



Trabajo Fin de Grado

Análisis de prestaciones de un tren mixto viajeros – mercancías propulsado por hidrógeno en la línea Zaragoza – Canfranc Estación.

Performance analysis of a mixed passenger and freight train powered by hydrogen on the Zaragoza – Canfranc Station line.

Autor/es

Paula Conrat Estonllo

Director/es

Emilio Larrodé Pellicer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

2021

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a mi tutor Emilio Larrodé, por aceptar la idea que le propuse, por su ayuda y dedicación en este proyecto.

También a mis padres por ser mis referentes, por estar ahí en todo momento apoyándome y creyendo en mí, gracias.

Y por último, pero más importante, gracias a Darío por estar siempre a mi lado incondicionalmente.

RESUMEN

En el presente trabajo se ha llevado a cabo el análisis de prestaciones de un tren mixto para viajeros y mercancías, impulsado por pila de combustible de hidrógeno y el estudio de su implantación de la línea Zaragoza – Canfranc.

Para ello, se ha caracterizado la línea desde el punto de vista topográfico mediante el uso de la aplicación de Google Earth Pro, con la que se ha obtenido las coordenadas, la altitud y la distancia punto a punto. Las velocidades máximas de cada tramo han sido proporcionadas por Adif y se han ajustado para asemejarse lo máximo posible a la realidad.

Posteriormente, se ha calculado la pendiente del terreno, la aceleración en los tramos que había variación de velocidad y las resistencias de avance, que se obtienen mediante la suma de las resistencias debidas a la rodadura, las rampas y pendientes, las curvas, la inercia y las debidas al efecto que produce el viento o las interferencias aerodinámicas. Con todos estos datos, la línea quedaría caracterizada completamente para su estudio.

Después se ha procedido a la caracterización del vehículo que realiza la ruta, calculando la potencia máxima que soporta, el tiempo que tarda, la energía consumida total del trayecto, el consumo de combustible y, en el caso del vehículo diésel, las emisiones de CO₂.

Paralelamente, se ha seguido la misma metodología en la ruta por la que circula el tren Coradia iLint, que es el primer convoy de hidrógeno desarrollado que está en circulación en Alemania, desde la ciudad de Cuxhaven hasta Buxtehude.

En otro apartado, se ha detallado la situación actual de la infraestructura, el material móvil que circula por las dos rutas, y el resultado de la explotación de ambas líneas ferroviarias.

Una vez estudiados en profundidad los dos trayectos, se realizan los cálculos implantando el Coradia iLint en la línea Zaragoza – Canfranc, para posteriormente compararlo con los resultados obtenidos del mismo, pero en su línea de origen, en Alemania. De esa forma se efectúa la relación de la potencia máxima que soporta en ambas líneas, y se dimensiona la potencia de la pila de combustible, la batería y la capacidad del tanque de hidrógeno. En base a esto, se obtienen las características del nuevo tren de hidrógeno en la línea Zaragoza – Canfranc.

Seguidamente, se ha efectuado la simulación de los flujos de transporte para el funcionamiento actual de la línea, con una duración de 4 horas por viaje. A continuación, se ha realizado el cálculo de prestaciones variando la velocidad, con el objetivo de reducir la duración del tiempo de viaje primero a 3 horas y después a 2 horas y media. Volviendo a efectuar la simulación de los flujos de transporte para compararlos.

En definitiva, se presenta la evidencia de que un tren propulsado por hidrógeno, puede mejorar los tiempos del recorrido del viaje, permitiendo aumentar la demanda de usuarios y reducir las emisiones contaminantes causadas por el transporte de pasajeros y de mercancías.

ABSTRACT

In this Final Degree Project, the analysis of the performance of a mixed train for passengers and goods, powered by hydrogen fuel cell, has been carried out; and the study of its implementation on the Zaragoza – Canfranc line.

In order to achieve this, the line has been characterized from the topographic point of view through the use of the Google Earth Pro application, with which the coordinates, altitude and distance point to point have been obtained. The maximum speeds of each section have been provided by Adif and have been adjusted to resemble reality as much as possible.

Subsequently, the slope of the terrain, the acceleration in the sections that had variation in speed and the advance resistances have been calculated, which are obtained by adding the resistances due to the rolling, the ramps and slopes, the curves, the inertia and those due to the effect produced by the wind or the aerodynamic interferences. With all these data, the line would be completely characterized for study.

Then we proceeded to the characterization of the vehicle that makes the route, calculating the maximum power it supports, the time it takes, the total energy consumed of the journey, fuel consumption and, in the case of the diesel vehicle, CO₂ emissions.

At the same time, the same methodology has been followed on the route on which the Coradia iLint train runs, which is the first developed hydrogen convoy that is in circulation in Germany, from the city of Cuxhaven to Buxtehude.

In another section, the current situation of the infrastructure, the rolling stock that circulates on the two routes, and the result of the operation of both railway lines have been detailed.

Once the two routes have been studied in depth, the calculations are made by implanting the Coradia iLint on the Zaragoza – Canfranc line, to later compare it with the results obtained from it, but in its origin line, in Germany. In this way, the ratio of the maximum power it supports in both lines is made, and the power of the fuel cell, the battery and the capacity of the hydrogen tank are dimensioned. Based on this, the characteristics of the new hydrogen train on the Zaragoza – Canfranc line are obtained.

Next, the simulation of the transport flows for the current operation of the line has been carried out, with a duration of 4 hours per trip. Later, the calculation of performance has been made by varying the speed, with the aim of reducing the duration of the travel time first to 3 hours and then to 2 and a half hours. Returning to perform the simulation of each transport flows to compare them.

In short, the evidence that a train powered by hydrogen can improve the times of the journey of the trip is presented, allowing to increase the demand of users and reduce the polluting emissions caused by the transport of passengers and goods.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	6
ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FÓRMULAS	12
ÍNDICE DE REACCIONES.....	11
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Objeto y justificación.....	13
1.2 Alcance	13
1.3 Situación actual.....	13
2 ESTADO DEL ARTE	15
2.1 El hidrógeno aplicado al ferrocarril.....	15
2.1.1 El hidrógeno como fuente de energía	15
2.1.2 Estructura del tren de hidrógeno	16
2.1.2.1 Pilas de combustible.....	17
2.1.2.2 Baterías de iones de litio	18
2.1.2.3 Almacenamiento y suministro del hidrógeno.....	18
2.2 Uso del hidrógeno en líneas de transporte ferroviario.....	19
2.2.1 Coradia iLint	19
2.2.2 HydroFlex	19
2.2.3 Talgo Vittal – One	20
2.2.4 Comparativa	21
3 METODOLOGÍA.....	22
3.1 Descripción de la metodología	22
3.2 Caracterización de la línea.....	22
3.2.1 Cálculo de las resistencias	26
3.3 Caracterización del vehículo	30
3.3.1 Cálculo de la potencia y el tiempo.....	30
3.3.2 Cálculo de la energía consumida por la tracción del vehículo.....	31
3.3.3 Energía utilizable proporcionada por el hidrógeno.....	33
3.3.4 Energía de los sistemas auxiliares.....	34
4 ESTUDIO TÉCNICO.....	35
4.1 Análisis actual de la línea Zaragoza – Canfranc.....	35
4.1.1 Infraestructura	35

4.1.2	Material móvil.....	39
4.1.3	Explotación	39
4.2	Análisis de la línea Cuxhaven – Buxtehude	43
4.2.1	Infraestructura.....	43
4.2.2	Material móvil.....	45
4.2.3	Explotación	45
4.3	Análisis de la línea Zaragoza – Canfranc con tren de hidrógeno	48
4.3.1	Infraestructura.....	48
4.3.2	Implantación del Coradia iLint	48
4.3.3	Diseño del nuevo tren de hidrógeno	49
4.3.4	Flujo de transporte	51
4.4	Prestaciones	51
4.4.1	Velocidad Serie 596.....	52
4.4.2	Reduciendo el tiempo del recorrido un 25%.....	52
4.4.3	Reduciendo el tiempo del recorrido un 35%.....	53
5	ESTUDIO DE EXPLOTACIÓN	54
5.1	Análisis de la demanda	54
5.1.1	Demandas de combustible en función del tiempo	54
5.1.2	Demandas en función de la estación del año.....	54
5.2	Flujos de transporte	55
5.3	Costes.....	56
5.3.1	Coste de inversión en infraestructura.....	56
5.3.2	Coste de inversión en material móvil.....	58
5.3.3	Coste de explotación y mantenimiento.....	58
5.4	Flujos futuros y comercialización.....	58
5.4.1	Tráfico de autobuses	58
5.4.2	Tráfico de mercancías	58
5.4.3	Impacto cultural	59
6	PROYECTOS FUTUROS	60
6.1	Conexión con Francia.....	60
6.2	Tren de hidrógeno en el territorio nacional	60
7	CONCLUSIONES	62
8	REFERENCIAS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones globales de gases de efecto invernadero	14
Figura 2. Partes del tren de hidrógeno de Alstom.....	16
Figura 3. Esquema de funcionamiento del Coradia iLint.	17
Figura 4. Pila de combustible.....	17
Figura 5. Esquema con la metodología de análisis utilizada.	22
Figura 6. Tramo del recorrido de Zaragoza a Canfranc.....	23
Figura 7. Ruta completa desde Zaragoza hasta Canfranc.	23
Figura 8. Ruta completa desde Cuxhaven hasta Buxtehude.	23
Figura 9. Perfil de elevación en la línea Zaragoza – Canfranc.	24
Figura 10. Perfil de elevación en la línea Cuxhaven – Buxtehude.	24
Figura 11. Obtención de la distancia a cada punto con TCX Converter.....	25
Figura 12. Pendientes características Adif.....	26
Figura 13. Obtención de radios mediante Google Earth.	29
Figura 14. Paradas y velocidades máximas en la línea Zaragoza Canfranc.	35
Figura 15. Paradas y velocidades reales en la línea Zaragoza Canfranc.....	35
Figura 16. Trazado del recorrido.....	36
Figura 17. (derecha) Ancho de vía y longitud máxima.....	36
Figura 18. (izquierda) Tipo de electrificación y velocidades máximas.	36
Figura 19. Tipo de vía en el tramo de Zaragoza a Tardienta.	37
Figura 20. Perfil de la ruta y tramos de electrificación.....	37
Figura 21. Tipo de vía en el tramo de Tardienta a Huesca.	38
Figura 22. Tipo de vía en el tramo de Huesca a Canfranc.....	38
Figura 23. Trazado del recorrido alemán.....	44
Figura 24. Tramo de Cuxhaven a Bremerhaven.....	44
Figura 25. Estación de Buxtehude.	45
Figura 26. Esquema del nuevo tren de hidrógeno.....	50
Figura 27. Malla horaria.....	51
Figura 28. Malla horaria para un trayecto de 3 horas.	55
Figura 29. Malla horaria para un trayecto de 2 horas y 35 minutos.	56
Figura 30. Plataforma logística de Plaza.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precios según el tipo de hidrógeno.	16
Tabla 2. Características técnicas Coradia iLint.	19
Tabla 3. Características técnicas HydroFlex.....	20
Tabla 4. Características Talgo Vittal – One.....	20
Tabla 5. Superficie frontal del Coradia iLint y de la serie 596 de Renfe.....	27
Tabla 6. Características técnicas Citadis Tramabaix y serie 465 Civia.	34
Tabla 7. Características técnicas Serie 596 Renfe.	39
Tabla 8. Horarios y frecuencia línea Zaragoza – Canfranc. Elaboración propia.	39
Tabla 9. Horarios y frecuencia de los trenes de mercancías.	40
Tabla 10. Cálculo de las resistencias en el tramo de Santa María y la Peña.....	40
Tabla 11. Cálculo de potencias, tiempos y energías en el tramo de Santa María y la Peña.	41
Tabla 12. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el Serie 596 Renfe.	43
Tabla 13. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el Serie 596 Renfe.	43
Tabla 14. Características técnicas Coradia Lint 41.....	45
Tabla 15. Horarios y frecuencia línea Buxtehude – Cuxhaven.....	46
Tabla 16. Resumen características Coradia iLint.....	47
Tabla 17. Resultados de Cuxhaven a Buxtehude con el Coradia iLint.....	47
Tabla 18. Resultados de Buxtehude a Cuxhaven con el Coradia iLint.....	47
Tabla 19. Resultados diarios del Coradia iLint.	48
Tabla 20. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el Coradia iLint.	49
Tabla 21. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el Coradia iLint.	49
Tabla 22. Comparativa Coradia iLint con el nuevo tren de hidrógeno.	50
Tabla 23. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el nuevo tren de hidrógeno.	52
Tabla 24. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el nuevo tren de hidrógeno.	52
Tabla 25. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el nuevo tren de hidrógeno.	52
Tabla 26. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el nuevo tren de hidrógeno.	53
Tabla 27. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el nuevo tren de hidrógeno.	53
Tabla 28. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el nuevo tren de hidrógeno.	53
Tabla 29. Consumo de combustible en función del tiempo.	54
Tabla 30. Demanda en función de la estación del año.....	55
Tabla 31. Coste de la hidrogenera en función de la capacidad y generación.	57

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Cálculo de la pendiente.	25
Fórmula 2. Cálculo de la aceleración.	26
Fórmula 3. Cálculo de la resistencia de avance.	26
Fórmula 4. Cálculo de la resistencia aerodinámica.	27
Fórmula 5. Cálculo de la resistencia debida a la pendiente.	27
Fórmula 6. Cálculo de la resistencia de inercia.	28
Fórmula 7. Cálculo de la resistencia de avance.	28
Fórmula 8. Cálculo de la resistencia a la curva.	28
Fórmula 9. Cálculo de la resistencia global.	29
Fórmula 10. Cálculo del límite adherencia.	30
Fórmula 11. Cálculo de la potencia necesaria.	30
Fórmula 12. Conversión.	30
Fórmula 13. Condición de potencias.	30
Fórmula 14. Movimiento uniforme acelerado.	31
Fórmula 15. Movimiento uniforme.	31
Fórmula 16. Ecuación del movimiento.	31
Fórmula 17. Cálculo del trabajo resistente.	31
Fórmula 18. Cálculo la energía potencial.	32
Fórmula 19. Cálculo de la energía cinética.	32
Fórmula 20. Trabajo resistente motor.	32
Fórmula 21. Condición trabajo resistente freno.	32
Fórmula 22. Condición trabajo del motor.	33
Fórmula 23. Energía consumida por el motor.	33
Fórmula 24. Energía que proporciona el hidrógeno.	33
Fórmula 25. Condición energías.	34
Fórmula 26. Obtención de la resistencia aerodinámica.	41
Fórmula 27. Obtención de la potencia.	41
Fórmula 28. Obtención del trabajo resistente.	42
Fórmula 29. Cálculo del peso del tren lleno.	42

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto y justificación

El objetivo de este trabajo es el análisis de prestaciones de un tren mixto para viajeros y mercancías traccionado por motores eléctricos alimentados a través de pilas de combustible de hidrógeno y el estudio de su implantación en la línea Zaragoza – Canfranc Estación.

La utilización de tecnologías de tracción en base al hidrógeno permitirá reducir las emisiones contaminantes, impulsando una línea mixta de pasajeros – mercancía ligera, que pudiese reactivar la economía de las comarcas, mediante la creación de nodos comerciales unidos por una línea de ferrocarril, permitiendo así la optimización de los viajes.

1.2 Alcance

En el primer apartado se expondrán las características del hidrógeno como combustible, los distintos tipos que existen, sus procesos de obtención y el coste actual de cada uno de ellos, en el mercado. Después se presentarán los prototipos de trenes de hidrógeno desarrollados en diferentes países.

Posteriormente, se va a llevará a cabo un estudio del trazado de la línea Zaragoza – Canfranc, analizando condiciones topográficas del terreno como las rampas, pendientes y curvas, así como la infraestructura que posee, que será lo que defina las limitaciones de velocidad de cada tramo y los tiempos.

De la misma manera, se realizará en Alemania, para la línea Cuxhaven – Buxtehude, con la finalidad de estudiar detalladamente la operatividad y las prestaciones que posee el tren de hidrógeno Coradia iLint, para posteriormente implantarlo en la línea española.

Después se realizará una comparativa de los resultados obtenidos con el Coradia iLint en la ruta alemana y en la española, gracias a esto, se obtendrán las características más óptimas que debería tener el tren de hidrógeno que se va a implantar en la línea Zaragoza – Canfranc.

Una vez creado el nuevo tren, se caracterizarán sus prestaciones, se realizará un análisis de la demanda, se simularán los flujos de transporte, una descripción de los costes que conllevaría y algunas estrategias para fomentar su uso.

Por último, se presentarán los futuros desarrollos en los que está presente la tecnología del hidrógeno que tiene un gran potencial para ser el combustible del futuro.

1.3 Situación actual

El cambio climático supone un grave problema medioambiental que está provocando consecuencias negativas en el planeta, como las condiciones meteorológicas extremas, el deshielo y el aumento del nivel del mar, entre otras. Uno de los factores determinantes, es el excesivo aumento de emisiones de gases de efecto invernadero debido a la quema de combustibles fósiles, como la gasolina y el gas natural; motivado por la gran demanda energética mundial, derivado en parte al crecimiento del uso del transporte.

