

PROYECTO FIN DE CARRERA



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA

HIDRÓGENO: VECTOR ENERGÉTICO EN EL SIGLO XXI

MEMORIA ACADÉMICA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL. ESPECIALIDAD
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Autor: Iván Cid Jiménez

Director: Miguel Ángel Torres Portero





Índice

1.-Introducción.....	3
2.- Desarrollo del proyecto.....	5
3.- Planificación del proyecto.....	10
4.-Ejecución y Seguimiento tutorial.....	12
5.-Balance de horas.....	15
6.-Conclusiones personales.....	16
7.-Agradecimientos.....	17
8.-Bibliografía.....	18



1. Introducción

El tema principal del Proyecto Final de Carrera es el hidrógeno y su uso como vector energético desde un punto de vista global.

El objetivo ha sido dar a conocer el entramado mundo de las tecnologías del hidrógeno y su estrecha y necesaria relación con las energías renovables, así como con equipos que aún hoy se nos antojan muy sofisticados y escasos.

El primer punto tratado constituye una introducción al tema principal del proyecto desde los antecedentes históricos del descubrimiento y primeros usos del hidrógeno, características principales como vector energético y el planteamiento de un paradigma que está haciendo que los gobiernos cambien su manera de ver la política energética por todo el mundo, el fenómeno conocido como la economía del hidrógeno, llamado a ser una revolución sin precedentes en el uso de la energía.

El segundo tema tratado constituye un estudio de los distintos métodos que existen para la producción de hidrógeno puro, pues este elemento, pese a ser el más abundante del universo, en la Tierra raras veces se encuentra en estado puro o natural, y siempre mezclado con otros elementos, como por ejemplo, con el oxígeno, formando agua.

El tercer apartado mencionado relata todas las formas de almacenamiento que tiene el hidrógeno. Más que necesario, es imprescindible encontrar un sistema que permita almacenar el hidrógeno de forma segura y dotándolo de una densidad volumétrica de energía que resulte rentable para su utilización a gran escala, ya que ese es su principal problema, su baja densidad energética.

El cuarto apartado incluido en el Proyecto Final de Carrera nos describe las aplicaciones que encuentra este vector energético, sobretodo de la mano de la pila de combustible, que, siempre y cuando reciba un suministro constante de hidrógeno y oxígeno o aire, producirá una corriente eléctrica modulable según el requerimiento de la carga apilando celdas en serie o paralelo. También se trata la ligadura de esta tecnología con las energías renovables y otros modos de obtener energía a partir de hidrógeno almacenado, como las turbinas de gas. Por último, se comentan diversos proyectos reales y prototipos que ya han visto la luz desde hace años y que demuestran que la tecnología está perfectamente preparada para salir al mercado, esperando una red de



distribución y producciones en serie que hagan disminuir los precios de una industria prácticamente inexistente.

En el siguiente apartado se hace un estudio relativo a la seguridad de manejar un componente que, aunque en principio en estado natural no es muy peligroso, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura ineludibles para su utilización energética puede llegar a resultar un problema en equipos, personas y rendimientos.

El sexto capítulo recoge las diferentes experiencias y conocimientos básicos más importantes que he decidido introducir en el presente Proyecto Final de Carrera, y que de forma conjunta ayudan al lector a comprender mejor el contenido del mismo.

Para finalizar el presente proyecto, se recoge una recopilación de direcciones de interés dentro del ámbito de estudio del proyecto.



2. Desarrollo del proyecto

La documentación presentada sigue el siguiente índice:

