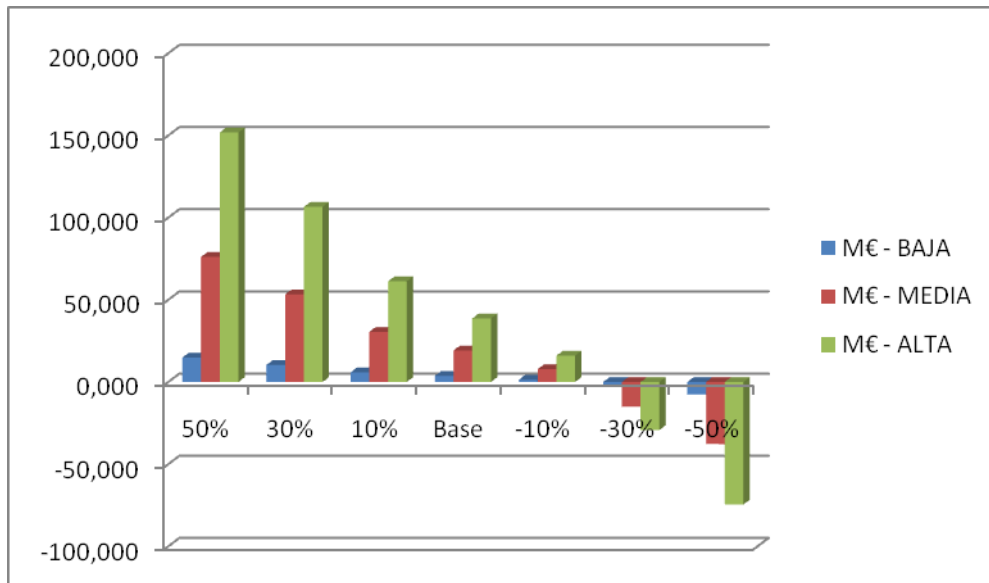


Figura 206. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2050

Tabla 229. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2050

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	304,48%	182,69%	60,90%	0,00%	-60,90%	-182,69%	-304,48%
Variación % - MEDIA	296,70%	178,02%	59,34%	0,00%	-59,34%	-178,02%	-296,70%
Variación % - ALTA	292,94%	175,77%	58,59%	0,00%	-58,59%	-175,77%	-292,94%

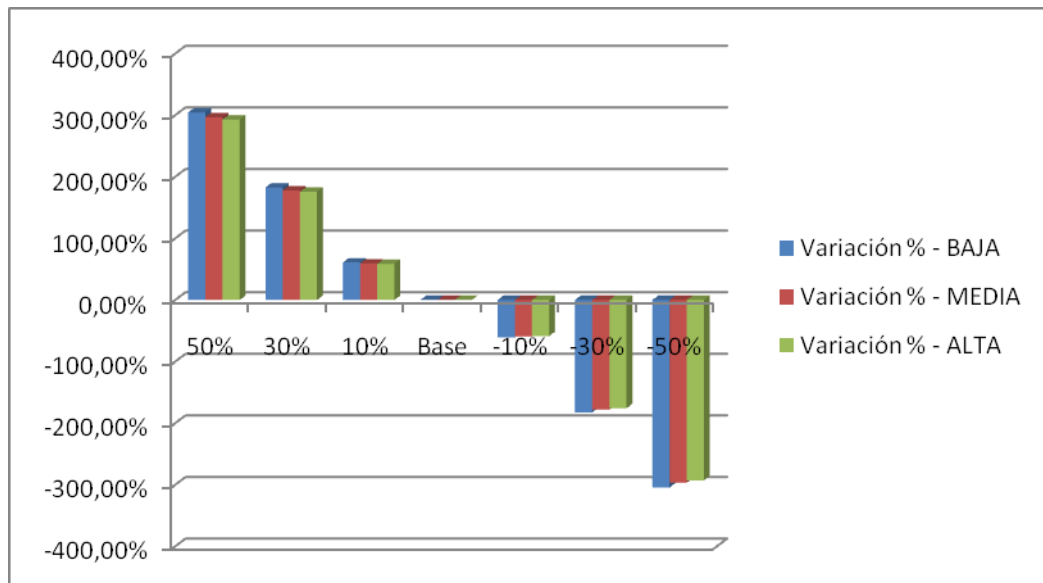


Figura 207. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Venta del Hidrógeno* en el año 2050

En la Figura 202, Figura 204 y Figura 206 se observa que a mayor precio de venta del hidrógeno, mejores resultados en cuanto a beneficios se obtienen.

En la Figura 203, Figura 205 y Figura 207 se puede ver como en términos de valor absoluto, los aumentos porcentuales del beneficio van siendo más constantes conforme el grado de penetración de esta nueva tecnología es mayor independientemente del grado de penetración de estas nuevas tecnologías.

Tabla 230. Análisis de la variable Precio Base de Venta del Hidrógeno

BENEFICIO BRUTO: Precio Venta Hidrógeno	Año	2015						2020						2050					
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta	
		Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base
50%	Ingresos (M€/año)	0,224	50,00%	0,753	50,00%	2,260	50,00%	25,230	50,00%	134,894	50,00%	265,207	50,00%	33,482	50,00%	170,738	50,00%	339,591	50,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,42	-15,23%	0,11	-182,02%	0,98	332,87%	10,78	354,57%	60,52	289,08%	120,14	278,55%	14,83	304,48%	76,09	296,70%	151,84	292,94%
30%	Ingresos (M€/año)	0,194	30,00%	0,653	30,00%	1,958	30,00%	21,866	30,00%	116,908	30,00%	229,846	30,00%	29,018	30,00%	147,973	30,00%	294,312	30,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,45	-9,14%	0,01	-109,21%	0,68	199,72%	7,42	212,74%	42,53	173,45%	84,78	167,13%	10,36	182,69%	53,33	178,02%	106,56	175,77%
10%	Ingresos (M€/año)	0,164	10,00%	0,552	10,00%	1,657	10,00%	18,502	10,00%	98,922	10,00%	194,485	10,00%	24,553	10,00%	125,208	10,00%	249,033	10,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,48	-3,05%	-0,09	-36,40%	0,38	66,57%	4,05	70,91%	24,55	57,82%	49,42	55,71%	5,90	60,90%	30,56	59,34%	61,28	58,59%
Referencia	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,49	0,00%	-0,14	0,00%	0,23	0,00%	2,37	0,00%	15,55	0,00%	31,74	0,00%	3,67	0,00%	19,18	0,00%	38,64	0,00%
-10%	Ingresos (M€/año)	0,134	-10,00%	0,452	-10,00%	1,356	-10,00%	15,138	-10,00%	80,936	-10,00%	159,124	-10,00%	20,089	-10,00%	102,443	-10,00%	203,755	-10,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,51	3,05%	-0,19	36,40%	0,08	-66,57%	0,69	-70,91%	6,56	-57,82%	14,06	-55,71%	1,43	-60,90%	7,80	-59,34%	16,00	-58,59%
-30%	Ingresos (M€/año)	0,105	-30,00%	0,352	-30,00%	1,055	-30,00%	11,774	-30,00%	62,950	-30,00%	123,763	-30,00%	15,625	-30,00%	79,678	-30,00%	158,476	-30,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,54	9,14%	-0,29	109,21%	-0,23	-199,72%	-2,67	-212,74%	-11,42	-173,45%	-21,31	-167,13%	-3,03	-182,69%	-14,97	-178,02%	-29,28	-175,77%
-50%	Ingresos (M€/año)	0,075	-50,00%	0,251	-50,00%	0,753	-50,00%	8,410	-50,00%	44,965	-50,00%	88,402	-50,00%	11,161	-50,00%	56,913	-50,00%	113,197	-50,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,57	15,23%	-0,39	182,02%	-0,53	-332,87%	-6,04	-354,57%	-29,41	-289,08%	-56,67	-278,55%	-7,50	-304,48%	-37,73	-296,70%	-74,56	-292,94%

A5.2.2. Precio base de producción/compra + distribución del hidrógeno

En la Tabla 237 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno*.

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2015, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 231. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2015

Beneficio Bruto (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-0,797	-0,675	-0,552	-0,491	-0,429	-0,307	-0,184
M€ - MEDIA	-0,445	-0,322	-0,199	-0,138	-0,077	0,046	0,169
M€ - ALTA	-0,387	-0,142	0,104	0,226	0,349	0,594	0,839

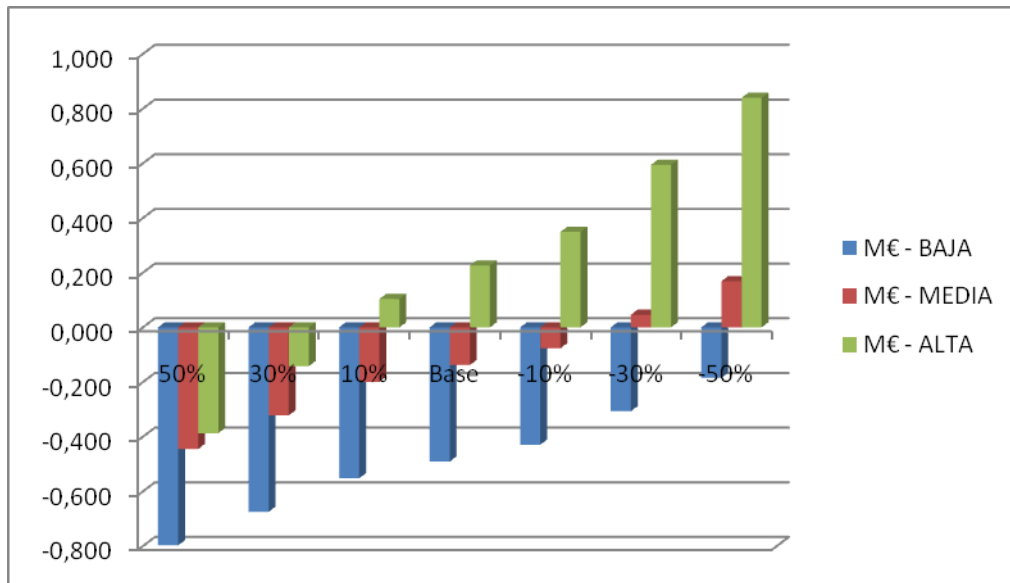


Figura 208. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno en el año 2015

Tabla 232. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno en el año 2015

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	62,48%	37,49%	12,50%	0,00%	-44,45%	-37,49%	-62,48%
Variación % - MEDIA	222,27%	133,36%	44,45%	0,00%	-44,45%	-133,36%	-222,27%
Variación % - ALTA	-270,98%	-162,59%	-54,20%	0,00%	54,20%	162,59%	270,98%

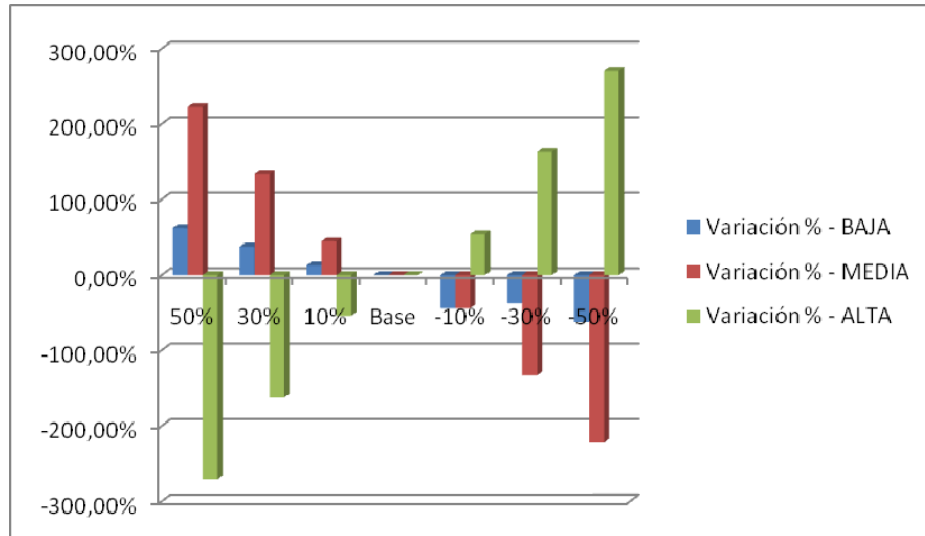


Figura 209. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* en el año 2015

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2030, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 233. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2030

Beneficio Bruto (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-4,709	-1,877	0,956	2,372	3,788	6,620	9,453
M€ - MEDIA	-20,872	-6,302	8,269	15,555	22,840	37,411	51,982
M€ - ALTA	-39,293	-10,881	17,530	31,736	45,942	74,354	102,765

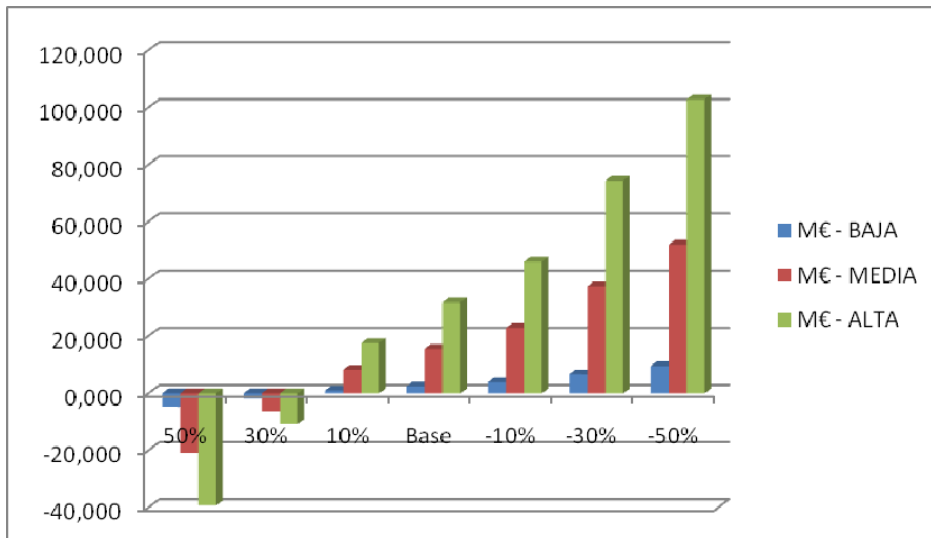


Figura 210. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* en el año 2030

Tabla 234. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* en el año 2030

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-298,54%	-179,12%	-59,71%	0,00%	59,71%	179,12%	298,54%
Variación % - MEDIA	-234,19%	-140,51%	-46,84%	0,00%	46,84%	140,51%	234,19%
Variación % - ALTA	-223,81%	-134,29%	-44,76%	0,00%	44,76%	134,29%	223,81%

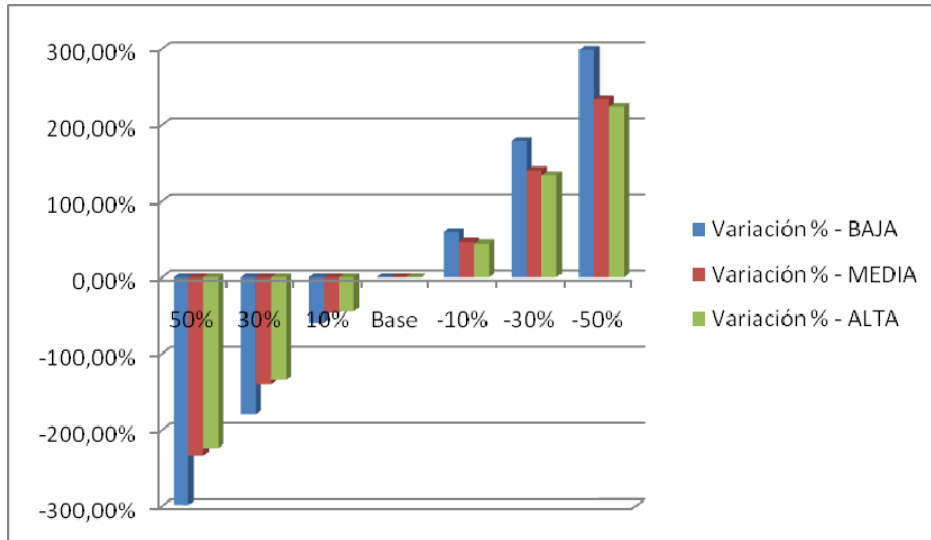


Figura 211. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* en el año 2030

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2050, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 235. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2050

Beneficio Bruto (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-5,277	-1,700	1,877	3,665	5,454	9,031	12,608
M€ - MEDIA	-26,233	-8,067	10,099	19,182	28,265	46,431	64,597
M€ - ALTA	-51,423	-15,397	20,628	38,641	56,654	92,679	128,705

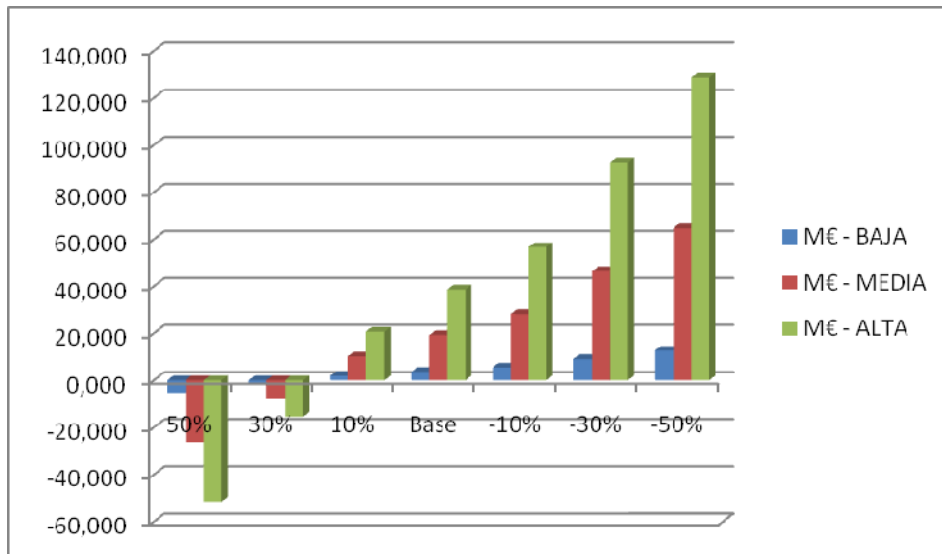


Figura 212. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* en el año 2050

Tabla 236. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* en el año 2050

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-243,96%	-146,38%	-48,79%	0,00%	48,79%	146,38%	243,96%
Variación % - MEDIA	-236,76%	-142,06%	-47,35%	0,00%	47,35%	142,06%	236,76%
Variación % - ALTA	-233,08%	-139,85%	-46,62%	0,00%	46,62%	139,85%	233,08%

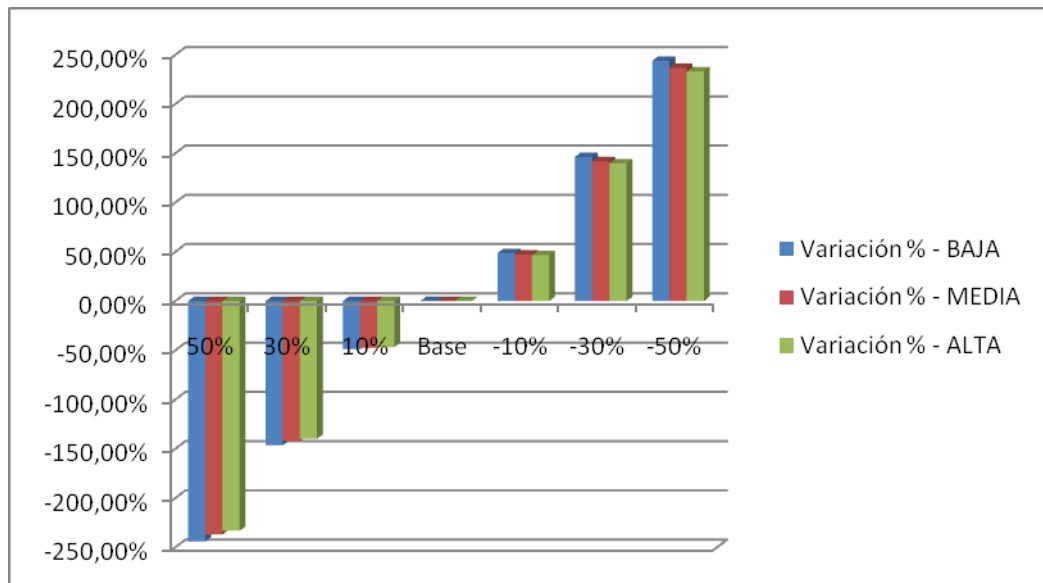


Figura 213. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Precio Base de Producción/Compra + Distribución del Hidrógeno* en el año 2050

En la Figura 208, Figura 210 y Figura 212 se observa que a mayor precio de producción/compra del hidrógeno, peores resultados en cuanto a beneficios se obtienen.