Center for climate and energy solutions, analiza las emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2015. La emisión de CO₂ es mayoritaria, representando un 76 % con respecto a otros gases como el metano, el óxido de nitrógeno y los gases fluorados.

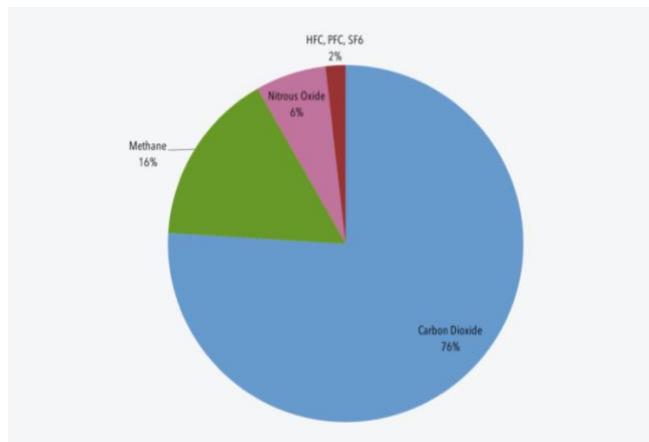


Figura 1. Emisiones globales de gases de efecto invernadero. [1]

Ante esta situación países de todo el mundo han alcanzado acuerdos climáticos con vistas al 2.050 donde, entre otras medidas, se comprometen a la descarbonización de la economía, para frenar el cambio climático.

Con el fin de hacer frente a este problema mundial, se está desarrollando un nuevo sistema ferroviario, que esté alimentado por celdas de combustible de hidrógeno, funciona con una tecnología libre de emisiones contaminantes, únicamente emite vapor de agua.

En la línea ferroviaria española que une Zaragoza y Canfranc, también conocida como línea 56, actualmente circula la Serie 596 de Renfe, que es una familia de automotores diésel.

La actual línea consta de un total de 17 paradas y una longitud aproximada de 226 kilómetros de vía, siendo ésta única para ambos sentidos. Comienza en la ciudad de Zaragoza y hasta Huesca presenta un terreno llano, con curvas de grandes radios; sin embargo, en el trayecto que parte de Huesca a Canfranc se alcanza una altitud de hasta 1.220 metros, con gran cantidad de puentes, túneles, y una predominancia de giros de radios pequeños.

Implantando en la línea Zaragoza – Canfranc un sistema que funcione con pilas de combustible de hidrógeno se conseguiría emplear una fuente de energía renovable sustituyendo el consumo de diésel y contribuyendo a la descarbonización del transporte, sin la necesidad de establecer la compleja infraestructura de una vía electrificada en una zona con altitudes elevadas, además de los altos costes que esto supondría.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El hidrógeno aplicado al ferrocarril

2.1.1 El hidrógeno como fuente de energía

El hidrógeno es un gas no tóxico, incoloro, inodoro; presente en el agua, en los hidrocarburos y toda la materia orgánica. Este gas no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, sino que debe separarse para estar disponible en su forma más pura.

El hidrógeno como combustible ofrece de 2 a 3 veces más energía que otros combustibles, ya que posee mayor energía de combustión por kilo (120 MJ/kg) que cualquier otro, convirtiéndolo en un combustible muy eficiente. En términos de energía, la energía liberada por 1 kilogramo de hidrógeno equivale a 2,78 kilos de gasolina.

Se utiliza en un gran número de aplicaciones en la industria como la síntesis de amoníaco, refinerías de petróleo... En el sector del transporte, este componente puede servir como combustible para turbinas de gas y células de combustible.

El principal problema del uso del hidrógeno como fuente de energía reside en el coste y la dificultad de producción de este gas, puesto que demanda una gran cantidad de energía.

En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de hidrógeno, los cuales se diferencian por su proceso de obtención y las emisiones generadas:

- El hidrógeno marrón se obtiene a partir del carbón y genera emisiones a la atmósfera, siendo CO₂ el principal subproducto.
- El hidrógeno gris se produce mediante el gas natural, generando a su vez emisiones con gran cantidad de CO₂.
- El hidrógeno azul se obtiene a partir de combustibles fósiles, al igual que el marrón o el gris, pero a diferencia de éstos, se captura el dióxido de carbono, para ser almacenado o reutilizado, de manera que no se emite a la atmósfera. Es el proceso más utilizado a escala industrial.
- El hidrógeno verde se consigue mediante el proceso de electrólisis utilizando electricidad generada por energías renovables. Es la tecnología más limpia porque no se genera dióxido de carbono.

Como se ha comentado anteriormente para el año 2.050 uno de los objetivos marcados por diferentes países del mundo, es la reducción de las emisiones de gases en el sector del transporte. Utilizando el hidrógeno como fuente de energía, en concreto el verde, se contribuiría con el objetivo, ya que no se producirían emisiones; o el azul que, aunque se produce CO₂, éste es sometido a un proceso de captura y almacenamiento bajo tierra, minimizando el impacto ambiental que pudiera producir su emisión.

Además, para ese mismo año, se estima que la demanda del hidrógeno verde, producido a partir de energías renovables, aumente y el precio disminuya a la mitad con respecto al actual, para fomentar su venta.

La Tabla 1 recoge los precios del hidrógeno gris, azul y verde en el mercado actual:

Tabla 1. Precios según el tipo de hidrógeno. [3]

	Precio por kg	Precio por MWh
Hidrógeno gris	0,8 – 1,6 €	24 – 49 €
Hidrógeno azul	1,3 – 2,2 €	40 – 67 €
Hidrógeno verde	3,5 – 5 €	162 €

Toda la información acerca de la obtención de los distintos tipos de hidrógeno, se encuentra en el Anexo 1.

2.1.2 Estructura del tren de hidrógeno

El tren impulsado mediante celdas de combustible de hidrógeno es una tecnología en fase experimental. En la actualidad, se ha desarrollado en Alemania un tren de pila de combustible para pasajeros que ha superado con éxito las pertinentes pruebas de funcionamiento. Este tren es el Coradia iLint, de la empresa Alstom, el cuál se va a tomar como referencia a lo largo del proyecto.



Figura 2. Partes del tren de hidrógeno de Alstom. [4]

En la parte inferior, el tren dispone de un motor eléctrico incrustado en el chasis, unas baterías de iones de litio, que almacenan la energía que no es necesaria para la tracción y aprovecha la energía del frenado del tren; un convertidor de CC/CA y CA/CC y un convertidor auxiliar.

Por encima de la cabina, se encuentran los dos tanques de almacenamiento de hidrógeno en fase gas, que empleará el tren como combustible a lo largo de su recorrido. Las celdas de combustible están situadas en el centro de la parte superior del tren, suministrarán la energía de a bordo e irán recargando las baterías.

Los tanques de combustible se encuentran a una presión de 350 bar, el hidrógeno procedente de ellos, entra en la celda de combustible junto con el oxígeno del ambiente, generando electricidad y vapor de agua. Después, la energía se distribuye a las baterías, a los inversores y al convertidor auxiliar, donde se transformará la electricidad de corriente continua a alterna para alimentar a los motores eléctricos, que propulsarán el tren; y a los equipos auxiliares como la iluminación, los sistemas de climatización, etc.

Este tren posee la función de frenada regenerativa que permite recuperar un 30% de la energía disipada en cada frenada, obteniendo de esa manera una mayor eficiencia en el uso de la energía.

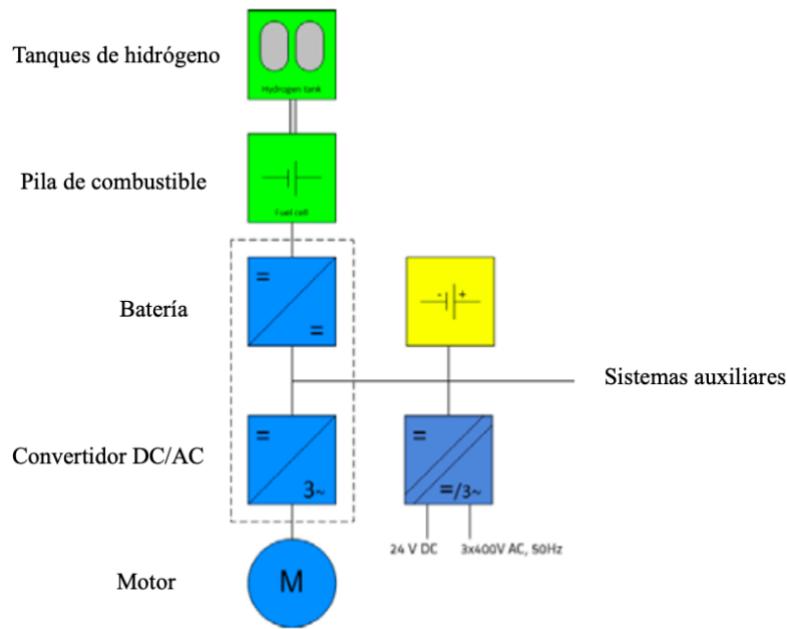


Figura 3. Esquema de funcionamiento del Coradia iLint. [4]

2.1.2.1 Pilas de combustible

Las pilas de combustible, también llamadas celdas de combustible, producen electricidad a través de una combinación del hidrógeno, en su forma pura; y el oxígeno presente en el aire, un proceso químico que deja como únicas emisiones vapor de agua. Con esta nueva tecnología se consigue que durante la combustión no se generen gases contaminantes como el CO₂. La electricidad generada, durante este proceso es almacenada en el paquete de baterías de iones de litio. La pila donde se produce la mezcla se degrada lentamente y posee una vida útil de 10 a 12 años.

Se trata de una forma de generación de energía con eficiencias de aproximadamente un 60%.

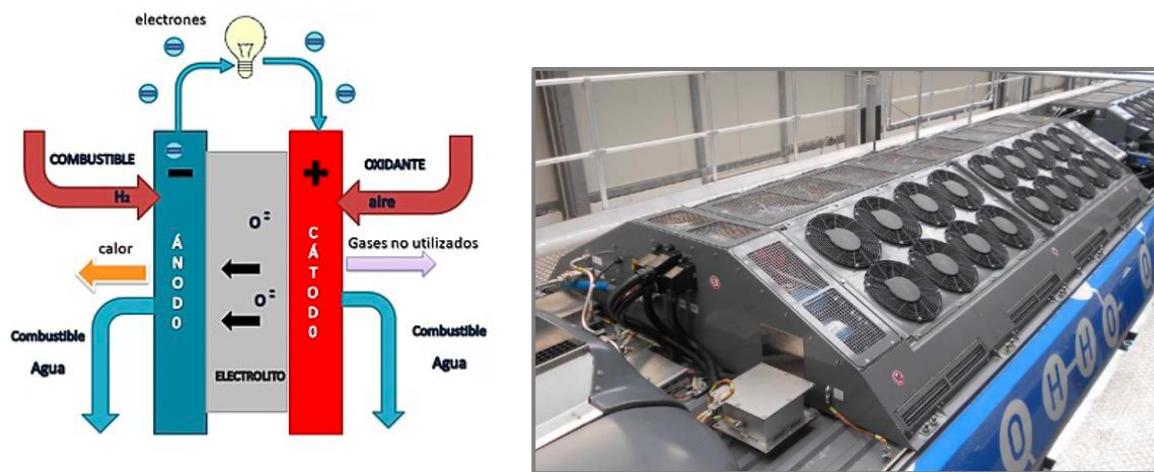


Figura 4. Pila de combustible. Izquierda: [5] Derecha: [6]

2.1.2.2 Baterías de iones de litio

Las pilas de combustible tienen incorporadas baterías de iones de litio que almacenan el exceso de energía producida.

Durante las fases de aceleración, la pila de combustible alimenta al motor eléctrico a través del convertidor, en esta fase la energía adicional será suministrada a las baterías. En las fases de baja aceleración o de avance por inercia, si la batería está lo suficientemente cargada, las pilas de combustible reducen su funcionamiento para alimentar solo a los equipos auxiliares. Esto permite reducir el consumo de hidrógeno.

Durante las fases de frenado, la pila de combustible se desactiva casi por completo, de forma que, la energía obtenida mediante la frenada permite alimentar los equipos auxiliares y recargar las baterías. Este manejo inteligente de las diferentes fuentes de energía, permite ahorrar una gran cantidad de hidrógeno y hacer que el sistema completo sea muy eficiente.

2.1.2.3 Almacenamiento y suministro del hidrógeno

Existen diversas alternativas para almacenar el hidrógeno, dos de ellas son el hidrógeno comprimido y el hidrógeno en estado líquido.

El almacenamiento del hidrógeno en forma de gas presurizado, es el método más común. Para comprimir un kilogramo de hidrógeno a altas presiones en un rango entre 200 y 700 bar, se necesitan entre 10 y 17 MJ, y depósitos para su almacenaje con paredes gruesas y materiales de alta resistencia como el acero, aluminio, etc. para después ser trasladados a los centros de consumo.

La principal diferencia del hidrógeno gaseoso presurizado con el hidrógeno líquido, es el gran volumen que ocupa y el peso, pudiendo llegar a pesar y ocupar un volumen de casi 4 veces más que el líquido.

El problema que presenta la obtención del hidrógeno líquido es que el proceso debe realizarse a temperaturas criogénicas (-240°C), lo que resulta bastante complejo.

Las plantas de producción industrial que generen un exceso de hidrógeno en su producción, pueden suministrarlo, siendo una solución atractiva y económica para los trenes de hidrógeno, con algunos beneficios medioambientales. Muchas plantas químicas utilizan hidrógeno como gas de proceso, como en la refinación de petróleo y gas, la producción de cloro, la síntesis de metanol, la producción de acero, etc.

Una vez que el gas de hidrógeno se purifica y se controla la calidad, el gas puede almacenarse, llenarse en remolques de hidrógeno o bien, distribuirse directamente al punto de uso a través de una tubería.

El correcto almacenamiento de hidrógeno es necesario para poder llevar a cabo el repostaje de los trenes impulsados con esta tecnología, se realiza mediante una estación de servicio de hidrógeno, denominada hidrogenera, consta de un depósito localizado junto a las vías de la estación, con el que se podrá suministrar hidrógeno al tren durante su repostaje en un tiempo estimado de entre 10 y 15 minutos.

2.2 Uso del hidrógeno en líneas de transporte ferroviario

2.2.1 Coradia iLint

El primer tren impulsado por pila de combustible de hidrógeno es el Coradia iLint y, desde 2.018 hasta 2.020, ha estado en funcionamiento en servicio regular en Alemania, entre las ciudades de Cuxhaven y Buxtehude. Actualmente, está en marcha su producción en serie y estará disponible a partir de 2.022 en Alemania y en distintos países de Europa.

El Coradia iLint no fue un tren diseñado y construido desde cero, sino que está basado en el tren regional Coradia Lint 54 impulsado por motores diésel.

Tabla 2. Características técnicas Coradia iLint. Elaboración propia.

Coradia iLint	
Empresa	Alstom
Longitud [m]	54,27
Altura [m]	2,75
Velocidad [km/h]	140
Masa en vacío [t]	105
Autonomía [km]	1.000
Capacidad tanque [kg]	90
Presión tanque [Pa]	350
Consumo de hidrógeno [kg/km]	0,25
Tiempo repostaje [min]	15
Potencia pilas de combustible [kW]	2 x 200
Peso pila de combustible [kg]	72
Potencia batería [kW]	225
Pasajeros	150 sentados
Potencia máxima tren [kW]	2 x 390

En el Anexo 2.1 se detalla toda la información del Coradia iLint.

2.2.2 HydroFlex

La empresa Porterbrook ha desarrollado el tren HydroFlex en Reino Unido, basándose en el tren eléctrico British Rail Class 319. Se encuentra en fase de prueba, y, según la empresa, pretende estar disponible para su funcionamiento y producción a partir de 2.023.

Tabla 3. Características técnicas HydroFlex. Elaboración propia.

HydroFlex	
Empresa	Porterbrook
Longitud [m]	19,83-19,92
Anchura [m]	2,82
Altura [m]	3,85
Velocidad [km/h]	140
Capacidad tanques [kg]	4 x 20
Consumo [kg/km]	0,08
Presión tanque [bar]	8,5
Potencia pila de combustible [kW]	100
Potencia máxima tren [kW]	4 x 247,5

En el Anexo 2.2 se detalla toda la información del tren HydroFlex.

2.2.3 Talgo Vittal – One

Actualmente, la empresa Talgo está trabajando para crear el primer tren de hidrógeno operativo en España en 2.023.

Tabla 4. Características Talgo Vittal – One. Elaboración propia.

Talgo Vittal – One	
Empresa	Talgo
Longitud [m]	75
Anchura [m]	2,9
Velocidad [km/h]	140
Masa en vacío [t]	131
Autonomía [km]	800
Consumo [kg/km]	0,25
Número de ejes	10
Potencia máxima tren [kW]	2 x 1.100

En el Anexo 2.3 se detalla toda la información del Talgo Vittal – One.