1. Introducción.....	9
<i>1.1. Conceptos Generales.....</i>	<i>15</i>
1.1.1. Propiedades del hidrógeno.....	17
1.1.2. Isótopos.....	18
1.1.3. Obtención.....	19
1.1.4. Ventajas y desventajas.....	20
<i>1.2. Antecedentes del uso de hidrógeno.....</i>	<i>21</i>
<i>1.3. El hidrógeno como vector energético.....</i>	<i>24</i>
1.3.1. Principios de obtención de energía a partir de hidrógeno.....	26
<i>1.4. La economía del hidrógeno.....</i>	<i>27</i>
1.4.1. Concepto.....	27
1.4.2. Viabilidad.....	32
2. Producción de Hidrógeno.....	36
<i>2.1. Generación de hidrógeno a partir de combustibles fósiles.....</i>	<i>40</i>
2.1.1. Reformado de gas natural.....	42
2.1.1.1. Desulfuración.....	44
2.1.1.2. Generación de hidrógeno.....	45
2.1.1.3. Tecnologías.....	49
2.1.2. Oxidación parcial de hidrocarburos.....	49
2.1.2.1. Generación de hidrógeno.....	50
2.1.2.2. Convertidor de desplazamiento y oxidante catalítico selectivo.....	52
2.1.3. Procesamiento de combustibles líquidos.....	53
2.1.4. Procesamiento de carbón.....	53
2.1.4.1. Limpieza del gas de síntesis.....	55
2.1.4.2. Purificación de hidrógeno.....	56
2.1.5. Reformado autotérmico.....	56
2.1.6. Procesamiento de otros combustibles fósiles.....	58
<i>2.2. Generación de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables.....</i>	<i>59</i>



2.2.1. Producción de hidrógeno mediante procesos electrolíticos.....	60
2.2.1.1. Introducción a los procesos electrolíticos.....	60
2.2.1.2. Electrolisis para la producción de hidrógeno.....	61
2.2.1.2.1. Electrolisis del agua a altas temperaturas.....	67
2.2.1.2.2. Otros usos paralelos a la electrolisis del agua.....	68
2.2.1.2.3. Uso de energía eólica para producir hidrógeno.....	70
2.2.1.2.4. Uso de energía solar fotovoltaica para producir hidrógeno...	81
2.2.1.2.5. Foelectrolisis.....	87
2.2.2. Producción de hidrógeno a partir de biomasa.....	88
2.2.3. Producción de hidrógeno mediante ciclos termoquímicos.....	95
2.2.4. Producción biofotolítica de hidrógeno.....	101
3. Almacenamiento y distribución de hidrógeno.....	115
3.1. <i>Características del hidrógeno asociadas al almacenamiento.....</i>	<i>117</i>
3.2. <i>Almacenamiento de hidrógeno gas comprimido.....</i>	<i>122</i>
3.3. <i>Hidrógeno líquido criogénico.....</i>	<i>130</i>
3.4. <i>Almacenamiento sólido de hidrógeno.....</i>	<i>140</i>
3.4.1. Hidruros metálicos.....	142
3.4.2. Hidruros químicos.....	144
3.4.3. Nanotubos de carbono.....	148
3.5. <i>Conclusiones y comparativa.....</i>	<i>151</i>
3.6. <i>Sistemas de distribución de hidrógeno.....</i>	<i>153</i>
3.6.1. Distribución de hidrógeno gas comprimido por carretera.....	155
3.6.2. Distribución de hidrógeno líquido por carretera.....	156
3.6.3. Distribución de hidrógeno gas canalizado.....	159
3.6.4. Consideraciones sobre los métodos de transporte.....	162
3.7. <i>Hidrogeneras.....</i>	<i>165</i>
3.7.1. Aspectos generales de una estación de servicio.....	168
3.7.2. Aspectos particulares de una hidrogenera, dimensionamiento y tipos...	173
3.8. <i>Equipos auxiliares.....</i>	<i>175</i>
3.8.1. Válvulas.....	176
3.8.2. Sensores de hidrógeno.....	179
3.8.3. Reguladores de presión.....	181



3.8.4. Compresores.....	183
3.8.4.1. Compresores alternativos o de pistón.....	183
3.8.5. Otros equipos.....	186
4. Aplicaciones.....	190
4.1. <i>Conceptos generales de pilas de combustible.....</i>	<i>197</i>
4.1.1. Concepto de la pila de combustible.....	197
4.1.2. Historia de las pilas de combustible.....	200
4.1.3. Ventajas e inconvenientes de las pilas de combustibles.....	205
4.1.3.1. Alta eficiencia.....	205
4.1.3.2. Sin partes móviles.....	205
4.1.3.3. Funcionamiento continuo.....	206
4.1.3.4. Modularidad.....	206
4.1.3.5. Respuesta rápida.....	207
4.1.3.6. Emisiones.....	208
4.1.3.7. Variedad de combustibles.....	208
4.1.3.8. Durabilidad.....	209
4.1.3.9. Precio.....	209
4.1.3.10. Tecnología en evolución.....	211
4.1.3.11. Conclusiones.....	211
4.2. <i>Funcionamiento de una pila de combustible.....</i>	<i>212</i>
4.2.1. Teoría de gases.....	212
4.2.2. Trabajo reversible y potencial de equilibrio.....	214
4.2.3. Comportamiento en circuito cerrado.....	221
4.2.4. La polarización de activación.....	222
4.2.5. La polarización de concentración.....	223
4.2.6. Curva de polarización.....	223
4.2.7. Prestaciones.....	225
4.2.7.1. Consumo de reactivos.....	226
4.2.7.2. Eficiencia de una pila de combustible.....	227
4.2.7.3. Potencia de una pila de combustible.....	231
4.2.7.4. Calor disipado por una pila de combustible.....	232
4.3. <i>Componentes de las pilas de combustible.....</i>	<i>233</i>



