



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER **DESARROLLO CONCEPTUAL DE LA CADENA DE TRACCIÓN DE UN TREN DE HIDRÓGENO**

Autor: Rodríguez-Ponga Eyriès, María de los Ángeles

Director: Eduardo de la Guerra Ochoa

Entidad Colaboradora: Talgo

Madrid

Julio de 2020

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Desarrollo conceptual de la cadena de tracción de un tren de hidrógeno

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2019/2020 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

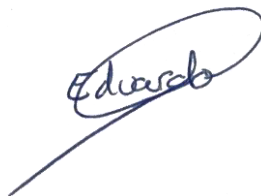
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: María Ángeles Rodríguez-Ponga Eyriès Fecha: 04/08/2020

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Eduardo de la Guerra Ochoa

Fecha: 04/08/2020



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER **DESARROLLO CONCEPTUAL DE LA CADENA DE TRACCIÓN DE UN TREN DE HIDRÓGENO**

Autor: Rodríguez-Ponga Eyriès, María de los Ángeles

Director: Eduardo de la Guerra Ochoa

Entidad Colaboradora: Talgo

Madrid

Julio de 2020

DESARROLLO CONCEPTUAL DE LA CADENA DE TRACCIÓN DE UN TREN DE HIDRÓGENO

Autor: Rodríguez-Ponga Eyriès, M^aÁngeles.

Director: Guerra Ochoa, Eduardo de la.

Entidad Colaboradora: Talgo

RESUMEN DEL PROYECTO

En respuesta al desafío energético actual, se estudió la aplicación de la tecnología de pila de combustible de hidrógeno en el sector ferroviario para sustituir los motores diésel de los trenes. En concreto, se realizó un estudio sobre el diseño conceptual de la cadena de tracción con esta tecnología en contribución al proyecto del futuro prototipo de tren híbrido hidrógeno-baterías-catenaria adaptado a un tren Talgo. Después de elaborar una herramienta de cálculo de recorrido para el estudio de consumos de potencia, se analizaron las posibles configuraciones de la cadena de tracción hasta llegar al prediseño final. A este diseño se añaden informes sobre el estudio de la seguridad en la operación con hidrógeno, las fuentes de tracción alternativas, además de estudios sobre la sostenibilidad; y la viabilidad económica y tecnológica de las pilas de combustible de hidrógeno. En conclusión, el hidrógeno se presenta como una solución flexible, libre de emisiones en el tráfico ferroviario y competitiva en términos tanto económicos como tecnológicos en un medio-largo plazo.

Palabras clave: Hidrógeno, pila de combustible, descarbonización, tren híbrido

1. Introducción

La creciente demanda energética por el aumento de la movilidad en las ciudades junto con la incesante preocupación sobre la sostenibilidad del medio ambiente ante el desarrollo de las industrias ha ocasionado el planteamiento de nuevos desafíos. Estos han quedado reflejados en los objetivos recogidos en el Acuerdo de París [1], en el Libro Blanco del Transporte de la Comisión Europea de 2011 [2] y en los ODS [3] de las Naciones Unidas.

Ante este desafío energético y de movilidad, el ferrocarril se presenta como un modo de transporte, que comparado a los demás es más eficiente en términos de energía y que podría contribuir favorablemente al cumplimiento de los objetivos si se empleasen fuentes alternativas de tracción. Por tanto, surge la necesidad en el sector ferroviario, de orientar su desarrollo hacia soluciones limpias, que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyan a la sostenibilidad energética.

En este documento se estudia la incorporación de la tecnología de hidrógeno en el sistema de tracción de un tren Talgo existente, de tracción eléctrica con pantógrafo. Concretamente, se recoge el diseño conceptual de la cadena de tracción de un futuro prototipo de tren híbrido

hidrógeno-baterías-catenaria, cumpliendo con los requisitos funcionales especificados por Talgo.

Además de Talgo, otros fabricantes de material rodante ya han confirmado que están invirtiendo en la aplicación de la tecnología de hidrógeno en sus próximos desarrollos. La pila de combustible de hidrógeno se plantea como una fuente de energía competitiva frente al resto de alternativas de tracción como son el diésel, el gas natural y los acumuladores de energía. Alstom ya ha demostrado en su tren Coradia iLint [4] la viabilidad tecnológica y estratégica de las pilas de combustible de hidrógeno para el sector ferroviario.

2. Metodología

El estudio se divide en dos fases. En primer lugar, se analizó el contexto de la tecnología de hidrógeno, su competitividad respecto a otras fuentes de energía, su aplicación para el sector ferroviario y finalmente, un análisis DAFO y económico de la misma.

Por otro lado, y siendo el principal objetivo de este trabajo, se realizó la configuración preliminar de la cadena de tracción del futuro prototipo híbrido hidrógeno-batería-catenaria. Para ello, el primer paso fue elaborar un modelo de simulación de cálculo de recorrido basado en un método de resolución iterativo con paso constante entre punto kilométrico. Un modelo, que a partir de unas variables de entrada: curva de resistencia, curva de tracción, límites de velocidad, trazado de la vía, paradas en estación, etc. calcula los consumos de potencia del tren, la energía consumida y regenerada, el tiempo total del trayecto, etc. A partir de estos valores se determinaron los requisitos funcionales del tren en su recorrido y consecuentemente los de los elementos que configurarían la nueva cadena de tracción. En base a estos requisitos y las conclusiones del estudio preliminar de la seguridad en la operación con hidrógeno, realizado paralelamente al desarrollo de la herramienta, se preseleccionaron los elementos del nuevo sistema de tracción: baterías, tanques de hidrógeno, pila de combustible y elementos de seguridad.

Elegidos los elementos, se procedió a la evaluación de los siguientes pasos: su integración en la cadena de tracción del tren actual, especificación de los equipos, normativas a tener en cuenta para garantizar la seguridad en su operación; detalle de los pasos para la elaboración de un plan de seguridad, así como, la logística de suministro, la hidrogenera.

Finalizados estos estudios adicionales, se evaluó el impacto medioambiental que supondría la sustitución de los trenes diésel por trenes de tracción híbrida hidrógeno-batería.

3. Resultados

La herramienta de cálculo de recorrido permite evaluar, a lo largo del recorrido del tren, el valor de las siguientes variables: aceleración, velocidad media, tiempo, consumo medio, potencia media de tracción, energía cargada en baterías, energía consumida en baterías, energía consumida del hidrógeno, balance final de las baterías; para obtener los resultados recogidos en la Figura 1.

Sentido	Hidrógeno necesario (kg)	kg/km de H ₂	Potencia instalada FC (kW)	Potencia media FC (kW)	Potencia instalada baterías (kW)	Mín. Energía inicial baterías (kWh)	Pot instalada para auxiliares (kW)	Energía consumida por auxiliares (kWh)
Ida	53	0,24	600	472	300	185	250	467,6
Vuelta	66	0,30	600	519	300	390	250	534,3

Figura 1 Requisitos de los equipos de la cadena de hidrógeno

A su vez, la herramienta permite monitorizar visualmente la velocidad del tren a lo largo del recorrido, la curva de tracción frente a la de frenado, el consumo energético y la potencia del tren. Se decidió simular el tren como un tren cercanías ya que es para este tipo de tren para el que la nueva tecnología ofrece una mejor respuesta en términos de funcionamiento. Por ello, se realizaron simulaciones con y sin paradas. En las figuras 2 y 3 se muestra la velocidad del tren en dos simulaciones distintas.

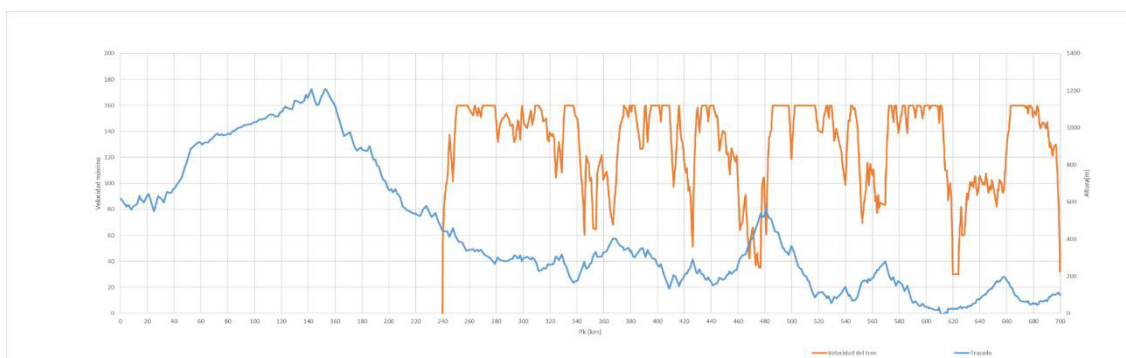


Figura 2 Simulación recorrido Madrid-Barcelona sin paradas

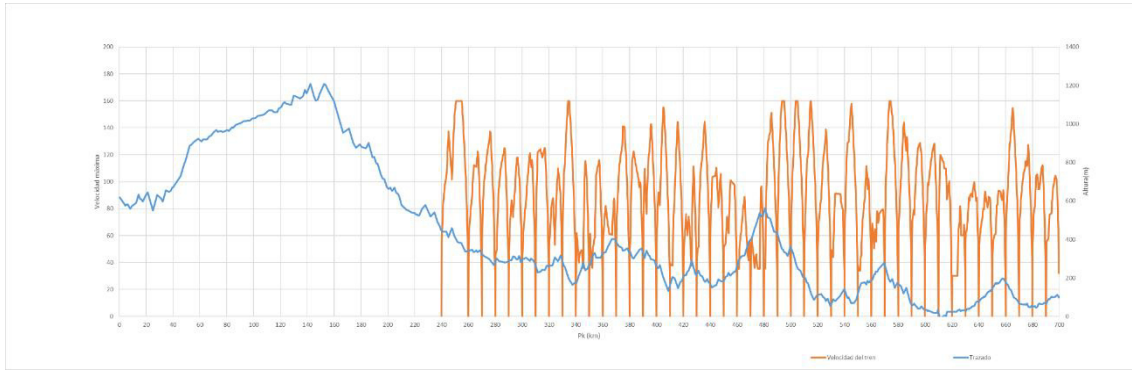


Figura 3 Simulación recorrido Madrid-Barcelona con paradas cada 10 km

A continuación, se muestra el comportamiento energético del tren para cada punto kilométrico:

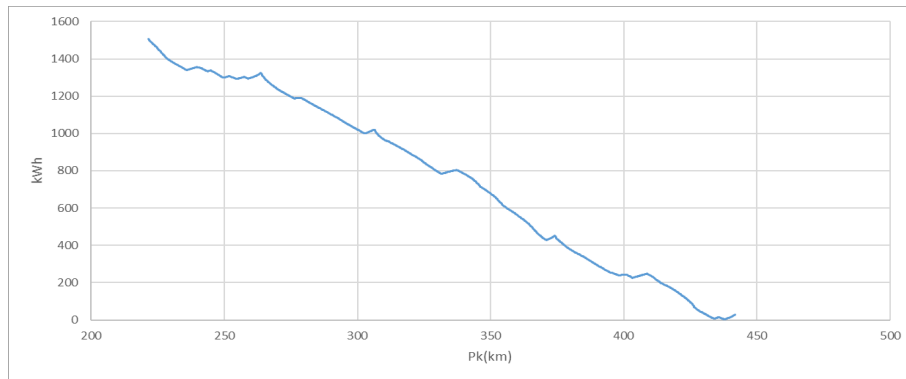


Figura 4 Descarga de la energía total del sistema

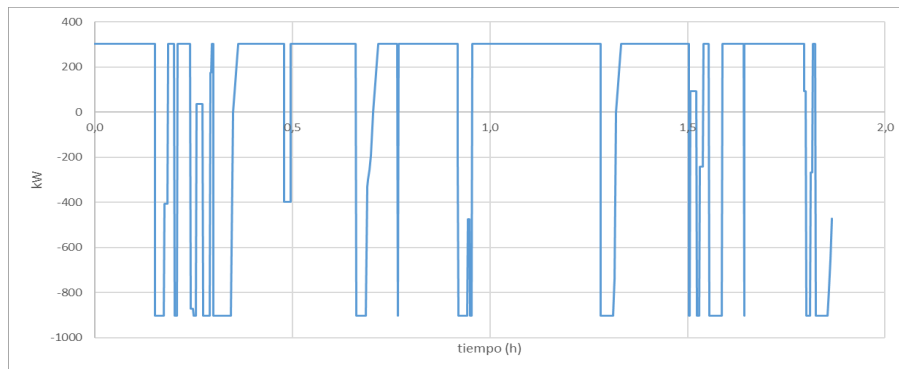


Figura 5 Potencia de las baterías (carga/descarga)-solo tracción

En base a todos los datos obtenidos de las simulaciones de cálculo de recorrido para el tren en diversos tramos, se eligió uno para las pruebas y se determinó, cumpliendo con los requisitos de seguridad para la operación con hidrógeno, las características del nuevo diseño, el tren híbrido hidrógeno-baterías-catenaria, recogidas en el siguiente cuadro:

Características del tren:

- Dinámicas y capacidades:
 - Velocidad máxima: 160 km/h
- Consumo y alcance
 - Consumo de combustible: 0,27 kg de H₂/km
 - Recorrido medio por tanque: 450 km
- Sistema de hidrógeno a bordo
 - Presión: 350 bar
 - Número de tanques: 15
 - Capacidad de almacenamiento: 126 kg
 - Sistema de pila de combustible: Ballard, modelo HD100 FC
 - Potencia de pila de combustible: 600 kW
- Tren de potencia:
 - Tipo de motor de tracción: T350
 - Sistema de hibridación: Baterías de ión de litio-Toshiba
 - Potencia:
 - Conjunto-tracción y auxiliares: 600 kW
 - Tracción: 300 kW + Auxiliares: 250 kW
 - Capacidad de almacenamiento de energía
 - Conjunto-tracción y auxiliares: 911 kWh
 - Tracción: 390 kWh + Auxiliares: 543 kWh
- Coste:
 - Material rodante: 2360 k€
 - Infraestructura: 1000 k€
 - Combustible de hidrógeno: 27 k€ (3000 kg para pruebas)
 - Ingeniería: 743 k€

4. Conclusiones

Seleccionados los equipos de la cadena de tracción acorde con los resultados obtenidos de la simulación del recorrido; realizado el estudio detallado de su integración en el tren Talgo y planteada la logística de suministro de hidrógeno, se concluye el estudio del diseño conceptual de la cadena de tracción del futuro prototipo de hidrógeno.

En cuanto a la tecnología, queda demostrada la viabilidad del hidrógeno como vector energético para futuros diseños ferroviarios y la oportunidad que representa para la innovación hacia soluciones de transporte sostenibles.

5. Referencias

- [1] Acuerdo de París (COP21)
https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- [2] White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system.
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:en:PDF>
- [3] Objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [4] Alstom, “Coradia iLint-The world’s 1st hydrogen powered train”
<https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>

CONCEPTUAL DEVELOPMENT OF THE TRACTION CHAIN OF A HYDROGEN POWERED TRAIN

Autor: Rodríguez-Ponga Eyriès, M^aÁngeles.

Director: Guerra Ochoa, Eduardo de la.

Entidad Colaboradora: Talgo

SUMMARY OF THE PROJECT

In response to the current challenge on sustainable development, the application of the hydrogen fuel cell technology in the railway sector has been brought to analysis with the aim of replacing the diesel engines of the current train fleet. In particular, the following document is the result of a study on the conceptual design of the traction chain with this technology incorporated in contribution to the project of the future hybrid train prototype, hydrogen-battery-catenary, based on an original Talgo train. With this objective, a route calculation tool was developed to study the power consumption of the train. Based on the results obtained through many simulations carried out with the tool, different configurations of the traction chain were analyzed until the final pre-design was reached. Further reports on the safety in the operation with hydrogen, on the alternative traction sources as well as additional studies on sustainability and on the economic and technological feasibility of the hydrogen technology were produced. In conclusion, hydrogen offers a flexible solution, free of emissions for the rail traffic and competitive in both economic and technological terms in the medium-long term.

Keywords: Hydrogen, fuel cells, decarbonization, hybrid train

1. Introduction

The growing demand of energy due to the increased mobility in cities together with the relentless concerns about environmental sustainability in response to the development of industries, has led to the appearance of new challenges. These have been reflected in the objectives contained in the Paris Agreement [1], in the 2011 European Commission Transport White Paper [2] and in the United Nations SDGs [3].

In regards to the actual energy and mobility challenge, the railway is presented as a mode of transport, which compared to others is more efficient in terms of energy and which could contribute favorably to meet the mentioned objectives if alternative traction sources were used. Therefore, the railway sector needs to respond by guiding its new developments towards clean solutions that reduce greenhouse gas emissions and contribute to the sustainability of energy.

This document studies the application of hydrogen technology in the traction system of an existing Talgo train, with electric traction with pantograph. Specifically, collects the

conceptual design of the traction chain of the future prototype, a hydrogen-battery-catenary hybrid train, complying with the functional requirements specified by Talgo.

Besides Talgo, other manufacturers of rolling stock have already confirmed that they are investing in the application of hydrogen technology in their future developments. The hydrogen fuel cell is considered as a competitive energy source compared to other traction alternatives such as diesel, natural gas, and energy accumulators. Alstom has already demonstrated on its train, the Coradia iLint [4] the technological and strategic feasibility of hydrogen fuel cells for the railway sector.

2. Methodology

The study is divided into two phases. At first, the context of hydrogen technology, its competitiveness with respect to other energy sources, its application for the railway sector, with a final SWOT and economic analysis, were studied.

On the other hand, and being the main objective of the whole research, the preliminary configuration of the traction chain of the future hydrogen-battery-catenary hybrid prototype was carried out. To do this, the first step taken was the development of a route calculation tool, a simulation model, based on an iterative resolution method with constant step between each kilometer point. A model that, based on some input variables: resistance curve, traction curve, speed limits, track layout, station stops, etc. calculates the power consumption of the train, the energy consumed and regenerated, the total time of the journey, etc. Based on these values, the functional requirements of the train along its route were determined and consequently those of the elements that would configure the new traction chain. Based on these requirements and the conclusions of the preliminary study of safety in hydrogen operations, conducted simultaneously with the development of the route calculation tool, the elements of the new traction system were pre-selected: batteries, hydrogen tanks, fuel cells and elements of security.

Once the elements were chosen, the following steps were evaluated: the integration of the elements into the traction chain of the current train, the specification of the equipment, the regulations the design must comply with to ensure safety in its operation, the follow-up plan to prepare the security plan, as well as the logistic activities for the hydrogen supply.

After these additional studies were completed, the environmental impact of replacing diesel trains with hybrid hydrogen-battery traction trains was evaluated.

3. Results

The route calculation tool monitors, along the distance traveled by the train, the value of all the following variables: acceleration, average speed, time, average consumption, average traction power, energy charged in batteries, energy consumed in batteries, energy consumed by hydrogen, final balance of the batteries; to get the results shown in the figure bellow, Figure 1.

Direction	Hydrogen (kg)	kg/km of H ₂	FC Installed Power (kW)	FC Average Power (kW)	Batteries Installed Power (kW)	Min. Batteries Initial Energy (kWh)	Auxiliary Equipment Installed Power (kW)	Auxiliary Equipment Consumed Energy (kWh)
Going	53	0,24	600	472	300	185	250	467,6
Coming	66	0,30	600	519	300	390	250	534,3

Figure 6 Hydrogen Chain Equipment Requirements

Moreover, the tool allows to visually monitor the speed of the train along the route, the traction curve versus the braking curve, the energy consumption, and the train power. The simulations were carried out considering the train as a commuter train since it is for this type of train for which the new technology offers a better response in terms of operation. Therefore, simulations with and without stops were carried out. Figures 2 and 3 show the speed of the train along the route in two different simulations.