2.2.4 Comparativa

Los tres trenes de hidrógeno existentes en el mercado, tienen en común la tecnología que utilizan, su principal diferencia radica en la estructura del tren, siendo el Talgo Vittal – One el de mayor longitud y el que más potencia demanda.

El tren Coradia iLint es el que menor potencia posee y esto puede deberse a que circula por una zona de Alemania llana (detallado en el Anexo 2.1), lo que se comprobará posteriormente que la altura máxima es de 50 metros.

En cuanto al Talgo Vittal – One que es un prototipo que realizará las pruebas en Extremadura, presenta un terreno con grandes contrastes, la altitud varía entre los 130 y 2.400 metros, por lo que necesitará más potencia para aquellas zonas con grandes pendientes.

El tren HydroFlex es del que menos información se posee, debido a que su desarrollo no es tan extenso como los otros.

Lo que los apartados anteriores reflejan es que los vehículos ferroviarios impulsados por hidrógeno actualmente se encuentran en desarrollo y crecimiento en diferentes países del mundo.

3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción de la metodología

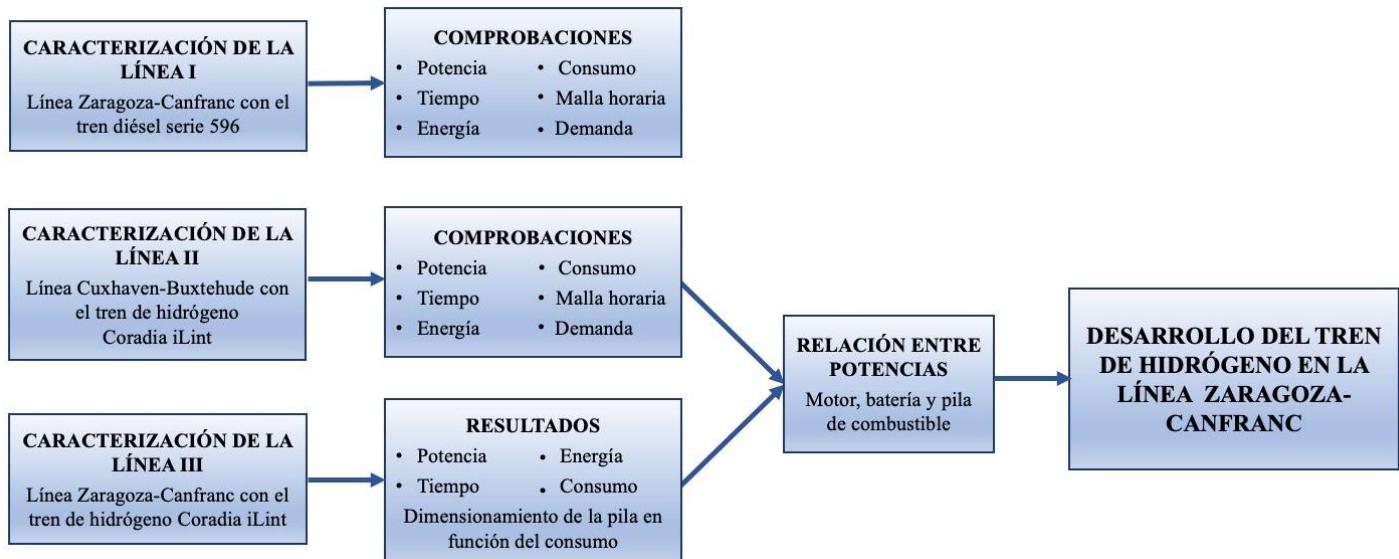


Figura 5. Esquema con la metodología de análisis utilizada. Elaboración propia.

3.2 Caracterización de la línea

Para la caracterización de la línea desde el punto de vista geográfico se ha utilizado la aplicación Google Earth Pro.

Se han tomado puntos desde la estación de tren Zaragoza Delicias hasta Canfranc Estación, pasando por las 17 paradas que tiene esta línea, de esa forma se obtienen los datos geográficos de cada uno de los puntos.

Paralelamente, se ha hecho lo mismo en el trayecto por el que circula el tren Coradia iLint en Alemania, que va desde la ciudad de Cuxhaven hasta Buxtehude, pasando por Bremerhaven y Bremervörde.

De esa forma, se realiza el estudio de la línea donde se quiere implantar el tren de hidrógeno y, a su vez, de la línea donde ya circula uno.

Se ha tenido en cuenta los tramos donde existen túneles, pasos a nivel y puentes, ya que afectan a la simulación generando datos erróneos en el cálculo de las pendientes.



Figura 6. Tramo del recorrido de Zaragoza a Canfranc. Google Earth.



Figura 7. Ruta completa desde Zaragoza hasta Canfranc. Google Earth.

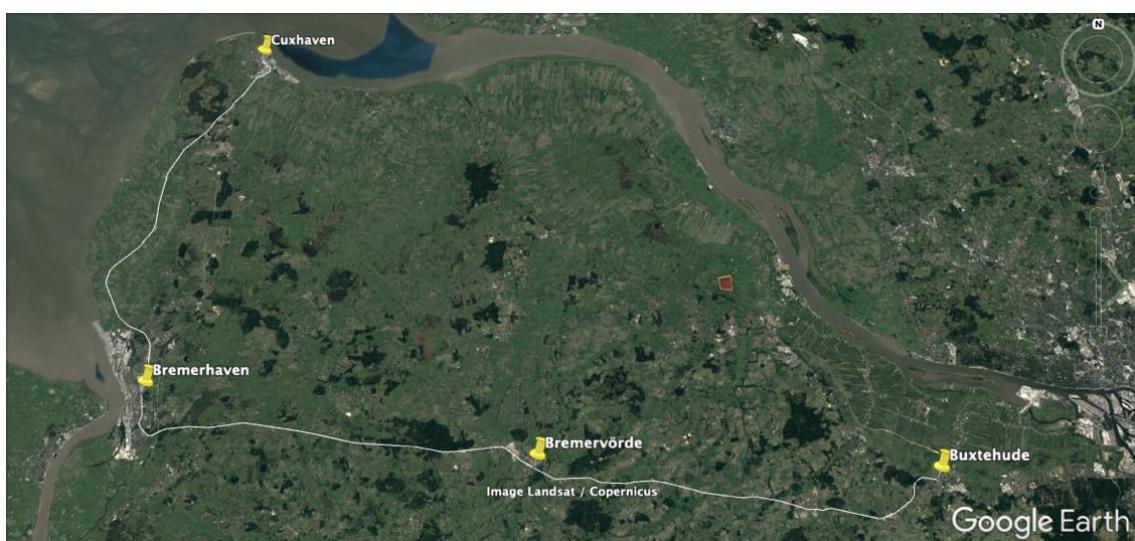


Figura 8. Ruta completa desde Cuxhaven hasta Buxtehude. Google Earth

Para saber la variación en el terreno que presenta cada una de las rutas se obtiene el perfil de elevación mediante Google Earth, que representa la altitud frente la distancia.

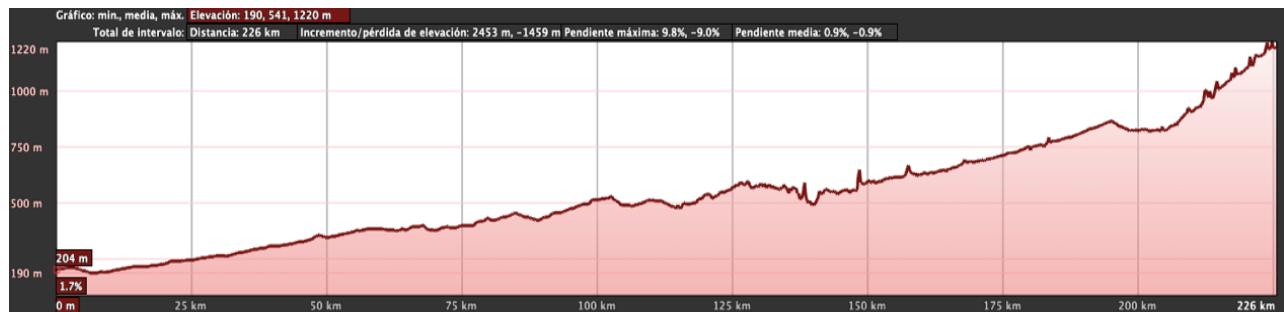


Figura 9. Perfil de elevación en la línea Zaragoza – Canfranc. Google Earth.

La altura mínima del recorrido es de 190 metros mientras que la máxima es de 1.220 metros. Se observa que se pasa de un tramo inicial prácticamente llano a uno final que por sus curvas y rampas se considera de alta montaña. La distancia total del recorrido es de 226 km.



Figura 10. Perfil de elevación en la línea Cuxhaven – Buxtehude. Google Earth.

En cuanto al perfil de la línea alemana, la altitud máxima es de 55 metros, por lo que se puede decir que el terreno es completamente llano. La distancia total del recorrido es de 122 km.

Para obtener los datos en una tabla Excel se descarga el archivo con extensión kml y con el uso de la página web gpsvisualizer se consigue la altitud que posee cada punto. [8]

Con el programa ‘TCX Converter’ se obtiene la distancia desde el inicio del recorrido a cada uno de los puntos.

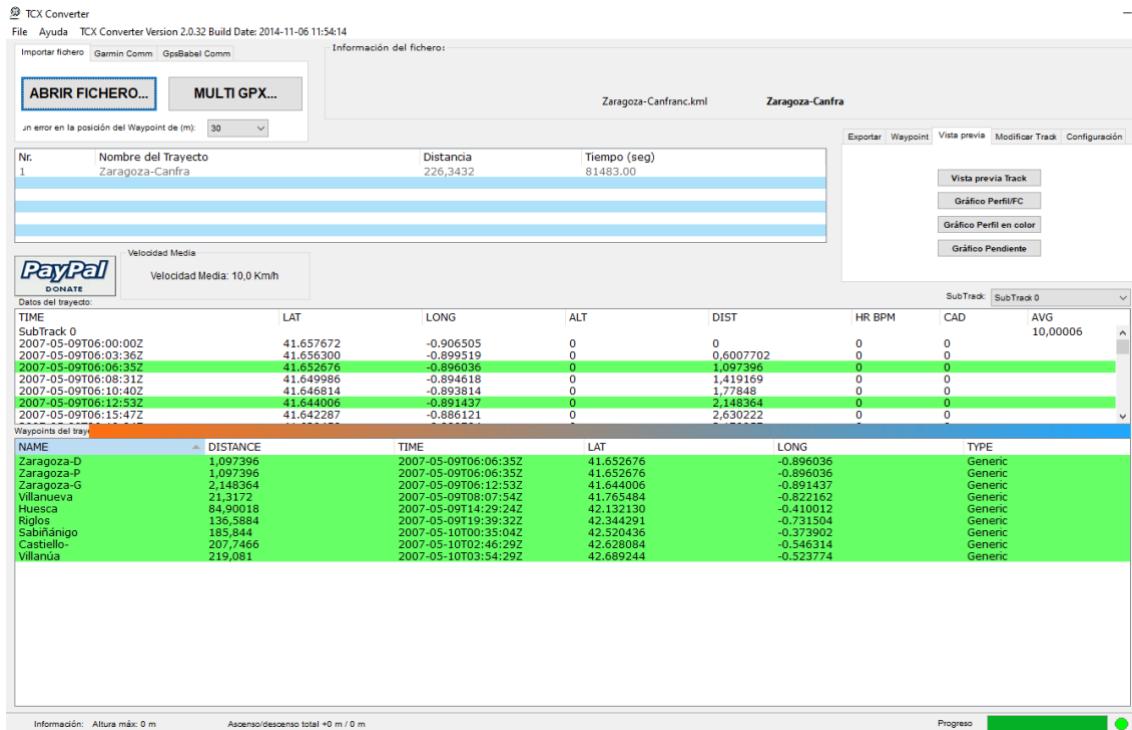


Figura 11. Obtención de la distancia a cada punto con TCX Converter. [7]

A partir de los mapas de Adif se obtienen las velocidades máximas de cada tramo que posteriormente se han ajustado para asemejarse lo máximo posible a la realidad. [9]

A continuación, se procede a explicar todos los cálculos realizados mediante los datos obtenidos de altitud, distancia y velocidad.

- La pendiente.

Con el dato de las altitudes y la distancia se ha caracterizado la pendiente media en cada tramo en milésimas.

$$i = \frac{h_f - h_o}{d_f - d_o} * 1000$$

Fórmula 1. Cálculo de la pendiente.

i = Pendiente [%].

h_f = Altura final [m].

h_o = Altura inicial [m].

d_f = Distancia final [m].

d_o = Distancia inicial [m].

A lo largo del recorrido, aparecen numerosos tramos con túneles y puentes, los puntos que se han tomado mediante Google Earth están por encima del túnel, por lo que la altitud es mucho mayor que la real. En todos los casos, la pendiente ha resultado errónea por lo que ha sido necesario recalculárla mediante una interpolación.

Se ha tomado como referencia de los mapas de la Declaración sobre Red de Adif de 2.021 [9] que la rampa máxima en el trayecto Zaragoza – Canfranc es de 23 %o y la pendiente mínima de 18 %o.



Figura 12. Pendientes características Adif. [9]

En cuanto a la línea Cuxhaven – Buxtehude la rampa máxima es de 7 %o y la pendiente mínima de 7 %o.

- Aceleración.

$$a = \frac{v_f^2 - v_o^2}{2 * (d_f - d_o)}$$

Fórmula 2. Cálculo de la aceleración.

a = Aceleración [m/s^2].

v_f = Velocidad final [m/s].

v_o = Velocidad inicial [m/s].

d_f = Distancia final [m].

d_o = Distancia inicial [m].

3.2.1 Cálculo de las resistencias

Para calcular la resistencia de avance que presenta el tren se deben sumar las resistencias debidas a la rodadura, las rampas o pendientes, las curvas, la inercia y las debidas al aire o las interferencias aerodinámicas.

$$r_{avance} = r_{aerodinámica} + r_{pendiente} + r_{inercia} + r_{mecánica} + r_{curvas}$$

Fórmula 3. Cálculo de la resistencia de avance.

- Resistencia aerodinámica.

Se deben a la resistencia que produce el aire al desplazarse el tren, sobre la parte frontal de la locomotora y sobre la parte lateral.

$$r_{aerodinámica} = \frac{v^2 * 0,85 * S * C_x}{16.000}$$

Fórmula 4. Cálculo de la resistencia aerodinámica.

$r_{aerodinámica}$ = Resistencia aerodinámica [kg/t].

v = Velocidad [m/s].

S = Superficie frontal del tren [m^2].

C_x = Coeficiente de penetración aerodinámico.

El término 0,85 se debe a que se toma el 85% de la superficie frontal al no ser regular y debido a que el hueco de la vía no llega hasta el suelo, por lo que entra el aire por debajo.

Para el cálculo de la superficie frontal:

Tabla 5. Superficie frontal del Coradia iLint y de la serie 596 de Renfe. Elaboración propia.

Coradia iLint		Serie 596 de Renfe	
Anchura [m]	2,75	Anchura [m]	2,91
Altura [m]	4,31	Altura [m]	4,058
Superficie frontal [m^2]	11,85	Superficie frontal [m^2]	11,808

Se escoge el coeficiente de penetración de 0,49 de un autobús con una superficie de 9 m^2 , ya que, se asemeja a las superficies calculadas. [10]

- Resistencia debida a las pendientes.

$$r_{pendiente} = i$$

Fórmula 5. Cálculo de la resistencia debida a la pendiente.

$r_{pendiente}$ = Resistencia debida a las rampas y pendientes [kg/t].

i = rampas y pendientes [%].

Los gradientes con valor positivo son tramos ascendentes, denominados rampas; y los gradientes con valor negativo son tramos descendentes, denominados pendientes.

Cuando se estudia un tramo ascendente aparecen fuerzas que se oponen al movimiento, al contrario que pasa cuando es un tramo descendente que existen fuerzas que favorecen al mismo.

- Resistencia debida de inercia.

Esta resistencia se produce cuando hay cambio de velocidad o en los arranques.

$$r_{inercia} = a$$

Fórmula 6. Cálculo de la resistencia de inercia.

$r_{inercia}$ = Resistencia de inercia [kg/t].

a = Aceleración [m/s²].

- Resistencia mecánica.

Esta resistencia es debida al contacto de la rueda con el carril, al rozamiento de los ejes, cojinetes, etc. y en ella, también se incluyen las resistencias por pérdidas mecánicas debidas a la rodadura y a rozamientos internos, todo ello resulta de la siguiente manera:

$$r_{mecánica} = r_{rodadura} + r_{roz}$$

Fórmula 7. Cálculo de la resistencia de avance.

$r_{mecánica}$ = Resistencia mecánica [kg/t].

$r_{rodadura}$ = Resistencia debida a la rodadura [kg/t].

r_{roz} = Resistencia rozamientos internos [kg/t].