4.3.1. Electroodos.....	233
4.3.2. Electrolito.....	235
4.3.3. Placas bipolares.....	235
4.3.4. Pila.....	235
4.4. Tipos de pilas de combustible.....	236
4.4.1. Celda de combustible de electrolito de polímero o de membrana de intercambio de protones (PEFC o PEMFC).....	238
4.4.2. Celda de combustible alcalina (AFC).....	244
4.4.3. Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC).....	247
4.4.4. Celda de combustible de carbonatos fundidos (MCFC).....	250
4.4.5. Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC).....	256
4.4.6. Otros tipos de celdas.....	261
4.5. Aplicaciones de las pilas de combustible.....	262
4.5.1. Aplicaciones estacionarias. Generación distribuida.....	263
4.5.2. Aplicaciones al transporte.....	278
4.5.2.1. Fabricantes de automóviles propulsados con hidrógeno a base de pila de combustible.....	284
4.5.2.1.1. General Motors.....	284
4.5.2.1.2. Honda.....	291
4.5.2.1.3. Ford.....	295
4.5.2.1.4. Nissan.....	297
4.5.2.1.5. Genepax: el motor japonés que funciona sólo con agua.....	298
4.6. Aplicaciones portátiles.....	300
4.7. Motores de combustión directa de hidrógeno.....	301
4.7.1. Combustión de hidrógeno en motores alternativos.....	302
4.7.1.1. Ford.....	303
4.7.1.2. BMW Hydrogen 7.....	307
4.7.1.3. Mazda.....	311
4.7.2. Combustión de hidrógeno en turbinas de gas.....	314
5. Seguridad.....	316
5.1. Comportamiento básico de seguridad: prevención, control de riesgos y Recomendaciones.....	316