En la Figura 209, Figura 211 y Figura 213 se puede ver como en valor absoluto, los aumentos porcentuales del beneficio van siendo más constantes conforme el grado de penetración de esta nueva tecnología es mayor independientemente del grado de penetración de estas nuevas tecnologías.

Tabla 237. Análisis de la variable Precio Base de Producción/compra + Distribución del Hidrógeno

Grado de Penetración		BENEFICIO BRUTO: Precio Producción + Distribución Hidrógeno																	
		2015				2030				2050									
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta	
Año	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	
	50%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394
Gastos (M€/año)		0,947	47,90%	0,947	47,90%	1,893	47,90%	21,529	49,01%	110,802	48,98%	216,098	48,96%	27,598	47,93%	140,058	47,99%	277,817	47,97%
Beneficio bruto (M€/año)		-0,80	62,48%	-0,44	22,27%	-0,39	270,98%	-4,71	-298,54%	-20,87	-234,19%	-39,29	-223,81%	-5,28	-243,96%	-26,23	-236,76%	-51,42	-233,08%
30%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,824	28,74%	0,824	28,74%	1,648	28,74%	18,697	29,41%	96,231	29,39%	187,686	29,38%	24,021	28,76%	121,892	28,79%	241,791	28,78%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,67	37,49%	-0,32	133,36%	-0,14	-162,59%	-1,88	-179,12%	-6,30	-140,51%	-10,88	-134,29%	-1,70	-146,38%	-8,07	-142,06%	-15,40	-139,85%
10%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,701	9,58%	0,701	9,58%	1,403	9,58%	15,864	9,80%	81,660	9,80%	159,274	9,79%	20,444	9,59%	103,726	9,60%	205,766	9,59%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,55	12,50%	-0,20	44,45%	0,10	-54,20%	0,96	-59,71%	8,27	-46,84%	17,53	-44,76%	1,88	-48,79%	10,10	-47,35%	20,63	-46,62%
Referencia	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,49	0,00%	-0,14	0,00%	0,23	0,00%	2,37	0,00%	15,55	0,00%	31,74	0,00%	3,67	0,00%	19,18	0,00%	38,64	0,00%
-10%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,579	-9,58%	0,579	-9,58%	1,158	-9,58%	13,032	-9,80%	67,089	-9,80%	130,863	-9,79%	16,867	-9,59%	85,560	-9,60%	169,740	-9,59%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,43	-12,50%	-0,08	-44,45%	0,35	54,20%	3,79	59,71%	22,84	46,84%	45,94	44,76%	5,45	48,79%	28,26	47,35%	56,65	46,62%
-30%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,456	-28,74%	0,456	-28,74%	0,912	-28,74%	10,199	-29,41%	52,519	-29,39%	102,451	-29,38%	13,290	-28,76%	67,394	-28,79%	133,715	-28,78%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,31	-37,49%	0,05	-133,36%	0,59	162,59%	6,62	179,12%	37,41	140,51%	74,35	134,29%	9,03	146,38%	46,43	142,06%	92,68	139,85%
-50%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,334	-47,90%	0,334	-47,90%	0,667	-47,90%	7,367	-49,01%	37,948	-48,98%	74,040	-48,96%	9,713	-47,93%	49,228	-47,99%	97,689	-47,97%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,18	-62,48%	0,17	-222,27%	0,84	270,98%	9,45	298,54%	51,98	234,19%	102,77	223,81%	12,61	243,96%	64,60	236,76%	128,70	233,08%

A5.2.3. Previsión número de turismos

En la Tabla 244 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Previsión del Número de Turismos*.

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2015, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 238. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* y el grado de penetración en el año 2015

Beneficio Bruto (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-0,431	-0,455	-0,479	-0,491	-0,503	-0,526	-0,550
M€ - MEDIA	0,060	-0,019	-0,098	-0,138	-0,178	-0,257	-0,336
M€ - ALTA	0,820	0,583	0,226	0,226	0,107	-0,130	-0,368

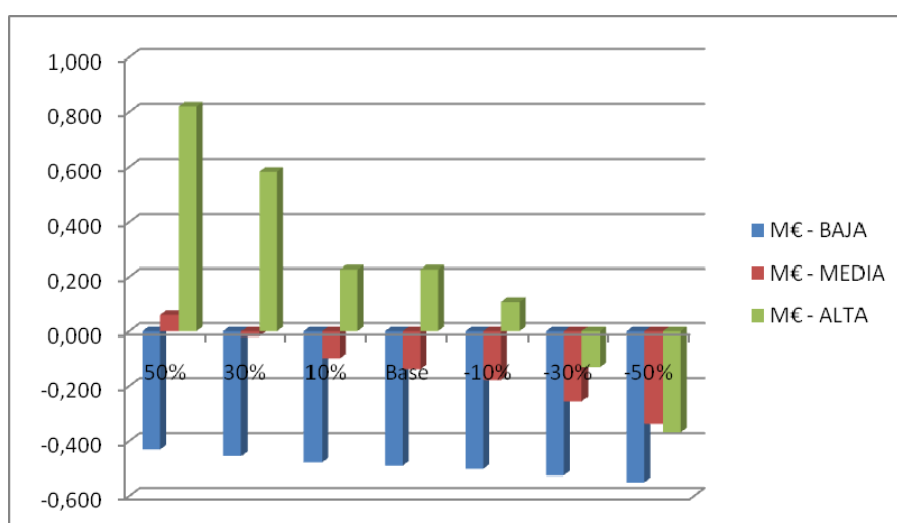


Figura 214. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2015

Tabla 239. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2015

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-12,11%	-7,26%	-2,42%	0,00%	28,71%	7,26%	12,11%
Variación % - MEDIA	-143,54%	-86,12%	-28,71%	0,00%	28,71%	86,12%	143,54%
Variación % - ALTA	262,49%	157,50%	52,50%	0,00%	-52,50%	-157,50%	-262,49%

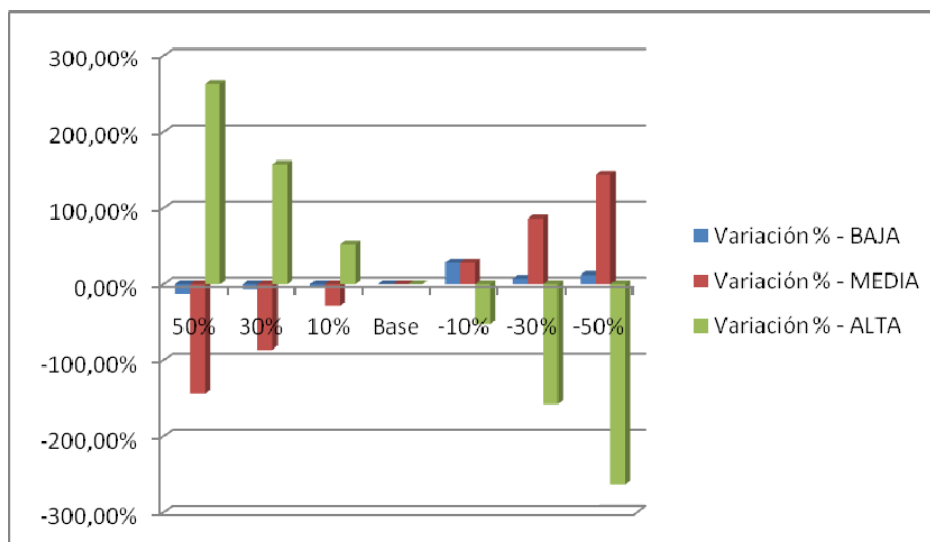


Figura 215. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2015

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2030, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 240. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* y el grado de penetración en el año 2030

Beneficio Bruto (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	10,310	7,135	3,960	2,372	0,784	-2,391	-5,567
M€ - MEDIA	57,998	41,021	24,043	15,555	7,066	-9,912	-26,889
M€ - ALTA	115,182	81,804	48,425	31,736	15,047	-18,331	-51,709

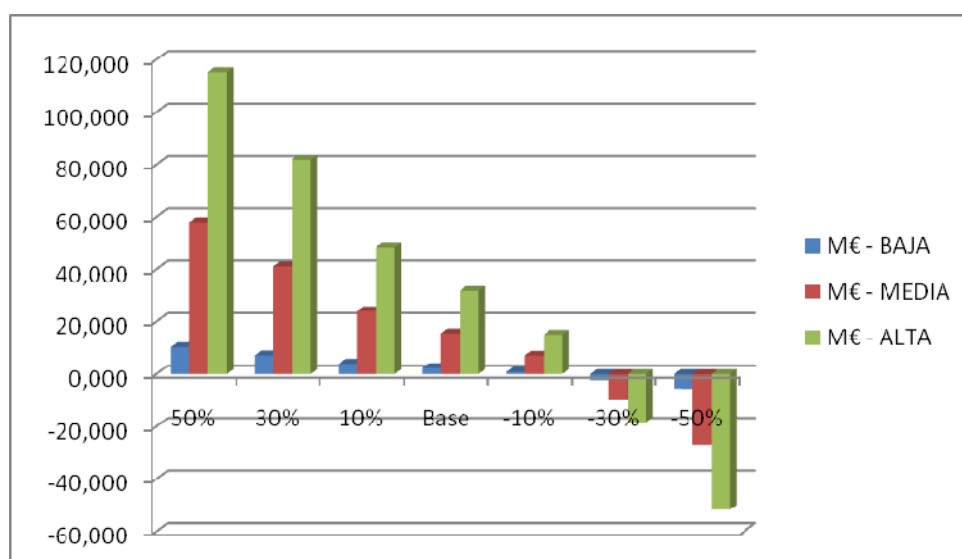


Figura 216. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2030

Tabla 241. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2030

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	334,69%	200,81%	66,94%	0,00%	-66,94%	-200,81%	-334,69%
Variación % - MEDIA	272,87%	163,72%	54,57%	0,00%	-54,57%	-163,72%	-272,87%
Variación % - ALTA	262,93%	157,76%	52,59%	0,00%	-52,59%	-157,76%	-262,93%

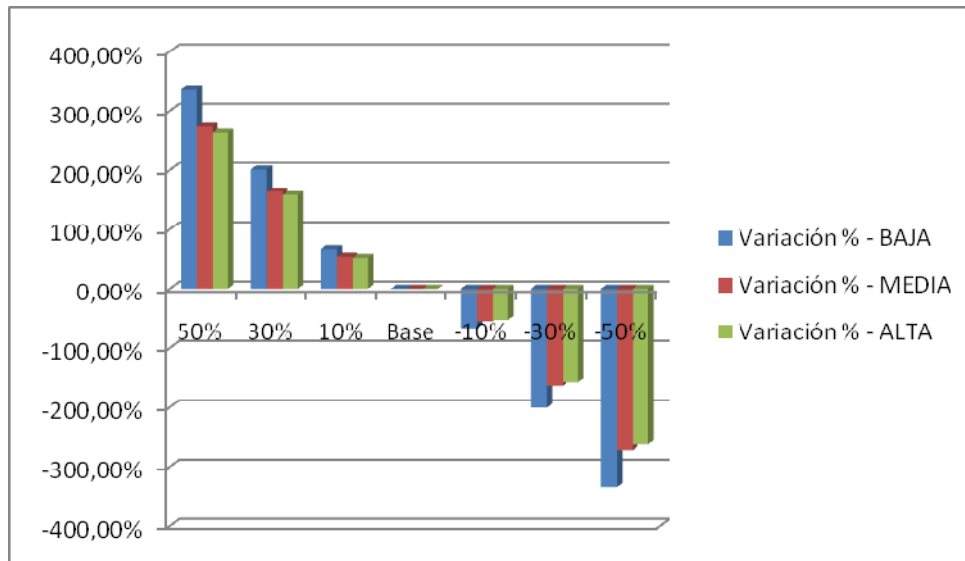


Figura 217. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2030

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2050, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 242. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* y el grado de penetración en el año 2050

Beneficio Bruto (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	14,200	9,986	5,772	3,665	1,559	-2,655	-6,869
M€ - MEDIA	72,903	51,415	29,926	19,182	8,438	-13,051	-34,540
M€ - ALTA	145,491	102,751	60,011	38,641	17,271	-25,469	-68,209

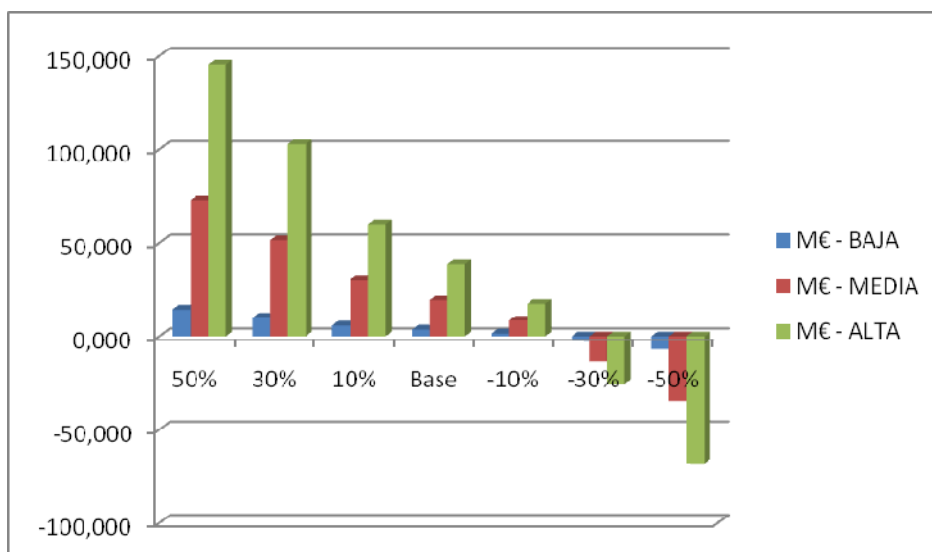


Figura 218. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2050

Tabla 243. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2050

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	287,41%	172,44%	57,48%	0,00%	-57,48%	-172,44%	-287,41%
Variación % - MEDIA	280,06%	168,04%	56,01%	0,00%	-56,01%	-168,04%	-280,06%
Variación % - ALTA	276,52%	165,91%	55,30%	0,00%	-55,30%	-165,91%	-276,52%

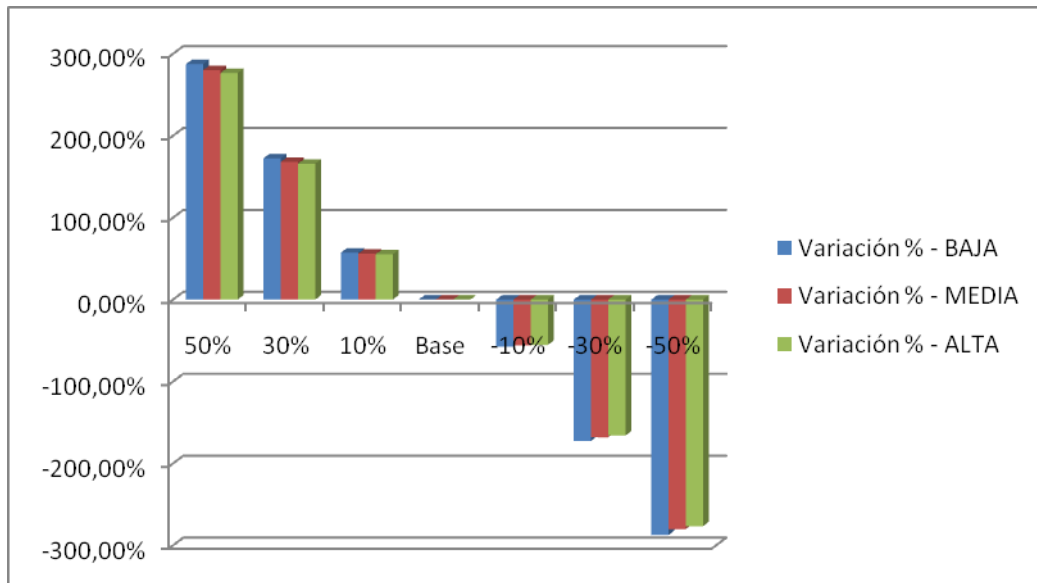


Figura 219. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Previsión del Número de Turismos* en el año 2050

En la Figura 214, Figura 216 y Figura 218 se observa que a mayor número de turismos traccionados mediante tecnología de pila de combustible, mejores resultados en cuanto a beneficios se obtienen.

En la Figura 215, Figura 217 y Figura 219 se puede ver como en términos de valor absoluto, los aumentos porcentuales del beneficio van siendo más constantes conforme el grado de penetración de esta nueva tecnología es mayor independientemente del grado de penetración de estas nuevas tecnologías.

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Tabla 244. Análisis de la variable Número de Turismos (Beneficio Bruto)

BENEFICIO BRUTO: Número de Turismos	Año	2015						2020						2050					
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta	
		Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base
50%	Ingresos (M€/año)	0,209	39,75%	0,700	39,43%	2,101	39,43%	24,758	47,20%	132,373	47,20%	260,251	47,20%	32,856	47,20%	167,547	47,20%	333,244	47,20%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,43	-12,11%	0,06	-143,54%	0,82	262,49%	10,31	334,69%	58,00	272,87%	115,18	262,93%	14,20	287,41%	72,90	280,06%	145,49	276,52%
30%	Ingresos (M€/año)	0,185	23,85%	0,621	23,66%	1,863	23,66%	21,583	28,32%	115,395	28,32%	226,872	28,32%	28,642	28,32%	146,058	28,32%	290,504	28,32%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,46	-7,26%	-0,02	-86,12%	0,58	157,50%	7,13	200,81%	41,02	163,72%	81,80	157,76%	9,99	172,44%	51,41	168,04%	102,75	165,91%
10%	Ingresos (M€/año)	0,161	7,95%	0,542	7,89%	1,625	7,89%	18,408	9,44%	98,418	21,59%	193,494	22,24%	24,428	9,44%	124,569	9,44%	247,764	9,44%
	Gastos (M€/año)	0,640	-2,43%	0,640	-2,43%	1,280	-2,43%	14,448	-3,00%	74,375	-3,01%	145,069	-3,01%	18,656	-1,77%	94,643	0,00%	187,753	-1,78%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,48	-5,49%	-0,10	-36,08%	0,35	77,47%	3,96	105,76%	24,04	463,78%	48,43	455,41%	5,77	73,43%	29,93	56,01%	60,01	70,26%
Referencia	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,49	0,00%	-0,14	0,00%	0,23	0,00%	2,37	0,00%	15,55	0,00%	31,74	0,00%	3,67	0,00%	19,18	0,00%	38,64	0,00%
-10%	Ingresos (M€/año)	0,138	-7,95%	0,463	-7,89%	1,388	-7,89%	15,232	-9,44%	81,441	-9,44%	160,116	-9,44%	20,214	-9,44%	103,081	-9,44%	205,024	-9,44%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,50	2,42%	-0,18	28,71%	0,11	-52,50%	0,78	-66,94%	7,07	-54,57%	15,05	-52,59%	1,56	-57,48%	8,44	-56,01%	17,27	-55,30%
-30%	Ingresos (M€/año)	0,114	-23,85%	0,383	-23,66%	1,150	-23,66%	12,057	-28,32%	64,463	-28,32%	126,737	-28,32%	16,000	-28,32%	81,592	-28,32%	162,284	-28,32%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,53	7,26%	-0,26	86,12%	-0,13	-157,50%	-2,39	-200,81%	-9,91	-163,72%	-18,33	-157,76%	-2,66	-172,44%	-13,05	-168,04%	-25,47	-165,91%
-50%	Ingresos (M€/año)	0,090	-39,75%	0,304	-39,43%	0,913	-39,43%	8,881	-47,20%	47,486	-47,20%	93,359	-47,20%	11,786	-47,20%	60,104	-47,20%	119,544	-47,20%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,55	12,11%	-0,34	143,54%	-0,37	-262,49%	-5,57	-334,69%	-26,89	-272,87%	-51,71	-262,93%	-6,87	-287,41%	-34,54	-280,06%	-68,21	-276,52%

A5.2.4. *Impuestos sobre la venta de hidrógeno*

En la Tabla 251 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno*.

Recordar que según las hipótesis de entrada, esta variable tiene un valor igual a cero, por lo que no es posible determinar el efecto que produce la disminución de esta variable respecto a la *Base*.