La resistencia a la rodadura suele ser de 0,5 kg/t a lo que se le añade la resistencia debida a los rozamientos internos que es del orden de 1,5 kg/t. Por lo que la resistencia mecánica se va a considerar de 2 kg/t a lo largo de toda la línea. [11]

- Resistencia debida a las curvas.

$$r_{curvas} = \frac{500}{R}$$

Fórmula 8. Cálculo de la resistencia a la curva.

r_{curvas} = Resistencia debida a las curvas [kg/t].

R = Radio de la curva [m].

Solo se van a considerar tramos con curvas, los cuales limitan la circulación del tren.

El radio se obtiene mediante la herramienta regla de Google Earth, que permite la medición de radios sobre el terreno.

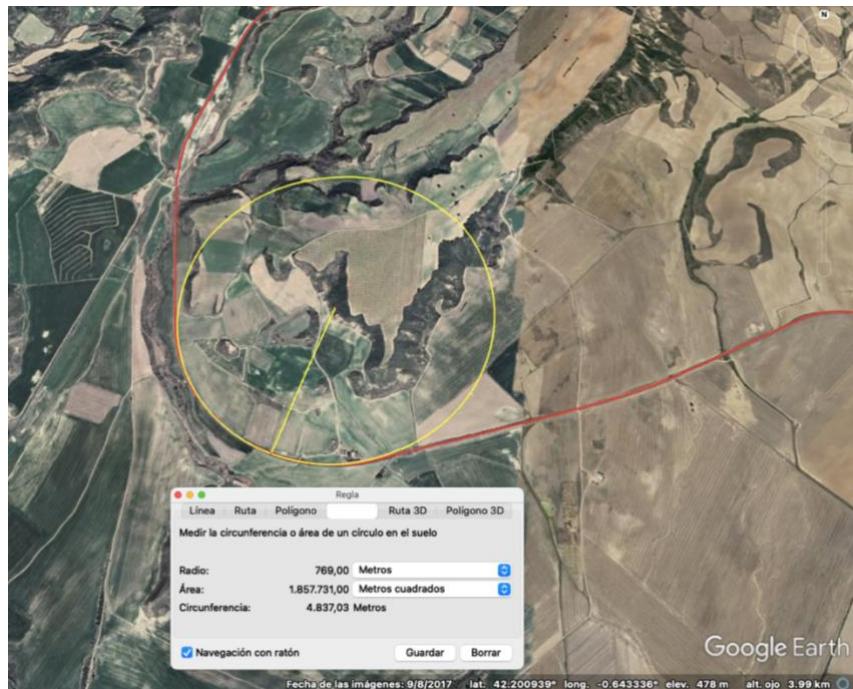


Figura 13. Obtención de radios mediante Google Earth.

El trazado de la línea Zaragoza – Canfranc presenta curvas cerradas con radios de curvatura de 300 metros como mínimo.

En la línea alemana los radios de curva se han despreciado por ser menores de 300 metros.

- **Resistencia global.**

El resultado se debe comparar con la fórmula experimental.

$$r_{global} = A + B * v + C * v^2$$

Fórmula 9. Cálculo de la resistencia global.

r_{global} = Resistencia global [kg/t].

v = Velocidad [m/s].

$A = 1,6$

$B = 0,00456$

$C = 0,000456$

El primer término de la fórmula (A) se debe a la rodadura de la rueda sobre el carril, el segundo (B) a las suspensiones, movimientos y contracciones ; y el último término (C) a los efectos de la resistencia aerodinámica.

3.3 Caracterización del vehículo

Para caracterizar el modelo de tren se debe calcular la potencia máxima que soporta, el tiempo que tarda y la energía consumida en todo el trayecto desde Zaragoza hasta Canfranc Estación.

3.3.1 Cálculo de la potencia y el tiempo.

- Límite de adherencia.

$$P_a = \frac{100}{27} \left(\frac{0,24 * m' * v}{1 + 0,01 * v} \right)$$

Fórmula 10. Cálculo del límite adherencia.

P_a = Límite de adherencia [CV].

m' = masa locomotora [t].

v = Velocidad [km/h].

El peso de la locomotora es la mitad del peso del tren porque dispone de dos motores.

- Potencia necesaria en cada tramo.

$$P = \frac{r_{avance} * v}{\eta * 75} * m$$

Fórmula 11. Cálculo de la potencia necesaria.

P = Potencia [CV].

r_{avance} = Resistencia de avance [kg/t].

v = Velocidad [m/s].

η = Rendimiento [%].

m = Masa tren [t].

El rendimiento se supone del 60%.

Para pasar a kilowatios:

$$1 \text{ CV} = 0,7457 \text{ kW}$$

Fórmula 12. Conversión.

Se debe cumplir que el límite de adherencia sea mayor que la potencia necesaria para que el tren avance:

$$P_a > P \rightarrow OK$$

Fórmula 13. Condición de potencias.

- Tiempo.

Para los tramos que posean cambio de velocidad:

$$t = \frac{v_f - v_o}{a}$$

Fórmula 14. Movimiento uniforme acelerado.

t = Tiempo [s].

v_f = Velocidad final [m/s].

v_o = Velocidad inicial [m/s].

a = Aceleración [m/s²].

Para los tramos que tengan velocidad constante:

$$t = \frac{d_f - d_o}{v}$$

Fórmula 15. Movimiento uniforme.

t = Tiempo [s].

d_f = Distancia final [m].

d_o = Distancia inicial [m].

v = Velocidad [m/s].

3.3.2 Cálculo de la energía consumida por la tracción del vehículo

Se debe tener en cuenta el freno que va aplicando el maquinista al tren en el trayecto de descenso, para ello se va a aplicar la ecuación general de la conservación de la energía:

$$W_M - W_R = \Delta E_p + \Delta E_c$$

Fórmula 16. Ecuación del movimiento.

- Trabajo resistente.

$$W_R = \frac{r_T * (d_f - d_o) * g}{3.600.000} * m$$

Fórmula 17. Cálculo del trabajo resistente.

W_R = Trabajo resistente [kWh].

r_T = r_{aerodinámica} + r_{mecánica} + r_{curvas} [kg/t].

d_f = Distancia final [m].

d_o = Distancia inicial [m].

g = Aceleración de la gravedad [m/s²].

m = Masa tren [t].

- Energía potencial.

$$\Delta E_p = m * g * (h_f - h_o)$$

Fórmula 18. Cálculo la energía potencial.

ΔE_p = Energía potencial [kWh].

m = Masa tren [t].

g = Gravedad [m/s²].

h_f = Altura final [m].

h_o = Altura inicial [m].

El exceso de energía potencial se considera la energía perdida en el freno.

- Energía cinética.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} * m * (v_f^2 - v_o^2)$$

Fórmula 19. Cálculo de la energía cinética.

ΔE_p = Energía potencial [kWh].

m = Masa tren [t].

v_f = Velocidad final [m].

v_o = Velocidad inicial [m].

En el caso de que haya una reducción de velocidad en un tramo, implicará una reducción de energía cinética, lo que será energía sobrante que se considerará de freno.

- Trabajo resistente motor.

$$W_{RM} = \Delta E_c + \Delta E_p + W_R$$

Fórmula 20. Trabajo resistente motor.

W_{RM} = Trabajo resistente motor [kWh].

El trabajo resistente del freno es el trabajo resistente del motor con signo negativo, por el contrario, el trabajo del motor será el que tenga signo positivo.

$$Si \ W_{RM} < 0 \rightarrow \ W_{RF} = -W_{RM}$$

Fórmula 21. Condición trabajo resistente freno.

$$Si \ W_{RM} > 0 \rightarrow \ W_M = W_{RM}$$

Fórmula 22. Condición trabajo del motor.

W_{RF} = Trabajo resistente freno [kWh].

W_M = Trabajo del motor [kWh].

- Trabajo motor.

La suma del trabajo del motor será la energía consumida por la tracción del vehículo, una vez obtenida deberá ser dividida por el rendimiento del motor y el rendimiento de la transmisión y caja de cambios, que resultan $\eta_M = 90\%$ y $\eta_t = 75\%$.

$$E_{consumida} = \frac{\sum W_R}{\eta_M * \eta_t}$$

Fórmula 23. Energía consumida por el motor.

W_M = Trabajo del motor [kWh].

η_M = Rendimiento del motor eléctrico [%].

η_t = Rendimiento de la transmisión y caja de cambios [%].

- Consumo de combustible diésel.

Una vez que se ha obtenido la energía consumida, se procede a calcular el consumo de combustible diésel, para ello se utiliza la densidad volumétrica energética del diésel que es $d_v = 35,86 \text{ MJ/l}$ [12]. Se divide la energía consumida para la densidad volumétrica y se obtiene el consumo en litros de diésel.

- Emisiones de CO₂.

El factor de emisión del gasóleo A o diésel es 2,493 kg CO₂/l [13]. Se multiplica el consumo diésel por el factor de emisión y se obtienen la cantidad de CO₂ que se emite.

3.3.3 Energía utilizable proporcionada por el hidrógeno

La energía que proporciona el hidrógeno:

$$E_H = m * H * \eta_p * \eta_b * \eta_c$$

Fórmula 24. Energía que proporciona el hidrógeno. [14]

E_H = Energía eléctrica utilizable que proporciona el hidrógeno [kWh].

m = Masa del hidrógeno [kg].

H = Calor de combustión del hidrógeno [kWh/kg].

η_p = Eficiencia de la pila de combustible [%].

η_b = Eficiencia la batería [%].

η_c = Eficiencia del convertidor de la batería [%].

Para obtener la masa de hidrógeno se multiplica el consumo del tren (kg/km), que es un dato conocido, por la distancia recorrida.

El calor de combustión del hidrógeno es $H = 33,3 \text{ kWh/kg}$.

Los valores de las eficiencias son $\eta_p = 60\%$, $\eta_b = 90\%$ y $\eta_c = 96\%$.

3.3.4 Energía de los sistemas auxiliares

Por otro lado, se debe calcular el consumo de la energía de todos los sistemas electrónicos que funcionan dentro del vehículo, que es la que se consume en todos los sistemas auxiliares como la calefacción, el aire acondicionado, sistemas hidráulicos, sistemas de iluminación, etc.

En el apartado 4.1 y 4.2 se analizan las líneas de Zaragoza – Canfranc y de Cuxhaven – Buxtehude y se observa que ambos trenes realizan un gran número de paradas durante su recorrido, lo que indica un gasto extra en la energía auxiliar.

Se va a tomar como referencia un estudio de la metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros [15], por un lado, el servicio tranviario Citadis Tramabaix y la serie 465 Civia que son los que más se asemejan al Coradia iLint y a la serie 596 de Renfe.

Tabla 6. Características técnicas Citadis Tramabaix y serie 465 Civia. [15]

Citadis Tramabaix (Tranviario)		Serie 465 Civia (Cercanías)	
CARACTERÍSTICAS		CARACTERÍSTICAS	
Masa en vacío [t]	41	Masa en vacío [t]	160
Velocidad máx [km/h]	70	Velocidad máx [km/h]	120
Potencia [kW]	480	Potencia [kW]	2.400
RESULTADOS		RESULTADOS	
Consumo de auxiliares [%]	40	Consumo de auxiliares [%]	25
Energía [kWh/km]	3,18	Energía [kWh/km]	5,53

Se va a tomar el 40 % como el porcentaje del consumo de los sistemas auxiliares, por tanto, para poder comparar la energía que proporciona el hidrógeno (E) y el trabajo del motor (W_M), se va a multiplicar por 0,6 la energía que proporciona el hidrógeno, de esa forma solo se tendrá en cuenta la que procede de la tracción del vehículo.

Se debe cumplir que:

$$W_M \approx E_H * 0,6$$

Fórmula 25. Condición energías.

4 ESTUDIO TÉCNICO

4.1 Análisis actual de la línea Zaragoza – Canfranc

4.1.1 Infraestructura

Para tener una visión más global de la línea Zaragoza – Canfranc, se presenta una descripción gráfica de las estaciones por las que circula el tren y las velocidades máximas permitidas.

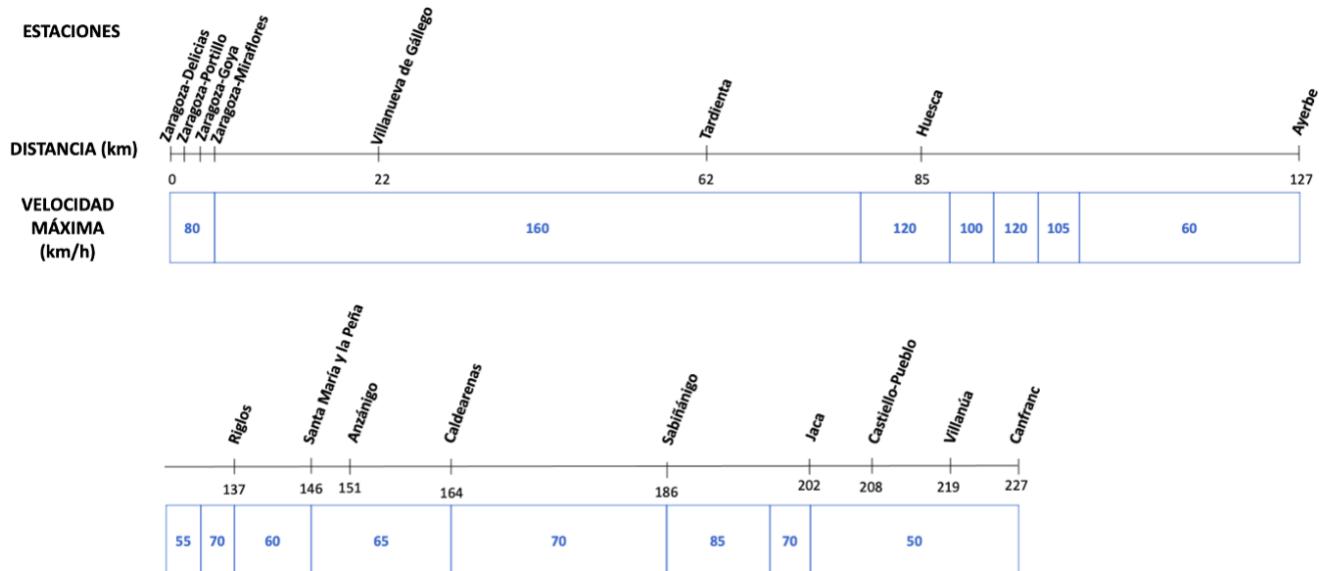


Figura 14. Paradas y velocidades máximas en la línea Zaragoza Canfranc. Elaboración propia.

El tren no circulará en todo momento a las velocidades máximas, es por ello, que se han disminuido, para acercarse lo máximo a las velocidades empleadas realmente.

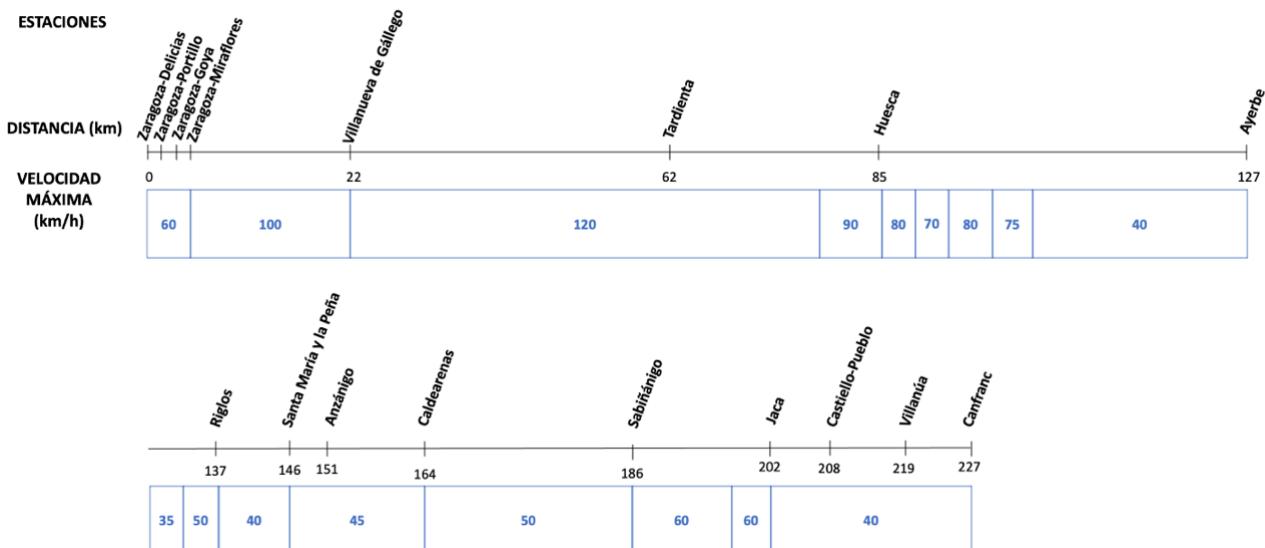


Figura 15. Paradas y velocidades reales en la línea Zaragoza Canfranc. Elaboración propia.

La ruta que se analiza transcurre desde la estación Delicias de Zaragoza hasta la estación de Canfranc, la cual presenta una gran variación en las condiciones topográficas y climáticas a lo largo del trayecto. Por un lado, el tren parte de Zaragoza que está a 200 metros sobre el nivel del mar y asciende hacia el Pirineo donde hay una altitud máxima de 1.220 metros, dada la diferencia de altitudes y la oscilación de temperaturas en las distintas estaciones del año también tendría que operar en un rango de temperaturas de - 20 °C a 45 °C. Todas estas especificaciones impactan directamente en el diseño final del tren.

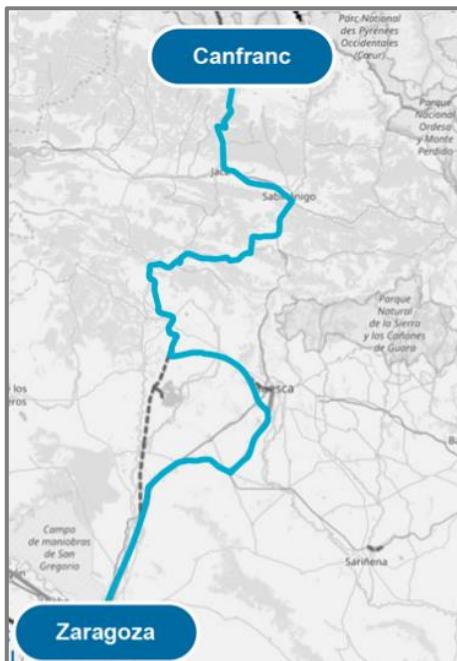


Figura 16. Trazado del recorrido. [17]



Figura 17. (derecha) Ancho de vía y longitud máxima. [9]

Figura 18. (izquierda) Tipo de electrificación y velocidades máximas. [9]

En cuanto al tipo de vía, la línea se va a dividir en 3 tramos:

El primer tramo, comprendido entre Zaragoza y Tardienta consta de 62 kilómetros, coexisten dos vías, una de ancho internacional (1,435 m) electrificada a 25 kV, para la circulación de trenes de alta velocidad y otra de ancho Ibérico (1,668 m) electrificada a 3

kV. Es un trazado llano, con pendientes suaves, la máxima es de 12 % y curvas de radios superiores a 1.000 metros. Las traviesas son de hormigón.



Figura 19. Tipo de vía en el tramo de Zaragoza a Tardienta. [16]

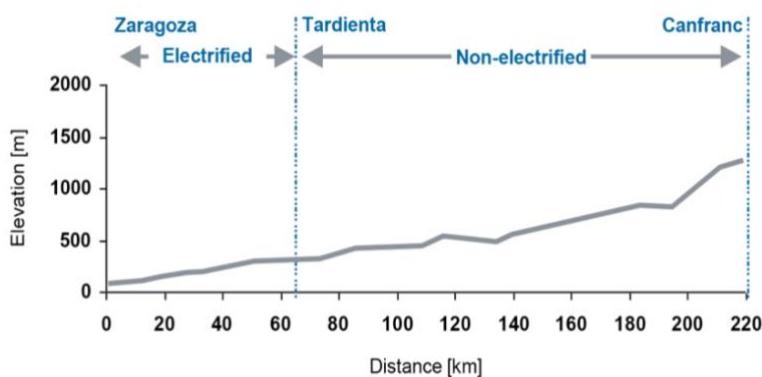


Figura 20. Perfil de la ruta y tramos de electrificación. [17]

En el segundo tramo de Tardienta hasta Huesca (22 km), existe un sistema de tercer carril, están conjuntas la vía de ancho internacional y la de ancho Ibérico, esto hace que puedan circular tanto trenes de alta velocidad como trenes de viajeros de ancho ibérico.



Figura 21. Tipo de vía en el tramo de Tardienta a Huesca. [16]

El tercer tramo, desde Huesca hasta la estación de Canfranc (138 km), la vía está realizada en ancho Ibérico (1,668 m) sin electrificar. A partir de Jaca, la línea adquiere características de alta montaña, con pendientes de 24 % y radios de curva de 300 metros que representan una notable resistencia a las curvas. Las traviesas son en su mayoría de madera.

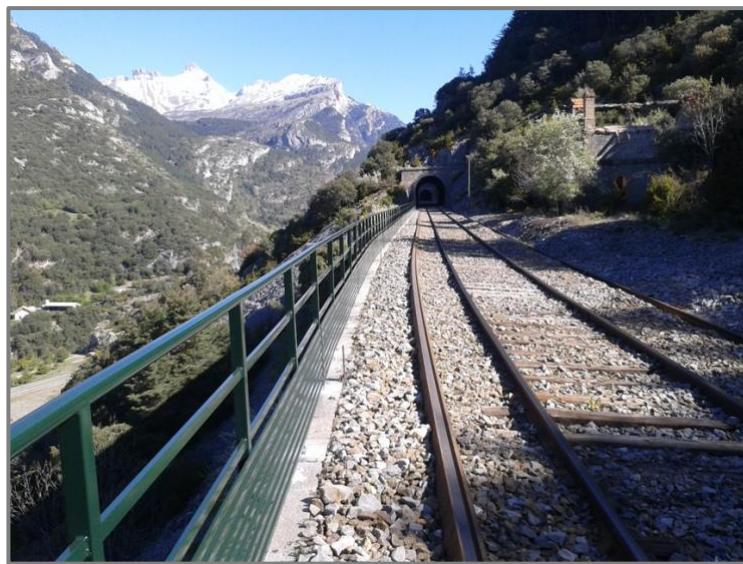


Figura 22. Tipo de vía en el tramo de Huesca a Canfranc. [16]

4.1.2 Material móvil

El tren que actualmente está en circulación en la línea Zaragoza – Canfranc es la Serie 596 de Renfe, se trata de una familia de automotores diésel de un solo coche dedicados a cubrir líneas de media distancia, realiza principalmente los servicios de Regional Exprés.

Tabla 7. Características técnicas Serie 596 Renfe. [18][17]

Serie 596 Renfe	
Peso en vacío [t]	51
Velocidad máxima [km/h]	120
Ancho de vía [mm]	1.668
Altura [m]	4,058
Longitud [m]	24,26
Anchura [m]	2,91
Potencia [kW]	2x206
Plazas	56

4.1.3 Explotación

En la siguiente tabla, se presenta un resumen con los horarios y todas las estaciones por las que pasa el tren serie 596 de Renfe que circula desde la ciudad de Zaragoza hasta Canfranc Estación.

Tabla 8. Horarios y frecuencia línea Zaragoza – Canfranc. Elaboración propia. [19]

Trayecto	Horario		Frecuencia	Estaciones
	Salida	Llegada		
IDA	06:40	10:30	S y D	Zaragoza – Delicias Zaragoza – Portillo Zaragoza – Goya
	08:43	12:34	L, M, X, J, V	Zaragoza – Miraflores Villanueva de Gállego Tardienta Huesca
	15:42	19:42	Diario	Ayerbe Riglos
VUELTA	06:00	09:55	L, M, X, J, V	Santa María y La Peña Anzáñigo Caldearenas
	08:45	12:43	S y D	Sabiñánigo Jaca
	17:53	21:48	Diario	Castiello – Pueblo Villanúa Canfranc – Estación
TOTAL		28 semanales	17 paradas	

Cuenta con 17 paradas, la duración de todo el recorrido es de alrededor de 4 horas, con paradas incluidas de 10 minutos en total.

El servicio que presta la línea Zaragoza – Canfranc es mixto, de viajeros y mercancías.

Circulan dos trenes de mercancías tres días por semana, que transportan el cereal importado de Francia, siendo la subida a Canfranc en vacío y la vuelta a Zaragoza cargado de maíz.

Tabla 9. Horarios y frecuencia de los trenes de mercancías. Elaboración propia.

Trayecto	Horario		Frecuencia
	Salida	Llegada	
IDA	06:40	10:30	L, X, V
	18:00	21:46	L, X, V
VUELTA	08:45	12:43	L, X, V
	04:25	08:11	L, X, V
TOTAL		12 semanales	

Para entender el proceso de cálculo seguido, como la línea Zaragoza – Canfranc es muy extensa, se va a exponer en detalle los resultados obtenidos en un tramo de la localidad de Santa María y la Peña.

Tabla 10. Cálculo de las resistencias en el tramo de Santa María y la Peña. Elaboración propia.

Puntos	Velocidad [km/h]	Pendiente [%]	r _{aerodinámica} [kg/t]	r _{pendiente} [kg/t]	r _{inerzia} [kg/t]	r _{mecánica} [kg/t]	Radio [m]	r _{curvas} [kg/t]	r _{avance} [kg/t]
1	40	14,742	0,038	14,742	0	2	0	0	16,780
2	45	2,327	0,0491	2,327	0,031	2	0	0	4,408
3	45	7,633	0,0491	7,633	0	2	420	1,190	10,873
4	45	-9,416	0,0491	-9,416	0	2	0	0	-7,367
5	45	-13,333	0,0491	-13,333	0	2	500	1	-10,284
6	45	12,603	0,0491	12,603	0	2	500	1	15,652
7	45	11,664	0,0491	11,664	0	2	0	0	13,714
8	45	9,220	0,0491	9,220	0	2	0	0	11,270
9	45	18,489	0,0491	18,489	0	2	647	0,772	1,360
10	45	9,790	0,0491	9,790	0	2	647	0,772	12,612

Primero, se obtiene la resistencia aerodinámica mediante la Fórmula 4, depende de la velocidad, la superficie y el coeficiente aerodinámico. La superficie frontal es de 11,808 m² y el coeficiente de penetración es C_x = 0,49, por lo anteriormente mencionado. Solo varía la velocidad, por lo que es igual para todos los puntos menos para el primero.

$$r_{aerodinámica} = \frac{v^2 * 0,85 * S * C_x}{16.000} = \frac{v^2 * 0,85 * 11,808 * 0,49}{16.000}$$

Fórmula 26. Obtención de la resistencia aerodinámica.

La resistencia a la pendiente es igual a las pendientes obtenidas mediante la Fórmula 1.

La resistencia a la inercia es igual a la aceleración, por lo que como solo hay cambio de velocidad del primer punto al segundo, es el único que posee resistencia a la inercia.

La resistencia mecánica es constante para toda la línea y se calcula con la Fórmula 7.

La resistencia debida a las curvas se calcula con la Fórmula 8 y solo depende del radio, en este tramo solo hay 5 puntos que poseen curvas.

Por último, la resistencia de avance es la suma de todas las resistencias, es decir, la Fórmula 3.

Tabla 11. Cálculo de potencias, tiempos y energías en el tramo de Santa María y la Peña.
 Elaboración propia.

Puntos	Potencia [kW]	Tiempo [s]	W _R [kWh]	Δ E _c [kWh]	Δ E _p [kWh]	W _{RM} [kWh]	W _M [kWh]
1	157,577	23,202	0,146	0,232	0,166	0,545	0,545
2	46,575	43,666	0,036	0	1,250	1,287	1,287
3	114,866	5,24	0,034	0	0,027	0,062	0,062
4	-77,826	4,248	0,059	0	0,125	0,184	0,184
5	-108,643	2,008	0,107	0	-0,277	-0,170	0
6	165,353	1,504	0,016	0	-0,013	0,002	0,002
7	144,877	3,584	0,082	0	0,027	0,109	0,109
8	119,058	34,707	0,011	0	-0,069	-0,058	0
9	225,141	3,696	0,028	0	-0,027	0	0
10	133,243	4,640	0,010	0	0,138	0,149	0,149

Para calcular la potencia se ha utilizado la Fórmula 11 variando la resistencia de avance y la velocidad.

$$P = \frac{r_{avance} * v}{\eta * 75} * m = \frac{r_{avance} * v}{0,6 * 75} * 51 * 0,7457$$

Fórmula 27. Obtención de la potencia.

El tiempo, se calcula de forma diferente si hay variación de velocidad de un tramo a otro o si la velocidad es constante, se obtiene mediante la Fórmula 14 y Fórmula 15.

El trabajo resistente (W_R) se calcula mediante la Fórmula 17.

$$W_R = \frac{(r_{aerodinámica} + r_{mecánica} + r_{curvas}) * (d_f - d_o) * 9,81}{3.600.000} * 51$$

Fórmula 28. Obtención del trabajo resistente.

La variación de energía cinética se calcula con la Fórmula 19 y como depende de la variación de las velocidades solo hay en el primer punto.

La variación de energía potencial se obtiene con la Fórmula 18 y solo depende de la variación de alturas.

Para el cálculo del trabajo resistente motor (W_{RM}) se utiliza la Fórmula 20, que es la suma de los tres términos anteriores.

Por último, el trabajo motor (W_M) se obtiene con la Fórmula 22 y realizando el sumatorio del trabajo motor de todos los puntos se consigue la energía, pero se debe tener en cuenta el rendimiento del motor y de la transmisión, por lo que la energía consumida por el motor, se calcula como la Fórmula 23.

De esta forma, se realizan los cálculos para toda la línea, con el tren cargado y vacío, para ello lo cual, primero se debe calcular el peso del tren lleno.

$$P_{lleno} = P_{vacío} + \frac{n * P_{pasajeros}}{1.000}$$

Fórmula 29. Cálculo del peso del tren lleno.

P_{lleno} = Peso del tren lleno [t].

$P_{vacío}$ = Peso del tren vacío [t].

N = número de pasajeros.

$P_{pasajeros}$ = Peso de cada pasajero [kg].

Se supone un peso medio de 75 kg por pasajero.

El peso del tren completamente lleno es de 55,2 t.

Los cálculos se efectúan tanto para la ida como para la vuelta y con el tren vacío y lleno, los resultados que se obtienen en cuanto a la potencia máxima, la energía consumida, el consumo de diésel y las emisiones de CO₂ se recogen en la Tabla 12 y 13.

Tabla 12. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el Serie 596 Renfe. Elaboración propia.

Serie 596 Renfe vacío		Serie 596 Renfe lleno	
Potencia máxima [kW]	375,026	Potencia máxima [kW]	405,911
Energía consumida [kWh]	616,252	Energía consumida [kWh]	667,002
Consumo diésel [L]	61,865	Consumo diésel [L]	66,960
Emisiones de CO ₂ [kg]	154,231	Emisiones de CO ₂ [kg]	166,932

Tabla 13. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el Serie 596 Renfe. Elaboración propia.

Serie 596 Renfe vacío		Serie 596 Renfe lleno	
Potencia máxima [kW]	359,972	Potencia máxima [kW]	389,617
Energía consumida [kWh]	381,647	Energía consumida [kWh]	413,077
Consumo diésel [L]	38,313	Consumo diésel [L]	41,469
Emisiones de CO ₂ [kg]	95,516	Emisiones de CO ₂ [kg]	103,382

Se comprueba que efectivamente el tren tarda alrededor de 4 horas en llegar y que la potencia máxima en ningún caso supera los 412 kW, que es la potencia máxima que puede soportar el tren.

4.2 Análisis de la línea Cuxhaven – Buxtehude

Una vez desarrollada la línea Zaragoza – Canfranc, se va a estudiar de la misma forma, la línea Cuxhaven – Buxtehude que es la ruta que sigue el tren de hidrógeno Coradia iLint, con el objetivo de conocer la energía que consume, la potencia máxima que puede soportar, el consumo de hidrógeno, etc.

4.2.1 Infraestructura

La ruta que se analiza transcurre desde la ciudad de Cuxhaven hasta Buxtehude, consta de 122 kilómetros en su totalidad y está ubicada en el estado de Baja Sajonia, Alemania. Posee un clima templado, en invierno presenta temperaturas bajas y en verano las temperaturas son suaves, no llegando a superar los 30 °C; y las lluvias son abundantes. Es un trazado llano, con pendientes suaves, siendo la máxima de 7 %. Las traviesas son en su mayoría de madera.

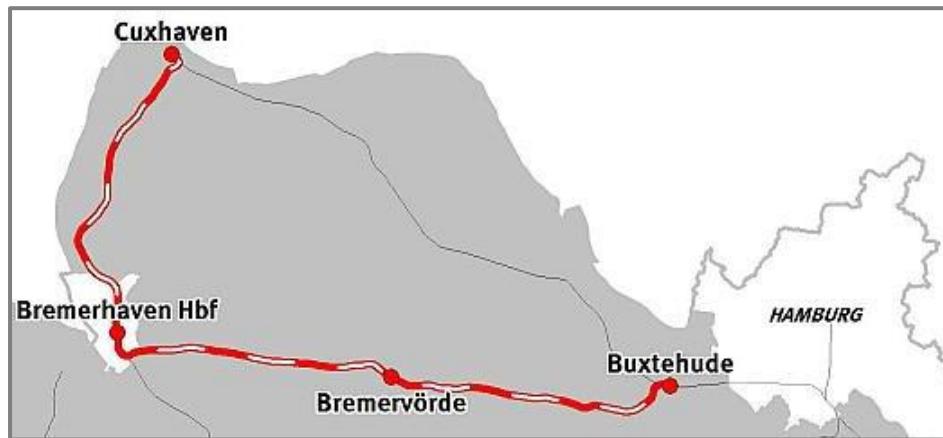


Figura 23. Trazado del recorrido alemán. [20]

El recorrido se va a dividir en dos tramos:

El primer tramo va desde Cuxhaven hasta Bremerhaven tiene una longitud de 44 kilómetros, posee vía única no electrificada de ancho estándar (1,435 m). Las velocidades permitidas son de 60 a 80 km/h y posee numerosos pasos a nivel.



Figura 24. Tramo de Cuxhaven a Bremerhaven. [21]

El segundo tramo de Bremerhaven a Buxtehude pasando por Bremervörde, tiene un recorrido de 74,87 kilómetros, es prácticamente llano, de ancho estándar. La velocidad máxima es de 60 km/h.



Figura 25. Estación de Buxtehude. [21]

4.2.2 Material móvil

La línea que va desde Cuxhaven hasta Buxtehude es la RB33, por ella circulan dos unidades del tren de hidrógeno Coradia iLint y el modelo diésel Coradia Lint 41.

Tabla 14. Características técnicas Coradia Lint 41. [22][17]

Coradia Lint 41	
Peso en vacío [t]	66
Velocidad máxima [km/h]	120
Ancho de vía [mm]	1.435
Altura [m]	4,34
Longitud [m]	41,81
Anchura [m]	2,75
Potencia [kW]	630
Plazas	130

Las características técnicas del Coradia iLint están recogidas en el apartado 2.2.1.

4.2.3 Explotación

En la Tabla 15 se presenta un resumen con los horarios y las estaciones por las que pasa el Coradia iLint cuando circula desde la estación de Buxtehude hasta Cuxhaven.

Tabla 15. Horarios y frecuencia Línea Buxtehude – Cuxhaven. Elaboración propia. [23]

Horario		Frecuencia	Estaciones
Salida	Llegada		
5:37	8:27	S y D	Buxtehude
7:17	10:27	Diario	Apensen
8:37	11:27	Diario	Ruschwedel
9:37	12:27	Diario	Harsefeld
10:37	13:27	Diario	Bargstedt
11:37	14:27	Diario	Brest – Aspe
11:45	14:27	S y D	Kutenholz
12:37	15:27	Diario	Hesedorf
13:37	16:27	Diario	Bremervörde
14:45	17:27	Diario	Oerel
15:45	18:27	Diario	Heinschenwalde
16:45	19:27	Diario	Frelsdorf
17:45	20:27	Diario	Geestenseth
18:45	21:27	Diario	Wehdel
19:45	22:27	Diario	Sellstedt
20:45	23:27	Diario	Bremerhaven – Wulsdorf
TOTAL		102 semanales	Bremerhaven Hbf
			Bremerhaven – Lehe
			Wremen
			Dorum (Weserm)
			Nordholz
			Cuxhaven
			22 paradas

La línea consta de 22 paradas y 122 kilómetros de vía. La duración total es de 2 horas y 40 minutos, siendo 36 minutos el tiempo que está parado en las estaciones y 19 minutos el tiempo de paradas facultativas.

Siguiendo el mismo método que con la línea Zaragoza – Canfranc, se obtienen los resultados de la línea Cuxhaven – Buxtehude.

La Tabla 16 recoge una tabla resumen con las características técnicas necesarias para el cálculo del Coradia iLint.

Tabla 16. Resumen características Coradia iLint. Elaboración propia.

Coradia iLint	
Masa en vacío [t]	105
Masa lleno [t]	116
Potencia máxima [kW]	780
Pasajeros	150
Consumo hidrógeno [kg/km]	0,20

Tabla 17. Resultados de Cuxhaven a Buxtehude con el Coradia iLint. Elaboración propia.

Coradia iLint vacío		Coradia iLint lleno	
Potencia máxima [kW]	325,839	Potencia máxima [kW]	360,750
Energía consumida [kWh]	224,869	Energía consumida [kWh]	249,008
Consumo de hidrógeno [kg]	22,723	Consumo de hidrógeno [kg]	25,162

Tabla 18. Resultados de Buxtehude a Cuxhaven con el Coradia iLint. Elaboración propia.

Coradia iLint vacío		Coradia iLint lleno	
Potencia máxima [kW]	242,192	Potencia máxima [kW]	268,141
Energía consumida [kWh]	218,093	Energía consumida [kWh]	241,461
Consumo de hidrógeno [kg]	22,038	Consumo de hidrógeno [kg]	24,4

La primera comprobación es que el tiempo obtenido es de 2 horas y 40 minutos, que es el tiempo que tarda realmente; se puede observar que en ningún caso la potencia máxima obtenida supera la potencia máxima de diseño.

Es necesario calcular la relación del consumo de hidrógeno en la ruta, para ello se calcula el consumo que realiza, multiplicando los 0,20 kg/km por 122 km la distancia de un viaje y se relaciona con la energía que consume en ese mismo trayecto.

Se obtiene que el consumo de hidrógeno es de 0,101 kg/kWh.

A continuación, se realiza un estudio más detallado del Coradia iLint, para ello, primero se ha estimado el número de viajes que realiza en un día.

Se debe tener en cuenta que, para el mantenimiento de la vía, los trenes no circulan entre las 12 de la noche y las 6 de la mañana, por lo que el periodo de actividad es de 18 horas, como cada viaje que realiza el Coradia iLint dura 2 horas y 40 minutos, se calcula que hace 6 viajes al día.

Tabla 19. Resultados diarios del Coradia iLint. Elaboración propia.

Viajes/día	6
Tiempo viajes/día [h/día]	16
Distancia recorrida al día [km/día]	732
Energía consumida/día [kWh/día]	1.471,408
Cantidad de hidrógeno consumido al día [kg/día]	146,4
Energía que proporciona el hidrógeno [kWh/día]	2.527,262
Energía que proporciona el hidrógeno para motor [kWh/día]	1.516,357

Como son 6 viajes, para obtener la energía consumida al día se multiplica por 3 idas la energía de la Tabla 16 con el tren lleno y por 3 vueltas la de la

Tabla 17 con el tren lleno.

Para la cantidad de hidrógeno consumida, se multiplica el consumo del tren por kilómetro y se multiplica por la distancia recorrida al día.

La energía que proporciona el hidrógeno se calcula mediante la Fórmula 24, pero lo que interesa en este caso, para poder compararlo con la energía antes obtenida, es la energía que proporciona el hidrógeno para motor, para ello, se debe tener en cuenta que los sistemas auxiliares son el 40% de la energía total. Es decir, se debe multiplicar la energía que proporciona el hidrógeno por 0,6, para obtener solo la del motor.

De esta forma, se comprueba que la energía consumida al día es muy similar a la energía que proporciona el hidrógeno para motor.

También, se comprueba que la energía consumida por kilómetro que resulta de 3,45 kWh/km está entre los dos resultados que aparecen en la Tabla 6, acerca del estudio de la metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros.

4.3 Análisis de la línea Zaragoza – Canfranc con tren de hidrógeno

4.3.1 Infraestructura

Ver apartado 4.1.1.

4.3.2 Implantación del Coradia iLint

El objetivo principal de este trabajo es la implantación de un tren de hidrógeno en la línea Zaragoza – Canfranc, para ello lo primero que se va a hacer es realizar los cálculos con el Coradia iLint para compararlos con los obtenidos del mismo, pero en la línea alemana. Después de hacer la comparación entre ambos, se creará y estudiará finalmente el tren de hidrógeno en la línea Zaragoza – Canfranc.

De la misma forma que antes, se calcula la potencia máxima, la energía consumida y el consumo de hidrógeno, los resultados que se obtienen del Coradia iLint se recogen en las siguientes tablas:

Tabla 20. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el Coradia iLint. Elaboración propia.

Coradia iLint vacío		Coradia iLint lleno	
Potencia máxima [kW]	772,113	Potencia máxima [kW]	854,839
Energía consumida [kWh]	1.268,754	Energía consumida [kWh]	1.404,692
Consumo hidrógeno [kg]	128,209	Consumo hidrógeno [kg]	141,946

Tabla 21. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el Coradia iLint. Elaboración propia.

Coradia iLint vacío		Coradia iLint lleno	
Potencia máxima [kW]	741,119	Potencia máxima [kW]	820,524
Energía consumida [kWh]	785,744	Energía consumida [kWh]	869,931
Consumo hidrógeno [kg]	79,400	Consumo hidrógeno [kg]	87,907

Comparando estos resultados y los de la Serie 596 de Renfe (Tabla 11 y Tabla 12) se puede ver que los valores de potencia y energía aumentan más o menos al doble en caso de utilizar el tren Coradia iLint, esto se debe a que la masa de este tren es de 105 t frente al tren de Renfe que es de 51 t, hecho similar ocurre con la potencia, que es casi el doble, la del primero de 780 kW y la del segundo de 412 kW.

Por otro lado, también se observa que la potencia máxima calculada ha sobrepasado la máxima del motor (780kW), esto se debe a que el Coradia iLint ha sido desarrollado para un trazado completamente llano, la línea Zaragoza – Canfranc, como se ha explicado, posee características de alta montaña.

4.3.3 Diseño del nuevo tren de hidrógeno

Para crear el nuevo tren de hidrógeno se va a realizar una comparativa del Coradia iLint en las dos líneas estudiadas.

La potencia máxima que soporta a lo largo de todo el recorrido de Cuxhaven – Buxtehude es de 360,75 kW, el tren está diseñado con dos motores de 390 kW cada uno, lo que da un total de 780 kW. Es decir, asumen una potencia del doble del trazado, utilizando un coeficiente de seguridad de dos.

La potencia máxima que soporta el Coradia, en la línea Zaragoza – Canfranc es de 854,84 kW, por tanto, se van a implantar cuatro motores de la misma potencia, es decir un total de 1.560 kW.

El nuevo tren desarrollado se va a dimensionar el doble del Coradia iLint, será un modelo de tren mixto, de viajeros y mercancías.

Tabla 22. Comparativa Coradia iLint con el nuevo tren de hidrógeno. Elaboración propia.

Coradia iLint		Nuevo tren de hidrógeno	
Potencia motor [kW]	2x390	Potencia motor [kW]	4x390
Potencia pila de combustible [kW]	2x200	Potencia pila de combustible [kW]	2x400
Potencia batería [kW]	225	Potencia batería [kW]	450
Capacidad tanque hidrógeno [kg]	2x90	Capacidad tanque hidrógeno [kg]	6x90
Masa en vacío [t]	105	Masa en vacío [t]	106
Pasajeros	150	Pasajeros	150

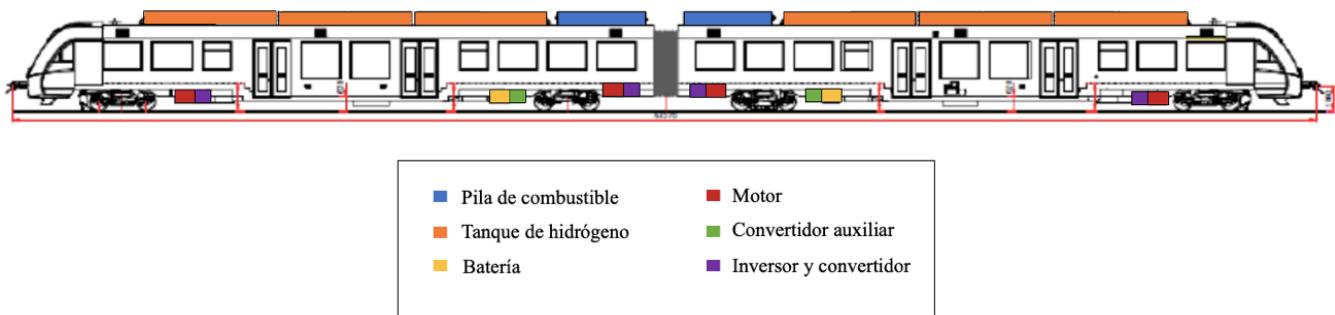


Figura 26. Esquema del nuevo tren de hidrógeno. Elaboración propia.

Posee las mismas dimensiones que el tren Coradia iLint pero con 4 motores en vez de 2, con dos pilas de combustible del doble de potencia, con 6 tanques de hidrógeno de 90 kilogramos, y con una batería con el doble de potencia.

4.3.4 Flujo de transporte

El flujo de transporte se ha llevado a cabo a través de la obtención de las mallas horarias, que permite la representación de cada una de las circulaciones en una línea ferroviaria.

En el eje vertical se representa la distancia en kilómetros con las distintas estaciones por las que pasa; y en el eje horizontal el horario que lleva el tren.

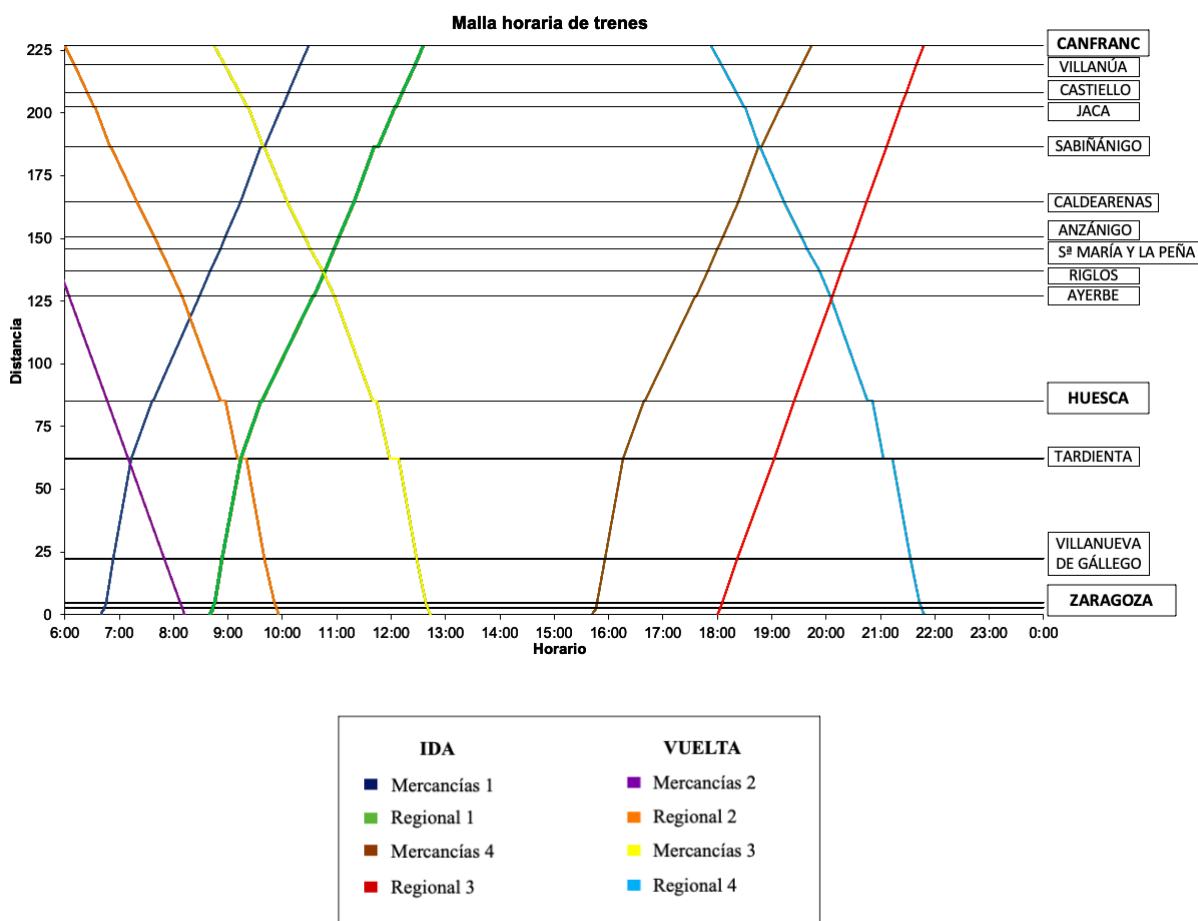


Figura 27. Malla horaria. Elaboración propia.

La malla se desarrolla un día que es lunes, circulan trenes en ambos sentidos, cuatro regionales y cuatro trenes de mercancías, los trenes de mercancías son los que se adaptan a los de viajeros, los horarios están recogidos en la Tabla 8 y 9.

Se puede observar que los trenes de mercancías no realizan paradas en estaciones intermedias, mientras que los de viajeros sí. Además, se debe cumplir que los cruces entre trenes se realicen en estaciones.

4.4 Prestaciones

El objetivo es la comparación de las prestaciones del nuevo tren de hidrógeno teniendo en cuenta la potencia, el consumo de energía, y la duración total del recorrido.

En el primero de ellos, se mantendrán las condiciones de velocidad en cada tramo y en los siguientes apartados se aumentará la velocidad con la finalidad de reducir el tiempo total de cada viaje.

4.4.1 Velocidad Serie 596

Con la misma metodología empleada anteriormente y a la velocidad que circula la Serie 596 de Renfe se obtienen los resultados de la potencia máxima, la energía consumida y el consumo de hidrógeno para el nuevo tren diseñado.

Tabla 23. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el nuevo tren de hidrógeno.
 Elaboración propia.

Nuevo tren de hidrógeno vacío		Nuevo tren de hidrógeno lleno	
Potencia máxima [kW]	779,466	Potencia máxima [kW]	862,192
Energía consumida [kWh]	1.280,837	Energía consumida [kWh]	1.416,775
Consumo hidrógeno [kg]	129,430	Consumo hidrógeno [kg]	143,167

Tabla 24. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el nuevo tren de hidrógeno.
 Elaboración propia.

Nuevo tren de hidrógeno vacío		Nuevo tren de hidrógeno lleno	
Potencia máxima [kW]	748,177	Potencia máxima [kW]	827,583
Energía consumida [kWh]	793,227	Energía consumida [kWh]	877,414
Consumo hidrógeno [kg]	80,156	Consumo hidrógeno [kg]	88,663

4.4.2 Reduciendo el tiempo del recorrido un 25%

El tren de hidrógeno desarrollado tiene un diseño que permite alcanzar velocidades superiores a la Serie 596 de Renfe.

En algunos tramos, se ha aumentado la velocidad, porque todavía había suficiente margen hasta llegar a la velocidad máxima de la vía. Por ejemplo, en el tramo de Zaragoza a Huesca, la serie 596 circulaba a 100 km/h y en este caso se ha aumentado 130 km/h.

Con esto se consigue una reducción del tiempo de viaje a 3 horas y 5 minutos.

Tabla 25. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el nuevo tren de hidrógeno.
 Elaboración propia.

Nuevo tren de hidrógeno vacío		Nuevo tren de hidrógeno lleno	
Potencia máxima [kW]	1.031,678	Potencia máxima [kW]	1.141,172
Energía consumida [kWh]	1.321,203	Energía consumida [kWh]	1.461,425
Consumo hidrógeno [kg]	133,509	Consumo hidrógeno [kg]	147,679

Tabla 26. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el nuevo tren de hidrógeno.
Elaboración propia.

Nuevo tren de hidrógeno vacío		Nuevo tren de hidrógeno lleno	
Potencia máxima [kW]	975,573	Potencia máxima [kW]	1.079,112
Energía consumida [kWh]	842,559	Energía consumida [kWh]	931,981
Consumo hidrógeno [kg]	85,141	Consumo hidrógeno [kg]	94,178

4.4.3 Reduciendo el tiempo del recorrido un 35%

Para esta situación, se ha planteado la circulación del tren a velocidades cercanas a las máximas de cada tramo de la vía, por ejemplo, en el tramo de Zaragoza a Huesca, la velocidad se ha aumentado de los 130 km/h a los 150 km/h, cercano a los 160 km/h, que es la velocidad máxima impuesta en este tramo.

Para realizar esta reducción del tiempo de recorrido se ha tenido en cuenta el no superar la potencia máxima diseñada para el motor que es de 1.560 kW, siendo las potencias máximas calculadas inferiores a este valor.

Con esto se consigue una reducción del tiempo de viaje a 2 horas y 35 minutos.

Tabla 27. Resultados de Zaragoza a Canfranc con el nuevo tren de hidrógeno.
Elaboración propia.

Nuevo tren de hidrógeno vacío		Nuevo tren de hidrógeno lleno	
Potencia máxima [kW]	1.247,090	Potencia máxima [kW]	1.379,446
Energía consumida [kWh]	1.298,990	Energía consumida [kWh]	1.436,854
Consumo hidrógeno [kg]	131,264	Consumo hidrógeno [kg]	145,196

Tabla 28. Resultados de Canfranc a Zaragoza con el nuevo tren de hidrógeno.
Elaboración propia.

Nuevo tren de hidrógeno vacío		Nuevo tren de hidrógeno lleno	
Potencia máxima [kW]	1.178,195	Potencia máxima [kW]	1.303,239
Energía consumida [kWh]	802,629	Energía consumida [kWh]	887,813
Consumo hidrógeno [kg]	81,106	Consumo hidrógeno [kg]	89,714

5 ESTUDIO DE EXPLOTACIÓN

5.1 Análisis de la demanda

5.1.1 Demanda de combustible en función del tiempo

En este apartado se va a estudiar la demanda de hidrógeno diaria requerida por el tren, con el fin de comprobar si la capacidad de los tanques de hidrógeno es suficiente para hacer frente a la demanda diaria de viajes; y la variación que se pueda producir al reducir el tiempo de duración del recorrido.

Tabla 29. Consumo de combustible en función del tiempo. Elaboración propia.

Duración de 4h		Duración de 3h y 5 min		Duración de 2 h y 35 min	
Nº de viajes/día	4	Nº de viajes/día	4	Nº de viajes/día	4
Energía [kWh]	4.588,3	Energía [kWh]	4.786,8	Energía [kWh]	4.649,12
Consumo [kg]	463,6	Consumo [kg]	483,71	Consumo [kg]	469,8

Para calcular la cantidad de hidrógeno consumida, se multiplica el consumo del tren por kWh por la energía consumida en 4 viajes a capacidad máxima.

El tren que se ha diseñado tiene 6 tanques de 90 kilogramos de capacidad, un total de 540 kilogramos. En ninguno de los casos se supera esa cantidad, por lo que el dimensionamiento del nuevo tren es adecuado para el mismo número de viajes que presentaba inicialmente. En caso de que se quisieran aumentar los viajes diarios, se debería añadir más capacidad de combustible.

5.1.2 Demanda en función de la estación del año

Para llevar a cabo el estudio de la demanda para el tren de hidrógeno se va a diferenciar la demanda para el periodo de verano y el periodo de invierno, que comprende los meses del resto de estaciones.

Durante el periodo de invierno la demanda media por viaje de usuarios del trayecto Zaragoza – Canfranc puede llegar a ser como máximo un 10% de la capacidad de transporte de pasajeros del tren diseñado, siendo este motivado por la cercanía a las estaciones de esquí, y diferentes actividades estacionales realizadas alrededor en otras ciudades cercanas como Jaca y Sabiñánigo. Sin embargo, la demanda de los usuarios del trayecto Zaragoza – Huesca, que también cubre el tren de hidrógeno en su camino a Canfranc, mantendría un nivel del 70% de la ocupación cada viaje, al tratarse de un flujo constante de viajeros entre las capitales de provincia, por motivos laborales y académicos.

Mientras tanto, a diferencia del periodo de invierno, el periodo de verano presentaría un aumento significativo de la demanda, llegando a una demanda media por viaje del 50%. Esto se produciría por el periodo estival, el cual fomenta el aumento de actividades socioculturales en la zona del Pirineo y el aumento de la ocupación en ciudades y pueblos cercanos que en invierno tienen unos valores de población mínimos. Se estima que en este periodo el flujo de personas Zaragoza – Huesca podría reducirse a niveles del 30%

de la ocupación, siendo mayor la demanda para el trayecto Zaragoza – Canfranc, sobre todo durante los fines de semana. Todo ello ligado a una organización que adecúe la oferta del servicio del tren a la demanda horaria del público de la forma más eficiente.

Tabla 30. Demanda en función de la estación del año. Elaboración propia.

	Invierno	Verano
Zaragoza – Huesca	70%	30%
Zaragoza – Canfranc	10%	50%
Total	120 pasajeros / viaje	120 pasajeros / viaje

5.2 Flujos de transporte

Este apartado recoge de forma gráfica los cruces entre trenes que se producirían en el caso de implantar el tren de hidrógeno diseñado, manteniendo las horas de salida y con períodos de duración más cortos.

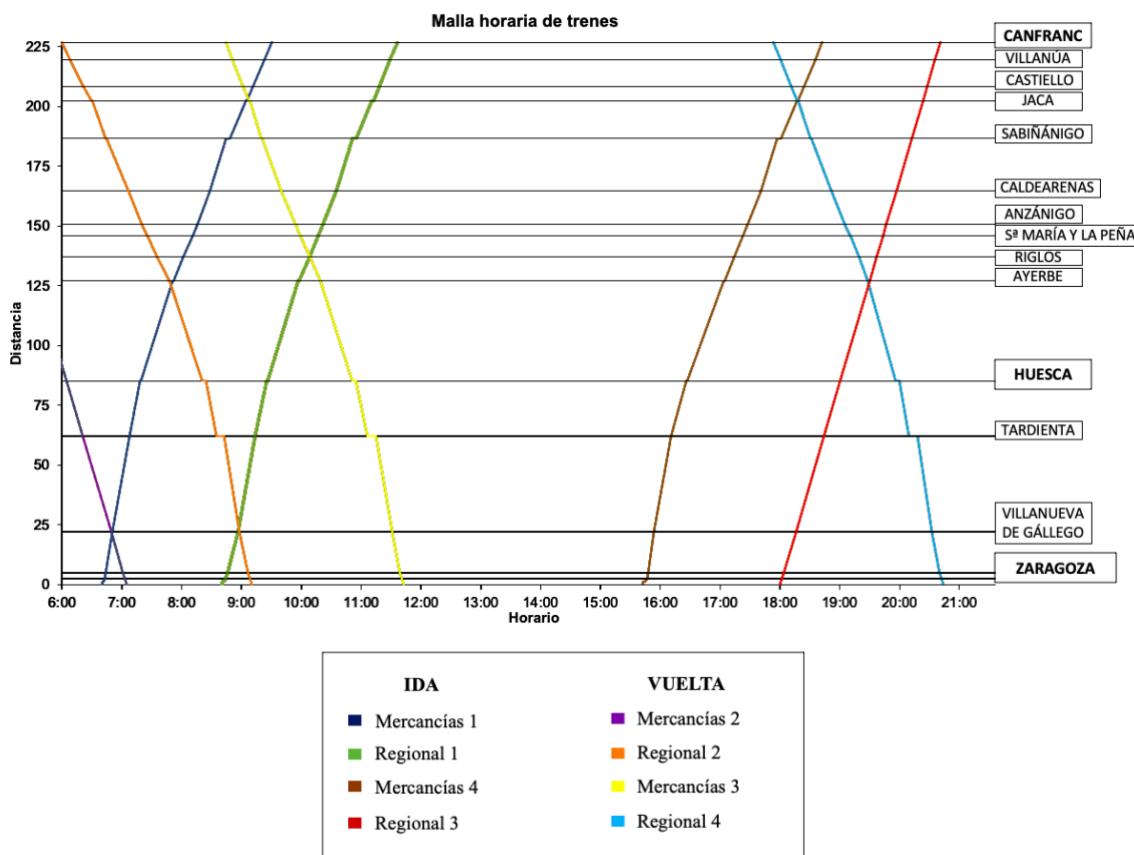


Figura 28. Malla horaria para un trayecto de 3 horas. Elaboración propia.

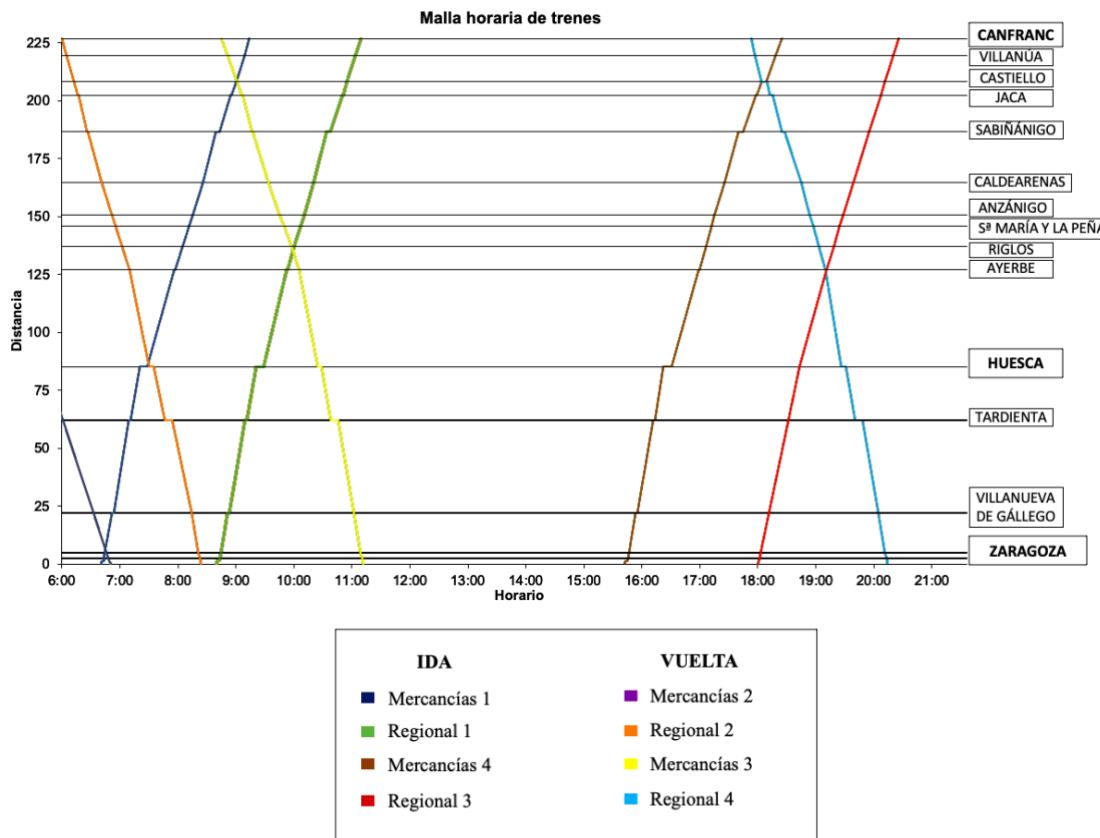


Figura 29. Malla horaria para un trayecto de 2 horas y 35 minutos. Elaboración propia.

5.3 Costes

5.3.1 Coste de inversión en infraestructura

En cuanto a la obtención del hidrógeno se distinguen dos situaciones:

- La primera, fabricar el hidrógeno en las mismas instalaciones donde se realiza el suministro, lo que supondría un gran impacto en el coste, por la infraestructura (planta de electrólisis) y además que el coste de fabricación del hidrógeno sería mayor debido a que los volúmenes de producción serían bajos.
- La segunda, obtener el hidrógeno en una instalación de producción externa y después trasladarlo a la planta de suministro. Esto supondría costes de transporte que aumentarían conforme la lejanía de esa planta.
Algunas de las formas de transporte más utilizadas son mediante tuberías o con tanques de hidrógeno comprimido trasladado con camiones.

Para el reabastecimiento de los trenes es necesaria la instalación de hidrogeneras, son estaciones de servicio que permiten suministrar el combustible a los vehículos de hidrógeno, con tiempos de repostaje similares a los empleados actualmente. Deben estar ubicadas en un espacio abierto y cumplir con la legislación y normativa vigente.

El coste varía dependiendo de la capacidad que tiene y de la forma en la que se obtiene el hidrógeno.

Tabla 31. Coste de la hidrogenera en función de la capacidad y generación. [43][42]

Capacidad hidrogenera [kg H ₂ /día]	Fabricación del hidrógeno		Transporte del hidrógeno	
	Por reformado de gas natural [M€]	Por electrólisis [M€]	Tanques de gas comprimido [M€]	Tuberías [M€]
100	0,9 – 2,6	1,0 – 2,6	1,1 – 7,8	0,7 – 2,1
480	1,9 – 4,6	1,9 – 5,4	1,9 – 2,4	1,5 – 2,9
1.000	3,2 – 4,8	4,0 – 7,9	3,2	2,4

En esta línea, las estaciones principales son la ciudad de Zaragoza y Canfranc, principio y final del recorrido, en las cuales deberían instalarse hidrogeneras por motivos de seguridad.

En Zaragoza se propone instalarla en el centro logístico de Plaza para la recarga de vehículos, la cual se encuentra a 15 kilómetros de la ciudad de Zaragoza. Para el repostaje del tren sería necesario que este modificara su recorrido. Tendría que llegar a Plaza Intermodal desde la estación Delicias y volver a la misma, que es desde donde se iniciará el trayecto.

Iberdrola lidera un proyecto que contempla la construcción de una hidrogenera en la plataforma logística de Plaza, su objetivo es generar y suministrar hidrógeno verde al transporte pesado de carretera, autobuses, vehículos ligeros particulares e industriales y el sector ferroviario. [44]



Figura 30. Plataforma logística de Plaza. [45]

En el caso de Canfranc no sería posible aprovechar una infraestructura cercana como es la de Plaza en Zaragoza, por lo que debería disponerse de una hidrogenera en la propia estación de Canfranc y de la infraestructura necesaria para el adecuado repostaje del tren de hidrógeno.

5.3.2 Coste de inversión en material móvil

Según VDE ‘Federación Alemana de Industrias Electrotécnicas, Electrónicas y de Tecnologías de la información el coste de un tren de hidrógeno está entorno a los 6,9 M€, y posee una vida útil de 30 años. [46]

Este coste engloba la pila de combustible, los tanques, la batería, motores, convertidores, la estructura del tren, las ruedas, asientos, alumbrado, sistemas ACS y calefacción, etc.

Para la línea Zaragoza – Canfranc, después de analizar su demanda, sería necesario la adquisición de dos trenes que supondrían un coste total de 13,8 M€.

5.3.3 Coste de explotación y mantenimiento

La puesta en funcionamiento del servicio generará un coste, que consta de las acciones de mantenimiento de la infraestructura, de la vía, del material móvil y de la propia explotación.

Se deberá tener en cuenta el coste de personal necesario para la explotación del servicio, los conductores de los trenes y trabajadores que se dediquen a la venta de billetes, al mantenimiento de las vías, controladores de tráfico, administración, limpieza, etc.

5.4 Flujos futuros y comercialización

En la actualidad el tren que circula de Zaragoza a Canfranc tiene poca demanda debido a que el tiempo de recorrido es elevado, al mal estado de la vía y a la poca oferta de horarios.

A continuación, se presentar una serie de ideas para reactivar el sistema y fomentar la circulación ferroviaria, pero garantizando un adecuado grado de fiabilidad, al ser un trazado con rampas pronunciadas y curvas cerradas.

5.4.1 Tráfico de autobuses

La línea de autobuses que comunica Zaragoza con Huesca realiza 28 servicios diarios de ida y vuelta, el tren por su parte solo hace 6 servicios de ida y vuelta.

Entre la ciudad de Zaragoza hasta Sabiñánigo y Jaca los autobuses garantizan 7 servicios diarios y el tren solo 2 que circulan hasta Canfranc.

Si se aumentara la oferta de viajes en tren y se organizase una buena coordinación entre los autobuses y el tren, tanto respecto a las circulaciones como a las tarifas, el tráfico regional por ferrocarril podría aumentar de manera importante.

5.4.2 Tráfico de mercancías

Actualmente, una media de 400 camiones circula en ambos sentidos desde o hacia Canfranc, si se considera una carga media de 20 toneladas por camión, el tonelaje transportado diario supone más de 12.000 toneladas y prevé aumentar con los años.

El objetivo es fomentar el tráfico ferroviario de mercancías y disminuir el uso de camiones, para conseguir, además de ingresos adicionales, la reducción de emisiones contaminantes para el medioambiente.

El desarrollo de este tren está ligado al potencial e interés internacional de la línea Pau-Canfranc-Zaragoza como punto transfronterizo entre la península ibérica y el resto de Europa. Cabe destacar la importancia del transporte del sector del cereal y agroalimentario desde el sur de Francia hacia la Península Ibérica, y de piezas de automoción entre Aragón y Alemania o Austria.

5.4.3 Impacto cultural

El paisaje es una característica a explotar de esta línea, la propuesta sería aumentar el número de viajes, involucrando al máximo los recursos económicos y culturales del territorio.

La línea pasa por importantes zonas turísticas como:

- La ciudad de Zaragoza (la basílica del Pilar y la Seo).
- Los Mallos de Riglos para escalar o hacer senderismo.
- El río Gállego para hacer rafting, kayak, paddle surf, barranquismo.
- El monasterio de San Juan de la Peña cerca de la ciudad de Jaca.
- Estaciones de esquí (Candanchú y Astún)
- La estación de Canfranc

Esta ruta también cuenta con un proyecto llamado ‘el tren geológico de prepirineo’ que es un tren turístico, que consiste en una excursión guiada en tren y senderismo. Realiza 4 viajes al año, el primer domingo de cada mes desde junio hasta septiembre.

Se propone aumentar la oferta de viajes del tren geológico para obtener mayores beneficios.

6 PROYECTOS FUTUROS

6.1 Conexión con Francia

El servicio ferroviario transpirenaico que une España con Francia, por el túnel del Somport, está interrumpido desde 1.970 a consecuencia de un accidente.

En 2.017 se presentó un proyecto para conseguir financiación para la rehabilitación de la línea Pau – Canfranc – Zaragoza con fin de lograr su reapertura para el tránsito internacional de pasajeros y mercancías.

Recientemente se ha firmado un Acuerdo donde se establece que la línea estará en funcionamiento en el 2.025. Contará con una vía única de ancho estándar europeo.

Esta línea cuenta con mucho potencial de carga ferroviaria. En lo que se refiere al transporte de mercancías, la ciudad de Zaragoza es un nexo de unión del transporte internacional, en ella se localizan grandes empresas de automóviles, productos metálicos, o de alimentación, como Opel, Balay, Mercazaragoza, Inditex, etc. En el otro extremo está Pau, que cuenta con empresas especializadas en la industria química, fertilizantes y en el sector del cereal.

El tren de hidrógeno podría realizar rápidamente conexiones transfronterizas, evitando una gran inversión en la electrificación de la vía y disminuyendo las emisiones contaminantes, además reduciría el tráfico de mercancías por carretera regional y transfronterizo, ya que, la demanda anual se estima en más de 2,5 millones de toneladas.

Por ello sería interesante el estudio del impacto económico y sociocultural que supondría la conexión ferroviaria de España y Francia.

6.2 Tren de hidrógeno en el territorio nacional

Los trenes impulsados por hidrógeno han despertado gran interés en el ámbito nacional, es por ello que numerosas empresas españolas están desarrollando diversos proyectos para crear trenes con esta tecnología y empezar a utilizarlos en zonas sin electrificar del territorio español y donde el servicio ferroviario presenta ciertas deficiencias, como son los territorios de la “España vaciada”.

En esta carrera por el desarrollo e implantación de estos trenes, España lleva un retraso con respecto a Europa, donde ya se han llevado a cabo ensayos de funcionamiento reales con éxito. Por ello, una propuesta que despertaría gran interés, tanto por su ahorro de material y costes, como por la rapidez de producción, sería estudiar la posibilidad de adaptar los trenes diésel existentes en el sistema ferroviario español con la tecnología de impulsión por hidrógeno.

Para ello, sería necesario estudiar la distinta orografía que presentan las vías españolas y la rentabilidad económica que supondría elevar las prestaciones de este medio de transporte. Este estudio no solo conllevaría el estudio técnico y constructivo de los trenes; sino un análisis de la infraestructura necesaria para el repostaje de hidrógeno en las zonas del territorio nacional donde no existe electrificación, y contrastar su viabilidad comparándolo con los costes que supone la electrificación de una vía.

7 CONCLUSIONES

La situación ferroviaria actual de la línea Zaragoza – Canfranc con la Serie 596 no es viable económicamente, debido a que la duración del recorrido es demasiado elevada, por las limitaciones técnicas del tren; presenta una oferta horaria muy reducida, lo que supone un flujo de viajeros bajo y, además el transporte de mercancías es escaso produciendo una gran congestión en la red de carreteras.

En primer lugar, se descarta la posibilidad de implantar la electrificación de las vías como sustituto del diésel, por la importante inversión inicial que requeriría, además cabe destacar la complicada orografía del recorrido y la gran cantidad de túneles que contiene lo que dificultaría la instalación de la catenaria.

En la búsqueda de cumplir con los desafíos medioambientales y los planes propuestos por distintos países del mundo, como la descarbonización del transporte; se está desarrollando un sistema ferroviario alimentado por celdas de combustible de hidrógeno que funciona con una tecnología libre de emisiones contaminantes.

Mediante el desarrollo de un tren alimentado a través de pilas de combustible de hidrógeno y el estudio de su implantación en la línea Zaragoza – Canfranc, se ha conseguido aumentar las prestaciones con respecto al tren diésel.

El tren ha sido diseñado con una potencia superior a la Serie 596, para poder alcanzar mayores velocidades y, de esa forma, reducir los tiempos de viaje. Se han analizado dos situaciones, consiguiendo una duración del recorrido total de 3 horas y de 2 horas y 35 minutos; reduciendo su duración actual de 4 horas.

Al haber mayor flexibilidad horaria, se prevé que la demanda de viajeros sea mayor, por ello, el nuevo tren se ha diseñado con una capacidad de 150 pasajeros frente a la Serie 596 que tiene 56.

Una mayor frecuencia de viajes, aumentará el transporte ferroviario de mercancías lo que supondría ingresos adicionales y la reducción de gases nocivos para el medioambiente al sustituir al transporte de mercancías por carretera.

8 REFERENCIAS

- [1] Global emissions (2019). *En Center for climate and energy solutions.* <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
- [2] The future of hydrogen (junio 2019). *En International Energy Agency.* <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [3] Morante, J.R., Andreu, T., Guilera, J. (2020) *Hidrógeno vector energético de una economía descarbonizada.* (2^a Ed). Fundación Naturgy.
- [4] Oscar Santiago (9 de octubre de 2016). *Coradia iLint un tren propulsado por pila de combustible.* <http://apilados.com/blog/coradia-ilint-tren-propulsado-pila-combustible/>
- [5] Pila de combustible de óxido sólido. (6 de febrero de 2021). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible_de_%C3%B3xido_s%C3%B3lido
- [6] Coradia iLint – Hydrogen fuel cell train, Rail conference, Alstom.
- [7] DDAAXX (2008). TCX Converter 2.0 [Software]. <https://tcx-converter.software.informer.com/Descargar-gratis/>
- [8] Adam Schneider (2003). Gps Visualizer [Software]. <https://www.gpsvisualizer.com/>
- [9] Declaración de la red ADIF (2021). *Mapa RFIG 2.* http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/20210405_02_ADIF_DR_Mapas_V0.pdf
- [10] Resistencia aerodinámica (20 de febrero del 2021). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_aerodin%C3%A1mica
- [11] Explotación técnica ferroviaria, ED. 4. Módulo 2 Dinámica del tren y consumo de energía. Página 8. *En Fundación de los ferrocarriles españoles.*
- [12] Diésel. (Agosto 2021). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* <https://es.wikipedia.org/wiki/D%C3%ADsel>
- [13] Factores de emisión. *Gobierno de España.* (Abril 2021). https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factoresemision_tcm30-479095.pdf
- [14] František Večeřa, Jaromír Pernička. (Enero 2018). *Fuel cell Coradia iLint on test.* <http://www.railvolution.net/news/fuel-cell-coradia-ilint-on-test>
- [15] García Álvarez, Alberto. Martín Cañizares, María Pilar. (2010) *Metodología del cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción.* https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/M5-ElecRail_Calculo-consumo.pdf
- [16] Una línea singular (2018). *Crefco.* <http://www.crefco.org/Articulo007.htm>

- [17] Study on the use of fuel cells and hydrogen in the railway environment. (2019) Report 2. *Shift2Rail*. <https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/04/Report-2.pdf>
- [18] Serie 596 de Renfe (21 de agosto del 2020). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://es.wikipedia.org/wiki/Serie_596_de_Renfe
- [19] Horarios Zaragoza a Canfranc. *Renfe.* <https://venta.renfe.com/vol/search.do?c=sXdb>
- [20] Más trenes entre Cuxhaven y Bremerhaven. (2011) <https://www.senatspressestelle.bremen.de/sixcms/detail.php?id=46677>
- [21] Bremerhaven – Buxtehude. (19 agosto 2021). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnstrecke_Bremerhaven%E2%80%93Buxtehude
- [22] Coradia Lint 54. (9 de enero de 2020). *En Trainspo.* <https://trainspo.com/model/5086/>
- [23] Horarios Cuxhaven a Buxtehude KB. *Renfe.* http://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe/dn/KB122_EVB_RB_33_H_Taeglich_G25112020.pdf?filename=KB122_EVB_RB_33_H_Taeglich_G25112020.pdf&orig=sS
- [24] Obtienen combustible de hidrógeno a partir de agua de mar. *Avatar energía.* <https://avatarenergia.com/hidrogeno-a-partir-de-agua/>
- [25] Pedro Ángeles Chero (2014). *Fuentes para obtención de hidrógeno.* <https://hidrogeno18.wixsite.com/hidrogeno/blank-cjg9>
- [26] Rubén Pozo Baquero (23 de julio de 2019). *Almacenamiento de hidrógeno.* <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- [27] Alstom mobility by nature. <https://www.alstom.com/es/alstom-en-espana>
- [28] BBC News Mundo. (18 de septiembre de 2018). *Así funciona el tren de hidrógeno que inició operaciones en Alemania.* <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45552735>
- [29] La radio del transporte. (13 de noviembre de 2017). *El Coradia iLint de Alstom el primer tren que se alimenta con pila de combustible.* <https://laradiodeltransporte.wordpress.com/2017/11/13/el-coradia-ilint-de-alstom-el-primer-tren-que-se-alimenta-con-pila-de-combustible/>
- [30] DW. (19 de septiembre de 2018). *Coradia iLint arranca el primer tren cero emisiones en Alemania.* <https://www.dw.com/es/coradia-ilint-arranca-el-primer-tren-cero-emisiones-en-alemania/a-45555411>
- [31] Porterbrook logo (septiembre 2020). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://en.wikipedia.org/wiki/File:Porterbrook_logo.svg
- [32] British Rail Class 319. (26 de julio de 2021). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_319

- [33] British Rail Class 799. (10 de junio de 2021). *En Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_Class_799
- [34] Luz verde al primer tren de hidrógeno de Reino Unido. (28 de junio de 2019). *En híbridos y eléctricos.* <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/prueba-primer-tren-hidrogeno-reino-unido/20190628151401028662.html>
- [35] HydroFLEX Hydrogen Train. (junio 2019). *En Railway Technology.* <https://www.railway-technology.com/projects/hydroflex-hydrogen-train>
- [36] Enrique Pérez. (20 de noviembre de 2020). *España se apunta al tren de hidrógeno.* <https://www.xataka.com/vehiculos/espana-se-apunta-al-tren-hidrogeno-talgo-presenta-primer-prototipo-pila-combustible-para-cercanias-media-distancia>
- [37] Características técnicas Talgo Vittal. *En Talgo .* <https://www.talgo.com/es/vittal>
- [38] Tren Vista (20 de noviembre de 2020). José María Oriol habla del Talgo Vittal One en la jornada de hidrógeno renovable. Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=j0andjoBS08&t=16sc>
- [39] Línea Elbe-Weser horarios RB33. *Moovit, compañía Intel.* https://moovitapp.com/index/es/transporte_p%C3%BAblico-line-RB33-Bremen_Niedersachsen-5417-1130041-2559751-0
- [40] Barrau Marc, Wolff Dan, Nolte Julian. (Diciembre 2019) *Livre Blanc. Palancas de optimización del tráfico de la línea Pau-Canfranc-Zaragoza.* <https://www.canfraneus.eu/wp-content/uploads/2019/12/RNA-LivreBlanc-PauCanfranc-A4-Espanol-1219Web.pdf>
- [41] Zaragoza-Canfranc-Pau un ferrocarril del futuro. (Junio 2019). *CREFCO y CRELOC.* http://le-creloc.com/wp-content/uploads/2019/09/LivreBlanc_Pau-Canfranc-Saragosse_CRELOC-CREFCO_juin-2019_web.pdf
- [42] Desiro y Coradia, los últimos trenes diésel para servicios regionales (2004). *Trenes del mundo.* https://www.vialibre-ffe.com/pdf/11529_pdf_03.pdf
- [43] Rozas Romero, Antonio. (2019). *Estado del arte de las estaciones de servicio de hidrógeno.* <http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/92659/fichero/TFG-2659+ROZAS+ROMERO.pdf>
- [44] López Redondo, Noelia. (Abril 2021). *Iberdrola proyecta hidrogeneras en Zaragoza, Valencia y Murcia.* <https://www.energynews.es/iberdrola-proyecta-hidrogeneras-en-zaragoza-valencia-alicante-y-murcia/>
- [45] Adif. http://www.adif.es/es_ES/ocio_y_cultura/fichas_informativas/ficha_informativa_00035.shtml
- [46] El transporte de hidrógeno es hasta un 30% más caro que el eléctrico. (Julio 2021) <https://www.economista.es/empresas-finanzas/noticias/11267716/06/21/El-transporte-de-hidrogeno-es-hasta-un-30-mas-carro-que-el->

[electrico.html#:~:text=Seg%C3%BAn%20VDE%2C%20el%20coste%20de,bater%C3%ADAs%20en%206%2C2%20millones](#)

[47] Romero, Manuel. (2022). *Informe económico del proyecto de un. Tren para Gran Canaria.*

https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/34/34984/informe_tren_gran_canaria_ulpgc.pdf

[48] El Canfranc, 9 preguntas 9 respuestas. Crefco.

<http://www.crefco.org/9%20preguntas%209%20respuestas.pdf>

[49] Estación de Canfranc. (23 noviembre de 2020)

<https://www.estaciondecanfranc.es/2020/11/23/el-consejero-de-vertebracion-del-territorio-movilidad-y-vivienda-jose-luis-soro-describe-como-sera-la-linea-internacional-de-canfranc-que-se-preve-que-este-puesta-en-marcha-en-2025/>