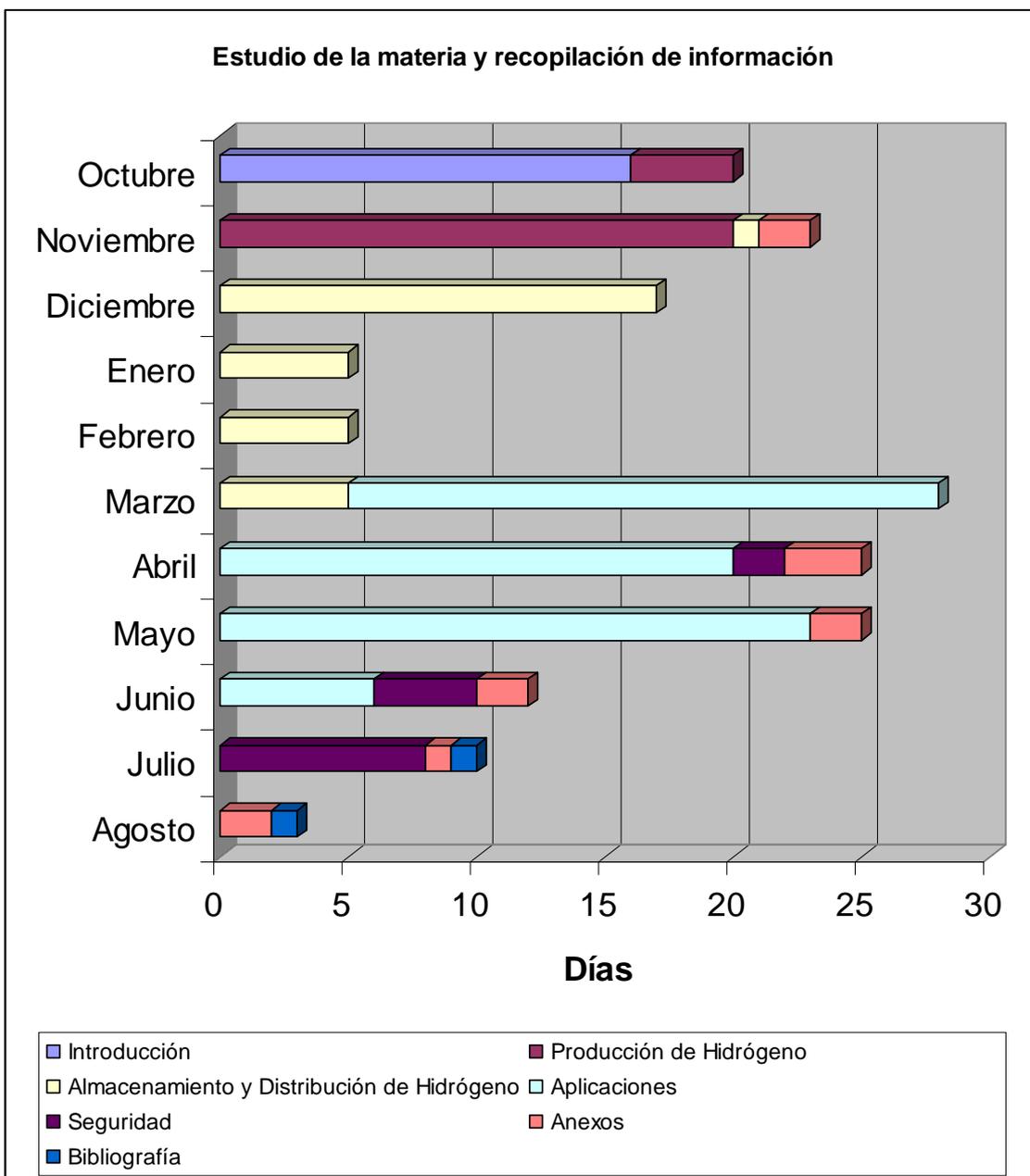


5.1.1. Mitigación de riesgos de diseño.....	317
5.1.1.1. Fragilización y ataque por hidrógeno.....	317
5.1.1.2. Materiales no metálicos.....	318
5.1.2. Consideraciones de limpieza.....	319
5.1.3. Almacenamiento y utilización de botellas de gases comprimidos.....	319
5.1.4. Ficha de seguridad del hidrógeno.....	322
5.1.5. Normativa.....	325
5.2. Seguridad: desarrollos futuros.....	331
5.3. Mercado CE y homologación.....	331
6. Anexos.....	335
6.1. Introducción y fundamentos básicos de reacciones químicas de transferencia de electrones.....	335
6.1.1. Concepto de oxidación y reducción.....	336
6.1.2. Concepto de pilas electroquímicas.....	337
6.1.2.1. Ejemplo: Pila Daniell.....	339
6.1.2.2. Pilas y baterías comerciales.....	340
6.1.2.3. Química, tecnología y medio ambiente.....	344
6.2. Práctica I: Realización de una práctica en “Procesos de Hidrógeno y Pilas de Combustible” en el Parque Tecnológico Walqa.....	346
6.3. Práctica II: Asistencia a la presentación del Proyecto HYRREG.....	354
7. Bibliografía	
7.1. Referencia de libros.....	356
7.2. Referencia de páginas web y enlaces de interés.....	356