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2015, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 245. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2015

Beneficio Bruto (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-0,521	-0,509	-0,497	-0,491	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	-0,239	-0,199	-0,158	-0,138	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	-0,078	0,044	0,165	0,226	0,000	0,000	0,000

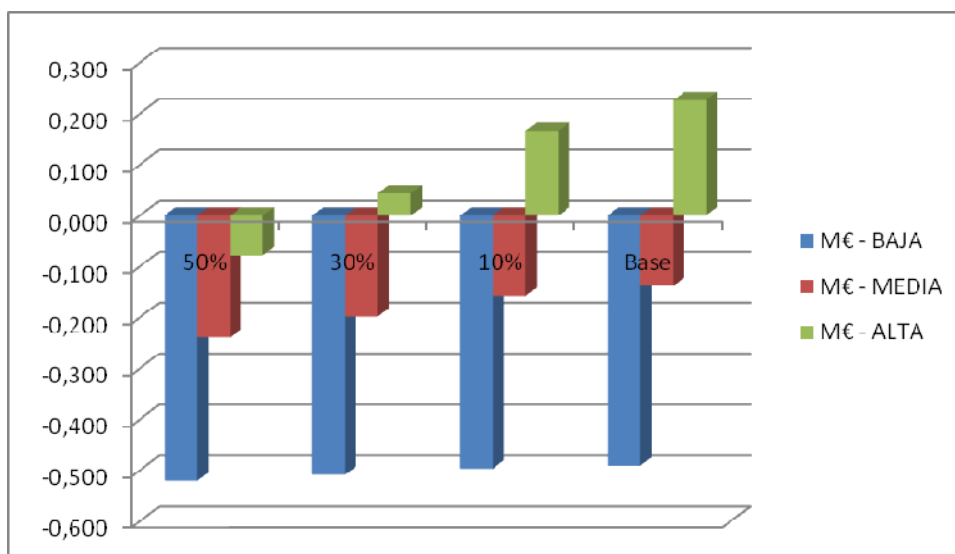


Figura 220. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2015

Tabla 246. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2015

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	6,15%	3,69%	1,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	73,55%	44,13%	14,71%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-134,49%	-80,70%	-26,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

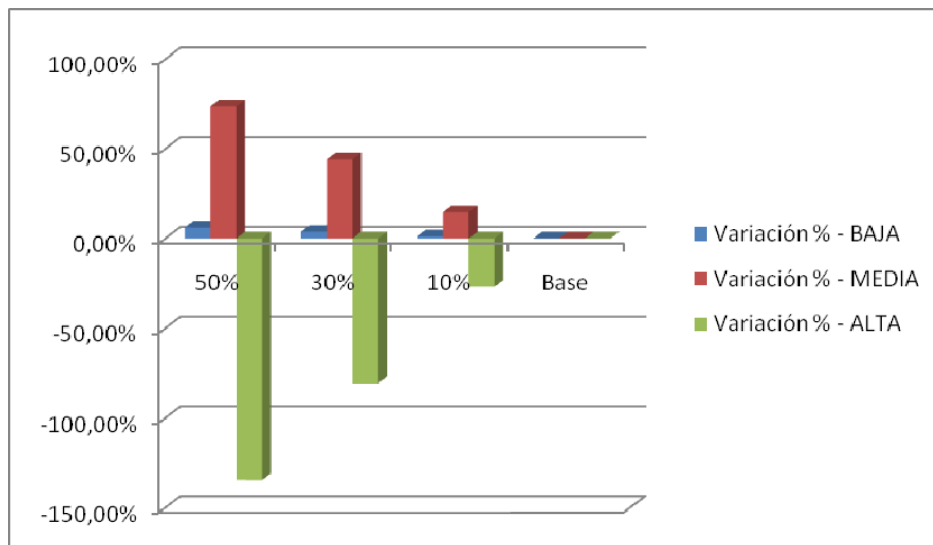


Figura 221. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2015

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2030, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 247. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2030

Beneficio Bruto (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-4,356	-1,665	1,026	2,372	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	-20,417	-6,029	8,360	15,555	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	-38,986	-10,697	17,592	31,736	0,000	0,000	0,000

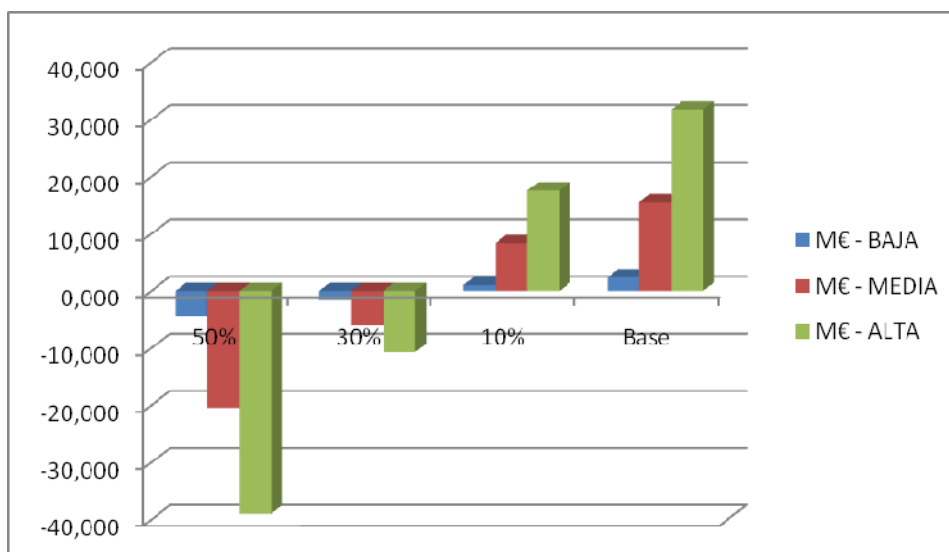


Figura 222. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2030

Tabla 248. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2030

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030							
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%	
Variación % - BAJA	-283,66%	-170,19%	-56,73%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
Variación % - MEDIA	-231,26%	-138,76%	-46,25%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	
Variación % - ALTA	-222,84%	-133,71%	-44,57%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	

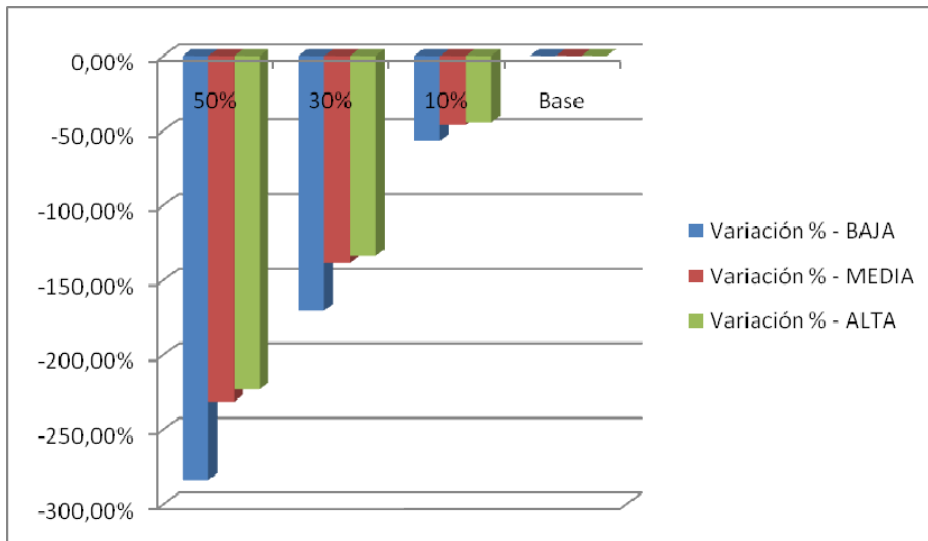


Figura 223. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2030

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2050, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 249. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2050

Beneficio Bruto (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-6,481	-2,422	1,636	3,665	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	-32,557	-11,861	8,834	19,182	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	-64,265	-23,103	18,060	38,641	0,000	0,000	0,000

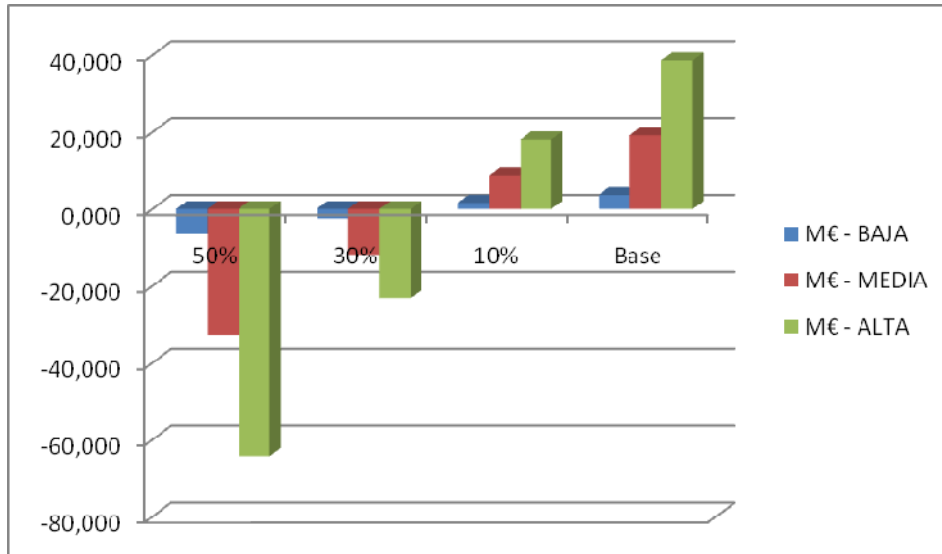


Figura 224. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2050

Tabla 250. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2050

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-276,80%	-166,08%	-55,36%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	-269,73%	-161,84%	-53,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-266,31%	-159,79%	-53,26%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

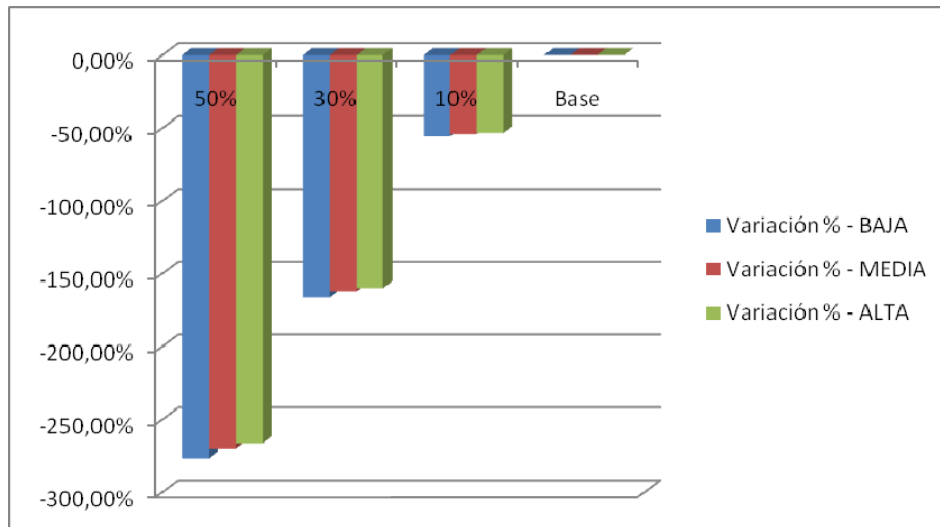


Figura 225. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Venta del Hidrógeno* en el año 2050

En la Figura 220, Figura 222 y Figura 224 se observa que cuanto mayor sea el impuesto que grave a la venta de hidrógeno, peores resultados en cuanto a beneficios se obtienen.

En la Figura 221, Figura 223 y Figura 225 se puede ver como en términos de valor absoluto, los aumentos porcentuales del beneficio van siendo más constantes conforme el grado de penetración de esta nueva tecnología es mayor independientemente del grado de penetración de estas nuevas tecnologías.

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Tabla 251. Análisis de la variable Impuesto a la Venta de Hidrógeno

BENEFICIO BRUTO: Impuestos Venta Hidrógeno	Año	2015						2030						2050					
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta	
		Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base
50%	Ingresos (M€/año)	0,119	-20,20%	0,401	-20,20%	1,202	-20,20%	10,092	-40,00%	53,958	-40,00%	106,083	-40,00%	12,175	-45,45%	62,086	-45,45%	123,488	-45,45%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,52	6,15%	-0,24	73,55%	-0,08	-134,49%	-4,36	-283,66%	-20,42	-231,26%	-38,99	-222,84%	-6,48	-276,80%	-32,56	-269,73%	-64,27	-266,31%
30%	Ingresos (M€/año)	0,131	-12,12%	0,441	-12,12%	1,324	-12,12%	12,783	-24,00%	68,346	-24,00%	134,372	-24,00%	16,234	-27,27%	82,782	-27,27%	164,650	-27,27%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,51	3,69%	-0,20	44,13%	0,04	-80,70%	-1,66	-170,19%	-6,03	-138,76%	-10,70	-133,71%	-2,42	-166,08%	-11,86	-161,84%	-23,10	-159,79%
10%	Ingresos (M€/año)	0,143	-4,04%	0,482	-4,04%	1,446	-4,04%	15,474	-8,00%	82,735	-8,00%	162,660	-8,00%	20,292	-9,09%	103,477	-9,09%	205,813	-9,09%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,50	1,23%	-0,16	14,71%	0,17	-26,90%	1,03	-56,73%	8,36	-46,25%	17,59	-44,57%	1,64	-55,36%	8,83	-53,95%	18,06	-53,26%
Referencia	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,49	0,00%	-0,14	0,00%	0,23	0,00%	2,37	0,00%	15,55	0,00%	31,74	0,00%	3,67	0,00%	19,18	0,00%	38,64	0,00%
-10%	Ingresos (M€/año)																		
-30%	Ingresos (M€/año)																		
-50%	Ingresos (M€/año)																		

A5.2.5. *Impuestos a la producción/compra de hidrógeno*

En la Tabla 258 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno*.

Recordar que según las hipótesis de entrada, esta variable tiene un valor igual a cero, por lo que no es posible determinar el efecto que produce la disminución de esta variable respecto a la *Base*.

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2015, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 252. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2015

Beneficio Bruto (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-0,783	-0,666	-0,549	-0,491	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	-0,430	-0,313	-0,196	-0,138	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	-0,358	-0,124	0,109	0,226	0,000	0,000	0,000

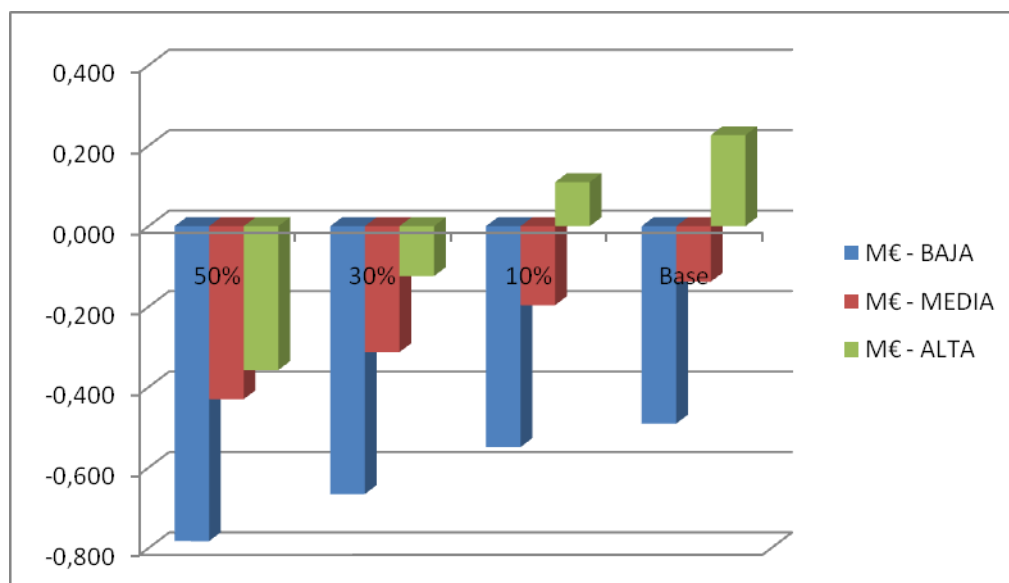


Figura 226. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2015

Tabla 253. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2015

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	59,51%	35,70%	11,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	211,68%	127,01%	42,34%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-258,07%	-154,84%	-51,61%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

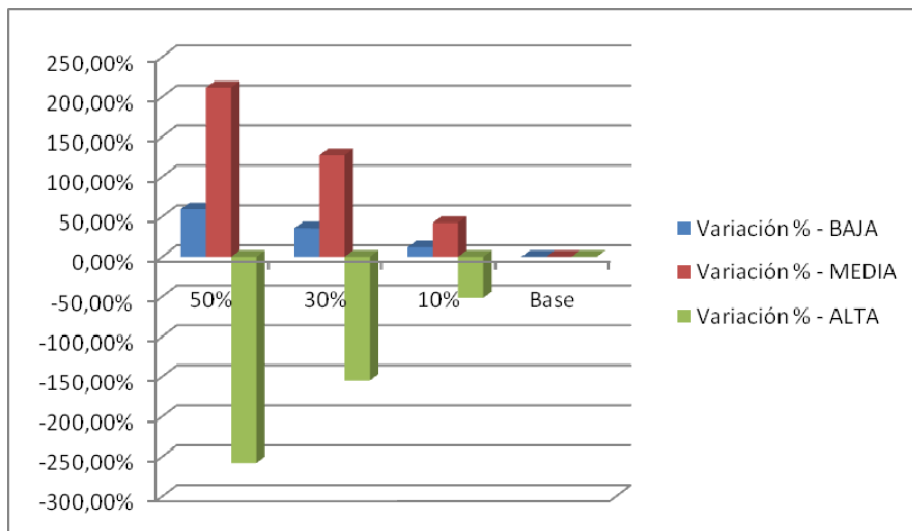


Figura 227. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2015

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2030, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 254. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2030

Beneficio Bruto (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-4,709	-1,877	0,956	2,372	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	-20,872	-6,302	8,269	15,555	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	-39,293	-10,881	17,530	31,736	0,000	0,000	0,000

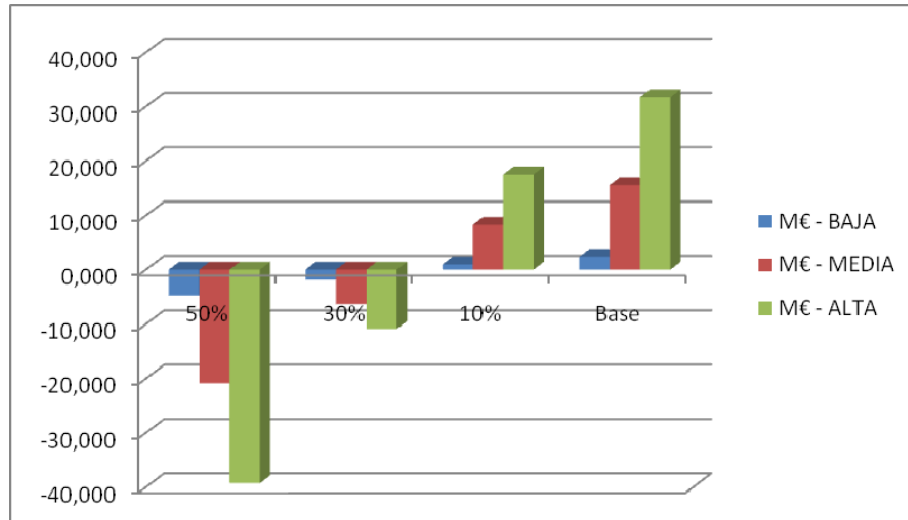


Figura 228. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2030

Tabla 255. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2030

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-298,54%	-179,12%	-59,71%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	-234,19%	-140,51%	-46,84%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-223,81%	-134,29%	-44,76%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

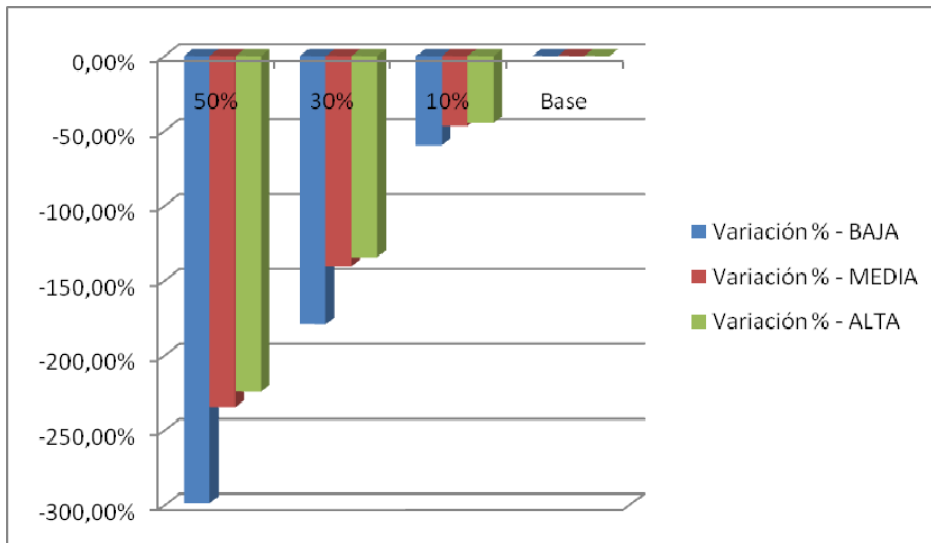


Figura 229. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2030

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2050, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 256. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* y el grado de penetración en el año 2050