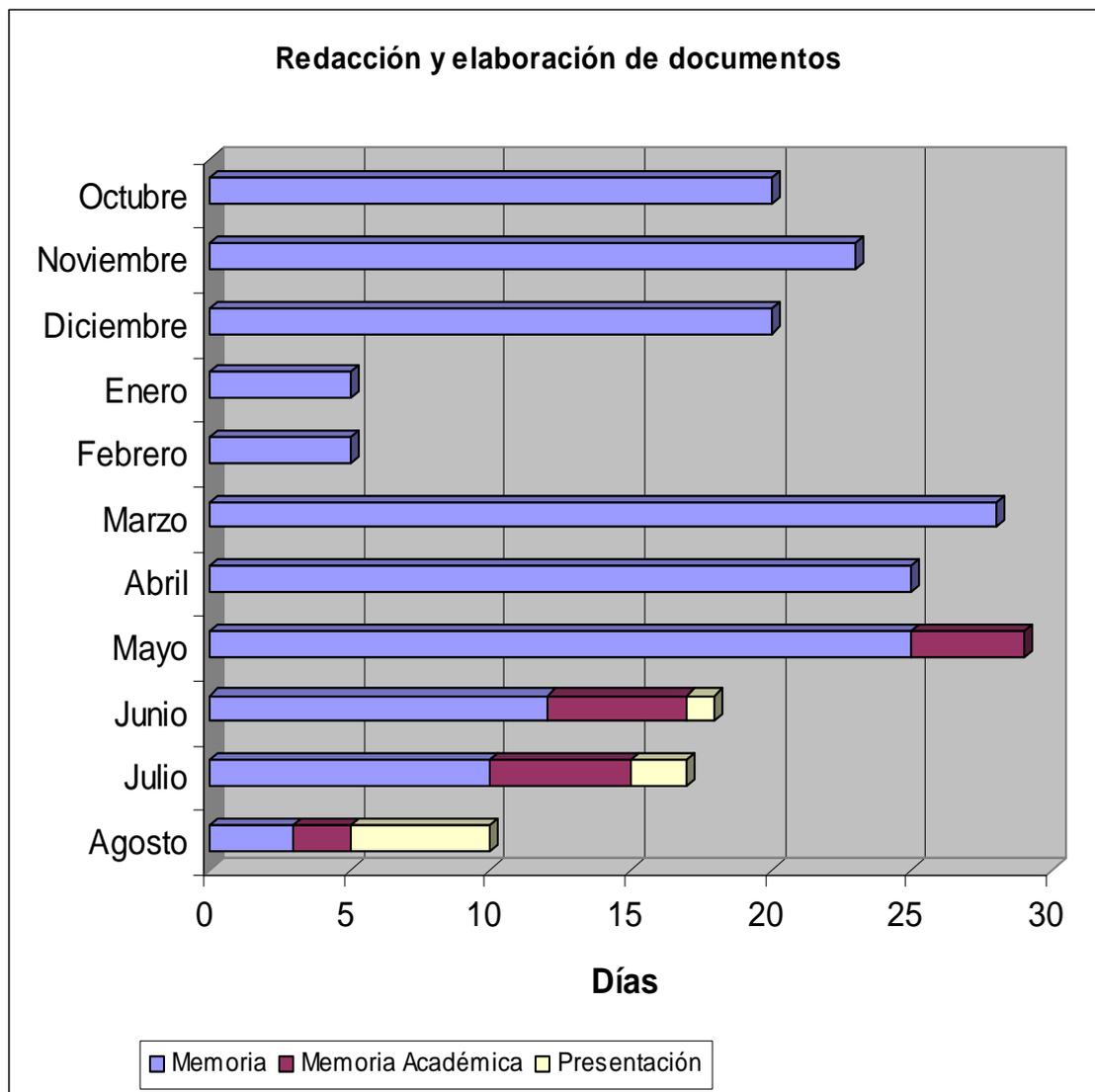
3. Planificación del proyecto

- Estudio de la materia y recopilación de información.





- Redacción y elaboración de documentos.





4. Ejecución y seguimiento tutorial

Durante el estudio, documentación y redacción de este proyecto, se ha llevado a cabo un control y seguimiento continuo en cada fase de ejecución. En el siguiente cuadro se muestra una relación de todas las reuniones producidas entre el alumno de Ingeniería Técnica Industrial, de especialidad Electrónica Industrial, Iván Cid Jiménez, y el director del proyecto, Don Miguel Ángel Torres Portero, desde el inicio de proposición del mismo, en Junio de 2009, hasta su finalización en Septiembre de 2010. También se adjuntan las fechas de visitas realizadas a instalaciones de interés para el desarrollo del proyecto durante el mismo periodo.

Reunión 1
Fecha: 15 de Junio de 2009
Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero
Asuntos Tratados: Proposición de la temática del proyecto y condiciones de elaboración.

Reunión 2
Fecha: 29 de Septiembre de 2009
Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero
Asuntos Tratados: Presentación de un índice provisional, orientación sobre la temática y objetivos a estudiar.

Reunión 3
Fecha: 24 de Octubre de 2009
Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero
Asuntos Tratados: Exposición del primer documento de la Memoria, titulado “Introducción”



Reunión 4

Fecha: 28 de Noviembre de 2009

Destinatario: Ismael Aso

Asuntos Tratados:

Práctica en “Procesos de Hidrógeno y Pilas de Combustible” realizada en la Fundación para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón, en el Parque Tecnológico Walqa, Huesca

Reunión 5

Fecha: 30 de Noviembre de 2009

Destinatario: Sala de la Corona, Edificio Pignatelli, sede de la Diputación General de Aragón

Asuntos Tratados:

Presentación de la hoja de ruta del proyecto HYRREG, de alcance europeo

Reunión 6

Fecha: 9 de Marzo de 2010

Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero

Asuntos Tratados:

Exposición de la Memoria del Proyecto, adjuntando dos nuevos documentos, “Producción de Hidrógeno” y “Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno”, para su análisis

Reunión 7

Fecha: 22 de Junio de 2010

Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero

Asuntos Tratados:

Muestra de la evolución del proyecto para posibles correcciones, incluido el cuarto



documento, “Aplicaciones” y obtención de información sobre la realización de la Memoria Académica.

Reunión 8

Fecha: 21 de Julio de 2010

Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero

Asuntos Tratados:

Exposición del siguiente documento, “Seguridad”

Reunión 9

Fecha: 23 de Agosto de 2010

Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero

Asuntos Tratados:

Exposición de la Memoria acabada

Reunión 10

Fecha: 25 de Agosto de 2010

Destinatario: Miguel Ángel Torres Portero

Asuntos Tratados:

Muestra de la versión final de la Memoria del proyecto y obtención de información relativa a la defensa del proyecto en Septiembre.

Adicionalmente a estas reuniones, se ha producido un contacto on-line permanente vía e-mail, que ha permitido un control y seguimiento con mayor profundidad fuera del horario de tutorías.



5. Balance de horas

Trabajo personal realizado:

Materia	Tiempo destinado
Introducción	70 horas
Producción de Hidrógeno	180 horas
Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno	200 horas
Aplicaciones	240 horas
Seguridad	150 horas
Anexos	120 horas
Presentación CD	15 horas
Maquetación	25 horas
Reuniones y consultas presenciales con el director del proyecto y visitas	25 horas
Otros	25 horas
Total	1.050 horas



6. Conclusiones personales

En el momento en el que decidí realizar el Proyecto Final de Carrera, me decanté por el hidrógeno como vector energético porque, personalmente, siempre me ha parecido una tecnología que, pese a la simplicidad de su síntesis, nos ofrece la posibilidad de transformar tanto la sociedad actual para bien que, de alguna manera, tenía que sentirme ligado a ella y a su difusión.

La energía eléctrica producida por pilas de combustible, de mayor o menor tamaño, conectadas o desconectadas de la red eléctrica, nos ofrece una posibilidad inigualable de almacenar, en forma de hidrógeno puro, la energía renovable que tantas veces hay que desechar por culpa de los caprichos de la demanda energética. Además, nos abre la puerta a un mundo en el que los ruidos y los gases nocivos pueden, si no decir adiós, dejar de ser una preocupación para la humanidad.

Actualmente, diversos son los campos de investigación relacionados con este vector energético y en todos ellos se esperan y obtienen siempre resultados prometedores y contundentes. Mientras el sistema energético que conocemos hoy en día va tocando a su fin, cada vez se hace más evidente que no podemos seguir basándonos en un sistema parecido, habrá que cambiar a uno mejor que nos ofrezca seguir creciendo a un ritmo que nos permita satisfacer nuestras áreas económicas, personales y a la vez, medioambientales.

Una vez concluido el proyecto, y gracias a los conocimientos que he adquirido en su realización, he descubierto una rama de la ingeniería que desconocía y a la cual espero ver crecer con paso firme en años venideros y ser una persona que pueda entender la base de su filosofía para poder dedicarme a ella en un futuro no muy lejano.



7. Agradecimientos

Este proyecto fin de carrera no se habría podido realizar sin la colaboración de muchas personas que me han prestado su ayuda, sus conocimientos y su apoyo. Quiero agradecerles a todos ellos cuanto han hecho por mí, para que este proyecto saliera adelante de la mejor manera posible.