Beneficio Bruto (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-6,555	-2,467	1,621	3,665	0,000	0,000	0,000
M€ - MEDIA	-32,721	-11,960	8,801	19,182	0,000	0,000	0,000
M€ - ALTA	-64,289	-23,117	18,055	38,641	0,000	0,000	0,000

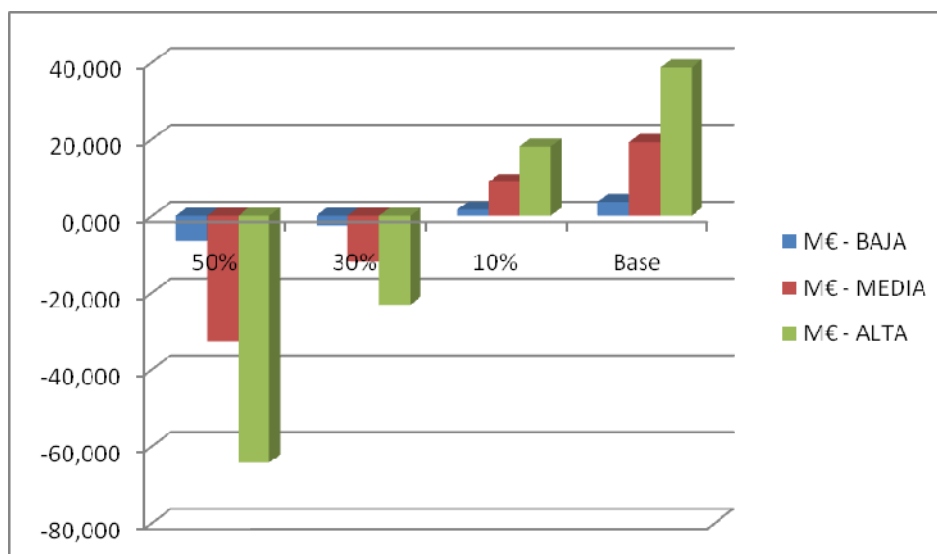


Figura 230. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2050

Tabla 257. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2050

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-278,82%	-167,29%	-55,76%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - MEDIA	-270,58%	-162,35%	-54,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Variación % - ALTA	-266,37%	-159,82%	-53,27%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

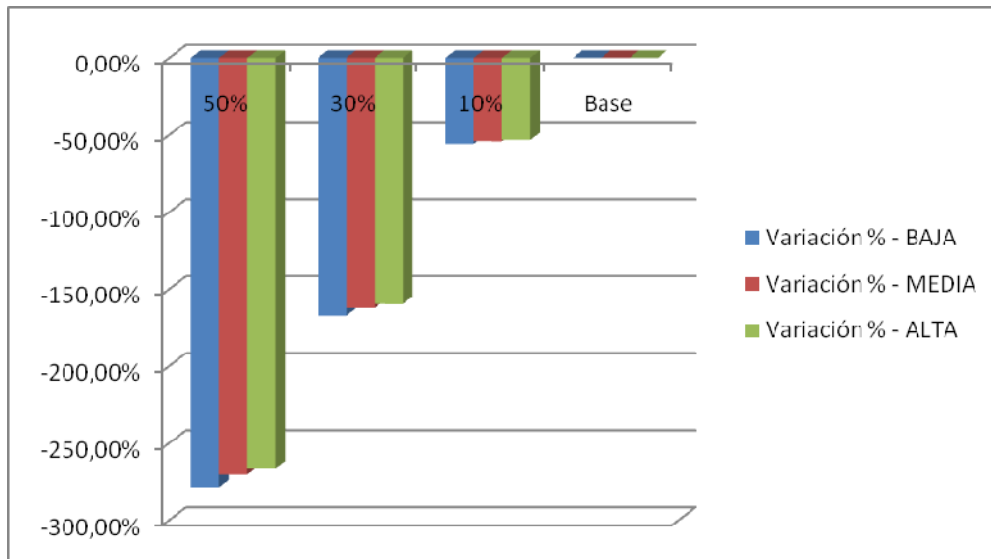


Figura 231. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Impuesto sobre la Producción/Compra del Hidrógeno* en el año 2050

En la Figura 226, Figura 228 y Figura 230 se observa que a mayor impuesto sobre la producción/compra del hidrógeno, peores resultados en cuanto a beneficios se obtienen.

En la Figura 227, Figura 229 y Figura 231 se puede ver como en términos de valor absoluto, los aumentos porcentuales del beneficio van siendo más constantes conforme el grado de penetración de esta nueva tecnología es mayor independientemente del grado de penetración de estas nuevas tecnologías.

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Tabla 258. Análisis de la variable Impuesto a la Producción/Compra de Hidrógeno

Grado de Penetración	BENEFICIO BRUTO: Impuestos Producción Hidrógeno																		
	Año	2015			2030			2050			Alta	% respecto a base							
		Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta	Baja	Media	Alta									
	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base							
50%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,932	45,62%	0,932	45,62%	1,864	45,62%	21,529	49,01%	110,802	48,98%	216,098	48,96%	28,876	54,78%	146,546	54,84%	290,683	54,82%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,78	59,51%	-0,43	211,68%	-0,36	-258,07%	-4,71	-298,54%	-20,87	-234,19%	-39,29	-223,81%	-6,55	-278,82%	-32,72	-270,58%	-64,29	-266,37%
30%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,815	27,37%	0,815	27,37%	1,631	27,37%	18,697	29,41%	96,231	29,39%	187,686	29,38%	24,788	32,87%	125,785	32,90%	249,511	32,89%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,67	35,70%	-0,31	127,01%	-0,12	-154,84%	-1,88	-179,12%	-6,30	-140,51%	-10,88	-134,29%	-2,47	-167,29%	-11,96	-162,35%	-23,12	-159,82%
10%	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,699	9,12%	0,699	9,12%	1,397	9,12%	15,864	9,80%	81,660	9,80%	159,274	9,79%	20,700	10,96%	105,024	10,97%	208,339	10,96%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,55	11,90%	-0,20	42,34%	0,11	-51,61%	0,96	-59,71%	8,27	-46,84%	17,53	-44,76%	1,62	-55,76%	8,80	-54,12%	18,06	-53,27%
Referencia	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,49	0,00%	-0,14	0,00%	0,23	0,00%	2,37	0,00%	15,55	0,00%	31,74	0,00%	3,67	0,00%	19,18	0,00%	38,64	0,00%
-10%	Ingresos (M€/año)																		
	Gastos (M€/año)																		
	Beneficio bruto (M€/año)																		
-30%	Ingresos (M€/año)																		
	Gastos (M€/año)																		
	Beneficio bruto (M€/año)																		
-50%	Ingresos (M€/año)																		
	Gastos (M€/año)																		
	Beneficio bruto (M€/año)																		

A5.2.6. Consumo medio de hidrógeno de los turismos

En la Tabla 265 se recogen los datos resultantes del análisis realizado sobre la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos*.

Esta variable experimenta el mismo comportamiento que la variable *Distancia media recorrida por turismos*. Por lo tanto el análisis de esta última no se desarrolla en la presente tesis, ya que dan resultados paralelos.

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2015, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 259. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* y el grado de penetración en el año 2015

Beneficio Bruto (M€)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	-0,431	-0,455	-0,479	-0,491	-0,503	-0,526	-0,550
M€ - MEDIA	0,060	-0,019	-0,098	-0,138	-0,178	-0,257	-0,336
M€ - ALTA	0,820	0,583	0,345	0,226	0,107	-0,130	-0,368

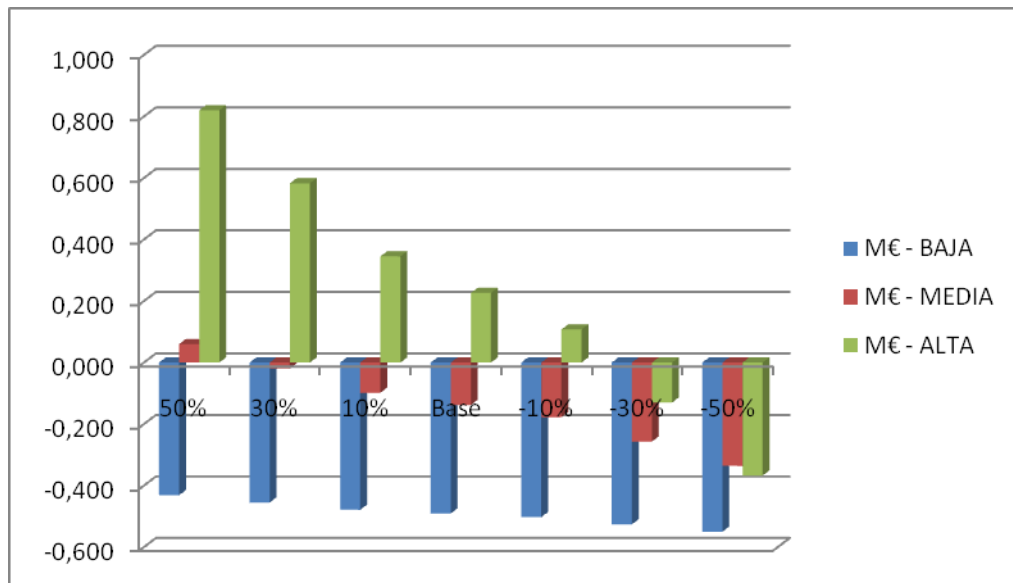


Figura 232. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2015

Tabla 260. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2015

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2015						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	-12,11%	-7,26%	-2,42%	0,00%	28,71%	7,26%	12,11%
Variación % - MEDIA	-143,54%	-86,12%	-28,71%	0,00%	28,71%	86,12%	143,54%
Variación % - ALTA	262,49%	157,50%	52,50%	0,00%	-52,50%	-157,50%	-262,49%

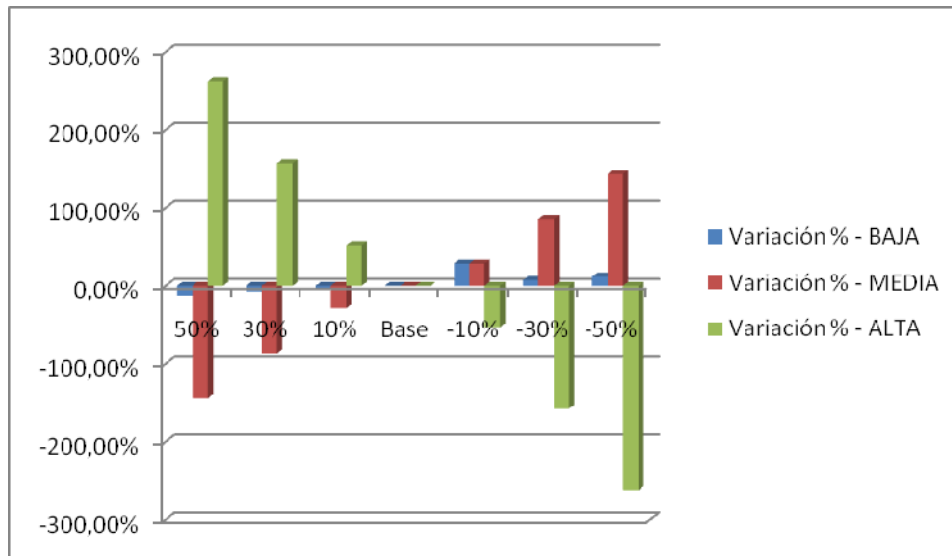


Figura 233. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2015

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2030, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 261. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* y el grado de penetración en el año 2030

Beneficio Bruto (M€)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	10,310	7,135	3,960	2,372	0,784	-2,391	-5,567
M€ - MEDIA	57,998	41,021	24,043	15,555	7,066	-9,912	-26,889
M€ - ALTA	115,182	81,804	48,425	31,736	15,047	-18,331	-51,709

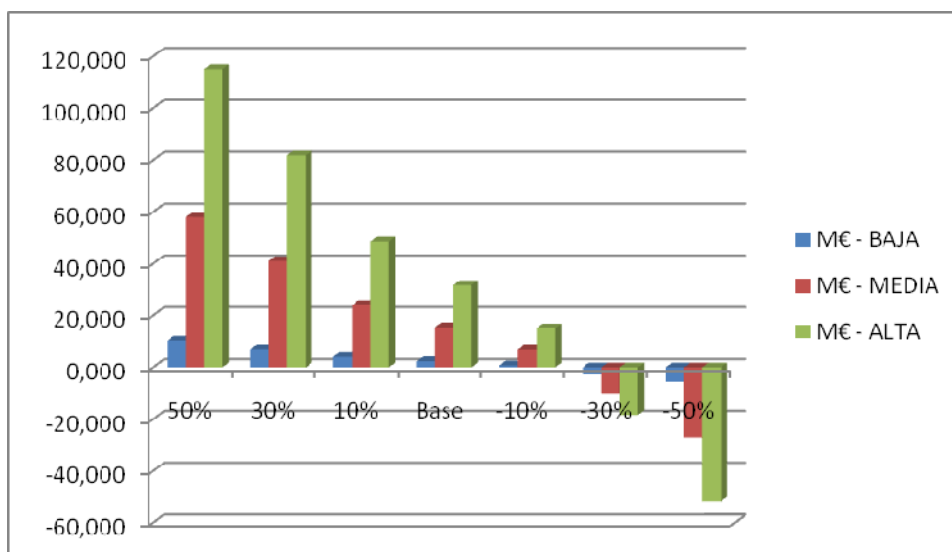


Figura 234. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2030

Tabla 262. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2030

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2030						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	334,69%	200,81%	66,94%	0,00%	-66,94%	-200,81%	-334,69%
Variación % - MEDIA	272,87%	163,72%	54,57%	0,00%	-54,57%	-163,72%	-272,87%
Variación % - ALTA	262,93%	157,76%	52,59%	0,00%	-52,59%	-157,76%	-262,93%

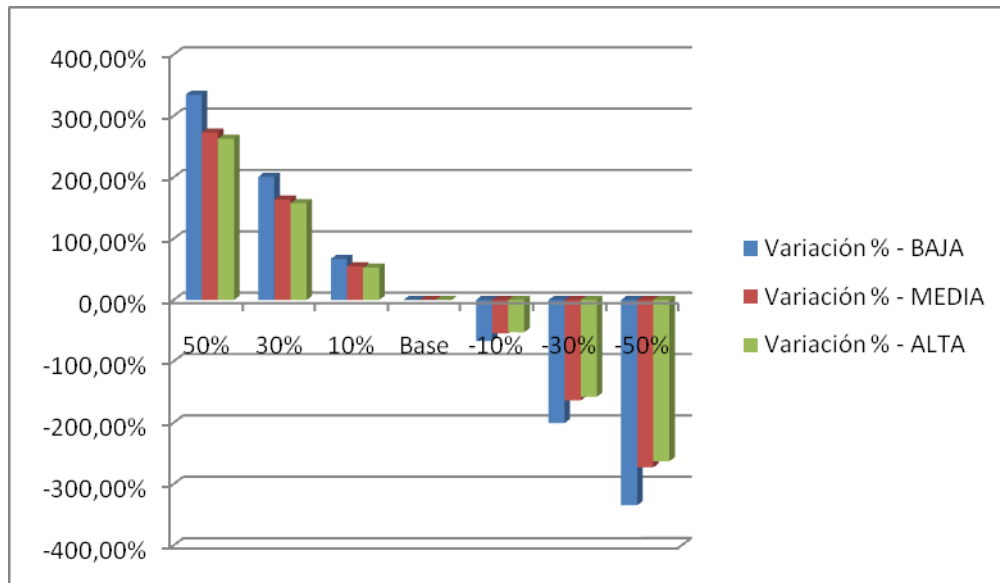


Figura 235. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2030

La evolución en el beneficio bruto resultado de la actividad compra/producción – venta del hidrógeno en el año 2050, en los tres escenarios de penetración considerados (baja, media y alta), viene representado en las dos figuras siguientes, junto a sus tablas correspondientes, en las que se muestra el beneficio bruto resultante de la actividad económica de las hidrogeneras en millones de euros primero y la variación en porcentaje respecto al valor de referencia *Base* después.

Tabla 263. Beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* y el grado de penetración en el año 2050

Beneficio Bruto (M€)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
M€ - BAJA	14,200	9,986	5,772	3,665	1,559	-2,655	-6,869
M€ - MEDIA	72,903	51,415	29,926	19,182	8,438	-13,051	-34,540
M€ - ALTA	145,491	102,751	60,011	38,641	17,271	-25,469	-68,209

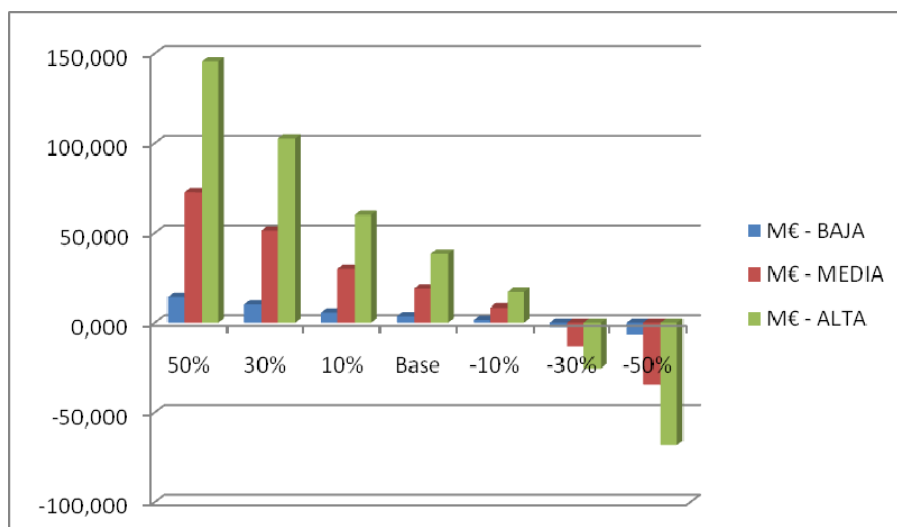


Figura 236. Evolución del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2050

Tabla 264. Datos porcentuales de variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2050

Beneficio Bruto (Variación respecto a base)	2050						
	50%	30%	10%	Base	-10%	-30%	-50%
Variación % - BAJA	287,41%	172,44%	57,48%	0,00%	-57,48%	-172,44%	-287,41%
Variación % - MEDIA	280,06%	168,04%	56,01%	0,00%	-56,01%	-168,04%	-280,06%
Variación % - ALTA	276,52%	165,91%	55,30%	0,00%	-55,30%	-165,91%	-276,52%

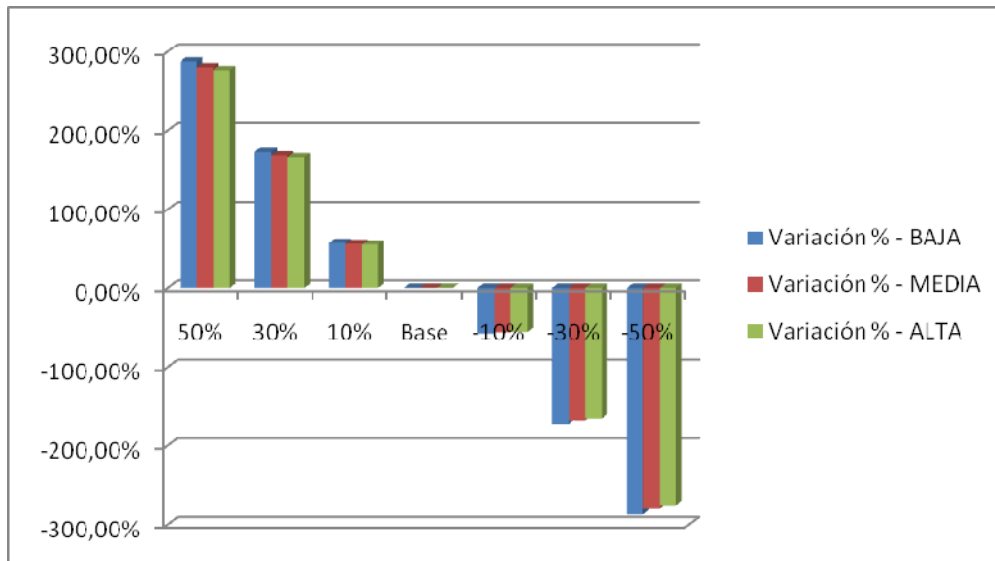


Figura 237. Variación respecto al valor de referencia del beneficio bruto a obtener en función de la variable *Consumo Medio de Hidrógeno de los Turismos* en el año 2050

En la Figura 232, Figura 234 y Figura 236 se observa que a mayor consumo de hidrógeno por parte de los turismos, mejores resultados en cuanto a beneficios se obtienen.

En la Figura 233, Figura 235 y Figura 237 se puede ver como se obtienen mayores aumentos porcentuales del beneficio conforme el grado de penetración de esta nueva tecnología es mayor y que estas variaciones se mantienen más o menos constantes independientemente del grado de penetración de las tecnologías del hidrógeno en el sector transporte.

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de infraestructuras eficientes para automóviles eléctricos

Tabla 265. Análisis de la variable Consumo Medio de los Turismos

Grado de Penetración	Año	2015						2050											
		Baja		Media		Alta		Baja		Media		Alta							
		Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base	Valor	% respecto a base						
50%	Ingresos (M€/año)	0,209	39,75%	0,700	39,43%	2,101	39,43%	24,758	47,20%	132,373	47,20%	260,251	47,20%	32,856	47,20%	167,547	47,20%	333,244	47,20%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,43	-12,11%	0,06	-143,54%	0,82	262,49%	10,31	334,69%	58,00	272,87%	115,18	262,93%	14,20	287,41%	72,90	280,06%	145,49	276,52%
30%	Ingresos (M€/año)	0,185	23,85%	0,621	23,66%	1,863	23,66%	21,583	28,32%	115,395	28,32%	226,872	28,32%	28,642	28,32%	146,058	28,32%	290,504	28,32%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,46	-7,26%	-0,02	-86,12%	0,58	157,50%	7,13	200,81%	41,02	163,72%	81,80	157,76%	9,99	172,44%	51,41	168,04%	102,75	165,91%
10%	Ingresos (M€/año)	0,161	7,95%	0,542	7,89%	1,625	7,89%	18,408	9,44%	98,418	9,44%	193,494	9,44%	24,428	9,44%	124,569	9,44%	247,764	9,44%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,48	-2,42%	-0,10	-28,71%	0,35	52,50%	3,96	66,94%	24,04	54,57%	48,43	52,59%	5,77	57,48%	29,93	56,01%	60,01	55,30%
Referencia	Ingresos (M€/año)	0,149	0,00%	0,502	0,00%	1,507	0,00%	16,820	0,00%	89,929	0,00%	176,805	0,00%	22,321	0,00%	113,825	0,00%	226,394	0,00%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,49	0,00%	-0,14	0,00%	0,23	0,00%	2,37	0,00%	15,55	0,00%	31,74	0,00%	3,67	0,00%	19,18	0,00%	38,64	0,00%
-10%	Ingresos (M€/año)	0,138	-7,95%	0,463	-7,89%	1,388	-7,89%	15,232	-9,44%	81,441	-9,44%	160,116	-9,44%	20,214	-9,44%	103,081	-9,44%	205,024	-9,44%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,50	2,42%	-0,18	28,71%	0,11	-52,50%	0,78	-66,94%	7,07	-54,57%	15,05	-52,59%	1,56	-57,48%	8,44	-56,01%	17,27	-55,30%
-30%	Ingresos (M€/año)	0,114	-23,85%	0,383	-23,66%	1,150	-23,66%	12,057	-28,32%	64,463	-28,32%	126,737	-28,32%	16,000	-28,32%	81,592	-28,32%	162,284	-28,32%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,53	7,26%	-0,26	86,12%	-0,13	-157,50%	-2,39	-200,81%	-9,91	-163,72%	-18,33	-157,76%	-2,66	-172,44%	-13,05	-168,04%	-25,47	-165,91%
-50%	Ingresos (M€/año)	0,090	-39,75%	0,304	-39,43%	0,913	-39,43%	8,881	-47,20%	47,486	-47,20%	93,359	-47,20%	11,786	-47,20%	60,104	-47,20%	119,544	-47,20%
	Gastos (M€/año)	0,640	0,00%	0,640	0,00%	1,280	0,00%	14,448	0,00%	74,375	0,00%	145,069	0,00%	18,656	0,00%	94,643	0,00%	187,753	0,00%
	Beneficio bruto (M€/año)	-0,55	12,11%	-0,34	143,54%	-0,37	-262,49%	-5,57	-334,69%	-26,89	-272,87%	-51,71	-262,93%	-6,87	-287,41%	-34,54	-280,06%	-68,21	-276,52%

ANEXO 6. Validación del Modelo de Cálculo

A6.1. *Escenario 2050. Parque Móvil Público Zaragoza con Hidrógeno*

Para desarrollar el caso de validación: “*Escenario 2050. Parque móvil público Zaragoza con hidrógeno*”, se utiliza la aplicación web desarrollada y descrita en el apartado 5.3.3. *Descripción del software*, para determinar el número de hidrogeneras necesarias para abastecer la flota total estimada de vehículos. Con este dato, y el de vehículos totales, a continuación se utiliza la *Herramienta de Valoración* descrita en el ANEXO 4, para determinar los costes y la amortización de las inversiones realizadas.

Se va a realizar una estimación de las flotas de vehículos urbanos equipados con tecnología de pila de combustible. Dentro de esta categoría se estudiarán las flotas de autobuses urbanos, taxis y tranvías. También se realiza un estudio paralelo del incremento de la flota en vehículos FCEV a nivel de usuario particular.

A6.1.1. *Estimación de flotas*

La estimación de flota de autobuses, taxis, tranvías y vehículos particulares, se ha realizado en función de unos ratios calculados respecto a la población.

Con ayuda de las bases de datos de censos poblacionales como de la jefatura de tráfico, se han elaborado unos modelos basados en la tendencia de los últimos años. Con los ratios obtenidos se ha extrapolado al año que ha interesado.

A6.1.1.1. *Análisis de crecimiento poblacional*

El objetivo final del estudio de validación es el año 2050, pero para aplicar la *Herramienta de Valoración*, será necesario también realizar estimaciones para los años 2015 y 2030. Para este tipo de previsiones entran en juego una gran cantidad de variables. No sería tan sencillo como leer una línea de tendencia del crecimiento actual y extrapolar para años venideros.

Factores como el movimiento migratorio, las tasas de natalidad y mortalidad, la esperanza de vida, el poder adquisitivo, son determinantes en este cálculo. Por ello se ha utilizado una herramienta que facilita el Instituto Nacional de Estadística (INE) [122], que pretende ser mucho más precisa y meticulosa.

Con estos datos poblacionales a nivel nacional se ha extrapolado para prever la población de Zaragoza en esos tres mismos escenarios. Para ello se ha supuesto que el crecimiento de esta ciudad se iba a mantener constante respecto al resto.

Tabla 266. Crecimiento poblacional en diferentes escenarios

Fuente: INE [122]

	Censo a 1 enero 2010 (hab.)	Previsiones censo año 2015 (hab.)	Previsiones censo año 2030 (hab.)	Previsiones censo año 2050 (hab.)
Provincia de Zaragoza	973.252	985.485	1.006.482	1.015.104
Zaragoza Capital	675.121	683.607	698.171	704.153
España	45.989.016	46.567.058	47.559.208	47.966.653

A6.1.1.2. Grados de penetración

Siguiendo la línea asumida por la tesis, se van a plantear tres grados de penetración para vehículos FCEV. Los grados de penetración planteados son 5%, 25% y 50%, *McKinsey* [103]. El desarrollo de esta tecnología depende notablemente de variables externas, como la situación económica del país o incluso la aparición o mejora de otras tecnologías que relegasen ésta a un plano secundario.

A6.1.1.3. Escenarios

El estudio se focaliza en una fotografía del parque móvil público para el año 2050. Para poder evaluar este escenario en la *Herramienta de Valoración*, será necesario calcular previamente las situaciones en 2015 y 2030. Con estos tres escenarios fijados, la herramienta puede ofrecer una estimación más ajustada y detallada, determinando para cada periodo unas condiciones especiales (precios de venta H₂, coste del terreno, ayudas, impuestos, etc.).

A6.1.1.4. Ratios por habitante

Para calcular el número de las flotas de transporte urbano se ha hecho uso de la aplicación de unos ratios por habitante. Se ha realizado un seguimiento de la tendencia de las flotas en los últimos años de los que se tienen datos, y se ha comparado con el aumento de la población. El resultado obtenido ha sido el esperado, una tendencia lineal, que relaciona directamente el aumento de la población con el de transporte urbano. El único caso del que no se tenían referencias es de la nueva obra del tranvía de Zaragoza, por lo que se han respetado los datos actuales, y se ha estimado una flota para 2050.

En el caso de la flota de taxis, la ordenanza municipal decreta que el número máximo de taxis por cada mil habitantes no debe superar los 2,5 [123], es decir, suponen 0,0025 taxis por habitante. La tendencia de los últimos años ha rondado esa cifra, aunque alguna vez ha sido superada ligeramente.

Para autobuses urbanos, según la empresa que dispone actualmente de la licencia de explotación del servicio, TUZSA, la flota actual es de 357 vehículos, con la que se ha obtenido un ratio de 0,000528 autobuses por habitante.

En el caso de vehículos particulares, según datos de la DGT, se observa un aumento del ratio vehículo por habitante, por lo que se ha realizado una aproximación lineal para determinar el número de turismos por habitante en 2050.

Una vez se han obtenido los datos de poblaciones estimadas y los escenarios han quedado completamente fijados, se aplica al escenario 2050 los grados de penetración antes mencionados (50, 25 y 5%). Con ello obtendremos la siguiente tabla de resultados:

Tabla 267. Flota de vehículos en Zaragoza escenario 2050

Fuente: *TUZSA, Cámara de Zaragoza, DGT*

		Turismos particulares	Autobuses	Tranvías	Taxis
Flota (2050)		613.364	372	60	1.791
FCEV	Penetración alta	306.682	186	30	895
	Penetración media	153		15	448
	Penetración baja			3	90

A6.1.2. Cálculo del número de hidrogeneras

Para determinar el número de hidrogeneras se utilizará la aplicación web desarrollada en la presente tesis y descrita en 5.3.3. *Descripción del software*. Como entradas a la aplicación se utilizarán los datos obtenidos en el apartado anterior.

La aplicación web consta de varios menús, en los que hay que fijar una serie de parámetros en función de las necesidades particulares de cada caso. En la Figura 238 se reflejan los que serán en este caso los parámetros de partida.

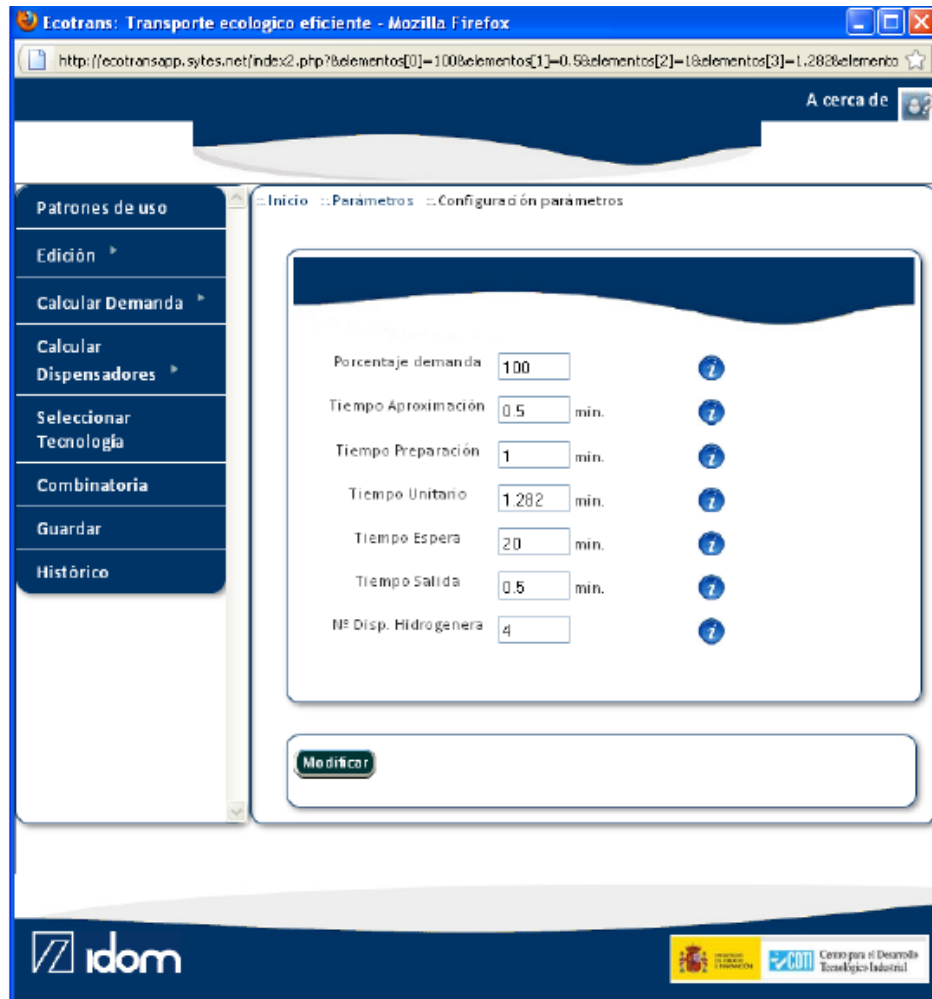
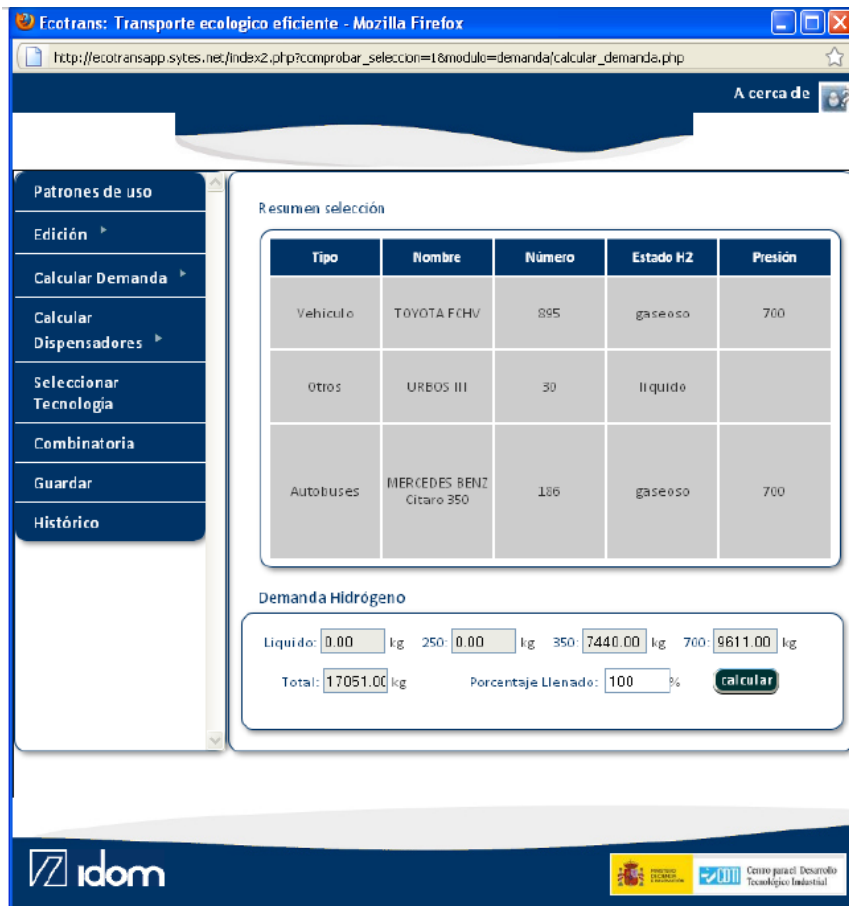


Figura 238. Parámetros de partida

A continuación deberá indicarse el número de vehículos que componen cada flota y su consumo asociado; obteniéndose el perfil de demanda de hidrógeno. También es posible especificar el tipo de combustible que utiliza cada vehículo y la presión de recarga del mismo. Ver Figura 239.



Ecotrans: Transporte ecológico eficiente - Mozilla Firefox

http://ecotransapp.sytes.net/index2.php?comprobar_seleccion=1&modulo=demanda/calculador_demanda.php

A cerca de

Patrones de uso

Edición

Calcular Demanda

Calcular Dispensadores

Seleccionar Tecnología

Combinatoria

Guardar

Histórico

Resumen selección

Tipo	Nombre	Número	Estado H ₂	Presión
Vehículo	TOYOTA FCHV	895	gaseoso	700
Otros	URBOS III	30	liquido	
Autobuses	MERCEDES BENZ Citaro 350	186	gaseoso	700

Demanda Hidrógeno

Líquido: 0.00 kg 250: 0.00 kg 350: 7440.00 kg 700: 9611.00 kg

Total: 17051.00 kg Porcentaje Llenado: 100 %

idom

Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial

Figura 239. Cálculo de la demanda de hidrógeno

Una vez se dispone del consumo de hidrógeno, se accede a la pantalla *Calcular dispensadores*. En ésta, como su nombre indica, se realiza una casación de la cantidad demandada de H₂ con la capacidad de suministro de una estación estándar. A partir de este parámetro, se determina el número total de hidrogeneras a instalar, con el número de dispensadores que deberán disponer para cubrir la demanda.

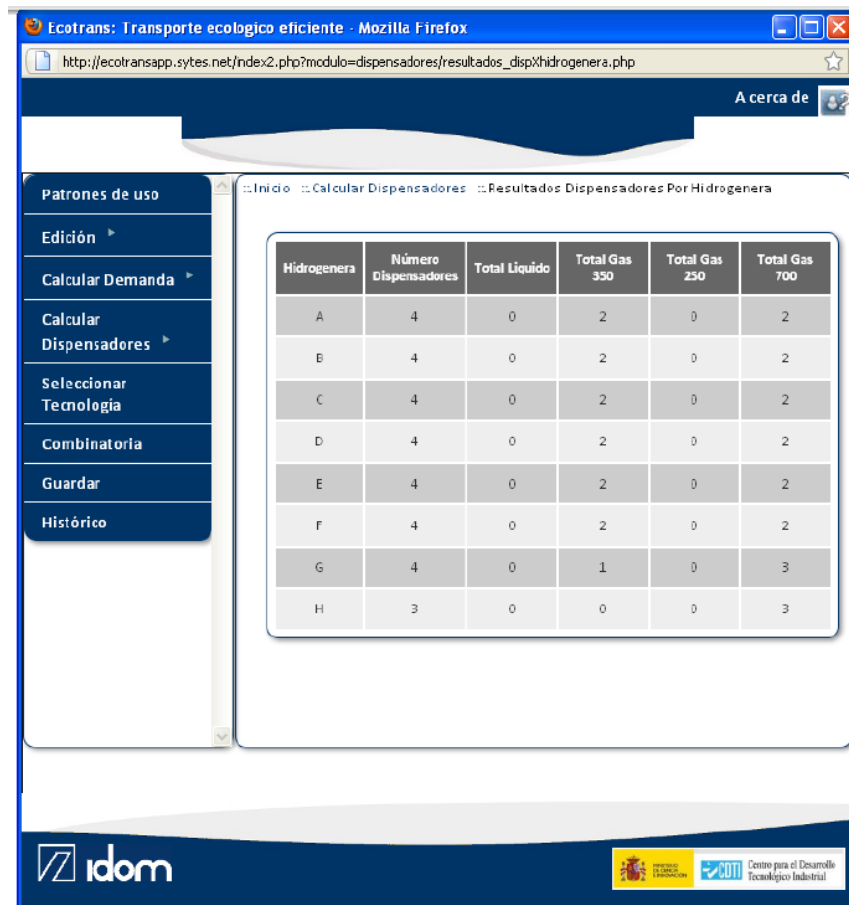


Figura 240. Cálculo de hidrogenas

Como se observa en la Figura 240, el número de hidrogenas totales son las que aparecen en la pantalla. Para cada estación de repostaje, se calcula el número de dispensadores, la presión de suministro de cada uno y el estado del H₂ a suministrar.

Esta operación se ha realizado para cada uno de los tres escenarios temporales, con sus respectivos grados de penetración. También se han calculado por separado un caso en el que se consideran únicamente las flotas de transporte público, y un segundo caso en el que se incorporan a la flota total de vehículos de hidrógeno los vehículos de uso particular. Este segundo caso sólo se estudiará para realizar una comparativa de rentabilidad.

Los resultados obtenidos se han resumido en la Tabla 268 y Tabla 269:

Tabla 268. Número de hidrogeneras, transporte público escenario año 2050

		Previsiones 2050	
		Demanda H ₂ [kg H ₂]	Nº Hidrogeneras (medianas)
Transporte público	Penetración alta	17.051	8 (31 dispensadores)
	Penetración media	8.530,4	4 (16 dispensadores)
	Penetración baja	1.726	1 (4 dispensadores)

Tabla 269. Número de hidrogeneras, transporte público y privado escenario año 2050

		Previsiones 2050	
		Demanda H ₂ [kg H ₂]	Nº Hidrogeneras (grandes)
Transporte público+ privado	Penetración alta	1.511.267,25	281 (2808 dispensadores)
	Penetración media	755636,1	141 (1405 dispensadores)
	Penetración baja	151136,2	29 (282 dispensadores)

A6.1.3. Estimación de costes

Los datos obtenidos hasta el momento con la aplicación web, se introducen en la *Herramienta de Valoración*.

Se comienza introduciendo el número de vehículos, para cada año de referencia y cada grado de penetración estudiados. En el caso de la flota de tranvías, se ha hecho una aproximación mediante consumos para poder adecuarla como si se tratase de autobuses urbanos. Los consumos de ambos medios son bastante similares, rondando los 0,2 kg/km. Con la capacidad de los depósitos se ha obtenido la relación de tres autobuses adicionales por cada cuatro tranvías calculados. Este número ha sido directamente sumado en la casilla de la flota de autobuses urbanos de la Herramienta de Valoración. En el apartado de turismos, como ya se ha comentado con anterioridad, se han analizado dos casos; en el primero sólo se tiene en cuenta la flota de transporte urbano público, mientras que en el

segundo se ha añadido la flota de turismos particulares, permitiéndose de este modo llevara cabo el cálculo de la influencia de la introducción de los mismos en el estudio.

Como escenarios a evaluar, se van a simular los grados de penetración baja y media para el año 2050. El grado de penetración alta se considera demasiado optimista, teniendo en cuenta el estado actual de la tecnología e infraestructura en España.

La *Herramienta* requiere previamente la introducción de unos parámetros necesarios para realizar los cálculos. Estas celdas a rellenar se encuentran en las hojas “Subvención”, “Vehículos” e “Infraestructuras”. Todos estos parámetros están prefijados en unos valores coherentes que se consideraron oportunos a la hora de desarrollar la *Herramienta*, pero son modificables por el usuario.

Tabla 270. Parámetros de inversión

Inversión (M€)	35,6616
Inversión considerada en la cuenta de resultados	100,00%
Fondos propios	20,00%
Fondos ajenos	80,00%
% máximo	
Años máximo	20
Plazo de la amortización	10
Plazo de la financiación ajena (años)	20
Tipo de interés	5,00%
Vida útil instalación (años)	20
Costes de mantenimiento y gestión (% facturación anual)	4%
Otros gastos	0%
IPC	2,875%
Impuesto de sociedades	0
Deducción impuesto sociedades	0

A6.1.3.1. Simulación 1 – Transporte público

La primera de las dos simulaciones realizadas tiene el objetivo de estudiar la rentabilidad del proyecto de implantación y explotación de una infraestructura de suministro de hidrógeno

para el transporte público en la ciudad de Zaragoza. Como transporte público se consideran las flotas de autobuses, tranvías y taxis de Zaragoza capital.

A continuación se adjunta una tabla resumen del análisis económico para el año 2050 y cada grado de penetración.

Tabla 271. Análisis económico escenario año 2050 sólo con transporte público

ANÁLISIS ECONÓMICO			
	Año	2050	
		Grado Penetración	
		Baja	Media
VEHÍCULOS			
Número vehículos año de referencia			
Turismos		0,05	0,2
Autobuses		0,0875	0,2375
Número vehículos acumulados hasta año de referencia			
Turismos		90	448
Autobuses		21	104
Coste vehículos año de referencia (M€)		0,0194975	0,0547025
Coste vehículos acumulados hasta año de referencia (M€)		6,89175	33,98935
Demanda H2 Flota año de referencia (kg/año)		412,95	1145,55
Demanda total acumulada hasta año de referencia (kg/año)		130185	641157
INFRAESTRUCTURA			
Número hidrogenas año de referencia		0,0	0,0
Pequeñas		0,0	0,0
Medianas		0,0	0,0
Grandes		0	0
Número hidrogenas acumulado hasta año de referencia		2	4
Pequeñas		1	1
Medianas		1	3
Grandes		0	0
Subvención construcción infraestructuras (M€)		0	0
Subvención acumulada construcción infraestructuras (M€)		0	0
Coste hidrogenas año de referencia (precio - subvención)(M€)		0	0
Coste hidrogenas hasta año de referencia (precio - subvención) (M€)		0,8505	2,0005
ACTIVIDAD COMPRA-VENTA HIDRÓGENO			
Grado de uso de las hidrogenas (%)		25,48%	51,66%
Capacidad de suministro hidrogenas año de referencia (kg/año)		0	0
Capacidad de suministro hidrogenas acumuladas hasta año de referencia (kg/año)		511000	1241000
Coste de personal hidrogenas año de referencia(M€/año)		0,000	0,000
Coste de personal hidrogenas hasta año de referencia(M€/año)		0,210	0,462
Coste producción + distribución hidrógeno año de referencia (M€/año)		0,000	0,000
Coste producción + distribución hidrógeno hasta año de referencia (M€/año)		1,635	3,971
Coste mantenimiento y operación hidrogenas año de referencia (M€/año)		0,000	0,000
Coste mantenimiento y operación hidrogenas hasta año de referencia (M€/año)		0,034	0,080
Ingresos generados hidrogenas año de referencia (M€/año)		0,000	0,000
Ingresos generados hidrogenas hasta año de referencia (M€/año)		0,573	2,821
Gastos incurridos hidrogenas año de referencia (M€/año)		0,000	0,000
Gastos incurridos hidrogenas hasta año de referencia (M€/año)		1,879	4,513

Resumen de la cuenta de resultados

Como se ha indicado anteriormente, se han simulado únicamente los grados de penetración bajo y medio para el escenario 2050. La Tabla 272 y la Tabla 273 muestran los resultados obtenidos en cada una de las dos simulaciones para transporte público urbano.

Tabla 272. Cuenta de resultados. Transporte urbano público con grado de penetración bajo

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS ACUMULADA HIDROGENERAS GRADO DE PENETRACIÓN BAJO		
	Hasta Año	2050
Ingresos venta hidrógeno (M€/año)		0,573
Gastos producción + distribución de hidrógeno (M€/año)		1,635
Gastos de mantenimiento instalación (M€/año)		0,034
Gastos de personal (M€/año)		0,210
Gasto total (M€/año)		1,879
Beneficio bruto (M€/año)		-1,306
Factor multiplicador gastos-ingresos		0,3048148

Tabla 273. Cuenta de resultados. Transporte urbano público con grado de penetración medio

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS ACUMULADA HIDROGENERAS GRADO DE PENETRACIÓN MEDIO		
	Hasta Año	2050
Ingresos venta hidrógeno (M€/año)		2,821
Gastos producción + distribución de hidrógeno (M€/año)		3,971
Gastos de mantenimiento instalación (M€/año)		0,080
Gastos de personal (M€/año)		0,462
Gasto total (M€/año)		4,513
Beneficio bruto (M€/año)		-1,692
Factor multiplicador gastos-ingresos		0,6250727

El parámetro “factor multiplicador” muestra la relación anual entre gastos e ingresos. Como era de esperar, en el caso *Sólo transporte público urbano*, la rentabilidad es inexistente. La inversión es muy elevada, y solamente con los ingresos generados por la venta de hidrógeno a la flota privada de transporte no es posible cubrir los gastos generados.

A6.1.3.2. Simulación 2 – Transporte público más privado

Además del parque móvil público, se ha estimado conveniente realizar un estudio de cómo afectaría la incorporación del parque móvil privado a la rentabilidad del proyecto.

Para este segundo caso, se han considerado como gastos únicamente los costes del parque móvil público y de las hidrogeneras, eximiendo el total del parque móvil privado que se presume será asumido por los propios propietarios de los vehículos. Sin embargo, en la parte de ingresos sí que se han considerado los retribuidos por el parque privado.

Sobre este planteamiento se ciernen varias incógnitas, siendo la más importante de ellas que no se sabe con exactitud en qué grado las actuales gasolineras podrán suministrar hidrógeno o si se creará una red de carácter privado paralela a éstas. Dependiendo de este factor, evidentemente la rentabilidad del proyecto se vería afectada.

Tabla 274. Tabla resumen de la Herramienta de Valoración horizonte 2050

2050		
Grado de penetración	Media	
Número vehículos propios		Valor máximo
Turismos	448	
Autobuses	93	
Precio vehículos propios (M€)	31,6606	
Demanda H2 Flota Propia (kg/año)	590532	
Demanda total acumulada 2050 (kg/año)	641157	
Número de hidrogeneras propias		Valor máximo
Pequeñas	1	1
Medianas	3	3
Grandes	0	0
Precio hidrogeneras propias (M€)	4,001	
Grado de uso de las hidrogeneras (%)	51,66%	
Capacidad de suministro hidrogeneras propias (kg/año)	1241000	
Pequeñas	146000	
Medianas	365000	
Grandes	912500	
Coste de personal (M€/año)	0,462	
Coste producción + distribución hidrógeno (M€/año)	3,971	
Ingresos hidrógeno (M€/año)	2,821	

Para introducir las flotas de vehículos se han tomado como turismos la suma de taxis y particulares. En el caso de los autobuses y tranvías, el número no ha cambiado desde el anterior caso.

Tabla 275. Análisis económico escenario año 2050 transporte público y privado

ANÁLISIS ECONÓMICO		
Año	2050	
	Baja	Media
VEHÍCULOS		
Número vehículos año de referencia		
Turismos	260,2	1303,05
Autobuses	0,05	0,05
Número vehículos acumulados hasta año de referencia		
Turismos	90	153789
Autobuses	19	93
Coste vehículos año de referencia (M€)	7,218	36,105
Coste vehículos acumulados hasta año de referencia (M€)	6,426	4279,206
Demanda H2 Flota año de referencia (kg/año)	100141,8	500596,2
Demanda total acumulada hasta año de referencia (kg/año)	120060	59473476
INFRAESTRUCTURA		
Número hidrogenas año de referencia	0,15	0,6
Pequeñas	0	0
Medianas	0	0
Grandes	0,15	0,6
Número hidrogenas acumulado hasta año de referencia	16	73
Pequeñas	1	1
Medianas	0	0
Grandes	15	72
Subvención construcción infraestructuras (M€)	0	0
Subvención acumulada construcción infraestructuras (M€)	0	0
Coste hidrogenas año de referencia (precio - subvención)(M€)	0,395	1,581
Coste hidrogenas hasta año de referencia (precio - subvención) (M€)	23,991	110,946
ACTIVIDAD COMPRA-VENTA HIDRÓGENO		
Grado de uso de las hidrogenas (%)	86,00%	90,32%
Capacidad de suministro hidrogenas año de referencia (kg/año)	136875	547500
Capacidad de suministro hidrogenas acumuladas hasta año de referencia (kg/año)	13833500	65846000
Coste de personal hidrogenas año de referencia(M€/año)	0,038	0,151
Coste de personal hidrogenas hasta año de referencia(M€/año)	3,864	18,228
Coste producción + distribución hidrógeno año de referencia (M€/año)	0,438	1,752
Coste producción + distribución hidrógeno hasta año de referencia (M€/año)	44,267	210,707
Coste mantenimiento y operación hidrogenas año de referencia (M€/año)	0,016	0,063
Coste mantenimiento y operación hidrogenas hasta año de referencia (M€/año)	0,960	4,438
Ingresos generados hidrogenas año de referencia (M€/año)	0,518	2,176
Ingresos generados hidrogenas hasta año de referencia (M€/año)	52,345	261,683
Gastos incurridos hidrogenas año de referencia (M€/año)	0,492	1,966
Gastos incurridos hidrogenas hasta año de referencia (M€/año)	49,091	233,373

Resumen de la cuenta de resultados

Las ventajas para la inversión en este escenario residen en que esta flota adicional no supone ningún gasto para el inversor, y sin embargo representa un flujo adicional de beneficios en las estaciones de repostaje en propiedad.

Tabla 276. Cuenta de resultados. Transporte privado con grado de penetración bajo

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS ACUMULADA HIDROGENERAS GRADO DE PENETRACIÓN BAJO		
	Hasta Año	2050
Ingresos venta hidrógeno (M€/año)		52,345
Gastos producción + distribución de hidrógeno (M€/año)		44,267
Gastos de mantenimiento instalación (M€/año)		0,960
Gastos de personal (M€/año)		3,864
Gasto total (M€/año)		49,091
Beneficio bruto (M€/año)		3,254
Factor multiplicador gastos-ingresos		1,0662873

Tabla 277. Cuenta de resultados. Transporte privado con grado de penetración medio

RESUMEN CUENTA DE RESULTADOS ACUMULADA HIDROGENERAS GRADO DE PENETRACIÓN MEDIO		
	Hasta Año	2050
Ingresos venta hidrógeno (M€/año)		261,683
Gastos producción + distribución de hidrógeno (M€/año)		210,707
Gastos de mantenimiento instalación (M€/año)		4,438
Gastos de personal (M€/año)		18,228
Gasto total (M€/año)		233,373
Beneficio bruto (M€/año)		28,310
Factor multiplicador gastos-ingresos		1,1213091

En este segundo caso estudiado se puede comprobar que la relación gastos – ingresos sale positiva para ambos grados de penetración. Siempre mayor en el grado de penetración medio, tal y como ocurre en el caso anterior en el que se contempla únicamente la flota de transporte público. La rentabilidad de la operación dependerá directamente de las ayudas y subvenciones que ofrezca el estado y el interés que se haya pactado en el préstamo, si es que lo hay.

A6.1.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos para cada una de las dos simulaciones son muy dispares, por ello hay que diferenciar y analizar con detalle cada uno por separado.

Como conclusión del caso de validación, se presentan las cantidades de inversión y beneficio, en el año 2050, para cada uno de los dos casos estudiados:

CASO 1: Transporte urbano público

- Para el grado de penetración baja se estiman unos ingresos de 0,573 M€, provenientes de la explotación y venta de hidrógeno en las estaciones instaladas. Los costes de la adquisición e instalación de la flota de transporte público y estaciones de repostaje ascienden a 1,789 M€. No se obtienen valores de TIR positivos para ninguna variación de los parámetros de inversión.
- Para el grado de penetración media, los ingresos serían 2,821 M€ y los costes 4,513 M€. No se obtienen valores de TIR positivos para ninguna variación de los parámetros de inversión.

CASO 2: Transporte público más transporte privado

- Para el grado de penetración baja se estiman unos ingresos de 52,348 M€, que provienen de la explotación y venta de hidrógeno en las estaciones instaladas. Los costes de la adquisición e instalación de la flota de transporte público y estaciones de repostaje ascienden a 49,091 M€. Se obtiene un TIR positivo a partir del 4 % de inversión propia.
- Para el grado de penetración media, los ingresos serían 261,683 M€ y los costes 233,373 M€. Se obtiene un TIR positivo a partir del 7 % de inversión propia.

En el primer caso, *Transporte público urbano*, la rentabilidad del proyecto es negativa. Los costes asociados a la construcción de la infraestructura necesaria para la producción y suministro, sumados a los invertidos en la adquisición de la flota de vehículos equipados con pila de combustible, son bastante mayores a los ingresos generados por dicha flota en los repostajes. Esto era de esperar debido al precio de la tecnología y el elevado coste de producción. Estos dos factores, sumados a la idea de construir una red de hidrogenas para abastecer tu propia flota de vehículos, sin ningún otro afluente de beneficios externos hacen que la inversión sea inviable. Ni siquiera modificando la inversión propia, suponiendo que se subvencionase el 100 % de la instalación.

El segundo caso de validación, *Transporte público más privado*, ofrece unas rentabilidades mayores, debido a que la herramienta considera que toda esa flota de turismos repostaría en las hidrogeneras planteadas. Como se ha comentado a lo largo del caso de validación, esta suposición tendría que ser modificada con un factor de corrección aplicado por el usuario en cada caso. No sería lógico que toda la flota de turismos privados repostase en las instalaciones en las que lo hacen las flotas públicas.

En el resumen de resultados aparece indicado a partir de qué porcentajes de inversión comienza a ser rentable la instalación. Estos porcentajes son muy bajos, por lo que se debería esperar una disminución de los costes de producción de hidrógeno y de los componentes de las pilas de combustible más acusada que la prevista en la Herramienta de Valoración. Como mínimo se tendría que mantener una relación del 50% entre la inversión propia y subvención para que se pueda llevar a cabo, siguiendo la tendencia de financiación marcada en los últimos años para proyectos europeos relacionados con el hidrógeno y las pilas de combustible.

En este segundo caso, como en el primero, los costes de producción y el elevado precio de la tecnología son bastante influyentes en la rentabilidad del proyecto. Pero al haber una flota superior de vehículos, el kilometraje medio recorrido por año es muy influyente. Esto hace que este valor sea una variable a tratar con extrema precaución, ya que hace variar la rentabilidad del proyecto.

A6.2. Definición de Rutas y Ubicación de Hidrogeneras para la Implantación de una Red Interna de Transporte en el Polígono PLAZA

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento de la aplicación web descrita en 5.3.3. *Descripción del software* y el sistema SIG descrito en 5.3.4. *Criterios de selección SIG*, se define el caso de estudio: “*Definición de rutas y ubicación de hidrogenera(s) para la implantación de una red interna de transporte en el polígono industrial PLAZA*”.

PLAZA es la *Plataforma Logística de Zaragoza*. Cuenta con una extensión de 12.826.898 m², lo que lo convierte en el recinto logístico de mayores dimensiones del Continente europeo. La principal característica de *PLAZA* es que está basada en un centro intermodal de transportes (ferrocarril, carretera y avión), combinación que posibilita unas capacidades que convierten a Zaragoza en una de las ciudades logísticas más importantes de Europa, con conexiones con los más relevantes centros de producción y consumo europeos. Esta intermodalidad refuerza los valores de localización y centralidad del recinto, completamente abierto a empresas que participen en actividades relacionadas con la logística.

Las características presentadas por esta plataforma logística, especialmente las gran superficie que ocupa, las diversas actividades que en ella se desarrollan, y que generan un gran movimiento de personas, y el acceso previsto mediante tren de cercanías, hacen de *PLAZA* un escenario inmejorable en el que implantar una red interna de transporte urbano. Actualmente ya existe un sistema de transporte interno mediante autobuses convencionales. Ahora lo que se estudia es la posibilidad de implantar una red de transporte basado en autobuses de hidrógeno, así como la infraestructura requerida, para el escenario temporal: *Año 2015*, año para el cual está previsto que *PLAZA* alcance una ocupación cercana al 100%.

Debido a su proximidad geográfica, la nueva red de transporte de *PLAZA* comunicará también con el *Aeropuerto de Zaragoza*, así como con la *Feria de Zaragoza*.

A6.2.1. Objetivos de la validación

Los objetivos previstos a cumplir en este caso de validación son los siguientes:

- Definición de las rutas necesarias para la implantación de una red interna de transporte en el polígono *PLAZA* en el año 2015, en función del número de usuarios y su localización.
- Dimensionamiento de la(s) hidrogena(s) necesarias para la implantación de dicha red interna de transporte en el polígono *PLAZA* en función del consumo de hidrógeno por parte de los autobuses que cubran las rutas anteriormente calculadas.
- Ubicación de la(s) hidrogena(s) dimensionadas anteriormente de acuerdo a los criterios de decisión considerados.

A6.2.2. Determinación de la demanda de transporte

Previamente a la definición de rutas, debe determinarse el número de usuarios previstos para las nuevas rutas de transporte.

Para ello es necesario conocer por un lado el número de trabajadores y visitantes de la plataforma logística, y por otro el número de usuarios del aeropuerto y de las previsiones existentes de visitantes en las fechas en las que se celebran eventos en la *Feria*. Debido a la naturaleza logística de la plataforma, también habrá que tener en cuenta el número de trabajadores ajenos a las empresas (en su mayoría transportistas), que permanecen en la plataforma periodos de tiempo cortos, pero que podrían demandar transporte hacia las zonas comerciales y de ocio.

Además deberán tenerse en cuenta dos aspectos, uno geográfico y otro temporal:

- Geográfico: se refiere a qué puntos del mapa son en los que mayor densidad poblacional se concentra, definido por el número de trabajadores y visitantes de cada centro de trabajo y su ubicación.

- Temporal: se refiere a si se trata de una densidad poblacional constante en el tiempo, o si se trata de una densidad temporal eventual. Como eventual se consideran todos aquellos acontecimientos que se producen puntualmente como es la celebración de ferias y convenciones en la Feria de Zaragoza.

También se debería tener en cuenta las horas de entrada y salida de los puestos de trabajo para determinar las horas punta y valle del sistema de transporte. No obstante, el sistema se dimensiona para el caso más desfavorable posible (horas punta), que es en el que las horas de entrada y salida del trabajo coincidirán durante una corta ventana temporal en todas las empresas.

A6.2.2.1. Consideraciones previas

A la hora de determinar el número de trabajadores de la plataforma logística, se realizará una estimación en función del tipo de actividad que desarrollen las diferentes empresas; así se estimarán dos ratios diferentes *personas por unidad de superficie* (*persona/m²*), en función de si se trata de una actividad industrial o de oficinas.

a. Áreas logísticas

Se estima el ratio *personas por unidad de superficie* [*persona/m²*], a partir de los ratios obtenidos para una serie de empresas elegidas al azar entre las establecidas en PLAZA (ver Tabla 278) y que se dedican a actividades diferentes.

Tabla 278. Ratio empleados por unidad de superficie de las empresas de PLAZA dedicadas a la actividad industrial-logística

Fuente: Elaboración propia a partir de la información obtenida en las páginas web de las propias empresas y en www.plazalogistica.com [117]

Empresa	Nº Empleados	Superficie [m²]	Ratio [empleados/m²]
Alberto Polo Distribuciones	35	5879	0,006
Apyk Textil	54	18779	0,003
Azkar	33	29800	0,001
Caladero	700	99714	0,007
Decathlon	350	51500	0,007
Facody	25	10307	0,002
Fersa	58	10317	0,006
Filtros-Man	618	79975	0,008
GER	75	41761	0,002
Global 3	200	35000	0,006
Imaginarium	712	50300	0,014
Inditex	700	120000	0,006
Infocopy	10	2000	0,005
Mercadona	71	11100	0,006
Pikolin	40	32000	0,001
Pikolin (futuro)	897	200000	0,004
Porcelanosa	100	41554	0,002
Quality Trucks	30	10021	0,003
Repuestos Fuster	18	19079	0,001
Walter Martinez	17	15000	0,001
			0,005
			Ratio medio

b. Parques empresariales-oficinas

En este caso, los edificios correspondientes a los parques empresariales, por norma general cuentan con tres plantas de oficinas. Tomando como referencia tres edificios, como son el *TechnoCenter*, el *Centro Tecnológico TIC XXI*, y el edificio de Barclays, y teniendo en cuenta que la densidad de ocupación máxima para edificios de oficinas es de una persona por cada 10m², según el Código Técnico de la Edificación (CTE DB SI), el ratio medio de ocupación para este tipo de uso es de 0,071 empleados/m², tal y como se refleja en la siguiente tabla:

Tabla 279. Ratio empleados por unidad de superficie de los parques empresariales de PLAZA

Fuente: **Elaboración propia a partir de la información obtenida en las páginas web de los propios centros empresariales, www.plazalogistica.com [117] y CTE [118]**

Centro empresarial	Densidad ocupación [personas/m ²] (según CTE)	Superf. Dedicada a oficinas [m ²]	Ocupación máxima [empleados]	Superf. Parcela [m ²]	ratio [empleados / m ²]	
TechnoCenter	0,1	9900	990	7650	0,129	
Centro Tecnológico TIC XXI	0,1	9000	900	7500	0,120	
Barclays	0,1	-	850	23175	0,037	
					0,071	Ratio medio

c. Aeropuerto

En el caso del aeropuerto se considera una actividad diaria regular que se prolonga a lo largo del día. Según el *Plan Director para el Aeropuerto de Zaragoza 2001* [119], las previsiones de AENA, del número de pasajeros para el año 2015 eran de 536.600 pasajeros, no obstante estas previsiones se han quedado cortas: el número de pasajeros con el que cerró el año 2010 el aeropuerto es de 606.000. De este modo, según se observa en la tabla y figura siguientes, a partir de los datos de pasajeros de AENA 2000-2010 [120], representándolos

por años y agregando la línea de tendencia, se obtiene una previsión del número de pasajeros para el año 2015 en torno a los 890.000; lo que supone 2.440 pasajeros diarios.

Tabla 280. Número de pasajeros por año del aeropuerto de Zaragoza. Periodo 2000-2010

Fuente: *Aeropuerto de Zaragoza (AENA)* [120]

AÑO	Nº Pasajeros
2000	246.720
2001	222.167
2002	228.557
2003	228.069
2004	215.213
2005	381.849
2006	435.881
2007	512.184
2008	594.952
2009	528.313
2010	605.912

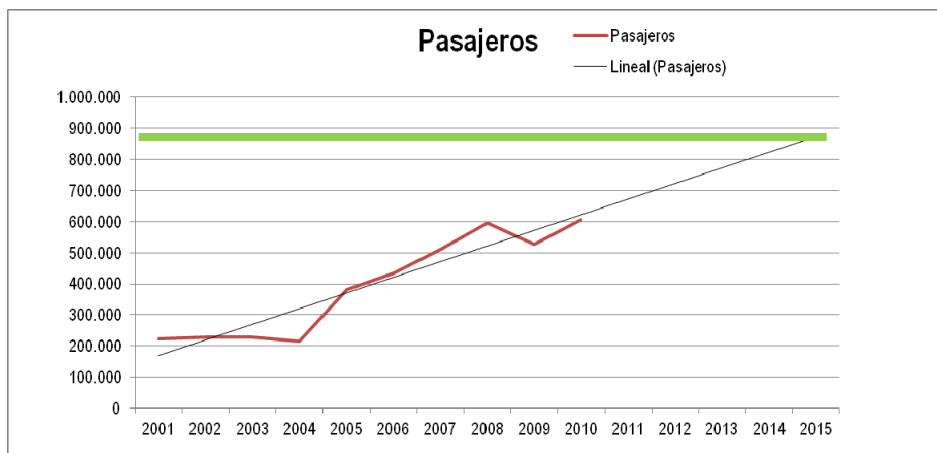


Figura 241. Previsión número de pasajeros en el Aeropuerto de Zaragoza año 2015

Fuente: *Aeropuerto de Zaragoza (AENA)* [119]

Por lo tanto, si suponemos que un 30% de los pasajeros viajarán en transporte público, se obtienen 732 usuarios diarios para el sistema de transporte interno de *PLAZA*.

A6.2.3. Definición de Rutas

Para definir las rutas a realizar, tanto en número como en recorrido, además de utilizar las demandas previamente determinadas, se marcan unos criterios a cumplir, en este caso se fija un tiempo máximo de recorrido de 30 minutos.

Este tiempo se refiere al tiempo máximo que un usuario permanecerá en el autobús hasta llegar a su destino final (punto de acceso a *PLAZA* o puesto de trabajo). Para ello será necesario conocer la velocidad media prevista en los viales de la plataforma logística y un mapa georreferenciado que permita obtener distancias.

A6.2.3.1. Diseño del mapa georreferenciado

Para el diseño de las rutas se utiliza el sistema GIS, a partir del cual gráficamente se puede analizar cuál es el mejor trazado de las líneas, así como cuantas líneas habilitar. Las pautas seguidas para su creación son básicamente las definidas en 5.3.4 *Criterios de selección SIG*.

Inicialmente a partir de un mapa de *Google Maps* que servirá de base, se definen una serie de puntos clave, para poder diseñar el resto del mapa.

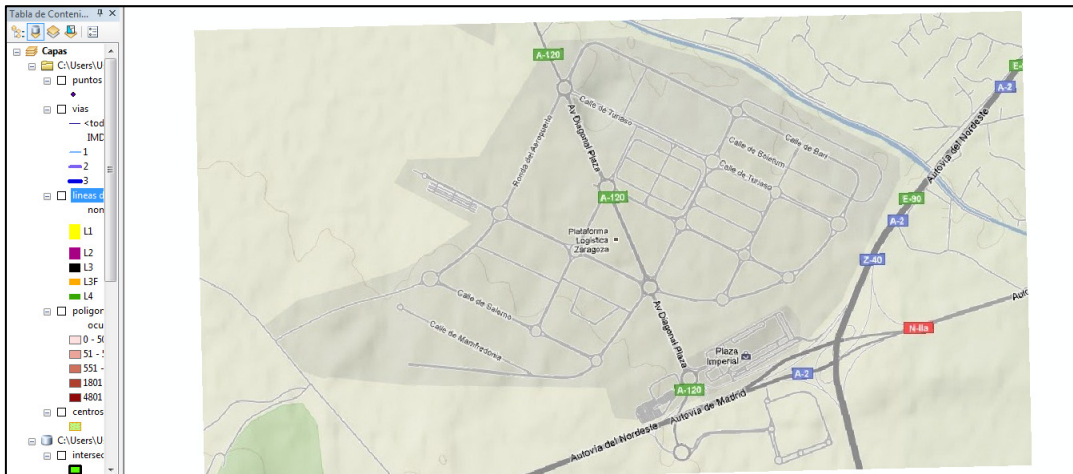


Figura 242. Capa de información general: plano general del polígono industrial PLAZA

Fuente: Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10*

Se insertan los viales existentes en el polígono industrial, diferenciándolos en función de sus IMD (Intensidad Media Diaria) de tránsito, estimada a partir del número de carriles de cada vial y de los lugares que conectan. Los viales en azul claro son los de menor tránsito y los de azul oscuro los de mayor IMD.

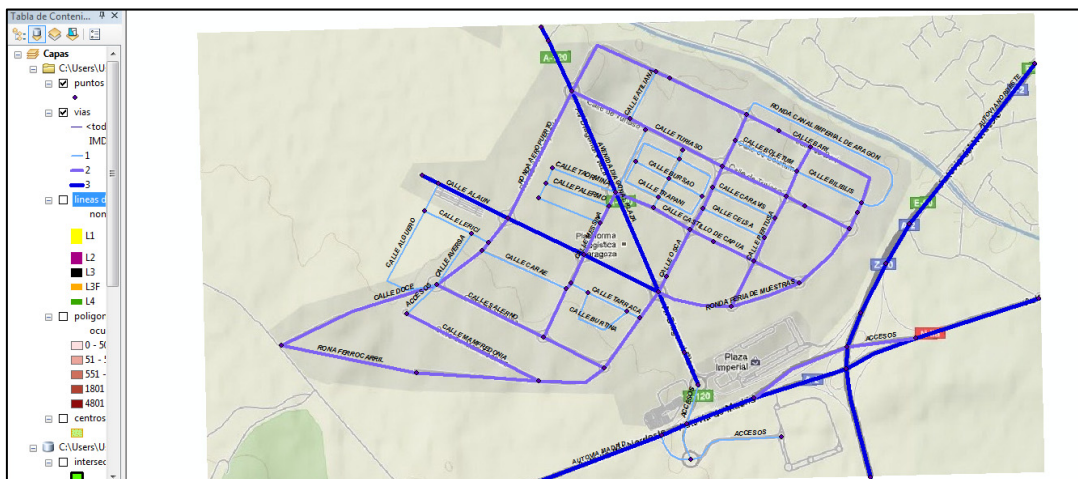


Figura 243. Representación de los principales viales con clasificación según IMD

Fuente: Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10*

La información en cuanto a la ocupación de las parcelas se ha explicado en el punto A6.2.2.1. *Consideraciones previas*, de este caso de validación. Como la determinación y diseño de cada parcela por separado era bastante complejo, se decidió el estudio por manzanas en vez de por parcelas, ya que no variará considerablemente los resultados. Se han establecido cinco niveles de ocupación en función del número de trabajadores.

Tabla 281. Número de trabajadores por manzana

Fuente: *Elaboración propia a partir de la información de www.plazalogistica.com*

COLOR	Nº de trabajadores
Blanco	0-50
Rosa	51-550
Salmon	551-1800
Naranja	1801-4800
Granate	4801-6600

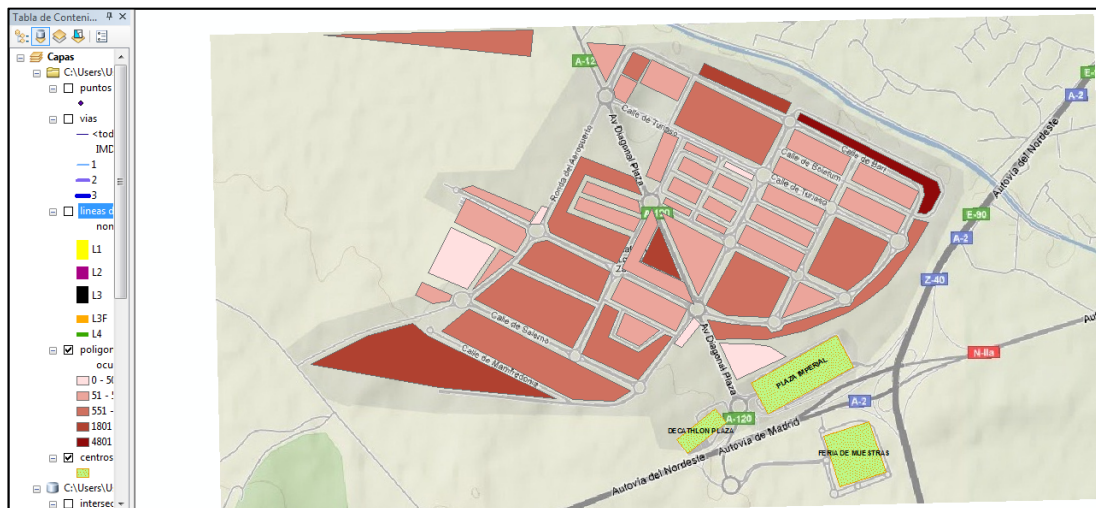


Figura 244. Representación de la ocupación de trabajadores por cada manzana

Fuente: *Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10*

A6.2.3.2. Selección de las líneas de bus

Para la determinar la mejor opción en cuanto a las líneas de bus se optó por estudiar dos posibles casos de análisis, uno con tres líneas de bus y otro con dos. Todas las líneas salen y llegan en el mismo punto, junto al centro comercial de Plaza Imperial.

Para el primer caso se diseñó la LÍNEA1 (en color amarillo) transcurriendo a lo largo de Plaza-1 (a la derecha de la avenida principal), la LÍNEA2 (en color morado) recorriendo Plaza-2 (a la izquierda de la avenida principal), y la LÍNEA3 (en color negro) en la Avenida Diagonal desde el Aeropuerto hasta el Centro Comercial, con una pequeña ampliación de dicha línea cuando haya algún evento en la Feria de Muestras (LÍNEA3F, en color naranja).

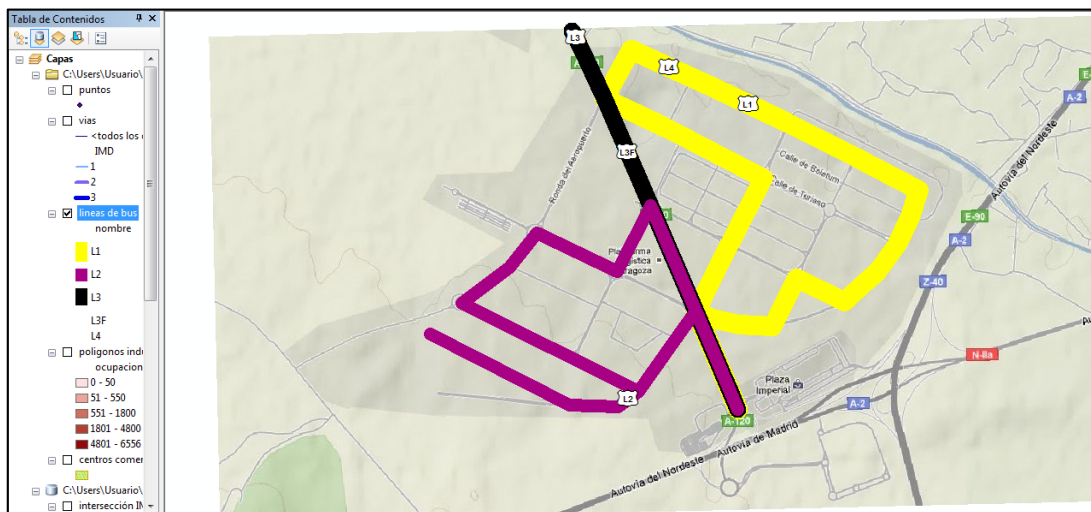


Figura 245. Representación de las líneas de bus diseñadas (L1, L2 y L3)

Fuente: Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10*

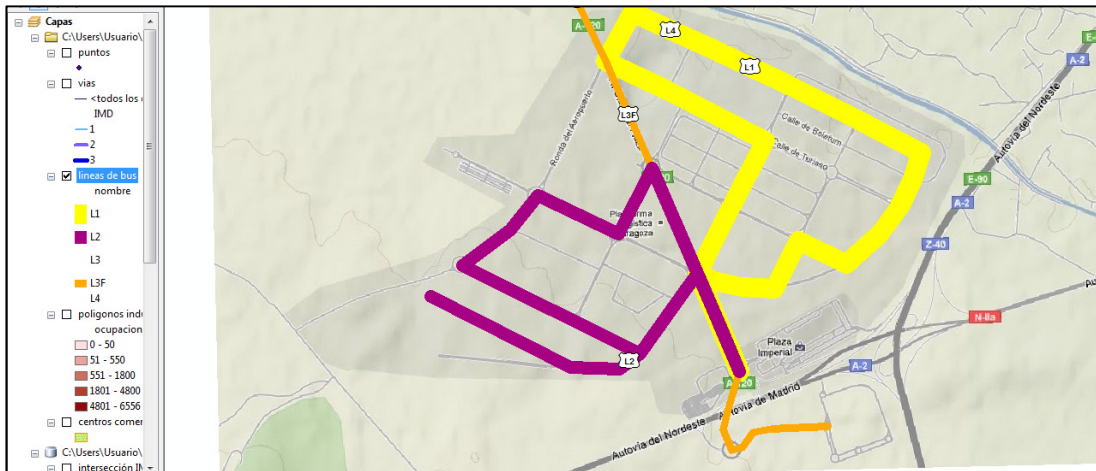


Figura 246. Representación de las líneas de bus diseñadas (L1, L2 y L3F)

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

Para el segundo caso se mantuvo la LÍNEA2 igual que en el caso anterior, y se diseñó la LÍNEA 4 (en color verde) que recorre el exterior de Plaza-1 y la Avenida Diagonal.

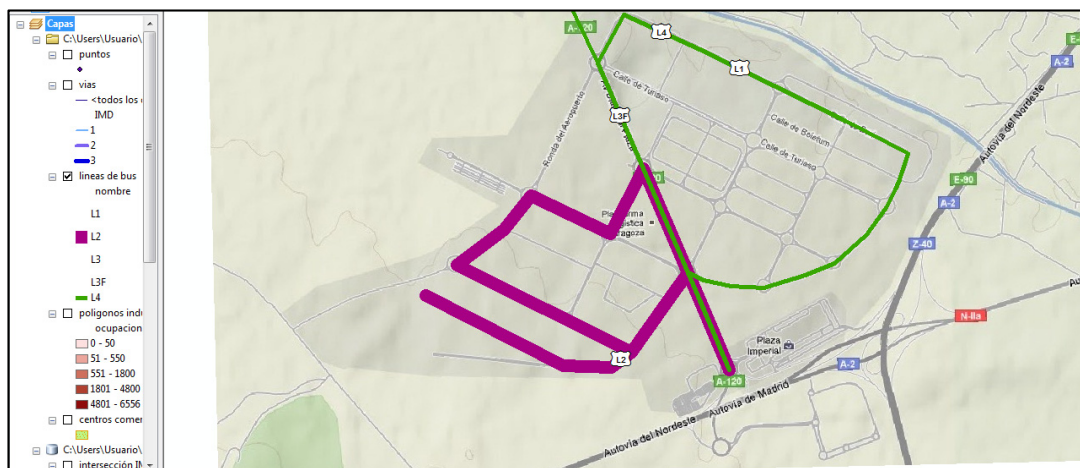


Figura 247. Representación de las líneas de bus diseñadas (L2 y L4)

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

A continuación se presentan los datos calculados para el estudio de ambos casos. Se ha estimado que de los trabajadores potenciales que podrían ir en esa línea, un 30% utilizaría este servicio público. También destacar que se ha analizado el recorrido para las dos horas punta del día con mayor afluencia de trabajadores al polígono.

Tabla 282. Número de autobuses necesarios para el caso de tres líneas

 Fuente: *Elaboración propia*

LÍNEA	Trabajadores totales	Trabajadores a transportar (30%)	Tiempo de recorrido [min]	Nº de viajes en dos horas	Nº de autobuses necesarios (70 plazas cada uno)	
LÍNEA1	19209,6	5762,9	16,2	7,4	11,1	
LÍNEA2	7671	2301,3	18,6	6,5	5,1	
LÍNEA3	7460,5	2238,2	14,4	8,3	3,9	
					20	Total

Tabla 283. Número de autobuses necesarios para el caso de tres líneas y llegada hasta la Feria de Muestras

 Fuente: *Elaboración propia*

LÍNEA	Trabajadores totales	Trabajadores a transportar (30%)	Tiempo de recorrido [min]	Nº de viajes en dos horas	Nº de autobuses necesarios (70 plazas cada uno)	
LÍNEA1	19209,6	5762,9	16,2	7,4	11,1	
LÍNEA2	7671	2301,3	18,6	6,5	5,1	
LÍNEA3F	11460,5	3438,2	19,8	6,1	8,1	
					24,2	Total

Tabla 284. Número de autobuses necesarios para el caso de dos líneas

Fuente: *Elaboración propia*

LÍNEA	Trabajadores totales	Trabajadores a transportar (30%)	Tiempo de recorrido [min]	Nº de viajes en dos horas	Nº de autobuses necesarios (70 plazas cada uno)	
LÍNEA4	21592,5	6477,8	19,2	6,3	14,7	
LÍNEA2	12748,6	3824,6	18,6	6,5	8,4	
					23,1	Total

Una vez evaluados los datos de las tablas, se concluye que la mejor opción es la primera, la de tres líneas, ya que se necesitaría un menor número de autobuses y se llegaría a un mayor número de empresas. En el supuesto de que hubiese algún evento en la *Feria de Muestras* el número de autobuses aumenta, pero para el caso de dos líneas también aumentaría considerablemente, con lo que seguiría siendo la mejor opción la de tres líneas.

A6.2.4. *Parque de vehículos e infraestructuras requeridas*

Se ha definido en el apartado anterior el número de autobuses necesarios en función de las rutas, prestaciones de los autobuses, número de trabajadores a transportar y frecuencias estimadas.

Conocido el número de autobuses es posible conocer la demanda de hidrógeno, y con esta el número de instalaciones de hidrógeno necesarias.

Para ello se utilizará la aplicación web descrita en el apartado 5.3.3. *Descripción del software* de la presente tesis.

Tabla 285. Demanda total de H₂ prevista para satisfacer las tres líneas de autobús

 Fuente: *Elaboración propia*

LÍNEA	Estado H ₂	Nº autobuses	Nº paradas	Tiempo de un recorrido [seg]	Nº viajes en 2 horas	Distancia recorrida [km]	Demanda prevista [kg]	
LÍNEA1	Gas 350	11,1	16	970	7,4	9,65	158,46	
LÍNEA2	Gas 350	5,1	14	1113	6,5	10,42	69,07	
LÍNEA3	Gas 350	3,9	7	858	8,3	8,76	56,71	
							284,25	Total

Finalmente la herramienta web nos da como resultado que se necesitará una sola hidrogenera con un solo dispensador para satisfacer la demanda prevista de hidrógeno.

A6.2.5. Ubicación de las hidrogeneras

Definición de las posibles ubicaciones de las hidrogeneras que conformarán la nueva infraestructura de suministro de hidrógeno. El número de instalaciones viene definido a partir de los resultados obtenidos con la aplicación web. Para este caso de estudio se necesitará una sola hidrogenera con un dispensador.

Se tienen en cuenta los siguientes criterios de decisión:

- Viales de la plataforma logística
- Índice medio de densidad de tráfico diario (IMD)
- Proximidad a zonas comerciales
- Rutas de transporte urbano
- Suelos urbanizables disponibles

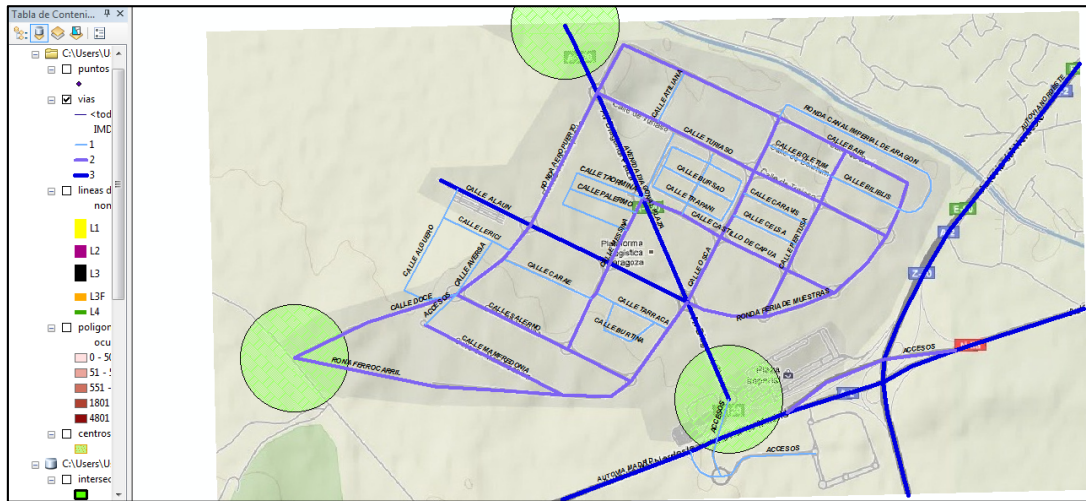


Figura 249. Representación de las zonas de preferencia debido a la existencia de puntos de acceso al polígono industrial

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

A6.2.5.2. Proximidad a zonas comerciales

Una vez localizadas las zonas de mayor actividad comercial, debido a que se trata de centros habitados de especial sensibilidad por el tipo de actividad que en ellos se desarrolla, el sistema crea una nueva capa en la que se representa una área de exclusión (en rojo) con un perímetro de 500 m en torno a la zona comercial. No obstante, debido a la alta concentración de tráfico que se genera en su entorno, el sistema representa a su vez una nueva área de preferencia (en verde) en la que ubicar la estación de suministro de hidrógeno. Esta nueva área tendrá forma de corona con una anchura de 200 m en torno al área de exclusión anteriormente indicada. Ver Figura 250:

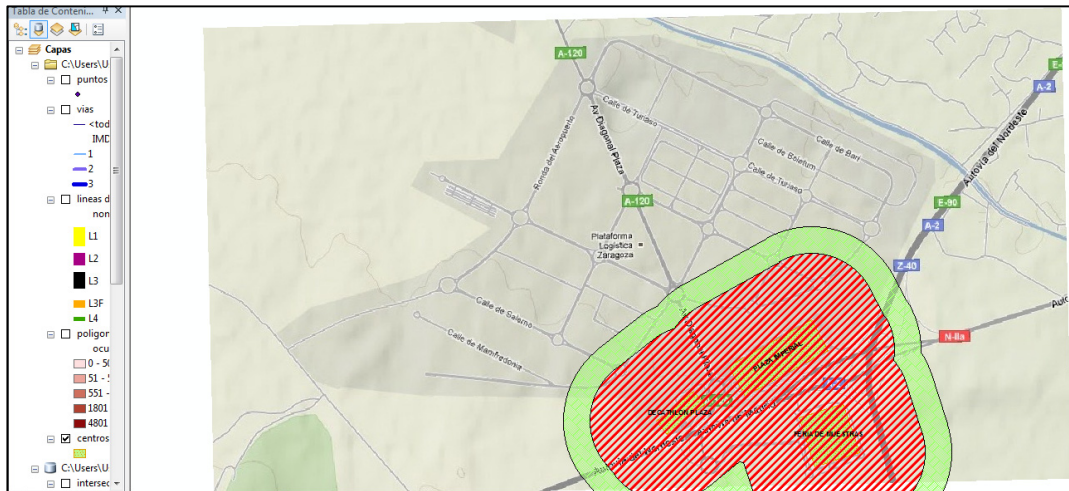


Figura 250. Representación de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) motivadas por la presencia de los grandes centros comerciales

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

A6.2.5.3. Rutas de transporte urbano

Una vez localizados los principios y finales de línea, se crea una nueva capa en la que se representa un área circular de preferencia a la hora de localizar la hidrogenera en torno a los principios y finales de línea con radio 150 m. Ver Figura 251:

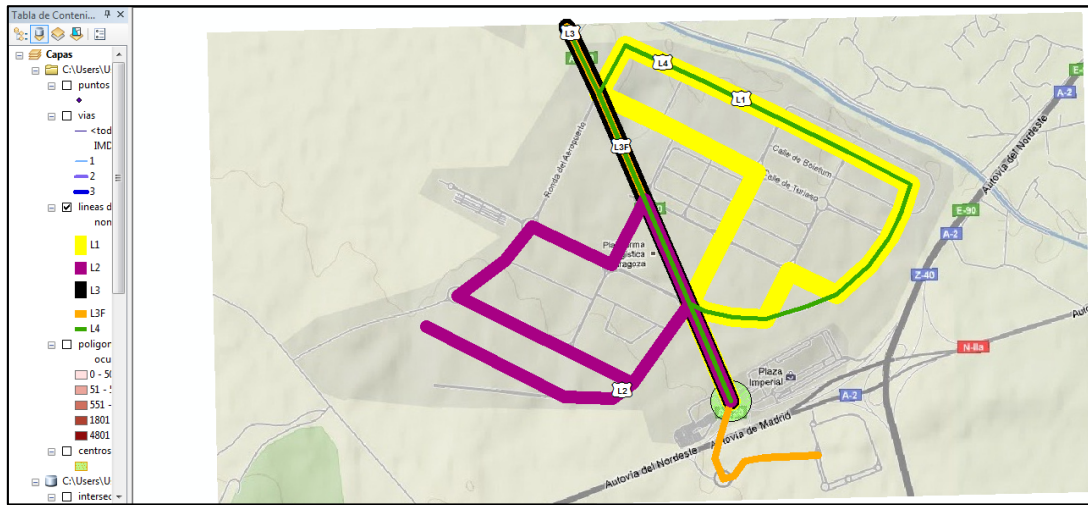


Figura 251. Representación del área de preferencia debido a la existencia de un inicio o fin de línea de autobús

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

A6.2.5.4. Suelos urbanizables disponibles

El sistema analizará los datos asociados a las parcelas referentes al tipo de suelo y creará una nueva capa en la que se representarán aquellas parcelas urbanizables disponibles. Ver Figura 252:

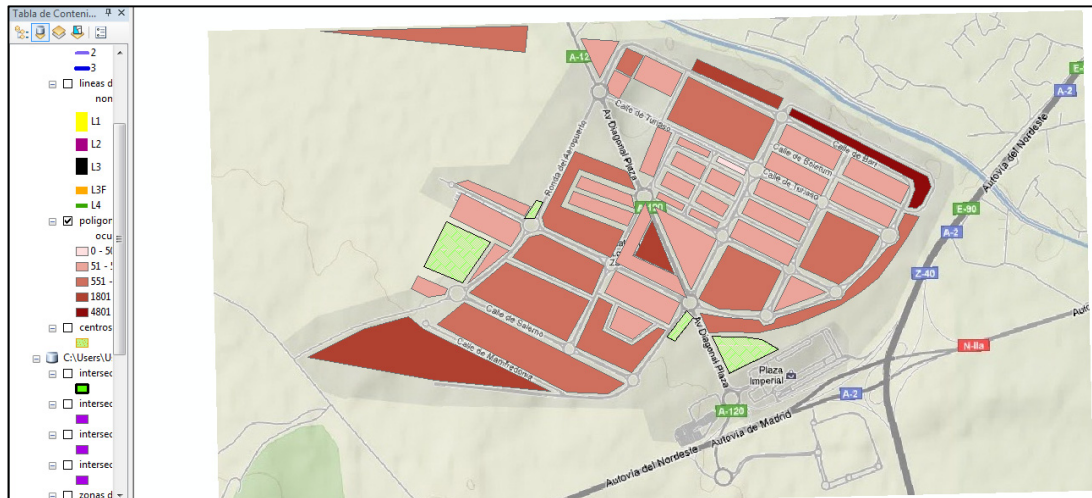


Figura 252. Representación del área de preferencia debido a la existencia de suelos urbanizables

Fuente: Elaboración propia a partir de *Google Maps* y *ARCGIS 10*

A6.2.5.5. Selección de ubicación óptima

Una vez analizados todos los criterios de decisión se procede a la selección de estas ubicaciones óptimas que son el objeto del sistema. A partir de los criterios de decisión, se generan las capas que representan las áreas de exclusión (rojo) y preferencia (verde) para la ubicación de la hidrogenera. Las áreas de exclusión son prioritarias sobre las de preferencia, es decir, en las áreas de preferencia que se superponen a las de exclusión serían desestimadas automáticamente. En la Figura 253 se representa el conjunto de estas áreas:

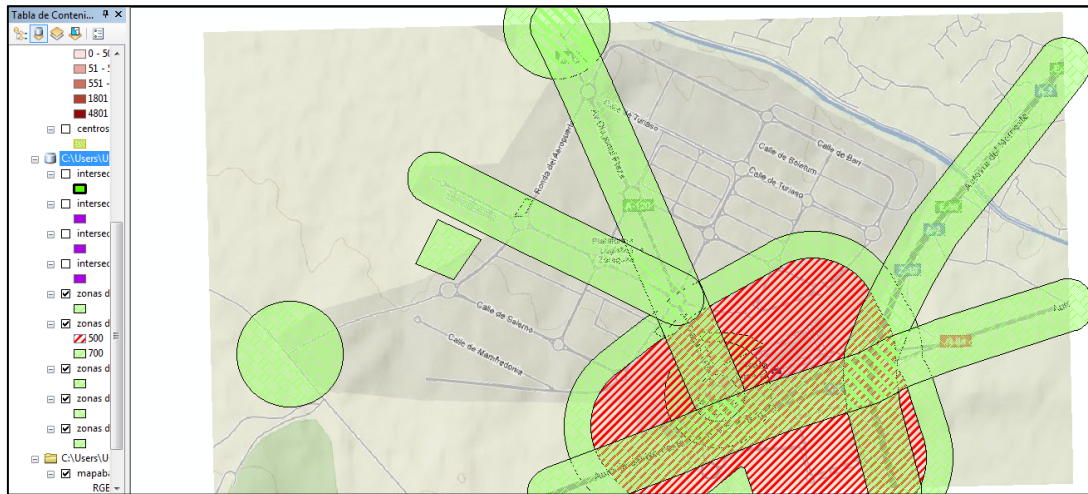


Figura 253. Representación del conjunto de las áreas de exclusión (rojo) y prioritarias (verde) generadas por los diferentes criterios de decisión

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

Como ya se ha indicado anteriormente se sigue la metodología marcada en el apartado 5.3.4. *Criterios de selección SIG* de esta tesis, en la que cada criterio de decisión venía acompañado por unos pesos para la determinación de la ubicación óptima.

A continuación, en la Figura 254, se muestra en color morado la representación de las localizaciones más óptimas para la ubicación de las nuevas instalaciones de suministro de hidrógeno, debido a la superposición de áreas de preferencia generadas por dos o más criterios de decisión. Quedan desestimadas aquellas zonas en las que se obtienen Grados de Decisión negativos debido a la superposición de una zona de exclusión, a pesar de que coincide en la misma zona varias áreas de preferencia.

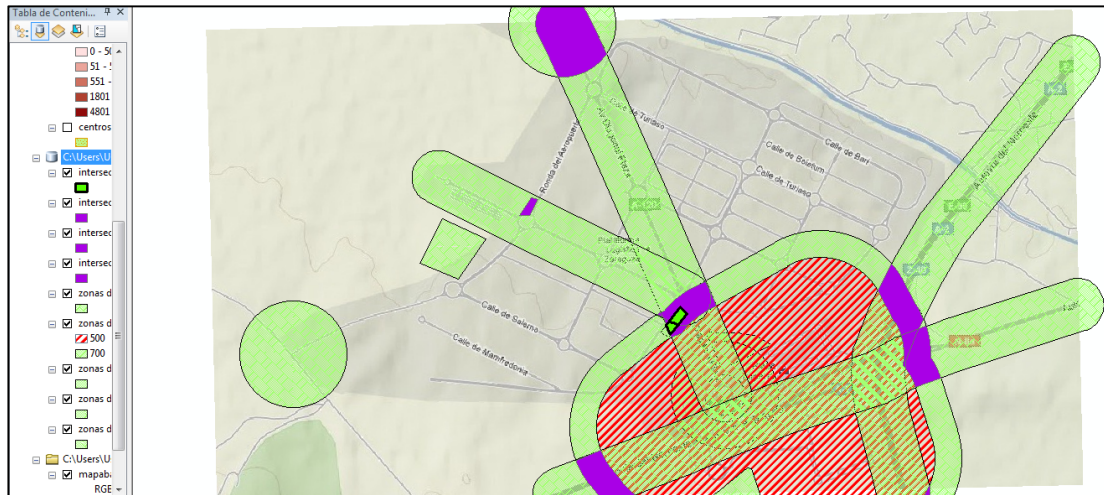


Figura 254. Representación de las zonas más óptimas para la localización de las estaciones de suministro de hidrógeno

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

Finalmente se muestra en color verde la parcela en la que se ubicaría la hidrogenera, ya que es la que mayor peso tiene, y es una zona en la que confluyen tres zonas de preferencia (proximidad a zona comercial, IMD alto y parcela de suelo urbanizable) y muy cerca del inicio y fin de las líneas de autobús.

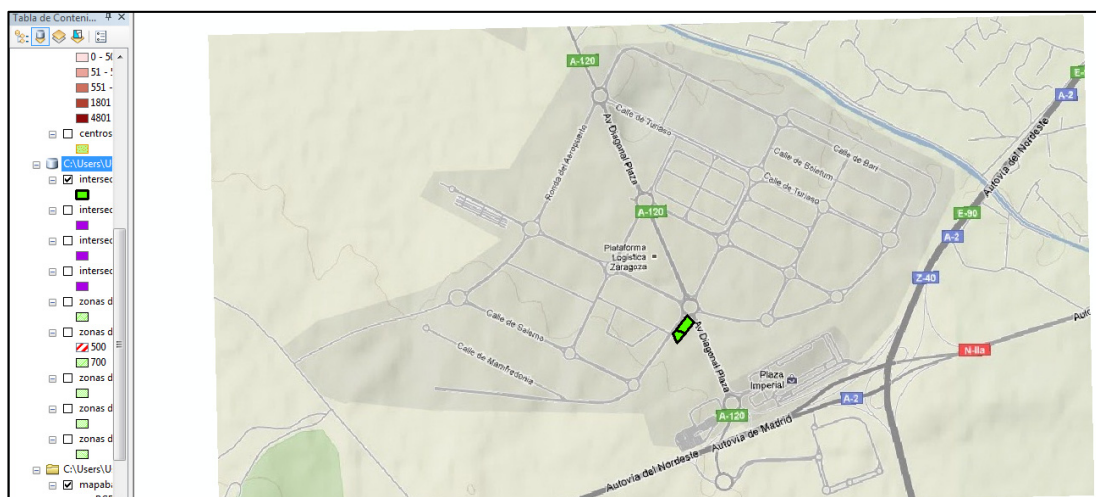


Figura 255. Representación de la parcela seleccionada para la ubicación de la hidrogenera

Fuente: **Elaboración propia a partir de Google Maps y ARCGIS 10**

A6.2.6. Conclusiones

En este caso de validación se han cumplido los tres objetivos que se buscaban:

- Se han definido las rutas necesarias para la implantación de una red interna de transporte en el polígono *PLAZA* en el año 2015, en función del número de usuarios y su localización. Se ha analizado implantar dos o tres líneas de autobús. Finalmente, debido a la menor cantidad de autobuses (20 autobuses para las tres líneas) que eran necesarios, se ha decidido implantar tres líneas de autobús; de este modo es posible llegar a un mayor número de empresas y de trabajadores.
- A partir de la herramienta web, se han obtenido para estas tres líneas de bus, que solamente era necesaria la implantación de una hidrogenera con un dispensador, en función del consumo de hidrógeno por parte de los autobuses que cubrirían las rutas anteriormente calculadas.
- Finalmente se ha obtenido la mejor ubicación para dicha hidrogenera dimensionada anteriormente de acuerdo a los criterios de decisión considerados. Utilizando el sistema GIS, se obtuvo la parcela redondeada en azul, como la parcela con las mejores condiciones para la implantación de dicha instalación.

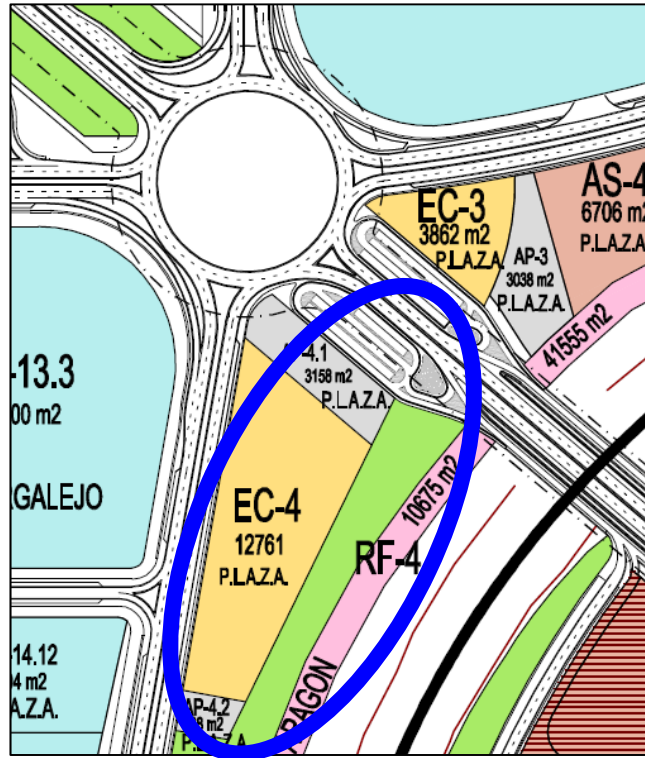


Figura 256. Plano de la parcela seleccionada para la ubicación de la hidrogenera

Fuente: Plano de www.plazalogistica.com [117]