Quedo especialmente agradecido con mi director del proyecto, Miguel Ángel Torres Portero, por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto, así como por su entera disposición para orientarme y ayudarme durante estos meses ante todas las dudas y dificultades que han ido surgiéndome en su realización.

A Ismael Aso, miembro de la Fundación para el Desarrollo de Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón y del CIRCE, por su entera disposición para resolverme cualquier duda acerca de este apasionante mundo, así como de facilitarme el acceso a realizar la Práctica en Procesos de Hidrógeno y Pilas de Combustible en dicha Fundación, sita en el Parque Tecnológico Walqa, en Huesca.

A mi familia, por insistirme en que no decayese jamás en el empeño de dedicarme a lo que me gusta y el llevarlo a cabo.

A mis amigos y amigas, tanto de Zaragoza como de Pina de Ebro, que me han ayudado sobremanera a desconectar muchos fines de semana para recargar las pilas y volver al trabajo con más ganas e ilusión si cabe.

También a mis amigos y amigas de la carrera de Ingeniería Técnica Industrial, ya que entre todos hemos formado un gran equipo humano de estudio que no dejaba que nadie se quedase atrás.

No podría finalizar estos agradecimientos sin nombrar a Tamara, mi pareja, la cual ha tenido el mérito de arrastrarme a realizar este Proyecto Final de Carrera incluso en días en los que ningún otro lo habría logrado. Sin ella, seguramente se habrían retrasado los plazos que yo mismo concluí. Gracias a ella, puedo entregarlo a tiempo y de la manera que había soñado.

Gracias.



8. Bibliografía

Principales publicaciones examinadas:

- *Economía de hidrógeno*, Jeremy Rifkin, 2002
- *El fin del petróleo*, Paul Roberts, 2004
- *Energías alternativas y tradicionales. Sus problemas ambientales*, Antonio Lucena Bonny, 1998
- *Energías renovables*, Antonio Creus Solé, 2004
- *Química 2*, Luis A. Oro, José Luis Andreu, Mari Cruz Fernández y Jesús J. Pérez-Torrente, 1997
- *Hidrógeno como vector energético*, Conferencia a cargo de Don Antonio González García-Conde, Director del Departamento de Aerodinámica y Propulsión del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y Presidente de la Asociación Española de Hidrógeno.

Enlaces de interés:

- www.opti.org
- <http://es.encarta.msn.com>
- <http://www.textoscientificos.com>
- <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/h.htm>
- http://www.fuelcellstandards.com/international_loc.html
- http://www.energiasostenible.net/laboratorio_hidrogeno.htm
- http://www.energiasostenible.net/indice_temas.htm
- <http://www.gepec.org>



- www.h2stations.org
- www.h2movility.org
- <http://neofronteras.com/>
- <http://es.motorfull.com/2008/09/la-produccion-actual-de-hidrogeno-podria-abastecer-a-mas-de-100-millones-de-coches>
- <http://www.iea.org>
- <http://www.ingenieroambiental.com/2020/Hidrogeno%20a%20partir%20de%20GN%20sin%20contaminar.pdf>
- http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress07_production.html
- http://www.mrn.gouv.qc.ca/english/publications/energy/path_future.pdf
- [http://www.madrimasd.org/cimtan/Informes/Informes_GetFile.aspx?id=8731&or
derid=0](http://www.madrimasd.org/cimtan/Informes/Informes_GetFile.aspx?id=8731&or
derid=0)
- <http://jamesadumesic.che.wisc.edu/home.htm>
- <http://news.soliclima.com/>
- http://energiasolarfotovoltaica.blogspot.com/2006/01/instalaciones-fotovoltaicas-aisladas_29.html
- <http://sustainable-tech.inf.um.es/imag/hidrogeno3.gif>
- <http://www.phototrek.org>
- <http://h2training.eu/>



- <http://www.scribd.com/doc>
- <http://www.textoscientificos.com>
- www.fisicanet.com
- www.motorpasion.com/chevrolet
- www.cocheshidrogeno.es
- www.supermotor.com
- www.automocionblog.com
- www.eleconomista.es
- www.gmeurope.info
- www.automobiles.honda.com
- www.diariomotor.com
- www.cocheseco.com
- www.deautomoviles.com
- www.supermotor.com
- www.hyrreg.eu



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA