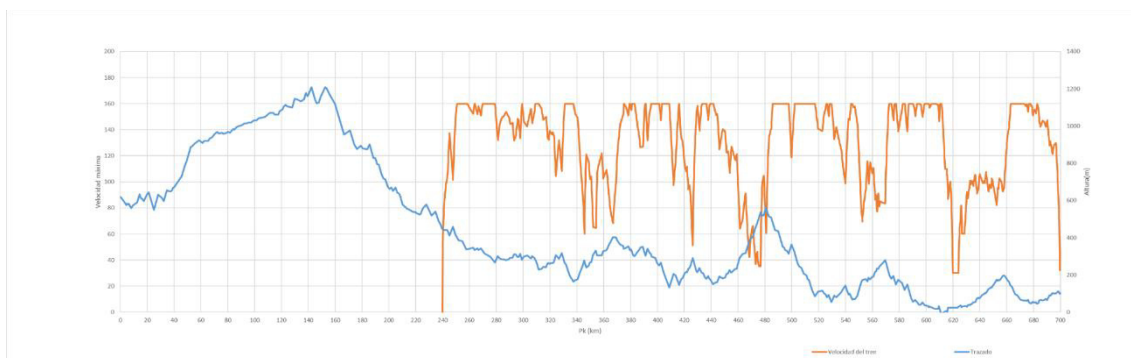


Figure 7 Route simulation Madrid-Barcelona without stops

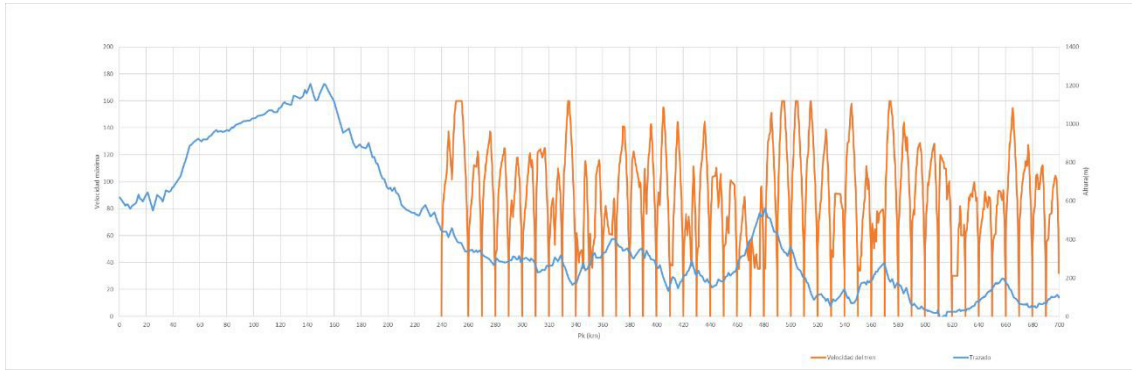


Figure 8 Route simulation Madrid-Barcelona with stops every 10 km

Shown below, the energy behavior of the train for each kilometer point:

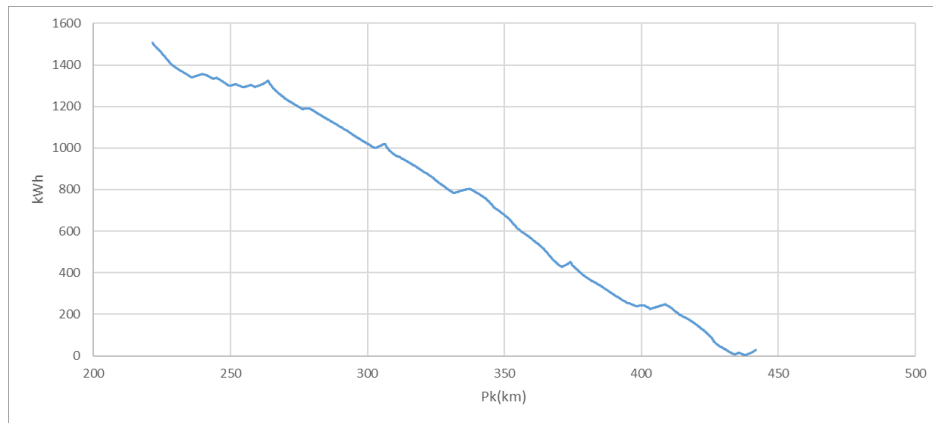


Figure 9 Discharge of total system energy

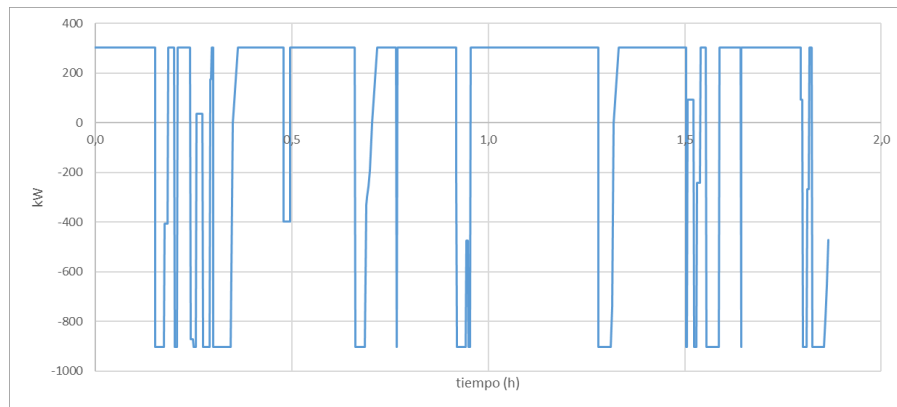


Figure 10 Battery power (charge/discharge)-traction only

Based on all the data obtained from the simulations performed for the train in different routes, one route was chosen for the prototype tests and with the final results, together with the security requirements, the train specifications were determined. The following table contains the relevant data of the new design, a hybrid hydrogen-battery-catenary train.

Train specifications:

- Dynamics:
 - Maximum speed: 160 km/h
- Consumption and scope
 - Fuel consumption: 0,27 kg de H₂/km
 - Average route per tank: 450 km
- Onboard hydrogen system
 - Pressure: 350 bar
 - N° of tanks: 15
 - Storage capacity: 126 kg
 - Fuel cell system: Ballard, HD100 FC
 - Fuel cell power: 600 kW
- Power train:
 - Type of traction motor: T350
 - Hybridization system: Toshiba lithium ion batteries
 - Power:
 - One set-traction & aux. elements: 600 kW
 - Traction: 300 kW + aux. elements: 250 kW
 - Energy storage capacity
 - One set-traction & aux. elements: 91 kWh
 - Traction: 390 kWh + Aux. elements: 543 kWh
- Cost:
 - Rolling stock: 2360 k€
 - Infrastructure: 1000 k€
 - Hydrogen fuel: 27 k€ (3000 kg for testing purposes)
 - Engineering: 743 k€

4. Conclusion

Selected the equipment of the traction chain according to the results obtained from the simulation of the selected route; studied their integration into the Talgo train and considered the logistic activities for the hydrogen supply, the study of the conceptual design of the traction chain of the future hydrogen prototype is concluded.

Regarding the technology, the document demonstrates the viability of hydrogen as an energy vector for future railway designs and the opportunity it represents for innovation towards sustainable transport solutions.

5. References

- [5] Paris Agreement (COP21)
https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- [6] White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system.
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:en:PDF>
- [7] United Nations Sustainable Development Goals
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [8] Alstom, “Coradia iLint-The world’s 1st hydrogen powered train”
<https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Objetivo.....	8
1.2 Motivación del proyecto.....	8
Capítulo 2. Estado del arte	11
Capítulo 3. Fuentes de tracción alternativas.....	13
3.1 Alternativas de tracción	13
3.2 Comparativa de las tecnologías	15
Capítulo 4. El hidrógeno	17
4.1 Análisis dafo.....	17
4.2 Análisis económico	20
4.3 Consideraciones adicionales sobre la tecnología	22
Capítulo 5. La cadena de tracción	23
5.1 Detalle sobre el tren con configuración I.....	23
Capítulo 6. Descripción detalla del cálculo de recorrido	25
6.1 Cálculo de recorrido	25
6.1.1 Inputs del modelo.....	25
6.1.2 Modelo de cálculo de recorrido.....	28
6.1.3 Outputs del modelo.....	32
Capítulo 7. Estudio de seguridad de la operación con hidrógeno	45
7.1 Propiedades Físico-Químicas del hidrógeno.....	45
7.2 Riesgos en la operación con hidrógeno.....	46
7.2.1 Medidas de mitigación.....	47
7.2.2 Medidas de control	49
7.3 Plan de seguridad.....	50
7.4 Componentes del sistema sujetos a regulación	51
7.4.1 Reglamento relativo a la homologación de los vehículos impulsados por hidrógeno en estado gaseoso.....	51
7.5 Requisitos preliminares de seguridad para la instalación.....	58
Capítulo 8. Prediseño de la cadena de tracción	61

8.1	Dimensionamiento de los elementos de la cadena	61
8.2	Integración de los elementos de la cadena en el tren avril	63
8.3	La cadena de tracción del tren avril	66
8.4	Modos de funcionamiento	66
8.5	Hidrogena.....	67
Capítulo 9. Impacto medioambiental.....		71
9.1	ODS.....	71
9.2	Cálculo de emisiones reducidas	72
Capítulo 10. Conclusiones.....		77
Capítulo 11. Bibliografía.....		79
ANEXO I		81
ANEXO II		91

Índice de figuras

Figura 1 Esquema pila de combustible.....	11
Figura 2 Acumuladores de energía [7]	13
Figura 3 Consumo de gasóleo y energía eléctrica en tracción ferroviaria.....	19
Figura 4 Esquema del tren AVRIL.....	25
Figura 5 Curva de tracción	27
Figura 6 Descarga de las baterías a lo largo del recorrido por consumo de tracción	35
Figura 7 Descarga de las baterías a lo largo del recorrido por consumo de tracción	35
Figura 8 Descarga de la energía total a lo largo del recorrido por consumo de tracción más auxiliares.....	36
Figura 9 Descarga de la energía total a lo largo del recorrido por consumo de tracción más auxiliares.....	36
Figura 10 Comparativa de potencia.....	37
Figura 11 Baterías para tracción a lo largo del recorrido	40
Figura 12 Baterías para tracción y auxiliares (conjunto) a lo largo del recorrido	40
Figura 13 Descarga de la energía total del sistema	40
Figura 14 Potencia de las baterías (carga/descarga). Sólo tracción.....	41
Figura 15 Baterías para tracción a lo largo del recorrido	41
Figura 16 Baterías para tracción y auxiliares (conjunto) a lo largo del recorrido	41
Figura 17 Descarga de la energía total del sistema	42
Figura 18 Potencia de las baterías (carga/descarga). Sólo tracción.....	42
Figura 19 Ensayo de lotes de depósitos.....	53
Figura 20 Exámenes y ensayos de producción para cada deposito	54
Figura 21 Documentación de la especificación del material	54
Figura 22 Documentación de la especificación de los ensayos de material	55
Figura 23 Documentación de los ensayos de los depósitos.....	55
Figura 24 Ensayos de los componentes de hidrógeno distintos de los depósitos.....	56
Figura 25 Catálogo Hexagon Purus Hydrogen Type IV	61
Figura 26 Configuración I	63

Figura 27 Configuración II	64
Figura 28 Configuración III.....	64
Figura 29 Vista completa 3D del coche.....	65
Figura 30 Vista lateral del coche	65
Figura 31 Vista de la instalación de los equipos en el coche	65
Figura 32 Esquema de tracción del tren AVRIL	66
Figura 33 Esquema conceptual del sistema híbrido	67
Figura 34 Esquema hidrogena fija-móvil [20]	68
Figura 35 Esquema I hidrogena móvil	68
Figura 36 Esquema II hidrogena móvil	69
Figura 37 misiones de la tracción diésel en infraestructura titularidad de Adif	73
Figura 38 Dióxido de carbono equivalente.....	73
Figura 39 Metas anuales de reducción de emisiones de GEI (t CO ₂ eq/año) por el cambio modal	76
Figura 40 Cuadro resumen características del tren prototipo	78

Índice de tablas

Tabla 1 Comparativa de las alternativas de tracción al diésel	16
Tabla 2 Presupuesto del proyecto(I).....	20
Tabla 3 Presupuesto del proyecto (II).....	20
Tabla 4 Comparativa de costes de producción y mantenimiento y gastos de suministro ...	21
Tabla 5 Datos de entrada curva de resistencia.....	27
Tabla 6 Análisis de sensibilidad en función de la deceleración para un recorrido sin paradas	32
Tabla 7 Análisis de sensibilidad en función de la deceleración para un recorrido con paradas cada 20 km.....	33
Tabla 8 Análisis de sensibilidad en función de la deceleración para un recorrido con paradas cada 10 km.....	33
Tabla 9 Resultados de la simulación: Características del recorrido	34
Tabla 10 Requisitos de los equipos de la cadena de hidrógeno.....	34
Tabla 11 Resultados de la simulación: Características del recorrido	38
Tabla 12 Requisitos de los equipos de la cadena de hidrógeno.....	38
Tabla 13 Paradas introducidas	38
Tabla 14 Resultados de la simulación: Características del recorrido	39
Tabla 15 Requisitos de los equipos de la cadena de hidrógeno.....	39
Tabla 16 Energía y potencia de los equipos	39
Tabla 17 Requisitos funcionales de los elementos de la cadena	42
Tabla 18 Riesgos y medidas de prevención (I).....	48
Tabla 19 Riesgos y medidas de prevención (II)	49
Tabla 20 Medidas de contingencia	49
Tabla 21 Peso de los equipos seleccionados	63
Tabla 22 Emisiones del tren con tracción diésel en el recorrido de estudio.....	74
Tabla 23 Resumen emisiones	75

Acrónimos

- GNC: Gas Natural Comprimido
- GNL: Gas Natural Licuado
- FMEA: *Failure Mode and Effect Analysis*
- HAZOP: *Hazard Operability Analysis*
- QRA: *Quantitative Risk Assessment*
- LCC: *Life Cycle Costing*

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el incremento de la movilidad en las ciudades junto con la creciente preocupación por el deterioro del medio ambiente y consecuente presión por parte de grupos medioambientales, ha impulsado a las empresas del sector ferroviario hacia la búsqueda de nuevas alternativas energéticas al diésel que reduzcan las emisiones de carbono.

Tanto es así, que varios operadores de material rodante ya han establecido objetivos específicos al respecto. Por ejemplo, la operadora alemana Deutsche Bahn ha comunicado que para 2030 habrá reducido sus emisiones en un 50%, mientras que la SNCF se ha propuesto alcanzar en 2025 una reducción de las emisiones y un aumento de la eficiencia energética de un 25%, llegando a 2035 sin ningún motor diésel en sus vehículos [1].

En las últimas dos décadas se han planteado en Europa iniciativas regulatorias para la reducción de las emisiones de efecto invernadero y la optimización de las nuevas tecnologías hacia un modelo energético cada vez más sostenible. Estas se reflejaron en los Acuerdos de París con los escenarios 2DS y B2DS [2]. Los gobiernos acordaron limitar el crecimiento de la temperatura media mundial a 2°C. Además, en el documento el Libro Blanco del Transporte de la Comisión Europea de 2011 [3], se establecieron objetivos de reducción de los gases de efecto invernadero en un 60% para el año 2050.

Ante estas nuevas exigencias de desarrollo sostenible y las iniciativas europeas de regulación, la respuesta de Talgo, al igual que la de muchos de sus competidores, ha sido la de innovar en los sistemas de tracción, utilizando la tecnología del hidrógeno, frente a otras alternativas como son el gas natural o los acumuladores de energía (baterías, supercondensadores y volantes de inercia). Una tecnología que, basada en la pila de combustible, genera energía a través de un proceso electroquímico sin explosión, reduciendo el ruido y las emisiones. A nivel tren el sistema es cero emisiones, llegando a ser el ciclo de vida completamente libre de emisiones en caso de obtenerse el hidrógeno a partir de las energías renovables.

No son solo las empresas del sector ferroviario las que han decidido apostar por el hidrógeno para conseguir una circulación limpia y sostenible, sino que también otros medios de transporte (autobuses, motos, coches...) están involucrados. De hecho, ya hay vehículos en el mercado que incorporan la tracción por hidrógeno, como es el caso del coche Mercedes-Benz GLC F-Cell o el Hyundai Nexo.

Por tanto, en el marco energético actual la pila de combustible con hidrógeno se presenta como una tecnología atractiva, en cuanto a emisiones y eficiencia, ante el resto de alternativas energéticas.

1.1 OBJETIVO

El objetivo principal de este documento es el desarrollo del diseño conceptual de un sistema de tracción híbrido de hidrógeno y baterías adaptado a un tren Talgo de tracción eléctrica con pantógrafo.

Se va a tomar el AVRIL como tren de base para implementar los desarrollos por motivos de disponibilidad de trenes para las pruebas. En este caso el objetivo es alcanzar hasta 160 km/h y ser capaz de realizar el recorrido con una potencia instalada en modo hidrógeno cómo máximo de 900 kW para no encarecer en exceso el prototipo.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En el sector ferroviario ha surgido la necesidad de plantear soluciones innovadoras para garantizar una ventaja competitiva, sostenible y rentable con respecto a otros medios de transporte. Como respuesta, Talgo necesita de un proyecto que amplíe su portfolio como fabricante de material rodante energéticamente eficiente. Nace así el proyecto de desarrollo de un tren híbrido hidrógeno-baterías-catenaria, en el que se engloba este estudio. Este proyecto se presenta como un gran reto por su alta componente innovadora.

Este estudio aportará las bases al proyecto de desarrollo de un tren que otorgará una mejor respuesta en términos de adaptabilidad y sostenibilidad para el escenario ferroviario del futuro.

Un proyecto sostenible, por la alternativa energética a los motores diésel que ofrece. Parte de la red ferroviaria actual española no está electrificada y en ella operan trenes con un sistema híbrido de tracción que incorpora pantógrafo y motor diésel o sólo motores diésel. Sin embargo, el alto factor contaminante del diésel junto con el aumento de su precio en los últimos años ha originado el debate hacia su prohibición o limitación. En este contexto, la incorporación del hidrógeno como vector energético sustituto de los motores diésel se presenta como una solución limpia y flexible; que cumplirá, no solo con las posibles futuras restricciones, sino que garantizará un transporte acorde a las exigencias del mercado contribuyendo a su vez en la reducción de las emisiones.

Un proyecto adaptable ya que se presenta como una solución sostenible para ampliar la red ferroviaria. Como se decía antes, España cuenta con muchas áreas no electrificadas, algunas de ellas accesibles por un tren híbrido catenaria-diésel y otras imposibles para su electrificación. El tren de hidrógeno se plantea como una solución de transporte a estas últimas sin necesidad de invertir en su electrificación. Electrificar un área requiere de una elevada inversión que no es rentable si la frecuencia del servicio no va a ser elevada.

Un proyecto viable económicamente, tecnológicamente y operacionalmente. El hidrógeno se desvela como una idea oportunista ante las barreras existentes entre los sectores de la energía y del transporte. Se plantea por primera vez una cadena generador-consumidor

distinta que aportaría grandes sinergias entre los sectores: los generadores podrían aprovechar los excedentes de las energías renovables para producir hidrógeno. Aunque implantar esta idea en las ciudades trae consigo dificultades iniciales de infraestructura, se podría compartir la infraestructura de generación, transporte y almacenamiento del hidrógeno con otros modos de transporte (autobuses, coches...) o con redes de distribuciones de gas existentes, optimizando la explotación de recursos, garantizando un porcentaje de utilización adecuado y reduciendo los costes de operación.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

El nuevo desafío energético ha ocasionado el resurgir de las pilas de combustible, descubiertas hace casi dos siglos atrás.

Las pilas de combustible, a partir de un combustible y de un comburente, transforman la energía química en eléctrica. Su uso más frecuente es con hidrógeno como combustible y oxígeno como comburente.

Las pilas de combustible, como se muestra en la Figura 1, están formadas por los siguientes elementos: los electrodos, el ánodo (polo negativo) y el cátodo (polo positivo); el electrolito y las placas bipolares. El proceso electroquímico es el siguiente: El hidrógeno en contacto con el ánodo se disocia en dos protones H^+ y dos electrones; los electrones son conducidos por un circuito exterior originando una corriente eléctrica mientras los protones, conducidos por la membrana, llegan al cátodo, donde reaccionan con el oxígeno introducido y los electrones del circuito dando lugar a agua y calor.

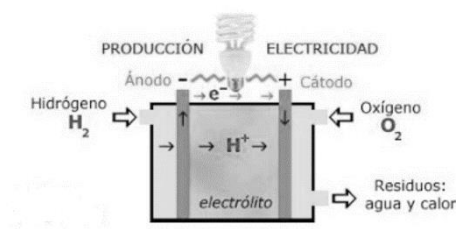


Figura 1 Esquema pila de combustible

De esta forma, el hidrógeno, a partir de su reacción electroquímica en la pila de combustible, es capaz de proporcionar energía, que por ejemplo se puede usar para alimentar un motor eléctrico.

Durante todos estos años la tecnología del hidrógeno ha permanecido en un segundo plano, eclipsada por la energía del petróleo. Pero ahora, el sector ferroviario necesita de combustibles alternativos al diésel para contribuir a la descarbonización y sostenibilidad del modelo de transporte. Además, el sector ferroviario, por su elevada capacidad, recibe una mayor presión en este sentido, fundamentada en la magnitud del impacto medioambiental que tendría la transición a fuentes de energía limpias. En este sentido, las pilas de combustible se presentan como una alternativa, medioambientalmente sostenible y energéticamente eficiente, ya que obtienen eficiencias mayores al 50%. De hecho, en los últimos diez años, ya se han incluido en una serie de desarrollos tecnológicos ferroviarios.

En 2007, el Railway Technical Research Institute y el East Japan Railway realizaron las pruebas en Japón de un prototipo híbrido de pasajeros que incorporaba dos pilas de combustible y baterías de ion-litio.

En 2012, FEVE y la Universidad de Valladolid presentaron, en España, el primer tranvía impulsado con pila de hidrógeno. El sistema de tracción contaba con 24kW de potencia de las pilas de combustible y 95 kW de las baterías y supercondensadores.

En 2016 Alstom presentó en InnoTrans en Berlín una nueva versión del tren Coradia Lint 54 impulsado por un sistema híbrido batería-pila de hidrógeno [4]. Este nuevo modelo ha tenido gran acogida, ya que, Alstom, no solo ha conseguido desarrollar un producto comercial preparado para el transporte de pasajeros, sino vender 27 trenes de hidrógeno a la empresa ferroviaria alemana, Fahma, interesada en sustituir su flota diésel. En 2018 entró el primero en servicio en la región de Baja Sajonia [5].

A pesar de que varios prototipos nunca llegaron a entrar en servicio, otros han revelado como esta tecnología tiene una aplicación efectiva y real como producto comercial en el sector ferroviario. El tren Coradia iLint fabricado por Alstom es reflejo de ello.

Además, todos los fabricantes de material rodante (p.ej. Talgo, Siemens, Stadler, Bombardier, etc.) han confirmado que están trabajando en la incorporación de la pila de hidrógeno en su catálogo. El pasado 12 de diciembre de 2019, el fabricante de material rodante polaco, PESA, ha firmado un acuerdo con la compañía de energía PKN Orlen. Esta compañía produce 45 toneladas por hora de hidrógeno de sus procesos de refinado del petróleo. Con objetivo de expandir su mercado en respuesta a la demanda de la tecnología de la pila de combustible de hidrógeno han firmado un acuerdo que planea desarrollar una locomotora de tracción con hidrógeno [6].

Capítulo 3. FUENTES DE TRACCIÓN ALTERNATIVAS

A continuación, se procede a estudiar las alternativas de tracción existentes al diésel. Además, se evaluará desde un punto de vista técnico y económico como es de competente cada tecnología.

3.1 ALTERNATIVAS DE TRACCIÓN

Acumuladores de energía

Los acumuladores de energía son una alternativa al diésel. Encontramos los siguientes tipos, según el modo de obtención de la energía y su posterior transmisión (eléctrica, mecánica o hidrostática):

- Baterías: Obtención de la energía eléctrica por métodos electroquímicos. En las baterías, el movimiento de los electrones por las reacciones de reducción y oxidación ocasiona una corriente eléctrica.
- Condensadores electroquímicos: Ultracondensadores (UC) o supercondensadores (SC). La energía que en ellos se almacena proviene de la transferencia de cargas en un campo electrostático. La transmisión es también eléctrica.
- Volantes de inercia: La energía proviene de las masas en rotación. En este caso la transmisión puede ser eléctrica o mecánica.

Para su elección se suelen tener en cuenta las siguientes variables: la densidad de potencia (W/kg), la densidad de energía (J/kg) y el tiempo de operación(s). En la Figura 2 que se muestra a continuación se muestran los valores típicos de estas variables según el tipo de acumulador.

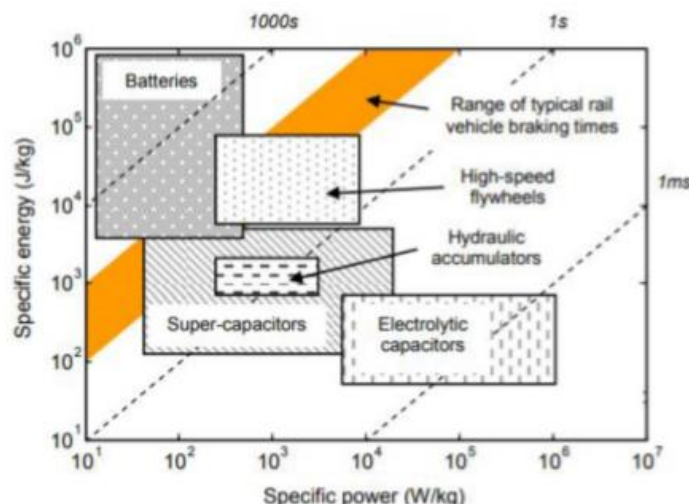


Figura 2 Acumuladores de energía [7]

Aunque las baterías tienen una alta densidad de energía su baja densidad de potencia conlleva un mayor tiempo de carga, lo que limita su aplicación, principalmente en el sector ferroviario. Entre todas, las baterías de ion litio tienen una densidad de potencia aceptable, pero en cambio por sus ciclos de carga/descarga su vida útil no es suficiente. Dicho esto, aunque no resulten competentes como opción de almacenamiento de energía por si solas para traccionar un tren, si se emplearan como complemento de almacenamiento en otros diseños de la cadena de tracción.

Por otro lado, tanto los volantes de inercia como los supercapacitores presentan valores de densidad de potencia y de energía más adecuados para su uso en el sector ferrocarril, principalmente para su uso en trenes regionales o urbanos.

Gas natural

El gas natural es un hidrocarburo compuesto en su mayoría por metano. Debido a su baja densidad energética, ha de ser comprimido a 250 bar para dar GNC o licuado a -160°C para dar GNL. Este último es el más utilizado en el sector ferroviario [7].

Hidrógeno

El hidrógeno se presenta como otra fuente de tracción alternativa al diésel. Su densidad de energía es mayor que cualquier otro producto químico. El hidrógeno se puede transformar en energía:

- a. Mecánica, en un motor de combustión interna
- b. Eléctrica, cuando se emplea como combustible para la producción de energía eléctrica en las pilas de combustible.

El hidrógeno, aunque muy presente en la naturaleza, no se encuentra libre y para su utilización es necesario extraerlo de las fuentes naturales. Existen diversos métodos de obtención del hidrógeno que se pueden distinguir según la materia prima contenedora del hidrógeno y la naturaleza del proceso de producción [7].

1. Según la materia prima:

- A partir de fuentes renovables: solar, eólica, hidráulica, geotérmica, biomasa. Ejemplos: Termólisis, electrólisis.
- A partir de fuentes no renovables: gas natural, petróleo, carbón, uranio. Ejemplos: pirolisis, gasificación, ciclos termoquímicos.
- Como producto de procesos industriales de producción: refinación de petróleo y gas, producción de cloro, fertilizantes o acero, síntesis del metanol y producción de vidrio.

2. Según el tipo de proceso:

- Procesos de conversión química
- Procesos de termólisis
- Procesos de electrólisis
- Procesos de fermentación: reformado de biomasa y residuos
- Procesos fotolíticos: disociación biológica del agua, disociación fotoelectroquímica de agua

3.2 COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS

Para realizar el análisis se definieron los siguientes factores para comparar las distintas tecnologías: eficiencia, emisiones, suministro, seguridad y costes.

Factor	Acumuladores de energía	Gas natural	Hidrógeno
	- Baterías - Volantes de Inercia - Supercondensadores	- Gas natural licuado (GNL) - Gas natural comprimido (GNC) - Gas licuado de petróleo (GLP)	- Motor de combustión interna - Pilas de combustible
Eficiencia	Alta	Alta Desde la extracción presenta buenas condiciones.	Media Se obtiene electricidad a partir de energía química en las celdas de combustible mejor que con cualquier otro sistema. Sin embargo, la eficiencia total al final de todo el proceso se puede ver muy reducida debido a la utilización de recursos externos para la obtención del hidrógeno.
Emisiones	Depende de la fuente externa de energía No generan emisiones a nivel de uso, solo tendrán las asociadas a la generación de la fuente de energía	Media-Alta Emite CO ₂ y en muy poca cantidad NOx. Las emisiones de SOx y PM son nulas.	Baja Cero emisiones a nivel tren, pero si a nivel generación (electrólisis con fuente de energía fósil), transporte y transformación excepto que la energía empleada en todo el proceso del H ₂ provenga de energías renovables. Residuo: vapor de agua.
Suministro	N/A	-La cadena de suministro tiene un gran volumen y madurez (instalaciones, puntos de suministro, etc.) -Derivados del petróleo y, por tanto, dependientes del mercado del crudo. -Reservas limitadas	-En fase experimental, no hay una red de suministro -Se suministra en fase gaseosa, debido a su baja densidad energética, se transporta a elevadas presiones -Reservas "ilimitadas"
Seguridad en la operación	Media-Alta Bajo condiciones normales de uso no presenta ningún riesgo. En caso de accidente podría producir descargas eléctricas.	Alta Distribución a baja presión. Cuanto mayor sea la presión de transporte, deberán incluirse medidas más estrictas para garantizar una operación sin accidentes.	Media-Baja En espacios abiertos, si hay una fuga se disipa en la atmósfera. Sin embargo, en espacios cerrados, tiene peligro de generar una explosión.
Características funcionales	-Peso elevado -Limitación de autonomía	-Compatible con locomotoras diésel	-Reducida masa respecto al diésel -Volumen condicionado por la presión, pero factor limitante -Proceso químico sin explosión: reducción del ruido, vibraciones y emisiones

Precio del combustible [8]	Depende de las características funcionales de la misma	Bajo GLP: 0,71 (-46%) €/km GNL: 0,64 (-52%) €/km Precio fijo frente al precio del diésel (1,32 €/km) que lo determina la oferta-demanda	Medio H2-gas: 1,16 (-13%) €/km
Costes (inversión, generación, etc.)	Media madurez tecnológica	Alta madurez tecnológica Menor coste que el diésel	Baja madurez tecnológica Elevada inversión: adaptar el actual material rodante o fabricar nuevo material

Tabla 1 Comparativa de las alternativas de tracción al diésel

La rentabilidad de las distintas alternativas energéticas dependerá de la evolución de los precios del combustible, de su tecnología y de las restricciones a su uso.

Se concluye por tanto que, los acumuladores de energía se presentan como una solución adecuada para líneas cortas cuya demanda energética sea baja, mientras que para líneas largas las otras dos alternativas propuestas son más adecuadas. Además, el hidrógeno, frente a los acumuladores eléctricos tiene un peso menor. Tanto la densidad energética, energía por peso, como densidad de potencia es mayor en el caso del hidrógeno, permitiendo que los tiempos de recarga disminuyan. En cuanto a la logística de recarga el hidrógeno en estado gaseoso presenta, por su elevado volumen, una desventaja y por ello necesitará ser comprimido.

Ahora bien, teniendo en cuenta además las nuevas exigencias del desafío energético, la tecnología del hidrógeno resulta a largo plazo la más competente. El nivel de emisiones que produce el uso del gas natural es el mayor de todas las alternativas planteadas.

Una de las limitaciones que presenta el funcionamiento de las pilas de combustible es la continuidad de uso, es decir, no puede encenderse y apagarse en pequeños intervalos de tiempo. Sin embargo, al ir acompañada de una batería, durante el estado de encendida, podrá estar proporcionando energía para mover el vehículo, mientras recargando a su vez la batería.

Por consiguiente, el hidrógeno se presenta como una fuente competitiva frente al diésel y demás alternativas para aplicación en tracción ferroviaria.

Capítulo 4. EL HIDRÓGENO

4.1 ANÁLISIS DAFO

Debilidades

- Falta de madurez y experiencia de la tecnología
- En estado gaseoso presenta un volumen elevado que complica la logística de suministro, es necesario comprimirlo. Alta inversión en la tecnología para su compresión y almacenamiento
- No es una fuente primaria de energía
- Falta de infraestructura
- Complejidad de la cadena logística: transporte desde la generación hasta el almacenamiento
- Complejidad de adaptación frente a otras alternativas energéticas: infraestructura de reabastecimiento, servicios de mantenimiento y garantía de seguridad
- Altos rendimientos en la transformación de energía, pero bajos debido a la obtención del hidrógeno de fuentes externas
- Necesidad de baterías lo que supone un aumento del 10-15% en la masa del tren. En definitiva, un aumento del consumo de potencia

Amenazas

- Falta de marco regulatorio para garantizar seguridad en la operación con hidrógeno
- Fluctuación del precio del hidrógeno en función del coste de generación del hidrógeno que depende de los excedentes de las energías renovables: eólica y solar
- Seguridad en el suministro del combustible
- Poder de negociación de proveedores de hidrógeno

Fortalezas

- Reservas ilimitadas en la naturaleza. Elemento más abundante del universo. Presente en el agua, los combustibles fósiles y en los seres vivos
- Independencia del mercado de combustibles fósiles
- Generación de energía a partir de un proceso químico sin explosión: reduce el ruido, las vibraciones y las emisiones.
- Modularidad de la tecnología: las celdas de combustible se pueden diseñar de acuerdo a la demanda energética, permitiendo una optimización de los costes debido a maximizar su tasa de utilización
- Independencia de la catenaria

Oportunidades

En este apartado se evaluaron las oportunidades de la tecnología del hidrógeno en España. Actualmente, la red ferroviaria española no está electrificada en su totalidad y aún operan un elevado número de trenes tanto de pasajeros como de mercancías traccionados por motores diésel. En efecto, de acuerdo con la declaración de la red de Adif [9], la Red Ferroviaria Titularidad de Adif cuenta con 11.963,3 km de los cuales solo 6.735 km están electrificados. Ver [9] para el detalle de las líneas.

En el Anexo II-1 se puede ver la distribución de las líneas titularidad de Adif a lo largo del territorio español, así como el estado de la electrificación de las mismas. Aparecen los siguientes tipos de vías:

- a. Vía electrificada
 - Doble a 25kV 50 Hz/ 3kV
 - Única a 25kV/ 3kV/ 1,5kV
- b. Vía no electrificada
 - Doble
 - Única

Las líneas de alta velocidad pertenecen a Adif AV (alta velocidad), una empresa independiente, cuya red alcanza los 3.402 km: 2.606 km de AV de Ancho Estándar (1.435mm), 694 km de la Red Convencional de Ancho Ibérico Puro (1.668 mm) y 102 km de Red Mixta. [10]. Ir al anexo II-2 para ver la distribución de las líneas de alta velocidad de Adif AV.

Además, Renfe en su último Informe Anual de Responsabilidad Social, Empresarial y Gobierno Corporativo [11] con fecha 2017 declaró que el 11% de su tráfico contaba todavía con tracción diésel, generando gran cantidad de emisiones de efecto invernadero, aunque la energía utilizada fuera completamente verde. Como respuesta, Renfe persigue con su plan estratégico alcanzar el objetivo ambiental de cero emisiones mediante la utilización de alternativas como el hidrógeno o el gas natural.

Algunos ejemplos de trenes traccionados por diésel o por un sistema híbrido catenaria-diésel, que potencialmente podrían sustituirse por un tren impulsado por pilas de hidrógeno:

- a. Pasajeros:
 - 15 trenes Renfe Alvia S-730 (Talgo 250): Tren híbrido eléctrico-diésel que opera en los tramos: Madrid-Valladolid (AV), Valladolid-Orense (sin electrificar) y Ourense-Santiago de Compostela (AV).
- b. Mercancías:
 - Renfe: 12 locomotoras diésel 333.3 y 6 319.2
 - Otras locomotoras diésel Euskotren, Captrain, FCG, Fesur, Continental Rail, Tranfesa...
- c. Mantenimiento de Infraestructura
 - Adif: 31 locomotoras diésel asignadas

Además, según los datos publicados por Adif en su memoria ambiental [12], el consumo energético por tracción en el sistema de transporte por ferrocarril en su infraestructura ha aumentado en los últimos años de la siguiente forma:

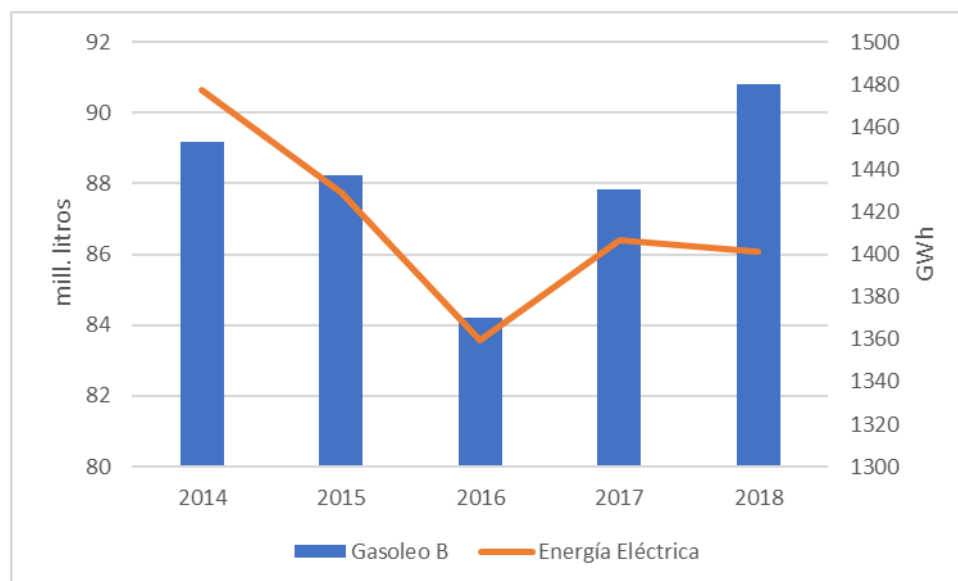


Figura 3 Consumo de gasóleo y energía eléctrica en tracción ferroviaria

De la gráfica se concluye que el consumo de combustible diésel es todavía muy necesario para la operación de los servicios de transporte por lo que las futuras posibles limitaciones de su uso se presentan como una verdadera amenaza para la continuidad en la operación de los servicios ferroviarios. Dicho esto, el tren híbrido con hidrógeno se presenta como una alternativa fiable que garantizaría la continuidad de los servicios acompañando las iniciativas europeas y libre de cualquier tipo de prohibición por cuestiones medioambientales.

Adicionalmente a esto, la incorporación de la tecnología de hidrógeno presenta las siguientes oportunidades:

- Beneficios ambientales del tren híbrido hidrógeno-baterías. Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas [13] (Ver capítulo 9)
- Oferta de un medio de transporte limpio para las áreas protegidas
- Respuesta ante la necesidad de interoperabilidad entre líneas francesas y españolas
- Respuesta ante la necesidad de promover el cambio intermodal tal y como se detalla en el Libro Blanco del Transporte de la Comisión Europea de 2011 [3]
- Aprovechamiento de los excesos de la red eléctrica española para la generación de hidrógeno
- Estrategia multimodal: La infraestructura de generación, transporte y almacenamiento del hidrógeno se podría compartir en un futuro con otros modos de transporte (bus, coches...). De esta forma se explotarían los recursos de forma óptima, garantizando un porcentaje de utilización adecuado y reduciendo los costes de operación.

4.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Las figuras que se muestran a continuación recogen el presupuesto para la ejecución del proyecto:

Paquete	Concepto	Parcial	Total (k€)
Conjunto Pilas+Baterías+Depósitos	Pilas	220k€/100kW	1.320
	Baterías	60k€/100kW	240
	Depósitos	-	200
Convertidores	Convertidores de 900kW	-	600
Suministro	Hidrogenera	-	1000
	Hidrógeno para pruebas (3000kg, 40 bar)	9€/kg*[14]	27
Proveedor	Ingeniería	-	150
Talgo	Estudio fugas en túnel	-	150
	Modificación de materiales	-	125
	Ingeniería		318
			4.130 k€

Tabla 2 Presupuesto del proyecto(I)

*Precio final del hidrógeno. Que incluye: generación, distribución y suministro

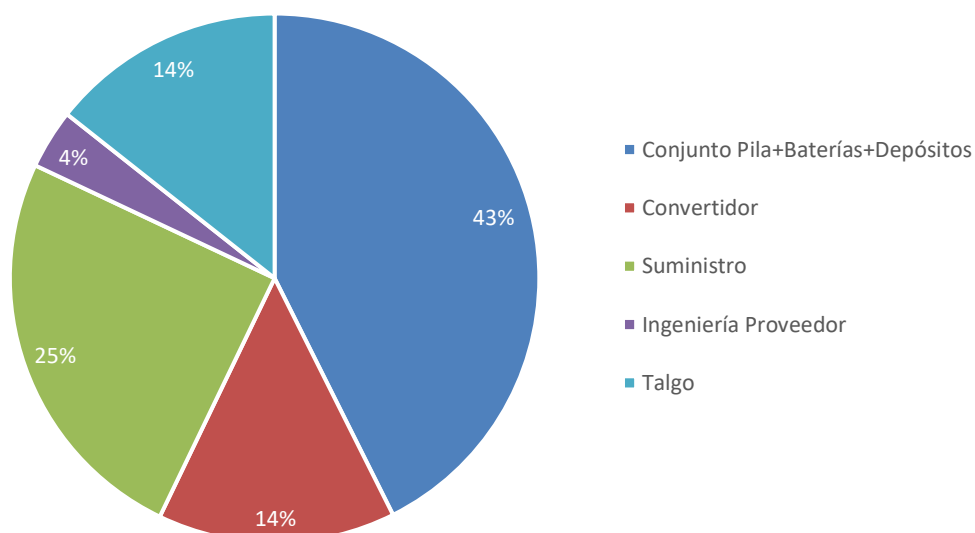


Tabla 3 Presupuesto del proyecto (II)

A continuación, se pretende realizar una comparativa económica preliminar entre un tren de cercanías híbrido hidrógeno-batería y un tren diésel. El objetivo es analizar la rentabilidad económica del nuevo tren en su producción y uso. Se considerará un escenario futuro en el que ya se ha probado la tecnología y existe una red de suministro de hidrógeno

al igual que la de combustible diésel. Por tanto, se elimina de la comparativa la inversión inicial que se ha contemplado anteriormente. Para ello se tendrá en cuenta: el coste de fabricar el tren, el gasto de suministro y las labores de mantenimiento. Se considerará una vida útil de 30 años, con una tasa de utilización del 80% y dos recorridos por día. Se seleccionó uno de los recorridos estudiados, Calatayud-Lérida, con una distancia total de recorrido, ida y vuelta, de 442 km. El objetivo será determinar el coste máximo de producción del tren híbrido hidrógeno-batería para que sea económicamente competitivo con respecto al tren diésel.

	Producción	Mantenimiento	Gastos de suministro							LCC
	subtotal 1 (k€)	subtotal 2 (k€)	Combustible	kg/ trayecto	litros/ trayecto	kWh	coste hidrógeno (€/kg)	coste diésel (€/l)	subtotal 3 (k€)	k€
Tren híbrido hidrógeno-batería	6.230,39	6.110,21	Hidrógeno	120,00		4.319,56	5,50		11.404,80	23.745,40
Tren diésel	4.750.00	6.873.98	Diésel	1.125.00	1323.53	5.361.57		0.53	12.121.41	23.745.40

Tabla 4 Comparativa de costes de producción y mantenimiento y gastos de suministro

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos. Como se puede ver, el coste máximo de producción, para que el nuevo diseño sea económicamente competente frente a un tren diésel, es de 6.2 millones de euros. El diseño del tren híbrido hidrógeno-batería supone un aumento en el coste asociado a la producción, por incluir un número de elementos adicionales (p.ej. baterías, convertidores etc.) en sustitución al motor diésel; pero en cambio, el gasto de suministro, por la eficiencia del sistema, es menor.

Nótese que se trata de un valor aproximado debido a la gran incertidumbre sobre la evolución del precio del hidrógeno. Además, para futuros análisis, se deberá tener en cuenta la predicción sobre la amortización de la inversión en infraestructura y la capacidad de suministro del hidrógeno proveniente de los excedentes de generación de energías renovables.

4.3 CONSIDERACIONES ADICIONALES SOBRE LA TECNOLOGÍA

- Se ha realizado el estudio para el hidrógeno en estado gaseoso. En este estado, su densidad energética es mucho menor, complicando la logística de suministro por el volumen que ocupa. Sin embargo, si se optase por un suministro de hidrógeno en estado líquido, debido a su bajo punto de ebullición, su transporte es muy inestable y requeriría de tomar medidas estrictas de seguridad.
- Complejidad de la cadena de suministro por la necesidad de comprimirlo. El hidrógeno a temperatura normal ocupa un gran volumen.
- Garantía de servicio: Como nueva tecnología, requiere de la estandarización del conjunto de sistemas
- Relación entre la aceptación e impulso de la tecnología con la opinión pública
- Dependencia de Talgo de las empresas Adif y Renfe. La producción, operación y construcción de infraestructura se verá supeditada a los intereses, permisos, regulaciones y acciones de Adif y Renfe.
- Una alta inversión será necesaria para probar la tecnología: coste de adaptación de los equipos, coste de adquisición de nuevos equipos, coste de suministro de hidrógeno, costes asociados a regulación y certificación, etc.
- La tecnología del hidrógeno deja de ser una respuesta competente en término de emisiones si el cómputo global de emisiones no se reduce. En definitiva, se deben hacer esfuerzos no solo en obtener la energía necesaria para la producción de hidrógeno de fuentes renovables, sino en garantizar también que todas las etapas de la prestación del servicio están comprometidas con los objetivos de eficiencia energética.
- Contribuye mediante su inversión en el desarrollo ferroviario en la sostenibilidad del sector transporte. Este desarrollo promueve el cambio modal del avión y el coche al tren, lo que supondría un grandísimo ahorro en emisiones.

Capítulo 5. LA CADENA DE TRACCIÓN

Existen diferentes configuraciones de la cadena de tracción de un tren:

- I. Tracción eléctrica:
 - a. Solo pantógrafo conectado a catenaria
 - b. Pantógrafo conectado a catenaria + acumuladores de energía
- II. Tracción eléctrica + diésel: Pantógrafo conectado a catenaria para los tramos electrificados y motor diésel para los tramos no electrificados
- III. Tracción diésel: Como es el caso de las locomotoras diésel
- IV. Tracción híbrida hidrógeno-baterías-catenaria: Alternancia entre pantógrafo en tramos electrificados y el sistema de hidrógeno con baterías para los demás tramos. Sustituto para la configuración II.
- V. Tracción híbrida hidrógeno-baterías: Sustituto para la configuración III.

5.1 *DETALLE SOBRE EL TREN CON CONFIGURACIÓN I*

A continuación, se detalla las características principales del tren de alta velocidad con pantógrafo conectado a catenaria. Será el tren que estudiaremos para el diseño de la cadena de tracción con la tecnología de hidrógeno.

La cadena de tracción consiste en la catenaria conectada al pantógrafo, que conecta con un transformador (colocado en la parte inferior del tren por su peso para garantizar mayor estabilidad). Este está a su vez conectado a un convertidor y este a un convertidor de tracción, ambos situados dentro de la motriz junto con un sistema de refrigeración (aire y refrigerante, habitualmente glicol). En la motriz se encuentran dos bogies, que tiene a su vez cuatro ruedas unidas dos a dos por un eje, con los motores eléctricos y las reductoras. Las reductoras son necesarias para adaptar la velocidad de giro del motor al giro de las ruedas del tren. En los coches, dedicados a pasajeros, no hay bogies sino rodales: un conjunto de bastidor con dos ruedas, independientes, cada una con su eje. Además de las dos motrices y los 12 coches, en el caso híbrido de tracción con diésel hay un coche más conectado a una de las motrices con bogie para garantizar el peso por eje normativo debido al elevado peso del grupo diésel.

Por tanto, el pantógrafo solo se encuentra en la motriz y los coches se mueven por transmisión de movimiento de uno a otro. Esto hace que sea necesaria una conexión robusta entre coches: una barra de conexión que solo transmite esfuerzos longitudinales. Para asegurar que el rodal está bien situado, los coches están conectados por un sistema de autoguiado que centra el rodal en cada movimiento, reduciendo el desgaste y aportando una reducción de costes para el mantenimiento.

Por otro lado, las ruedas tienen una pestaña que asegura su posición dentro de la ranura del carril y luego un perfil cónico diseñado para evitar que el tren descarrile. Para el frenado, las ruedas cuentan con discos de freno y unas pinzas en contacto con unas pastillas de freno. Cuando se quiere frenar se libera la presión y las pinzas presionan el disco.

Además de considerar los elementos que intervienen de forma activa en la cadena de tracción, se deberán considerar los servicios auxiliares: iluminación, alimentación de equipos, climatización, refrigeración de equipos, etc.

Capítulo 6. DESCRIPCIÓN DETALLA DEL CÁLCULO DE RECORRIDO

En este apartado se detallan los cálculos de recorrido del tren AVRIL realizados para determinar las especificaciones técnicas de los elementos de la cadena de tracción con hidrógeno que garantizan un adecuado funcionamiento del tren. Se simulará como un tren de cercanías y tendrá limitada su velocidad a 160 km/h.

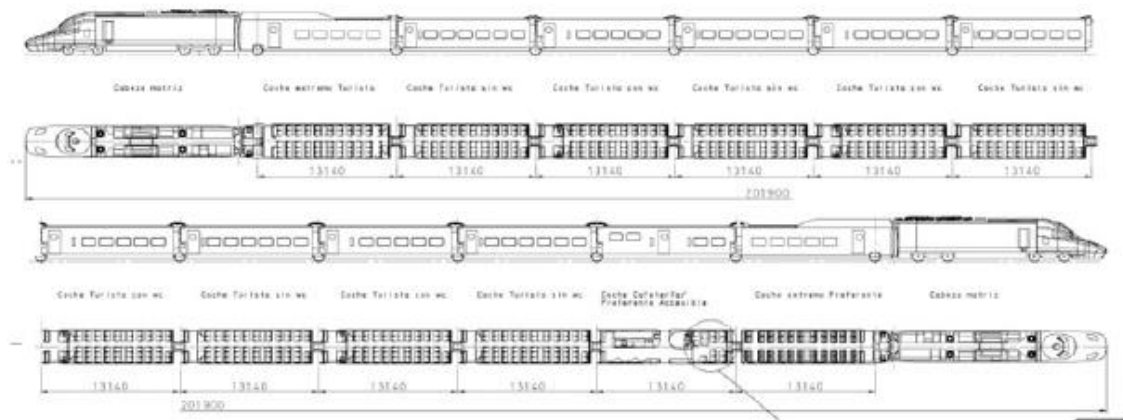


Figura 4 Esquema del tren AVRIL

6.1 CÁLCULO DE RECORRIDO

Una vez evaluado el potencial del hidrógeno como vector energético para el sector ferroviario y entendidas las distintas configuraciones de la cadena de tracción del tren resulta necesario dimensionar los elementos de dicha tecnología en función de las características esperadas del tren y sus requisitos funcionales para el correcto funcionamiento del mismo.

Para ello, se modeló un programa que simulase el funcionamiento del tren a lo largo del recorrido de la siguiente forma:

6.1.1 INPUTS DEL MODELO

Inicialmente, es necesario introducir los siguientes datos de entrada del tren:

1. Curva de resistencia:
Esta curva recoge la resistencia al avance del tren en todos los puntos del recorrido. Para relacionar la velocidad instantánea del tren con las fuerzas que se oponen a su

avance considerando la velocidad del viento exterior nula, se emplea la siguiente expresión polinómica conocida como fórmula de Davis [15]:

$$F_{resistencia} = -(A + B \cdot v + C \cdot v^2)$$

Siendo:

- $F_{resistencia}$ - Fuerza de resistencia total al avance
 - A, B y C- Coeficientes en base a las características físicas del material rodante: masa, forma, flujos de aire, sección transversal y superficie mojada
 - V-Velocidad a la que circula
2. Los coeficientes de la fórmula incluyen los efectos de las siguientes fuerzas de oposición al avance:
- A [N]: Resistencia mecánica al avance (R_m). Parte de la resistencia al avance que no tiene que ver con el efecto del aire exterior. Incluye:
 - R_{mrd} - resistencia debida a la rodadura. Se produce por la deformación elástica del contacto rueda carril
 - R_{mri} -resistencia debida a rozamientos internos
 - B [$N \cdot h/km$]: Resistencia al avance debida a la entrada de aire. El tren demanda entrada de aire para la refrigeración de los motores y/u otros sistemas además del necesario para renovar el aire de los viajeros (aprox. 10 a 20 $m^3/pax \cdot h$ de caudal). Por acción-reacción, la aceleración instantánea del aire que entra origina una fuerza de reacción hacia atrás.
 - C [$N \cdot h^2/km^2$]: Resistencia aerodinámica al avance- Consecuencia interacción tren-aire. Incluye:
 - Resistencia aerodinámica de presión- resultante de las fuerzas de presión que actúan sobre la superficie del cuerpo en la dirección del movimiento. Depende de la sección transversal del tren, de los elementos del techo...
 - Resistencia aerodinámica de fricción- esfuerzos tangenciales debidos a la viscosidad del aire. Depende fundamentalmente al área mojada del cuerpo.
3. P: peso total del tren, calculado a partir del número de ejes y la limitación de 17 toneladas por cada uno de ellos. Hay 8 ejes (2 por bogie / 4 por motriz) + 13 ejes de ruedas independientes.
4. f.m.rotat: Factor que incluye el efecto de rotación de la masa
5. Mtract: Masa de tracción, 17 toneladas por eje
6. Fadh: Fuerza de adhesión. Calculada a partir del coeficiente de adhesión y la masa de tracción.
7. Decel: Deceleración del tren en el frenado.

La tabla que se muestra a continuación recoge los datos de entrada del modelo:

P [t]	357
f.m.rotat	1,05
M_{tract} [t]	136
F_{adh} [kN]	400
μ	0,3
Decel [m/s²]	0,2

Tabla 5 Datos de entrada curva de resistencia

Curva de tracción del motor:

Por otro lado, será necesario tener en cuenta la curva del motor del tren AVRIL. De acuerdo con las características de los motores, el par máximo en el arranque es de 200kN.

Para una potencia instalada de 900 kW la curva de tracción obtenida se muestra a continuación:

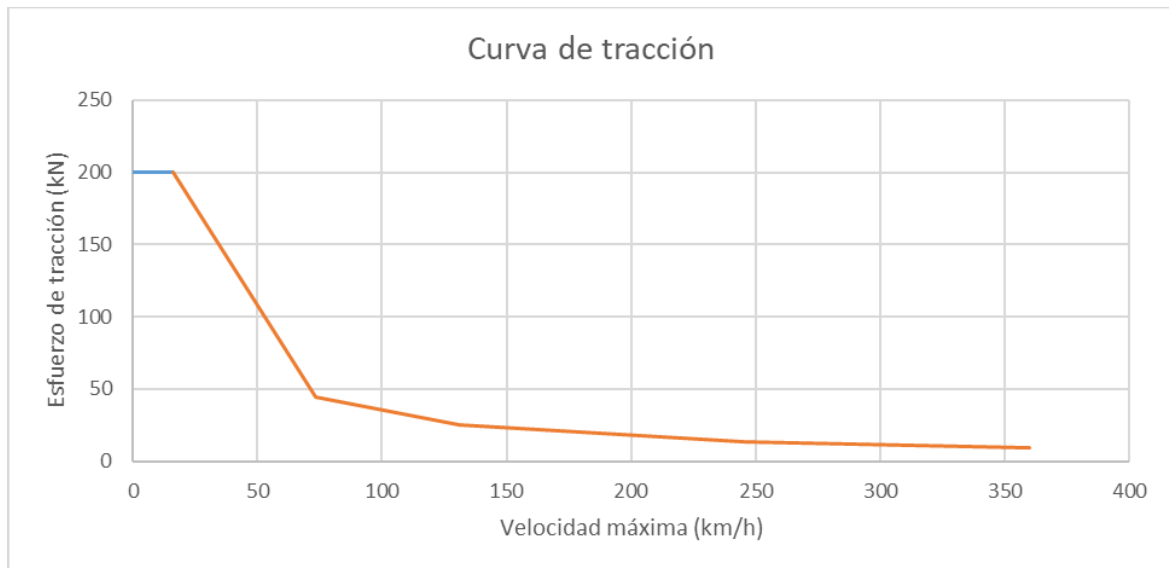


Figura 5 Curva de tracción

Nótese que la curva rotulada en azul muestra los puntos de fuerza/par constante. Una vez alcanzada una velocidad de 16 km/h, la potencia alcanzada a esa velocidad coincide con la instalada y en ese punto cambia la curva, rotulada en rojo. A partir de esa velocidad la potencia se mantiene constante (900 kW) y a medida que se aumenta la velocidad del tren, se reduce el esfuerzo de tracción, tal y como recoge la fórmula que se muestra a continuación:

$$F_{tracción} = \frac{\text{Potencia instalada}}{\text{Velocidad instantánea}}$$

6.1.2 MODELO DE CÁLCULO DE RECORRIDO

Una vez recopilados los datos de partida del tren, el objetivo es obtener a partir del modelo unos datos de salida que permitan dimensionar la potencia y la capacidad de las baterías, así como los kg de hidrógeno necesarios para accionar el tren en todo su recorrido cumpliendo con los requisitos de tiempo, velocidad, autonomía, etc.

En la elaboración del modelo, además de los inputs del tren mencionados anteriormente, se introdujeron otros factores limitantes del modelo:

- Límite de velocidad del tren en todo su recorrido
- Límites de velocidad en puntos kilométricos específicos, si los hubiera.
- Limitación de la aceleración para evitar el deslizamiento del tren. El coeficiente de adhesión está considerado en el modelo.

De esta forma se intentó perseguir que el modelo se pareciese en la mayor medida de lo posible a la realidad, introduciendo las mismas limitaciones que el tren tiene a lo largo de su recorrido debido a características de la vía (pendientes, túneles, etc.). Sin embargo, se han tomado las siguientes simplificaciones en la elaboración del modelo:

- La eficiencia media del motor no se ha tenido en cuenta. La potencia que se ha utilizado en la simulación de 900 kW es la potencial final en llanta que se busca obtener una vez aplicados los porcentajes de eficiencia permitentes.
- No se ha tenido en cuenta la curvatura del trazado de la vía que afectaría a la velocidad del tren al considerarse despreciable.
- La potencia requerida por los elementos auxiliares del tren no se ha considerado como variable de entrada inicial para la simulación.

Por otro lado, adicionalmente a lo anterior mencionado, se introdujeron los datos específicos de pendiente y altura para cada punto kilométrico con el fin de construir el perfil del recorrido. Antes de proceder con la simulación del recorrido seleccionado, es necesario determinar el kilómetro inicial y el kilómetro final de estudio. A partir de esos datos, el modelo calculará las variables de salida tomando intervalos constantes de distancia de 200 m desde el inicio hasta el final. Por tanto, cada punto kilométrico considerado en el modelo se distanciará del anterior 200 m y a modo iterativo sus variables de salida se calcularán a partir de las de salida obtenidas para el punto kilométrico anterior. Todas las comparativas entre variables se harán respecto a punto kilométrico, en vez del tiempo, en línea con el método de resolución.

6.1.2.1 Curva de tracción

Para el cálculo de la curva de tracción se necesita calcular la aceleración y velocidad del tren en cada punto kilométrico. Para ello se iterará partiendo de un punto de velocidad y aceleración cero en el km inicial y se calculará la aceleración del siguiente punto kilométrico partiendo de la velocidad y la pendiente del punto kilométrico anterior al de estudio; y de la fuerza de tracción del motor correspondiente a la velocidad del punto anterior.

$$a = \frac{F_{resistencia} + F_{peso} + F_{tracción}}{Peso * f.m.rotat}$$

Siendo:

$$F_{resistencia} = -(A + B \cdot v + C \cdot v^2)$$

$$F_{peso} = -Peso \cdot pendiente \cdot g$$

Para el cálculo de la aceleración en la simulación se introdujo esta fórmula con algunos condicionantes:

- El esfuerzo de tracción, $F_{tracción}$, depende de la velocidad del punto kilométrico de análisis: para puntos de velocidad menor a la velocidad correspondiente al cambio de curva, en este caso 16 km/h, el valor del esfuerzo es constante, 200 kN; pero de ser la velocidad mayor, el esfuerzo es variable e igual al valor de potencia instalada, que es fijo, entre la velocidad instantánea del punto en cuestión (ver fórmula).
- La potencia empleada por el tren cuando está traccionando, será siempre la máxima instalada.
- Las fuerzas que actúan sobre el tren son: fuerza debida a la tracción, fuerza de oposición debida a la resistencias pasivas y fuerza debida a la componente del peso, que dependiendo de la pendiente se opondrá, o no, al avance. De ser el valor del sumatorio de fuerzas mayor que el valor de la fuerza de adhesión, la aceleración valdrá la fuerza de adhesión entre el peso del tren.

A continuación, conocida la aceleración del punto, se calcula la velocidad correspondiente, según la siguiente fórmula:

$$V_{final} = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot a \cdot (X_1 - X_0)}$$

Para el cálculo, de la misma forma que en la aceleración, se introdujeron las siguientes condiciones:

- Velocidad limitada al límite de velocidad del recorrido completo
- Velocidad limitada al límite de velocidad de cada tramo
- Velocidad limitada a cero si el pk de estudio coincide con una de las paradas programadas con el tren

Nótese que se trata de un método aproximado de cálculo iterativo de tal forma que los valores de aceleración y velocidad hallados para cada punto kilométrico serían aquellos con los que llega el tren al punto de estudio. Conocida la aceleración del punto, se calcula la velocidad correspondiente.

6.1.2.2 Curva de frenado

Por otro lado, se evaluó la curva de frenado del tren, incorporando el cálculo de la velocidad del tren en sentido contrario al de la marcha, es decir, si la curva de tracción se construyó en el sentido de ida, la de frenado en el de vuelta. De esta forma se podrán comparar para establecer la velocidad real del tren. En aquellos puntos en los que la curva de tracción esté por debajo de la de frenado, el tren estará traccionando; de lo contrario frenando.

Para el cálculo de la velocidad se aplica la misma fórmula que en la curva de tracción, con la única diferencia que en este caso la aceleración no se calcula, sino que es un dato que introducimos en función del requisito de tiempo de frenado del tren. Se introducirán también los mismos condicionantes que en la curva de tracción.

6.1.2.3 Funcionamiento del tren

- Velocidad real del tren: Determinada por el mínimo valor entre la curva de aceleración y de frenado.
- Tiempo total: Calculado en función de la velocidad del tren y la distancia recorrida.
- Aceleración real del tren: Una vez conocida la velocidad real del tren en cada punto km, se calcula la aceleración de la siguiente forma:

$$a = \frac{V_f^2 - V_o^2}{2 \cdot (X_1 - X_o)}$$

6.1.2.4 Potencia

La potencia consumida o generada por el tren a lo largo de su recorrido dependerá del modo de funcionamiento del tren:

- I. Traccionando (o aceleración $\neq$ 0)
En esta situación el tren está traccionando de acuerdo a las condiciones de la curva de tracción. Consume potencia.
- II. Traccionando, pero velocidad=límite (a=0; v=cte)
 - i. Se requiere de tracción para mantener la velocidad constante. En este caso la potencia es consumida correspondiente al esfuerzo de tracción necesario para igualar las resistencias pasivas del tren.
 - ii. El sumatorio de fuerzas del tren ya es positivo y no se requiere de tracción para mover el tren, será dar el caso principalmente cuando la pendiente sea negativa. En este caso la potencia es generada e igual a la resta entre la Fpeso menos la Fresistencia.
- III. Frenando
En esta situación la potencia es siempre potencia generada e igual a la fuerza de frenado menos las fuerzas de oposición, peso y resistencias pasivas.

El criterio de signos empleado es de (+) cuando se refiere a potencia consumida y (-) cuando se refiere a potencia generada.

Nótese que en los casos en los que se genera potencia, esta no puede superar el límite del motor. Por ello hay los siguientes sistemas de frenado:

- Freno de recuperación (Motor)- La energía generada cuando el motor trabaja en modo generación como resultado de un frenado se carga en las baterías.
- Freno neumático-Uno en cada rueda. Se emplea cuando se ha llegado al límite del freno de recuperación, el motor no es capaz de absorber más.
- Freno reostático - Cuando el motor está funcionando en modo generación, pero la energía no se puede cargar en las baterías o devolver a catenaria.

Procediendo con la simulación, lo que se ha calculado es el consumo instantáneo, expresado en kWh/km, en base a todos los casos mencionados anteriormente. Conocidos el consumo y la velocidad instantánea se puede calcular la potencia demandada para cada punto kilométrico.

A continuación, el objetivo fue determinar la energía instantánea consumida o generada en cada punto kilométrico para así determinar el consumo y la generación total de energía en todo el trayecto.

En resumen, las variables de salida que conocemos después de utilizar el modelo son: (1) tiempo total del trayecto, (2) consumo medio, (3) potencia de tracción media, (4) energía total cargada en las baterías, (5) energía total consumida procedente de las baterías, (6) energía total consumida procedente de las pilas de combustible, (7) balance final de energía de las baterías.

Conocidos estos valores se puede especificar los detalles sobre las baterías y el hidrógeno.

Los kilogramos necesarios de hidrógeno se calculan a partir del valor de la energía consumida proveniente de las pilas de combustible y la capacidad energética del hidrógeno. Esta se obtiene de la siguiente forma: la capacidad energética del hidrógeno en tanque es 36 kWh/kg, si se aplican los valores de eficiencia de la cadena de tracción de 92% y de la pila de hidrógeno del 50% el valor final de la capacidad energética es de 16,6 kWh/kg.

6.1.2.5 Estrategia de regeneración

Ante la necesidad de afrontar la descarga de las baterías y reducir el peso, el volumen y el coste correspondiente a la capacidad instalada de las baterías es necesario aumentar la capacidad regenerativa del trayecto. Para ello, la solución es introducir paradas intermedias que permitan recargar las baterías con la energía generada en la frenada. Con esto se conseguirá mejorar el balance de energía de cada tramo, empleando el exceso de energía de unos pk en suministrar energía en los picos de demanda de otros pk.

Se considera la posibilidad de convertir hidrógeno en energía almacenada en baterías en aquellos casos en los que la demanda de potencia se encuentre por debajo de los 600 kW. La energía excedente en ese tramo del recorrido podrá ser almacenada en las baterías.

6.1.3 OUTPUTS DEL MODELO

Para el estudio se eligieron dos recorridos: Madrid-Barcelona y Madrid-Valencia.

6.1.3.1 Madrid-Barcelona

Consideraciones iniciales:

- El recorrido completo son 700 km. Sin embargo, para la simulación del recorrido, se partió del kilómetro 240 debido a que en la acusada pendiente del tramo inicial impedía un correcto funcionamiento del tren de acuerdo a las características especificadas.
- El límite de velocidad establecido para todo el recorrido es de 160 km/h.
- La potencia instalada son 900 kW= 300kW (baterías) + 600 kW (pila combustible) para tracción
- No se contempla aumentar la potencia instalada de las pilas de combustible debido al incremento de coste que supone.

Resultados simulación (I)

En las tablas que se muestran a continuación se recogen los resultados del análisis de sensibilidad de las principales variables de salida en función de la deceleración. De todas las simulaciones se han recogido para el estudio tres situaciones distintas en función de la estrategia regenerativa: sin paradas, con paradas cada 20 kilómetros y con paradas cada 10 km. El sentido escogido fue el de ida.

I. Sin paradas:

(m/s ²)	Vmedia (km/h)	Tiempo (h)	Cons.medio (kWh/km)	E.cargada (kWh)	E.consumida (kWh)	% Cargado vs consumido	Balance final batería* (kWh)
0,4	131,12	3,89	5,53	-493,29	2859,57	17,25	433,46
0,3	131,05	3,90	5,48	-507,78	2850,28	17,82	416,26
0,2	130,89	3,91	5,37	-536,20	2830,64	18,94	381,65
0,15	130,71	3,92	5,33	-540,10	2818,30	19,16	374,02
0,1	130,38	3,94	5,31	-541,13	2798,53	19,34	366,11

Tabla 6 Análisis de sensibilidad en función de la deceleración para un recorrido sin paradas

*Siendo el Balance= Potencia cargada en la batería (<0) +Potencia consumida de la batería

II. Con paradas cada 20 km:

(m/s ²)	Vmedia (km/h)	Tiempo (h)	Cons.medio (kWh/km)	E.cargada (kWh)	E.consumida (kWh)	% Cargado vs consumido	Balance final batería* (kWh)
0,4	111,80	4,94	6,48	-641,14	3345,51	19,16	459,68
0,3	110,35	5,04	6,11	-742,68	3282,86	22,62	338,02
0,2	107,34	5,24	5,58	-872,92	3175,23	27,49	165,21
0,15	104,34	5,44	5,26	-938,37	3095,77	30,31	67,51
0,1	98,62	5,84	4,77	-1048,51	2971,33	35,29	-103,45

Tabla 7 Análisis de sensibilidad en función de la deceleración para un recorrido con paradas cada 20 km

III. Con paradas cada 10 km:

(m/s ²)	Vmedia (km/h)	Tiempo (h)	Cons.medio (kWh/km)	E.cargada (kWh)	E.consumida (kWh)	% Cargado vs consumido	Balance final batería (kWh)
0,4	96,84	5,83	7,53	-857,87	3978,34	21,56	464,56
0,3	94,60	6,01	6,90	-1020,51	3865,84	26,40	265,15
0,2	90,26	6,36	5,92	-1316,41	3669,65	35,87	-106,85
0,15	86,18	6,70	5,25	-1510,38	3511,72	43,01	-364,32
0,1	79,24	7,36	4,42	-1825,30	3286,22	55,54	-787,46

Tabla 8 Análisis de sensibilidad en función de la deceleración para un recorrido con paradas cada 10 km

De acuerdo a lo explicado anteriormente se busca aumentar la energía generada debido a la frenada mediante la introducción de paradas adicionales a la final del trayecto. Inicialmente, la predicción podría ser que, al aumentar el número de paradas, estaríamos disminuyendo la diferencia entre energía consumida y generada. Sin embargo, no se puede olvidar el tiempo de frenado. Cuando se introduce una parada y la deceleración del tren en el frenado es de 0,4 m/s², el tiempo de frenado es muy pequeño, insuficiente para poder generar más energía en los puntos kilométricos de frenado que energía consumida en los posteriores de aceleración hasta la velocidad final. De hecho, al introducir una parada adicional, es decir, un punto de velocidad cero, la energía consumida en los puntos kilométricos posteriores es mucho mayor que sin paradas ya que al ser menor la velocidad, el tiempo en alcanzar el mismo pk que antes es mucho mayor (Energía = Potencia*tiempo). Por todo esto, si se desea mejorar la capacidad regenerativa, es necesario reducir el valor de la deceleración, aumentando así el tiempo de frenado y consecuentemente la energía generada. De esta forma se consigue contrastar las pérdidas por el esfuerzo adicional de acelerar con el aumento de la capacidad regenerativa. Al final lo que interesa es que el balance entre la potencia consumida por las baterías (potencia descargada) y la generada (cargada) sea menor o igual que cero.

Los resultados mostrados en las tablas anteriores recogen estas diferencias. Evaluando el caso en el que se introducen paradas cada 10 km se puede ver como para una aceleración de 0,4 m/s² el balance de las baterías es positivo mientras que para aceleraciones menores

es negativo, significando que al final del trayecto tenemos las baterías cargadas ese valor de energía.

Resultados simulación pk 240-700 (II)

En base a los resultados explicados en el apartado anterior se decidió seleccionar una deceleración de $0,2 \text{ m/s}^2$. La tabla que se adjunta a continuación recoge los resultados obtenidos de la simulación del recorrido sin paradas en sentido ida, a modo de referencia, y del recorrido con paradas cada diez kilómetros en ambos sentidos.

En la simulación del recorrido con paradas cada diez kilómetros se planteó una hipótesis adicional; se establece que la potencia consumida en cada uno de los puntos de tracción es como mínimo igual a la potencia instalada de las pilas de combustible, de valor 600 kW. Por consiguiente, en aquellos puntos en los que la potencia requerida sea menor que 600 kW, se podrá almacenar en baterías la energía correspondiente al exceso de potencia por el tiempo del trayecto que corresponda.

Paradas	Sentido	Velocidad media (km/h)	Tiempo (h)	Consumo medio (kWh/km)	Potencia media de tracción (kW)	Energía cargada en baterías (kWh)	Energía consumida de baterías (kWh)	Energía consumida del H ₂ (kWh)	Balance baterías* (kWh)
Sin	Ida	130,89	3,91	5,37	710	-536,2	918	2030	381,65
10 km	Ida	90,26	6,36	5,92	610	-1316,4	1209,6	2598,1	-106,65
	Vuelta	87,02	6,47	6,79	660	-1188	1320	2761	131,67

Tabla 9 Resultados de la simulación: Características del recorrido

*Balance de baterías positivo quiere decir que se pierde energía desde el comienzo del trayecto

A partir de estos resultados, se pudieron calcular los requisitos funcionales de los componentes de la cadena de tracción con hidrógeno: baterías, pila de combustible y tanques de hidrógeno.

Paradas	Sentido	Hidrógeno necesario (kg)	kg/km de H ₂	Potencia instalada FC (kW)	Potencia instalada baterías (kW)	Mín. Energía inicial baterías (kWh) (1)	Pot instalada para auxiliares (kW)(2)	Energía consumida por auxiliares (kWh)	Capacidad total baterías * (kWh) (3)	Energía total instalada (kWh)(4)
10 km	Ida	156,51	0,34	600	300	100	250	1590	1500	4097,8
	Vuelta	166,35	0,36	600	300	160	250	1620	1770	4531

Tabla 10 Requisitos de los equipos de la cadena de hidrógeno

*Considerando la demanda energética de tracción y auxiliares

Siendo:

- (1) La mínima energía inicial de las baterías, la energía mínima que han de tener las baterías en el inicio del recorrido para realizar el trayecto completo, considerando sólo la energía demandada para la tracción.

Las figuras 6 y 7, a continuación, muestran el perfil de descarga de las baterías en el recorrido de ida y vuelta respectivamente.

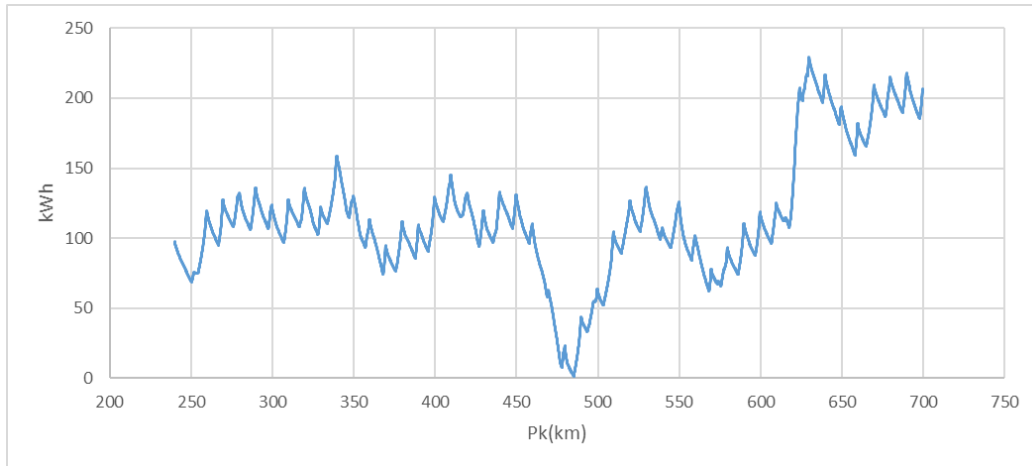


Figura 6 Descarga de las baterías a lo largo del recorrido por consumo de tracción

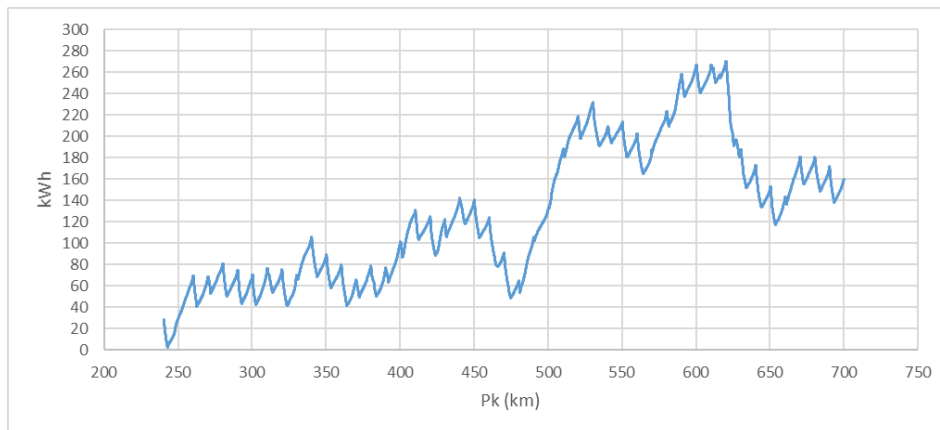


Figura 7 Descarga de las baterías a lo largo del recorrido por consumo de tracción

Nótese que la diferencia de energía en baterías al inicio y el fin del recorrido es igual al valor del balance de energía de las baterías recogido en la Tabla 9.

- (2) La potencia instalada para auxiliares proviene de la demanda de 190 kW en la motriz y 22 kW en un coche [16].
- (3) Capacidad total de las baterías, la energía inicial que han de tener las baterías al principio del trayecto para garantizar la llegada al destino. Los valores se encuentran en la Tabla 10. Para su cálculo se ha tenido en cuenta:
 - a. La demanda de energía de tracción correspondiente a las baterías

- b. La demanda de energía de los equipos auxiliares
 - c. La energía regenerada y almacenada en baterías en distintos puntos del recorrido
- (4) La energía total instalada igual a la suma de la energía demandada para tracción y la energía demandada por los equipos auxiliares. Los valores se encuentran recogidos en la Tabla 10 y han sido calculados sumando la capacidad total de las baterías y la energía consumida del hidrógeno.

La descarga de la energía total instalada a lo largo del trayecto se muestra en las figuras 8 y 9, correspondientes a los trayectos de ida y vuelta, respectivamente.

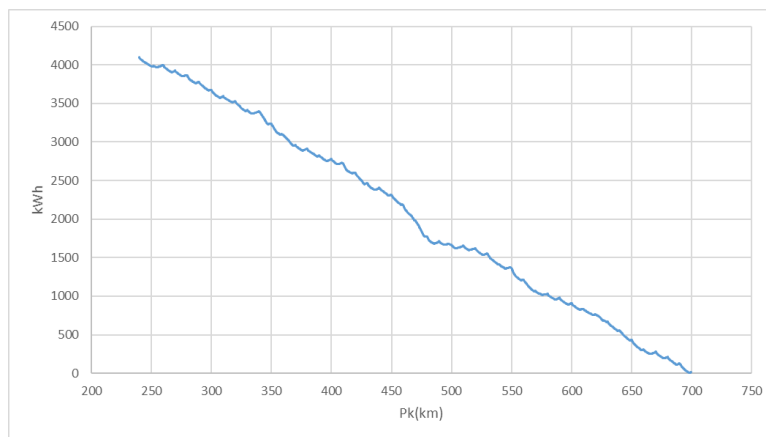


Figura 8 Descarga de la energía total a lo largo del recorrido por consumo de tracción más auxiliares

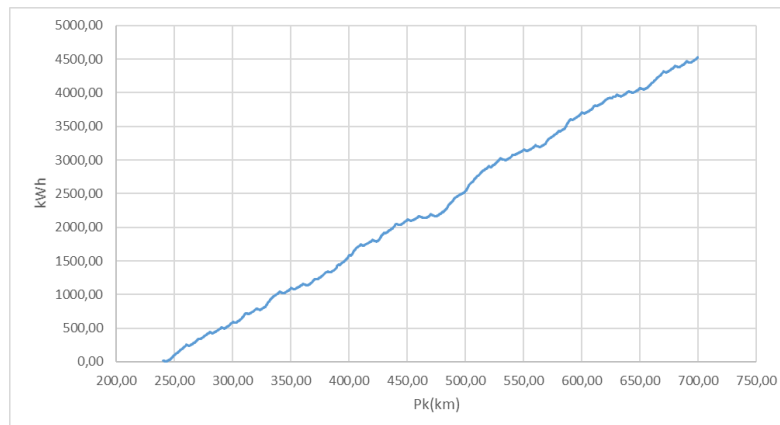


Figura 9 Descarga de la energía total a lo largo del recorrido por consumo de tracción más auxiliares

Resultados simulación (III)- Consideración sobre la potencia de regeneración

En el modelo de simulación para el cálculo de recorrido del que se han obtenido los resultados mostrados anteriormente, la potencia en el momento de frenado está limitada a 904 kW, es decir, a la potencia máxima de tracción. Sin embargo, si prescindimos de esta limitación y repetimos la simulación se obtienen valores de potencia mucho mayores. Debido a la masa del AVRIL que tiene unos motores instalados mayores.

A continuación, en la figura 10 se muestra la diferencia de potencia entre ambas simulaciones. Si eliminamos el límite de la potencia de regeneración a la máxima del motor, se obtiene una energía extra de 1372,23 kWh. Esta puede ser almacenada, reconducida a la resistencia de freno o se usará el freno neumático.

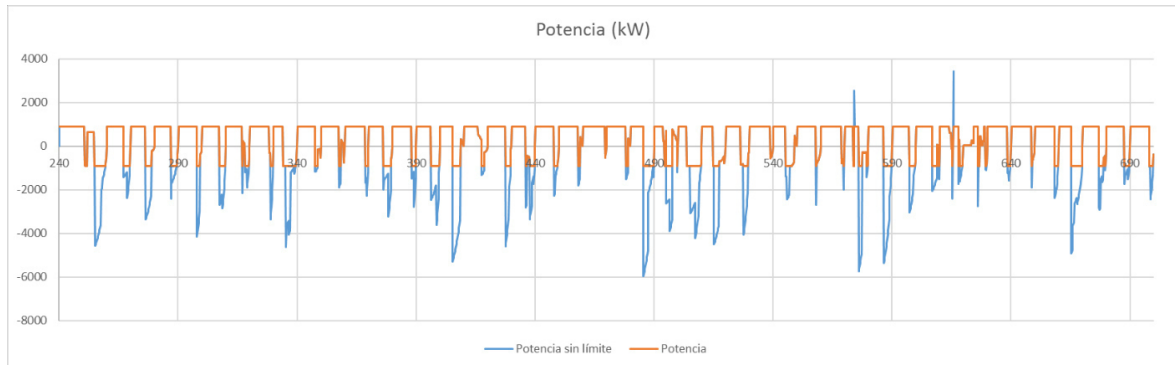


Figura 10 Comparativa de potencia

Comentarios adicionales de la simulación:

- Balance ida y vuelta de energía en baterías por tracción: en el sentido de ida, con una energía inicial en las baterías de 100 kWh, se obtiene una energía final generada y almacenada en las baterías de 107 kWh. Esta puede ser utilizada para realizar el recorrido de vuelta que requiere de una energía inicial en baterías de 160 kWh para finalizar el trayecto.
- El hidrógeno consumido por kilómetro es de 0,34-0,36 kg/km. Ante el objetivo de obtener un prototipo de 800 km de autonomía, se necesitarán desde 256-280 kg.
- La energía para auxiliares incluye la energía necesaria para el aire acondicionado de las cabinas y coches, la iluminación, compresores, etc.
- Ver Anexo I-1 para ver la comparativa de resultados obtenidos en la simulación del recorrido de Ida con y sin paradas.

6.1.3.2 Madrid-Valencia

Por último, se realizó también la simulación para el recorrido Madrid-Valencia, sin paradas. Con la potencia instalada de tan solo 900 kW es imposible realizar el recorrido completo.

Por eso, en primer lugar, se simuló desde el pk 8-Madrid hasta el pk 289,55- Minglanilla; siendo el recorrido completo de 281,5 km. Sin embargo, en el recorrido de ida el tren perdía mucha velocidad. Finalmente, el tren sólo podría realizar ambos sentidos sin ningún problema para el tramo de Madrid hasta Tarancón, pk 118,59. (Ver Anexo I-2)

Resultados simulación Madrid-Tarancón

Paradas	Sentido	Velocidad media (km/h)	Tiempo (h)	Consumo medio (kWh/km)	Potencia media de tracción (kW)	Energía cargada en baterías (kWh)	Energía consumida de baterías (kWh)	Energía consumida del H ₂ (kWh)	Balance baterías* (kWh)
Sin	Ida	120,28	0,98	7,30	842	-41,27	280,16	558,28	238,9
	Vuelta	135,11	0,89	5,08	704	-118	207	441	88,2

Tabla 11 Resultados de la simulación: Características del recorrido

*Balance de baterías positivo quiere decir que se pierde energía desde el comienzo del trayecto

A partir de estos resultados, se pudieron calcular los requisitos funcionales de los componentes de la cadena de tracción con hidrógeno: baterías, pila de combustible y tanques de hidrógeno.

Paradas	Sentido	Hidrógeno necesario (kg)	kg/km de H ₂	Potencia instalada FC (kW)	Potencia instalada baterías (kW)	Mín. Energía inicial baterías (kWh) (1)	Pot instalada para auxiliares (kW)	Energía consumida por auxiliares (kWh)	Capacidad total baterías * (kWh) (2)	Energía total instalada (kWh)(3)
Sin	Ida	58,48	0,58	600	300	240	250	245	485	1043,7
	Vuelta	26,57	0,27	600	300	121	250	223	317,7	758,9

Tabla 12 Requisitos de los equipos de la cadena de hidrógeno

*Considerando la demanda energética de tracción y auxiliares para un mismo conjunto de baterías

6.1.3.3 Calatayud-Lérida

En este apartado se recogen los cálculos de recorrido del recorrido Calatayud-Lérida (parte del recorrido Madrid-Barcelona), recorrido en el que previsiblemente se realizará la prueba del prototipo.

La simulación comienza en el pk 221,3- Calatayud y finaliza en el pk 442,1- Lérida; siendo el recorrido completo de 220,8 km. Las condiciones de operación son exactamente las mismas que en la simulación anterior, exceptuando el número de paradas introducidas. A continuación, la tabla recoge las paradas introducidas.

Parada	Pk
1	263,9
2 (Zaragoza)	306,7
3	374,3

Tabla 13 Paradas introducidas

Resultados simulación:

Sentido	Velocidad media (km/h)	Tiempo (h)	Consumo medio (kWh/km)	Potencia media de tracción (kW)	Energía cargada en baterías (kWh)	Energía consumida de baterías (kWh)	Energía consumida del H ₂ (kWh)	Balance baterías* (kWh)
Ida	129,30	1,87	4,8	703	-298	434	883,88	136
Vuelta	116,71	2,14	6,78	772	-185	541,5	1103	357

Tabla 14 Resultados de la simulación: Características del recorrido

*Balance de baterías positivo quiere decir que se pierde energía desde el comienzo del trayecto

A partir de estos resultados, se pudieron calcular los requisitos funcionales de los componentes de la cadena de tracción con hidrógeno, recogidos en la siguiente tabla.

Sentido	Hidrógeno necesario (kg)	kg/km de H ₂	Potencia instalada FC (kW)	Potencia media FC (kW)	Potencia instalada baterías (kW)	Mín. Energía inicial baterías (kWh)	Pot instalada para auxiliares (kW)	Energía consumida por auxiliares (kWh)
Ida	53	0,24	600	472	300	185	250	467,6
Vuelta	66	0,30	600	519	300	390	250	534,3

Tabla 15 Requisitos de los equipos de la cadena de hidrógeno

Obteniendo para cada trayecto dos posibles configuraciones de las baterías: un conjunto de baterías para tracción y equipos auxiliares o baterías separadas. Según sea la configuración varía la energía instalada.

Sentido	Hidrógeno necesario (kg)	Energía consumida H ₂ (kWh)	Energía instalada baterías auxiliares (kWh)	Energía instalada baterías tracción* (kWh)	Energía total instalada (kWh)
Ida	53	883,88	467,6	224	1575
			634		1518
Vuelta	66	1102,9	543,3	390	2036,2
			911,3		2014,2

Tabla 16 Energía y potencia de los equipos

* El valor de energía instalada para las baterías es el valor de pico de la energía requerida de las baterías.

Ida:

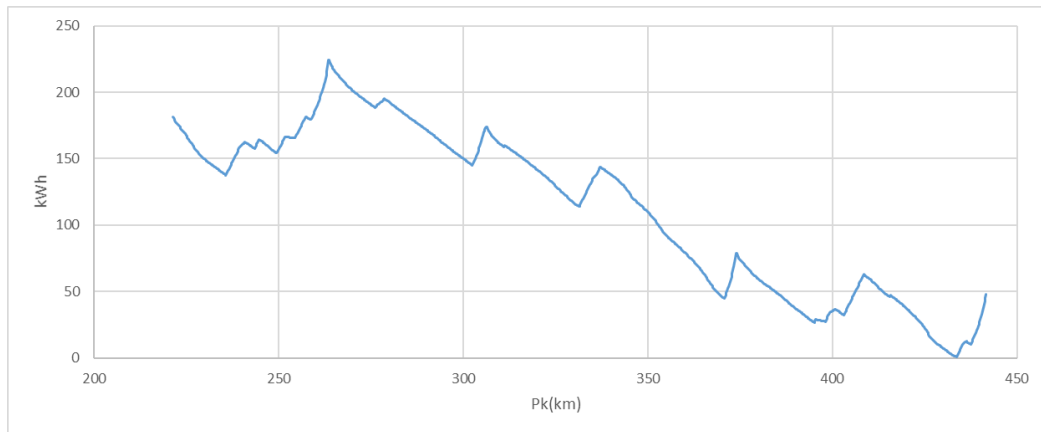


Figura 11 Baterías para tracción a lo largo del recorrido

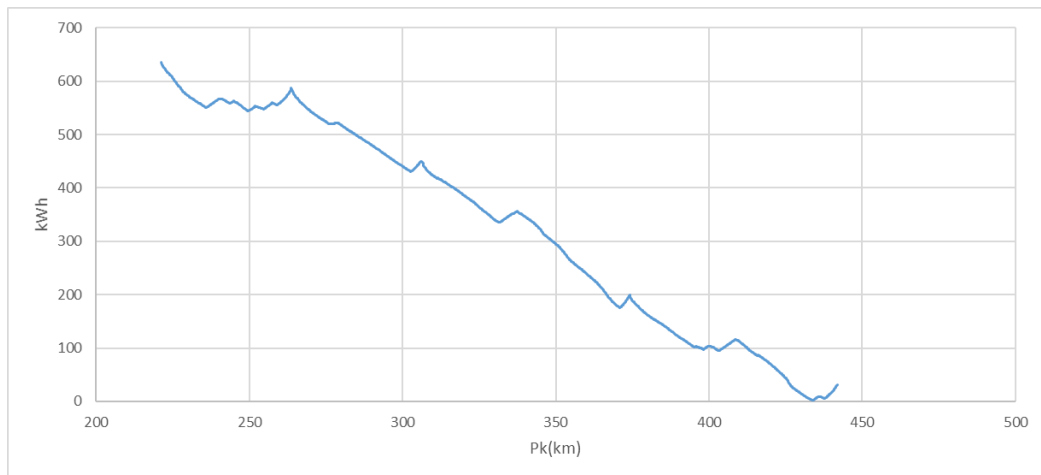


Figura 12 Baterías para tracción y auxiliares (conjunto) a lo largo del recorrido

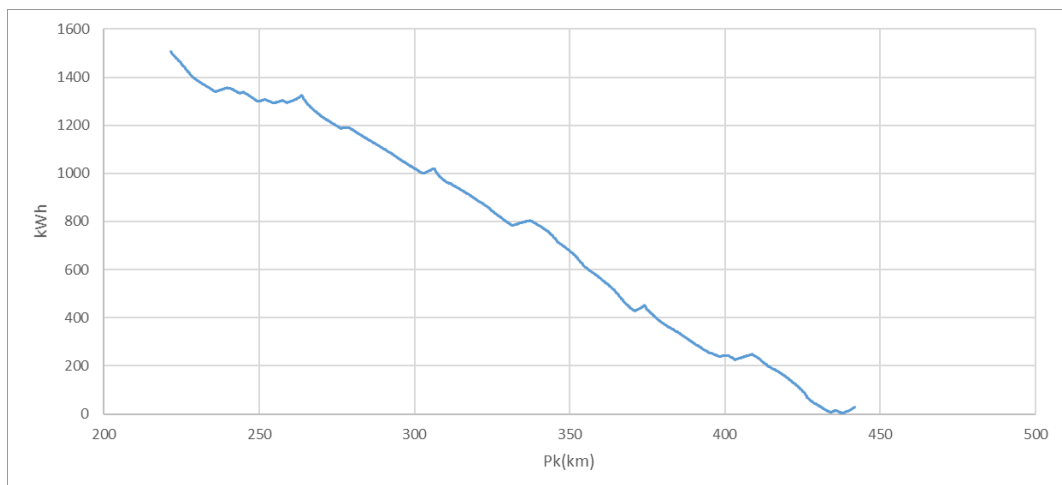


Figura 13 Descarga de la energía total del sistema

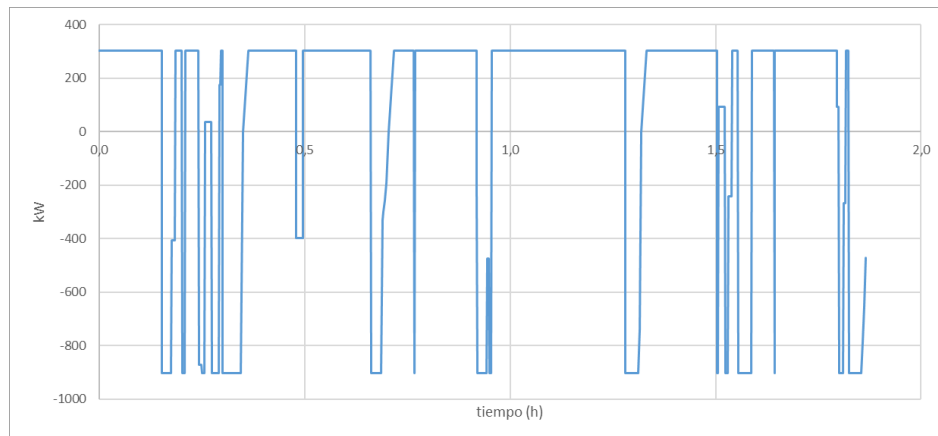


Figura 14 Potencia de las baterías (carga/descarga). Sólo tracción

Vuelta:

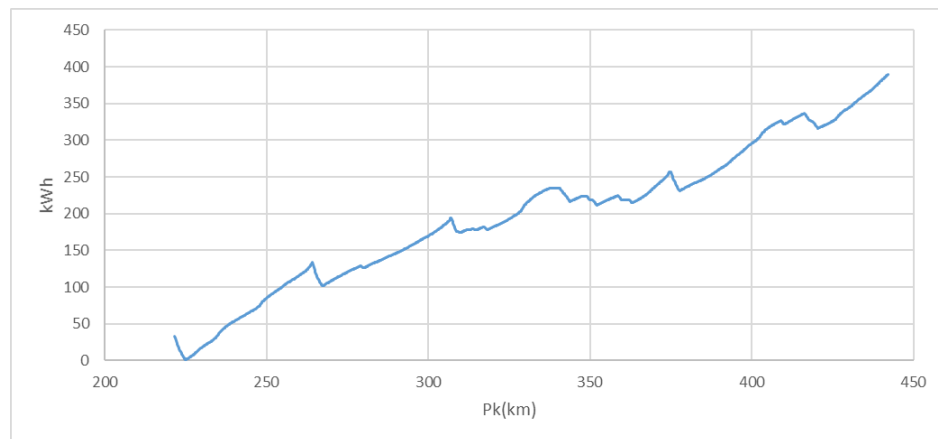


Figura 15 Baterías para tracción a lo largo del recorrido

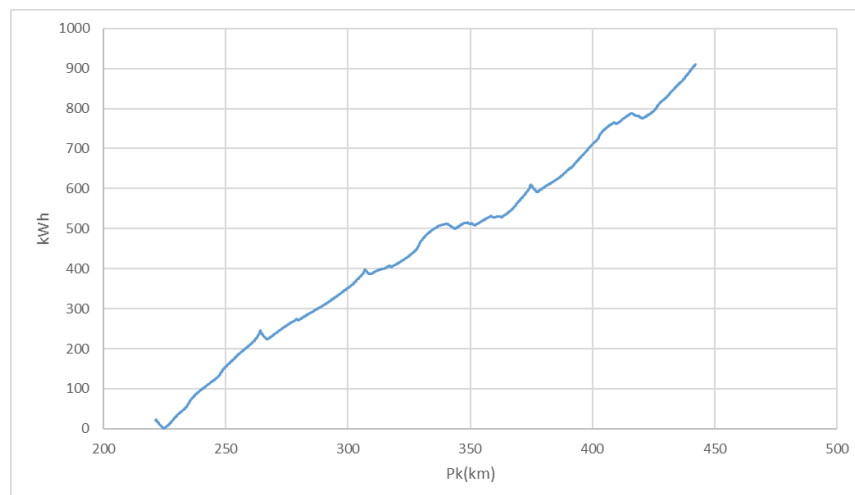


Figura 16 Baterías para tracción y auxiliares (conjunto) a lo largo del recorrido

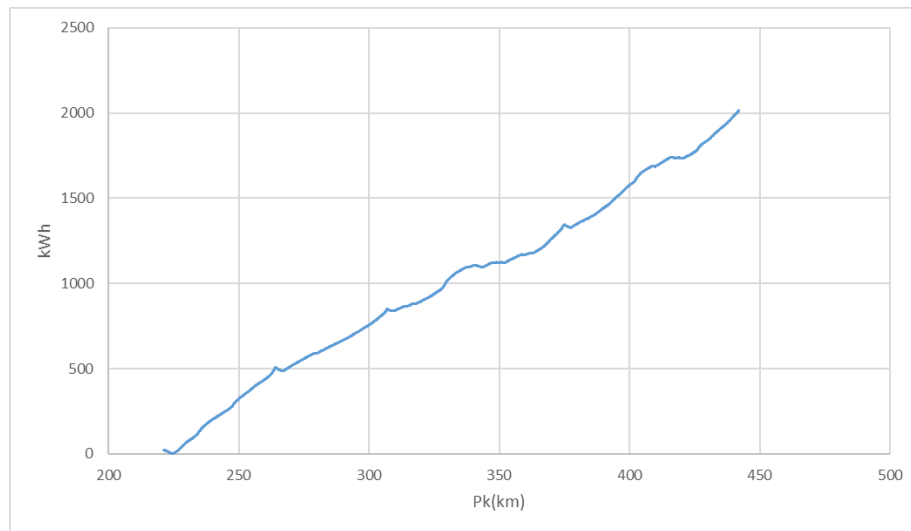


Figura 17 Descarga de la energía total del sistema

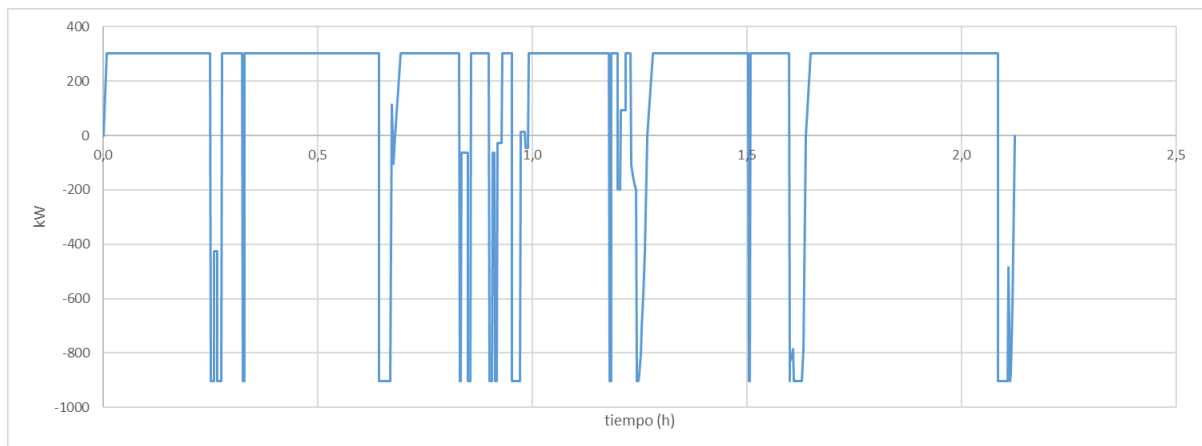


Figura 18 Potencia de las baterías (carga/descarga). Sólo tracción

Requisitos finales de los equipos de la instalación para un recorrido de 442 km:

Hidrógeno	Potencia pila de combustible (kW)		600	
	Cantidad de hidrógeno (kg)		118,49	
Baterías	Potencia (kW)		Capacidad (kWh)	
	Tracción	Auxiliares	Tracción	Auxiliares
	300	250	390	543,3
	550		911,3	

Tabla 17 Requisitos funcionales de los elementos de la cadena

Comentarios adicionales de la simulación:

- Para el dimensionado de los equipos de la instalación, se tomará la energía máxima del recorrido de ida y vuelta, ya que se considera que al final del recorrido de ida se recargarán los equipos con catenaria para la vuelta. En caso de dimensionar un tren híbrido hidrógeno- baterías, sin recarga por el medio que sea, entre la ida y la vuelta, se deberán seleccionar equipos cuya capacidad sea igual a la suma de la necesaria para la ida y la vuelta.
- La tabla recoge los requisitos tanto para un set de baterías conjunto para tracción y auxiliares o independiente para cada uno.
- Para optimizar la energía sería interesante, antes de la frenada, descargar las baterías para poder cargar lo máximo en la frenada y aprovechar toda su capacidad.
- En caso de tener que realizar algún ajuste de autonomía, es más favorable, para la optimización de costes y peso, bajar la capacidad de las baterías y aumentar los kg de hidrógeno.

Capítulo 7. ESTUDIO DE SEGURIDAD DE LA OPERACIÓN CON HIDRÓGENO

El tren híbrido hidrógeno-catenaria-batería presenta grandes ventajas operativas, gracias entre otras cosas, a la densidad energética del hidrógeno, a la eficiencia de la pila de combustible de un 50% frente al 33% de los motores diésel, etc. Sin embargo, la operación con hidrógeno supone algunas modificaciones y trae consigo riesgos que hay que considerar para mantener la seguridad de las personas, el entorno y las propiedades.

En este apartado se pretende identificar las principales consecuencias de la operación con hidrógeno (riesgos, ventajas, partes implicadas, etc.) para detallar:

- Plan de seguridad: Identificación de riesgos y medidas de prevención y mitigación.
- Requisitos de diseño que han de cumplir los elementos de la cadena de tracción de acuerdo a las directivas europeas.

7.1 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno se plantea como una fuente alternativa de energía a los combustibles convencionales con propiedades muy distintas. Algunas de ellas resultarán ventajosas para la operación, otras, sin embargo, plantearán riesgos:

- Densidad: El hidrógeno es más ligero que el aire. Por ello, en contacto con él sube rápidamente.
- Difusión: Rápida. (Las moléculas del hidrógeno son muy pequeñas).
- Alta capacidad de reaccionar con metales en su difusión, de ahí la importancia en la elección de todos los elementos en posible contacto con hidrógeno.
- Viscosidad: Muy baja lo que se traduce en un alto porcentaje de fuga.
- Detección de su presencia:
 - Inodoro: No se puede añadir ningún compuesto que permita su detección con el olor, como el caso del gas natural, por su incompatibilidad con la pila de combustible. El hidrógeno ha de ser de gran pureza para evitar la contaminación de los electrodos.
 - Invisible: A diferencia del propano, cuando prende el hidrógeno, no se ve la llama. Sólo se aprecia por la noche.
- Radiación
 - Baja radiación infrarroja, lo que supone:
 - Baja sensación de calor, impidiendo se detección

- Baja probabilidad de propagación del fuego en sus alrededores. La transferencia de calor radiada es baja.
 - Alta radiación ultravioleta: Alto tiempo de exposición provocará quemaduras.
- Combustión:
 - Temperatura de autoignición: Alta, 812° C.
 - Alta velocidad de llama, por consiguiente, la probabilidad de que una llama derive en una detonación es alta. Sin embargo:
 - En aire, aunque la velocidad de combustión es elevada, la ligereza del hidrógeno hace que no se alcance una mezcla suficientemente rica como para producir la detonación.
 - En un espacio confinado, la probabilidad de alcanzar la mezcla es mayor. Para evitarlo se debe ventilar de forma adecuada para garantizar una concentración de hidrógeno en aire.
 - Para valores bajos de concentración de hidrógeno en aire (<4%), la energía de ignición para iniciar la combustión es similar a la del resto de combustibles, sin embargo, sobrepasado este porcentaje, la energía es mucho menor, traduciéndose en una alta probabilidad de combustión.
- Inflamabilidad: Alta cuando aumenta su concentración. El hidrógeno en contacto con el oxígeno del aire, actúa como factor asfixiante, produciéndose así la llama.
- Alta variabilidad de inflamabilidad en aire: 4% -75%. El intervalo de concentraciones combustible-aire en los que se puede producir la combustión es mucho mayor que el del resto de combustibles.
- No es tóxico. El producto de su combustión es agua.

7.2 ***RIESGOS EN LA OPERACIÓN CON HIDRÓGENO***

Los accidentes que puede ocasionar la operación con hidrógeno comienzan siempre con una fuga de hidrógeno procedente de alguno de los tanques o de algún conducto del circuito. El hidrógeno es un gas inflamable que en contacto con el oxígeno del aire puede originar una atmósfera explosiva.

La fuga de hidrógeno puede desencadenar los siguientes sucesos: el hidrógeno en contacto con el oxígeno forma una mezcla, ésta entra en contacto con una fuente de calor (chispa, altas temperaturas, etc.) y da lugar a la ignición de la misma; su congestión ocasiona la aceleración en la formación y propagación de llamas y si estas se encuentran confinadas en un espacio, producirá un aumento de la presión y tendrá lugar la explosión.

En definitiva, la fuga de hidrógeno ocasionará el comienzo de la cadena y dependiendo del estado al que se llegue habrá unos riesgos asociados:

- I. Riesgos asociados a la liberación de hidrógeno:
 - a. Chorro abrasivo, metralla
 - b. Asfixia por la reducción del O₂ del aire

- c. Quemaduras criogénicas (cuando se trate de hidrógeno en estado líquido)
- II. Riesgos asociados a una rápida ignición tras la liberación
 - a. Cargas térmicas
- III. Riesgos asociados a una ignición tardía tras la liberación, posterior propagación de llamas y rápida degradación térmica
 - a. Explosión

7.2.1 MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Ante estos riesgos, se analiza la cadena de eventos y se establecen medidas para limitar o eliminar los sucesos de la cadena. En cada nuevo suceso de la cadena, aumenta el impacto y nivel de criticidad de las consecuencias frente al anterior. Por eso, cuanto antes se detecte y se actúe, más eficientes serán las medidas de contingencia y mayor será el ahorro.

En una ignición intervienen tres factores: la energía de activación (T^a , chispa, etc.), combustible (H_2) y comburente (mezcla de H_2 y O_2). Se acotarán los riesgos en la operación desarrollando barreras de prevención y medidas de reducción para cada uno de estos factores, que son al final el origen de los peligros finales, mencionados en el apartado anterior.

A continuación, se detallan los riesgos evaluados, medidas para su prevención y contingencia, detallando que acciones incluye cada una de ellas.

I. Riesgos y medidas de prevención:

Categoría	Riesgo	Medida de prevención	Acciones
Combustible	Fuga de hidrógeno	Limitar la cantidad de hidrógeno en el interior a lo estrictamente necesario	- Manipulación del hidrógeno en depósitos pequeños - Almacenamiento principal de hidrógeno en el exterior
	No detectar las fugas	- Monitorizar todos los procesos en los que interviene el hidrógeno	- Instalación de sensores - Evaluación de la localización idónea de los sensores - Señalización adecuada del estado del sistema - Señalización de la necesidad de ventilación - Señalización de la necesidad de cortar toda la electricidad
Comburente	Formación de una mezcla inflamable	Evitar la formación de una mezcla inflamable por: - Entrada de aire dentro de los tanques por una	- Asegurar la estanqueidad del sistema - Evitar el atornillado de tuberías

		baja presión en la operación - Liberación de hidrógeno	- Diseño de tuberías de pequeño diámetro - Incorporar un sistema de ventilación forzada en caso de que no sea suficiente con la natural - Diseño adecuado de válvulas de exceso de flujo y de las boquillas de descarga
	Formación de una atmósfera explosiva*	Identificar y analizar las zonas ATEX	- Clasificar las zonas ATEX para definir los requisitos de seguridad de cada una de ellas
	Obstaculización de la evacuación de una mezcla de alta concentración de H ₂	Evitar la congestión, reducir las turbulencia	- Diseño adecuado de las tuberías, componentes y edificios - Retirar los componentes innecesarios que obstaculizan
	Confinamiento de la mezcla	Evitar el confinamiento de la mezcla proporcionando la ventilación adecuada en cada momento	- Aumentar, en la medida de lo posible, el contacto con el aire exterior - Eliminar o reducir las zonas donde se pueda quedar acumulado el hidrógeno. Evitar techos de protección.
Energía de activación	Materiales como fuentes de ignición	Limitar los materiales susceptibles de convertirse en fuentes de energía	- Instalar materiales y equipos ATEX: ventiladores, luminarias. - Las tuberías de hidrógeno se colocan por encima del resto de cableado, de tal forma que antes una fuga, estos, por estar debajo no estén expuestos. - En zonas de riesgo, evitar sustancias inflamables, altas temperaturas y electricidad - Puesta tierra adecuada - Protección frente a rayos en instalaciones en el exterior

Tabla 18 Riesgos y medidas de prevención (I)

Categoría	Riesgo	Medida de prevención	Acciones
Energía de activación	Materiales incompatibles con Hidrógeno	Evitar los peligros asociados a la interacción entre materiales	- Selección adecuada de los materiales en contacto con el circuito de hidrógeno
Otros	Desconocimiento de los peligros del hidrógeno	Entrenar a los trabajadores en la seguridad de operación con hidrógeno	- Plan de auditoria interna - Creación de manuales y procedimientos - Control de seguridad de manera regular - Promover la participación de los trabajadores en cursos sobre la seguridad en la operación con hidrógeno
	Propagación del fuego	Introducir barreras	- Muros de protección contra incendios - Vidrio de seguridad - Pararrayos de llama - Respiraderos de explosión
	Fugas del circuito de agua de las pilas de combustible	Diseño de las tuberías	- Materiales seleccionados con alta resistencia

Tabla 19 Riesgos y medidas de prevención (II)

* Una atmósfera explosiva se define como la mezcla, en la cual, tras una ignición, la combustión se expande a la totalidad de la mezcla no quemada.

II. Medidas de contingencia:

Categoría	Medida de contingencia
Combustible	Plan de acción ante detección de una fuga de hidrógeno
Comburente	Plan de acción ante mezcla inflamable mediante ventilación
Energía de activación	Plan de acción ante la propagación de las llamas

Tabla 20 Medidas de contingencia

7.2.2 MEDIDAS DE CONTROL

- Informar y registrar los accidentes e incidentes ocurridos
- Actualizar el plan de seguridad

7.3 PLAN DE SEGURIDAD

El manejo de materiales peligrosos requiere de la elaboración de un plan de seguridad riguroso que contemple cada una de las actividades en las que interviene, de tal forma que se pueda eliminar o limitar en la medida de lo posible todo riesgo asociado. Por consiguiente, la operación de un vehículo híbrido de hidrógeno requerirá también de la definición de un plan que garantice la seguridad en cada una de las actividades implicadas: suministro, almacenamiento, distribución, operación etc.

Para ello se han definido los siguientes pasos a seguir en su elaboración:

- 1) Descripción detalla del alcance del proyecto: especificación de las actividades
- 2) Recopilación de la información organizativa de seguridad de las actividades
 - a. Aplicación de políticas y procedimientos relacionados con la seguridad
 - b. Aplicación de la experiencia organizativa en la operación con hidrógeno previa al proyecto
- 3) Proyecto de seguridad:
 - a. Identificación de riesgos en la seguridad de la operación del tren aplicando una metodología: *Checklist, What If, HAZOP, FMEA, Fault Tree, Event Tree, Probabilistic Risk Assessment, QRA, hydrogen safety engineering etc.*
 - b. Evaluación de los riesgos identificados
 - i. Clasificar los riesgos en función de su probabilidad
 - ii. Predecir el nivel de impacto de cada uno de ellos
 - c. Definir un plan de reducción de riesgos:
 - i. Identificar y clasificar modos de fallo
 - ii. Medidas de prevención: reducir la probabilidad de ocurrencia
 - iii. Medidas de contingencia: minimizar las consecuencias asociadas
 - d. Especificar para cada proceso medidas concretas para garantizar la seguridad del trabajo: pasos de cada fase de operación, límites de operación, sistemas de seguridad y la funcionalidad de cada uno, etc.
 - e. Integración mecánica y de equipos
 - f. Procedimientos de gestión y de cambio: desarrollar un plan que contemple los detalles sobre la metodología a seguir en la evaluación de cambios en los materiales, la tecnología, equipos, personal, procedimientos, etc.
 - g. Documentación del plan de seguridad
- 4) Plan de comunicación y monitorización
 - a. Organizar sesiones de formación para los trabajadores sobre la nueva forma de operación: Comunicación de los riesgos, medidas de prevención, etc.
 - b. Informar de forma periódica sobre la seguridad del sistema
 - c. Revisión del plan de seguridad
 - d. Organizar eventos dedicados a transmitir y compartir las medidas establecidas para la seguridad en la operación con hidrógeno
 - e. Informar de accidentes e incidentes ocurridos y evitados
 - f. Auditorías internas

- 5) Aprobación del plan de seguridad

7.4 COMPONENTES DEL SISTEMA SUJETOS A REGULACIÓN

El diseño de la instalación deberá asegurar el cumplimiento de los requisitos establecidos por las directivas europeas para la operación con hidrógeno.

A continuación, de acuerdo al Reglamento (CE) nº79/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, se listan los componentes de hidrógeno que necesitan ser homologados, si se dispone de ellos en el vehículo impulsado por hidrógeno:

- 1) depósito;
- 2) válvula de cierre automática;
- 3) conjunto de piezas del depósito;
- 4) accesorios;
- 5) conducto de combustible flexible;
- 6) intercambiador térmico;
- 7) filtro de hidrógeno;
- 8) válvula manual o automática;
- 9) válvula antirretorno;
- 10) regulador de presión;
- 11) dispositivo de descarga de presión;
- 12) válvula de descarga de presión;
- 13) conexión o receptáculo para el reabastecimiento de combustible;
- 14) conector extraíble del sistema de almacenamiento;
- 15) sensores de presión, temperatura, hidrógeno y caudal (si se utilizan como dispositivo de seguridad);
- 16) sensores de detección de fugas de hidrógeno.

siempre que la presión de trabajo nominal sea superior a los 3MPa como es el caso.

7.4.1 REGLAMENTO RELATIVO A LA HOMOLOGACIÓN DE LOS VEHÍCULOS IMPULSADOS POR HIDRÓGENO EN ESTADO GASEOSO

En este apartado se resumen los principales puntos del presente (UE) nº 406/2010 [18] de la comisión del 26 de abril de 2010 por el que se aplica el Reglamento (CE) nº 79/2009 [17] del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a la homologación de los vehículos (principalmente coches) impulsados por hidrógeno en estado gaseoso y que, por tanto, pueden ser tomados como referencia para el diseño del prototipo. Del reglamento se incluye únicamente la información que pueda ser aplicable a la operación de un tren con hidrógeno. Para ver detalle ir a [17] y [18].

Anexo IV: Requisitos de los componentes y sistemas de hidrógeno diseñados para el uso de hidrógeno comprimido

Requisitos generales:

- i. Toda la documentación y todos los informes relativos a los ensayos de homologación de tipo deberán estar lo suficientemente detallados para que un laboratorio de ensayo independiente pueda reproducirlos.
- ii. El intervalo de temperaturas de funcionamiento normal de los componentes oscila entre -40° C y +85° C.
- iii. El gas de hidrógeno comprimido utilizado para los ensayos deberá cumplir con la norma ISO/TS 14687-2.
- iv. El fabricante será el responsable de especificar las presiones de trabajo nominales de los componentes y sistemas de hidrógeno.
- v. El fabricante especificará la vida útil de los depósitos, nunca superior a 20 años de acuerdo a las recomendaciones.
- vi. Durante el llenado no estarán funcionando el sistema de propulsión ni el (los) sistema(s) de conversión de hidrógeno, salvo los dispositivos de seguridad, y el vehículo estará inmovilizado.
- vii. Se deberá definir el ciclo de llenado (ver def.) de los depósitos. Su valor es de 5000, reducible si lo especifica el fabricante o se instala un sistema de supervisión y control de uso. Para una vida útil de los depósitos de 15 años se ha calculado 70.000 ciclos de llenado. (Ver detalle 5.1)
- viii. Los componentes se sustituirán antes de que superen su vida útil.

Parte 1: Requisitos para la instalación de componentes y sistemas de hidrógeno diseñados para el uso de hidrógeno comprimido

- a. El sistema de hidrógeno presurizado hasta la presión de trabajo nominal se someterá a un ensayo de fugas con un agente tensioactivo sin que se formen burbujas durante 3 minutos
- b. La presión mínima del depósito o conjunto de depósitos a temperatura ambiente de 0,2 MPa (20 bar)
- c. Si alguno de los componentes de hidrógeno puede producir una fuga de hidrógeno a compartimentos de pasajeros o equipaje u otro sin ventilación, deberán ir en un compartimento estanco para el gas o la fuga deberá ser inmediatamente evacuada mediante ventilación forzada.
- d. Los depósitos deberán montarse y fijarse de tal forma que no se rompa ante las aceleraciones aplicadas a vehículos de categoría P-II de acuerdo a EN-12663-1 apdo. 6.5.2.
- e. Cada depósito o conjunto de depósitos contará con un dispositivo de descarga para evitar su rotura.
- f. Si la ventilación es insuficiente la instalación de depósitos será con camisa metálica en el habitáculo
- g. Válvulas
 - a. Válvulas de cierre automático, cerradas en vacío. Anexo VI 79/2009 punto 6

- b. Conexiones de repostaje. Bifurcación del conducto de llenado al de alimentación de cada depósito- Anexo VI 79/2009 punto 4
- c. Si se rompen algunos de los conductos de llenado las válvulas no se separan de los depósitos
- d. Garantizar el flujo continuo de combustible hacia el sistema de propulsión y hacia otros sistemas de conversión de hidrógeno
- h. Sistema de llenado
 - a. Protegido contra acoplamientos incorrectos e intervenciones no autorizadas
 - b. Protegido frente a errores de manipulación
 - c. El receptáculo no se montará en ningún elemento externo de absorción de energía
 - d. Durante el llenado no estará funcionando el sistema de propulsión ni el sistema de conversión de hidrógeno, salvo los dispositivos de seguridad y el vehículo estará inmovilizado
- i. Instalación eléctrica
 - a. Las conexiones de suministro de corriente estarán aisladas contra la entrada de hidrógeno cuando haya bien presencia de componentes de hidrógeno o bien riesgo de fuga.
- j. Cada sistema de hidrógeno será inspeccionado al menos cada 48 meses después de su puesta en servicio

Parte 2: Requisitos de los depósitos de hidrógeno

- a. Los depósitos deberán fabricarse de acuerdo al reglamento (p.ej. dentro de límites de presión de rotura)
- b. El fabricante someterá a ensayo lotes de depósitos acabados que sean representativos de la producción normal (max. 200 depósitos). Se recogen en la tabla de la figura 19.

Ensayo y referencia		Aplicable al tipo de depósito				Valor de diseño especificado	Valor de ensayo
		1	2	3	4		
(1)	Ensayo de tracción	✓	✓ ⁽⁵⁾	✓ ⁽⁵⁾	✓ ⁽⁵⁾		
(2)	Ensayo de impacto Charpy	✓	✓ ⁽⁵⁾	✓ ⁽⁵⁾			
(3)	Ensayo de curvado			✓ ⁽⁵⁾			
(4)	Examen macroscópico			✓ ⁽⁵⁾			
4.1.2.	Ensayo de temperatura de reblandecimiento				✓ ⁽⁵⁾		
4.1.6.	Ensayo de lotes de revestimiento	✓	✓	✓	✓		
4.2.1.	Ensayo de rotura	✓	✓	✓	✓		
4.2.2.	Ensayo cíclico de presión a temperatura ambiente	✓	✓	✓	✓ ⁽⁶⁾		
4.2.11.	Ensayo de fugas)			✓ ⁽⁷⁾	✓ ⁽⁶⁾		
4.2.13.	Ensayo de par del inserto				✓ ⁽⁶⁾		

Figura 19 Ensayo de lotes de depósitos

- c. Se efectuarán exámenes y ensayos de producción de todos los depósitos durante y después de la fabricación (Ver detalle punto 3.10/Parte II/Anexo IV)

Exámenes y ensayos de producción		Aplicable al tipo de depósito			
		1	2	3	4
	Principales dimensiones de diseño	✓	✓	✓	✓
Apéndice de la ficha de características establecida en el anexo II, parte 1	Principales parámetros de fabricación	✓	✓	✓	✓
	Examen no destructivo	✓	✓ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	
4.1.8.	Ensayo de dureza	✓	✓ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	
4.2.11.	Ensayo de fugas			✓ ⁽²⁾	✓
4.2.15.	Ensayo hidráulico	✓	✓	✓	✓
3.8.	Marcas	✓	✓	✓	✓

Notas explicativas:
⁽¹⁾ Ensayo de camisa metálica
⁽²⁾ Todas las camisas de metal soldadas deberán someterse a un ensayo de fugas.

Figura 20 Exámenes y ensayos de producción para cada depósito

- d. Documentación de los resultados de los ensayos de los depósitos de hidrógeno:
- i. Especificaciones del material de los depósitos
 - ii. Resultados de los ensayos del material de los depósitos
 - iii. Resultados de los ensayos de los depósitos

Especificación del material		Aplicables al material						Detalles
		Acero	Aleación de aluminio	Camisa de plástico	Fibra	Resina	Revestimiento	
	Fabricantes de material	✓	✓	✓	✓	✓		
	Tipo de material	✓	✓	✓	✓	✓		
	Identificación del material	✓	✓	✓	✓	✓		
	Definición del tratamiento térmico	✓	✓					
	Composición química	✓	✓					
	Procedimiento conformado en frío o de crioformado	✓						
	Definición del procedimiento de soldeo	✓	✓					

Figura 21 Documentación de la especificación del material

Especificaciones para ensayos de material		Aplicables al material						Valor del material especificado
		Acero	Aleación de aluminio	Camisa de plástico	Fibra	Resina	Revestimiento	
	Ensayo de tracción	✓	✓	✓				
	Ensayo de impacto Charpy	✓						
	Ensayo de curvado	✓	✓					
	Examen macroscópico	✓						
	Ensayo de corrosión		✓					
	Ensayo de agrietamiento bajo carga permanente		✓					
	Ensayo de temperatura de reblandecimiento			✓				
	Ensayo de temperatura de transición vítrea					✓		
	Ensayo de resistencia de las resinas al cizallamiento					✓		
	Ensayo de revestimiento						✓	
	Ensayo de compatibilidad con el hidrógeno	✓	✓	✓	✓	✓		

Figura 22 Documentación de la especificación de los ensayos de material

Especificaciones para los ensayos de los depósitos		Valor de diseño especificado
	Ensayo de rotura	
	Ensayo de ciclos de presión a temperatura ambiente	
	Ensayo de fugas antes de la rotura	
	Ensayo de fuego	
	Ensayo de penetración	
	Ensayo de exposición química	
	Ensayo de tolerancia del material compuesto a las hendiduras	
	Ensayo de rotura acelerada por esfuerzos	
	Ensayo de ciclos de presión a temperatura extrema	
	Ensayo de daños por impacto	
	Ensayo de fugas	
	Ensayo de permeabilidad	
	Ensayo de par del inserto	
	Ensayo cíclico de gas hidrógeno	

Figura 23 Documentación de los ensayos de los depósitos

Parte 3: Requisitos de los componentes de hidrógeno distintos de los depósitos

Documentar, de acuerdo al Reglamento (CE) nº 79/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, los resultados de los ensayos aplicables a los componentes de hidrógeno, distintos de los depósitos.

Estos ensayos se encuentran en la siguiente tabla, ver figura 24.

COMPONENTE DE HIDRÓGENO	TIPO DE ENSAYO					
	Ensayos de material	Ensayo de resistencia a la corrosión	Ensayo de resistencia	Ensayo de ciclos de presión	Ensayo de fugas internas	Ensayo de fugas externas
Dispositivos de descarga de presión	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Válvulas automáticas	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Válvulas manuales	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Válvulas antirretorno	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Válvulas de descarga de presión	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Intercambiadores térmicos	✓	✓		✓		✓
Conexiones o receptáculos para el reabastecimiento de combustible	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reguladores de presión	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sensores para los sistemas de hidrógeno	✓	✓	✓	✓		✓
Conductos de combustible flexibles	✓	✓	✓	✓		✓
Accesorios	✓	✓	✓	✓		✓
Filtros de hidrógeno	✓	✓		✓		✓
Conector extraíble del sistema de almacenamiento	✓	✓	✓	✓		✓

Figura 24 Ensayos de los componentes de hidrógeno distintos de los depósitos

Detalle sobre muestreo, procedimiento, requisitos y resultado en el punto 4/parte 3/anexo IV del reglamento [17].

Además, de acuerdo a la Regulación ECE R 134 “Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen fuelled vehicles (HFCV)”, se deberán realizar y documentar los siguientes ensayos (ver detalle de cada uno en la regulación)

- Ensayos del sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido
 - o Incluye el protocolo de prueba de fuego: perfil de temperatura...
- Ensayos de los componentes específicos para un sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido

- Ensayos de un vehículo con sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido:
 - Prueba de cumplimiento de:
 - Sistema de escape
 - Sistema de fugas en la línea del combustible
 - Modo de fallo

Otras posibles normativas de referencia a tener presentes en el diseño del prototipo:

- EN-IEC 62281-Directiva sobre seguridad en el uso de baterías de litio para el transporte.
- Norma ISO 17268 - Dispositivos de conexión para el reabastecimiento de hidrógeno gaseoso a los vehículos terrestres
- Norma ISO23828-Medida del consumo energético de vehículos propulsados por hidrógeno comprimido. Mide la economía del combustible para mejorar la eficiencia de los vehículos.
- Norma ISO 20762- Poner a prueba la potencia máxima del sistema del vehículo eléctrico híbrido (HEV)
- Norma EN 45545-2 de seguridad contra el fuego
- EN 50121-3-2 (89/336/EEC) - Compatibilidad electromagnética
- 73/23/EEC- Directiva del consejo sobre el material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión
- Directivas ATEX 99/92/EC y 2014/34/EU- Establecen los requisitos mínimos para garantizar la seguridad y la protección de la salud de los trabajadores bajo riesgos potenciales de atmósferas explosivas. (Reglamento nacional: Real Decreto 144/2016)
- UN ECE R 134 *"Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen fuelled vehicles (HFCV)"* 25 Jun 2015 (ECE/TRANS/WP.29/2014/78.)
- 97/23/EC of the European Parliament and of the Council of 29 May 1997-Directiva de equipos de presión- Aplica a todos los equipos estacionarios de presión mayor de 0,5 bar y volumen mayor de 50 litros. (depósitos, válvulas, conectores etc.)
- TPED -The Council Directive 1999/36/EC (Real Decreto 1388/2011)- Transporte de equipos a presión
- Reales Decretos 2267/2004 y 513/2017- Seguridad contra incendio
- Real Decreto 840/2015- Accidentes graves

7.5 REQUISITOS PRELIMINARES DE SEGURIDAD PARA LA INSTALACIÓN

En este apartado se detallan los requisitos principales a considerar en el diseño de la instalación de la cadena de tracción en el tren AVRIL. Todos los elementos seleccionados deberán garantizar la seguridad en la operación de acuerdo a los puntos del reglamento concernientes. Asimismo, los riesgos asociados a dichos elementos, así como sus medidas de prevención y contingencia asociadas, deberán estar adecuadamente detallados en el Plan de Seguridad.

En base a la normativa reflejada en el Reglamento (UE) nº 406/2010 de la comisión del 26 de abril de 2010 detallada en el apartado anterior, se concluye que los tanques han de someterse de forma rigurosa a un conjunto de pruebas que garanticen de manera fiable la seguridad en la operación.

Además de considerar el hidrógeno, será necesario analizar el resto de componentes que configurarán la nueva cadena de tracción. Por ejemplo, la pila de combustible. Dentro de la pila podría producirse una reacción entre el hidrógeno y el oxígeno, de ocurrir la ruptura de alguna de las membranas. Sin embargo, la pequeña cantidad de hidrógeno dentro de la pila hace que sea un riesgo prácticamente insignificante.

Por otro lado, en el caso de las baterías no será necesario considerar ningún aspecto adicional respecto de las ya instaladas en el tren en caso de tecnología de plomo-ácido y en caso de baterías de ión-li será necesario considerar EN-IEC 62281.

Adicionalmente, para evitar todo peligro asociado a la fuga de hidrógeno, se instalará un sistema de control con los siguientes elementos y características:

1. **Sensores de detección** de la concentración de hidrógeno en el aire superior a 4%. Por debajo de este grado de concentración, no se produce inflamación.
2. **Válvulas automáticas** que cerrarán el suministro de hidrógeno en caso de detección de un elevado porcentaje de concentración de hidrógeno en el espacio.
3. **Sistema de control** que apague todos los sistemas ante la detección de cualquier fallo para evitar que elementos, como las baterías, se conviertan en focos de ignición.
4. **Instalación de ventilación forzada**, para disminuir los niveles de hidrógeno en el aire del espacio.

Para el diseño de la ventilación forzada se tomará el caso de fallo de la válvula de un tanque de hidrógeno y liberación del hidrógeno contenido en el mismo. Se toman como ejemplo los tanques preseleccionados de 350 litros de hidrógeno a 350 bar cada uno [19] (ver detalle sección 8.1). Aplicando la ley de gases ideales, a una misma temperatura, el producto de la presión por el volumen de un gas se mantiene constante:

$$p \cdot v = \text{cte}$$

Por consiguiente, a presión ambiente, 1 bar, la cantidad de hidrógeno en un tanque es de 122,5 m³. Para garantizar una concentración máxima de 4% de hidrógeno en el aire, serían necesarios 2062,5 m³ de aire. Sin embargo, por las dimensiones del coche, solo hay 108 m³ de aire; siendo necesario impulsar mediante ventilación forzada, 1954,5 m³ de aire.

En caso de estar el tren en un espacio completamente abierto, el aire impulsado mantendrá los valores de concentración en el interior por debajo del límite, expulsando una mezcla de hidrógeno y aire al exterior.

Ahora bien, cuando se encuentre en un túnel o en alguna instalación de mantenimiento cerrada, se tendrá que garantizar que la mezcla que quede retenida en su interior no pueda ser susceptible de explosión o plantear otras medidas mitigadoras en caso necesario.

Si se toma todo el volumen entre el tren y el techo del túnel, a lo largo de los 200 metros de largo de túnel, se considera un volumen de aire lo suficientemente abundante como para garantizar una proporción hidrógeno-aire inferior al 4%. En caso de que existan concentraciones locales y energía suficiente para la ignición, ésta se producirá alejada del tren/viajeros con lo que no existe riesgo.

Algunos detalles sobre el diseño de la instalación que aportarán mayor seguridad:

- El circuito de hidrógeno contará con doble protección, una válvula por tanque y una por conjunto de tanques. De esta forma, la pérdida máxima de hidrógeno ante la ruptura de una válvula sería la de un único tanque y en caso de romperse la válvula común, la válvula propia de cada tanque frenaría la pérdida.
- Se instalarán las líneas de hidrógeno por encima de las líneas de corriente que sea posible, de tal manera que las fuentes de chispa estén por debajo del nivel del hidrógeno.
- Para equipos que estén por encima de las líneas de hidrógeno se aplicará directiva ATEX (luminaria o el sistema de ventilación/extracción antes comentado).

Por último, aunque en este estudio se plantea como combustible el hidrógeno en estado gaseoso, el sistema de tracción también se podría accionar con hidrógeno líquido. Gracias a la alta densidad energética que presenta el hidrógeno en este estado, supondría una gran ventaja para el diseño: ahorro de espacio y facilidad para el repostaje. Sin embargo, el hidrógeno líquido está en continuo estado de ebullición. Por ello, un sistema con hidrógeno líquido necesitaría incorporar además de dispositivos de descarga de presión, un sistema de ventilación constante.

La operación con hidrógeno líquido, al igual que ocurre con el resto de combustibles, trae consigo peligros que requieren de un estudio exhaustivo para garantizar una operación segura. Principalmente, en el caso del hidrógeno líquido, los riesgos se deben a su bajo punto de ebullición, su continua evaporación y el aumento de presión ocasionado por la retención de una fuga en un espacio confinado.

Capítulo 8. PREDISEÑO DE LA CADENA DE TRACCIÓN

Definidos los requisitos funcionales de cada uno de los elementos de la cadena de tracción híbrida hidrógeno-batería-catenaria para el tramo de pruebas Calatayud-Lérida, se procedió a seleccionar los mismos y detallar su integración en el prototipo de pruebas de alta velocidad, el AVRIL.

8.1 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE LA CADENA

Tanques de hidrógeno

La cantidad de hidrógeno demandada por el tren en su recorrido es de 120 kg.

Los tanques preseleccionados son los de Hexagon Composites Tipo IV [19]. A continuación, en la figura 25, se muestra el catálogo de tanques de tipo IV.

Se estima, para una vida útil de 15 años, con dos llenados por día y un coeficiente de reducción de 0,98 (p.ej. no todos los días operará el tren), un total aproximado de 10700 ciclos de llenado.

HEXAGON PURUS HYDROGEN TYPE 4 CYLINDER INFORMATION*

NOMINAL WORKING PRESSURE AT 15°C	OUTSIDE DIAMETER	OVERALL LENGTH	TANK WEIGHT	WATER VOLUME	HYDROGEN CAPACITY	WEIGHT RATIO (hydrogen weight/ tank weight)	SUITABLE FOR NECK MOUNT	APPROVAL
MPa	mm	mm	kg	L	kg	%		
20	315	1 060	18	46	0.7	3.9		Planned
25	541	2 783	164	450	8.0	4.9	✓	TPED
25	503	2 342	94	350	6.3	6.7	✓	TPED
25	654	2 413	147	581	10.4	7.1	✓	ABS/US DOT
25	653	4 419	267	1 170	21.0	7.9	✓	ABS/US DOT
25	653	5 689	342	1 544	27.8	8.1	✓	ABS/US DOT
30	509	2 342	112	350	7.4	6.6	✓	TPED
35	420	3 190	101	312	7.5	7.4	✓	EC79/HVG2
35	509	2 342	112	350	8.4	7.5		EC79
50	565	3 277	280	530	16.5	5.9	✓	PED/US DOT
50	531	2 424	229	347	10.9	4.8		TPED
70	319	906	34	36	1.4	4.1	✓	EC79/R-134
70	238	1 600	29	39	1.6	5.5	✓	Planned
70	440	1 050	59	76	3.1	5.3	✓	R-134/GTR13
70	530	2 154	188	244	9.8	5.2	✓	HGV2
95	515	2 783	365	254	12.4	3.4	✓	PED/US DOT

Figura 25 Catálogo Hexagon Purus Hydrogen Type IV

Se seleccionaron los tanques de 350 bar frente a los de 700 principalmente por el peso (en vacío) de 112 vs 188 kg.

- Capacidad de hidrógeno de los tanques: 8,4 kg

- Peso total/tanque= $112+8,4= 120,4$ kg
- Número de tanques de hidrógeno: 15
- Cantidad de hidrógeno instaladas: 126 kg (vs. 120 kg demandados)
- Presión: 350 bar
- Peso total tanques: 1,8 toneladas
- Accesorios: conectores tanques-pilas de hidrógeno y estructura de fijación de los tanques.

Baterías

Las baterías deben dar potencia para la tracción y alimentar los equipos auxiliares del tren. Se elegirá bien un set de baterías para el conjunto, o bien uno para tracción y otro para auxiliares según resulte más conveniente para la instalación en términos de peso.

Según se decida, de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación (Ver tabla 17), se requiere:

- Potencia instalada
 - I. Conjunto tracción y auxiliares: 4 módulos de baterías de 150kW
 - II. Tracción: 2 baterías de 150 kW + Auxiliares: 250 kW
- Capacidad de las baterías
 - I. Conjunto tracción y auxiliares: 911 kWh
 - II. Tracción: 390 kWh + Auxiliares: 543 kWh

Las baterías preseleccionadas son las de Toshiba *SCiB SIP series* de tecnología ión de litio.

Pila de combustible

Las pilas de combustible preseleccionadas son las de Ballard, modelo HD100 FC move.

- Se necesitan al menos 6 pilas de combustible de 100kW.
- Peso en vacío: 275 kg
- Peso del contenido: 25 kg
- Peso total/pila: 300 kg
- Accesorios:
 - o Subsistema de admisión de aire e hidrógeno.
 - o Sistema de conversión de energía (uno por cada 3 pilas).

Elementos de seguridad

- Para las pilas de combustible se instalará un sistema de enfriamiento mediante radiadores localizados en el techo del tren. El circuito de agua transportará el calor de la pila hasta el radiador, donde se refrigerará. Habrá tantos circuitos como número de pilas se instale.
- Las baterías tendrán también su sistema de refrigeración: ventiladores.
- Sistema de válvulas automáticas.
- Sensores y detectores de hidrógeno.

Además de estos elementos, se deberán añadir un convertidor capaz de modular desde la tensión de la batería y/o pila hasta la tensión de 3000 VDC del circuito intermedio de tracción.

Cumpliendo con la restricción de peso por eje establecida por la ETI de 17 toneladas, el peso máximo permitido de la instalación que forman todos estos elementos es aproximadamente de 9 toneladas (el resto es peso de estructura y rodadura).

Elemento	Peso unitario (kg)	Unidades	Peso total (kg)
Tanques	120,4	15	1806
Pila de combustible	300	6	1800
Radiadores+ ventiladores	250	6	1500
Estructuras materiales e instrumentación	2	500	1000
			6106

Tabla 21 Peso de los equipos seleccionados

Resultando el peso máximo admisible del conjunto de baterías con su sistema de refrigeración, convertidor y cuadros de 2894 kg.

8.2 INTEGRACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA CADENA EN EL TREN

AVRIL

Tres posibles configuraciones:

1. Se dispone de toda el área interior del coche para la instalación de los elementos de la cadena de tracción

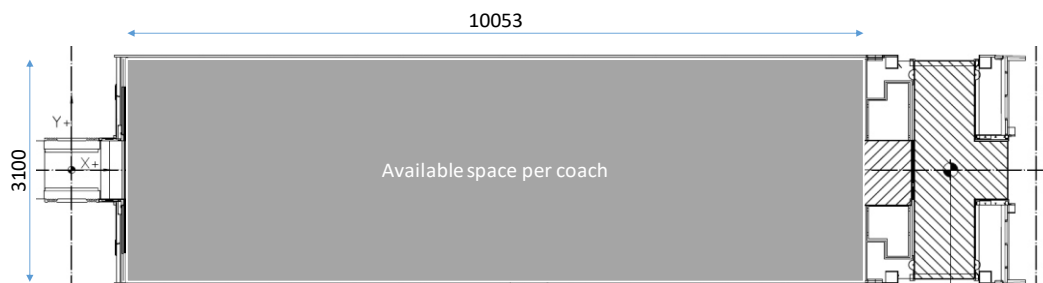


Figura 26 Configuración I

2. Se libera un espacio central del coche para permitir el acceso desde dentro del coche a cada uno de los elementos de la instalación para su mantenimiento.

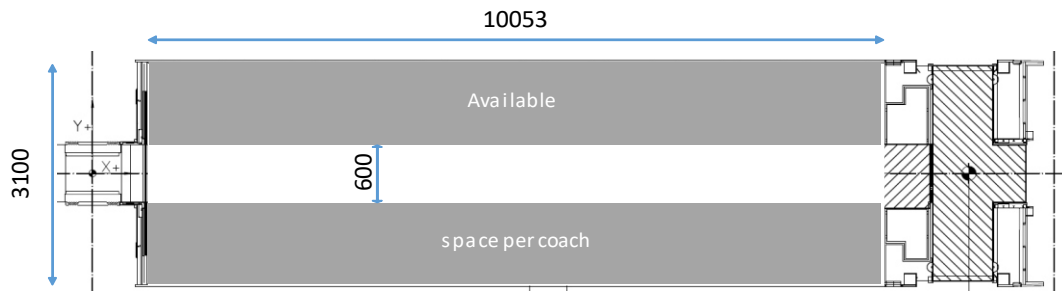


Figura 27 Configuración II

3. Se libera un espacio lateral que permita acceder a todos los elementos.

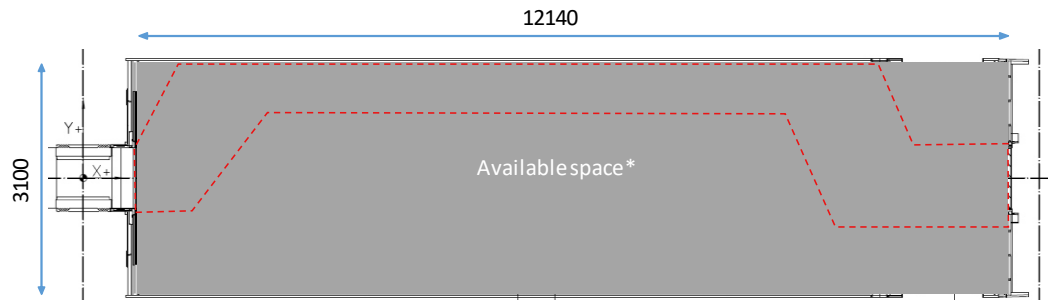


Figura 28 Configuración III

La configuración seleccionada ha de permitir la instalación de cada uno de los elementos además del acceso posterior a cada uno de ellos para su control y mantenimiento. Dicho esto, las configuraciones II y III que liberan un pasillo de 600mm permitiendo al operador ir de un coche a otro sin necesidad de salir del tren son mucho más convenientes.

Se prevé la instalación de todos los elementos en el interior del coche, exceptuando el ventilador y los radiadores que se instalarán en el techo del coche

Se deberá realizar un análisis de pesos, principalmente en el eje “y”, para garantizar una distribución adecuada de los elementos en el coche, de tal forma que se evite el desequilibrio por rueda.

A continuación, el diseño preliminar proporcionado por el Centro Nacional del Hidrógeno siguiendo la configuración III:

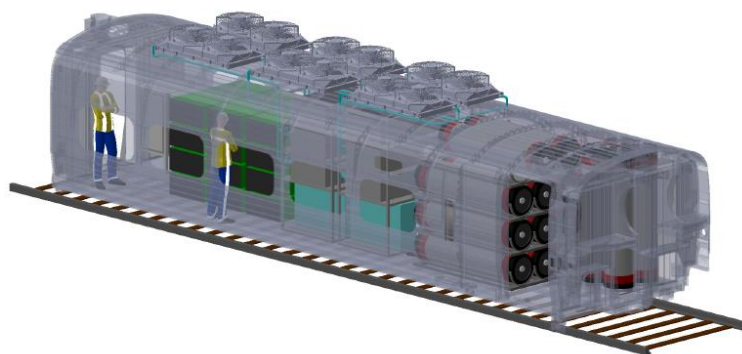


Figura 29 Vista completa 3D del coche

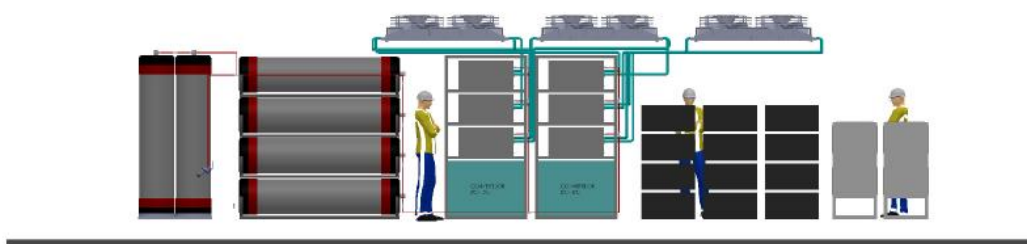


Figura 30 Vista lateral del coche

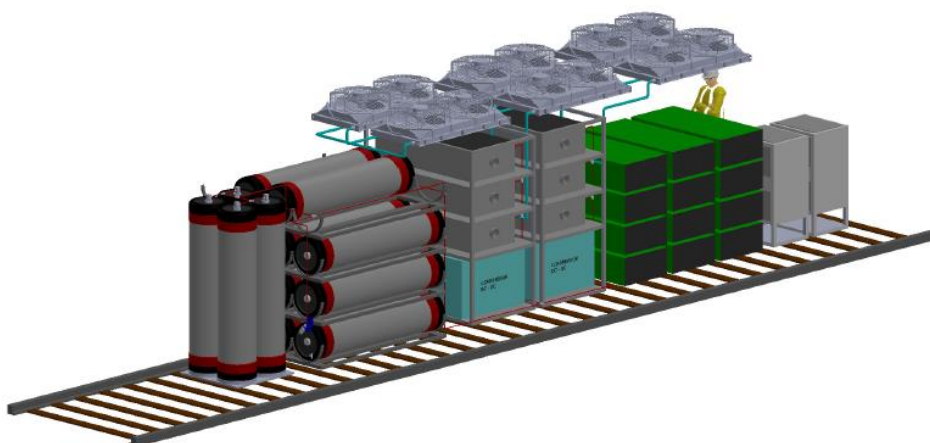


Figura 31 Vista de la instalación de los equipos en el coche

8.3 LA CADENA DE TRACCIÓN DEL TREN AVRIL

Los elementos principales de la cadena de tracción convencional son:

- Ejes motores
- Convertidores de tracción con los siguientes elementos incorporados:
 - o Convertidor de línea (4Q)- conexión secundario del trafo con el circuito intermedio de tensión continua
 - o Chopper de freno – limitar la tensión del circuito intermedio
 - o Inversor de motor- transmite la energía almacenada en el circuito intermedio en tensión continua a los motores de tracción
 - o Inversor auxiliar- genera la tensión trifásica necesaria para alimentar los servicios auxiliares del tren.
- Motores de tracción: Motor asíncrono trifásico de jaula de ardilla
- Freno eléctrico de tipo reostático independiente de la tensión de catenaria
- Freno eléctrico por recuperación de energía- Motor en modo generación
- Sistemas auxiliares: ventilación forzada de los frenos

El tren AVRIL actual tiene el siguiente esquema de tracción.

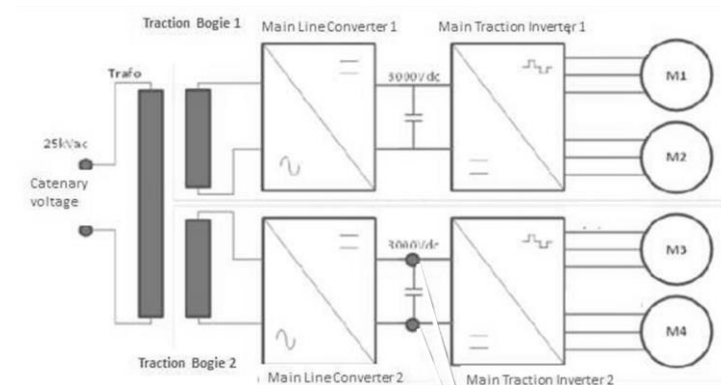


Figura 32 Esquema de tracción del tren AVRIL

La figura representa el esquema de una motriz. Cada cabeza motriz está formado por dos bogies, que tiene a su vez cuatro ruedas unidas dos a dos por un eje. Cada eje tiene un motor. De izquierda a derecha: el pantógrafo recibe la tensión de la catenaria (25kV); un transformador principal alimenta a los convertidores de línea; estos a su vez a los convertidores de tracción conectados a los motores eléctricos.

8.4 MODOS DE FUNCIONAMIENTO

A continuación, en la figura 33 se muestra de forma esquemática la integración de los elementos de la cadena de tracción hidrógeno-baterías en la cadena de tracción actual. Se tendrá, por tanto, dos modos de funcionamiento:

1. Con catenaria:
 - a. Tracción: El motor recibe la energía de catenaria. Se podrán cargar las baterías para su utilización cuando se pase a modo de hidrógeno.
 - b. Frenado: El motor regenera energía, una parte se irá a las baterías, si se desea; otra será devuelta a catenaria o si no se empleará el freno reostático.
2. Con hidrógeno y baterías:
 - a. Tracción: El motor recibe la energía de la pila de combustible y de las baterías.
 - b. Frenado: El motor regenera energía, una parte irá a las baterías y el resto al freno reostático.

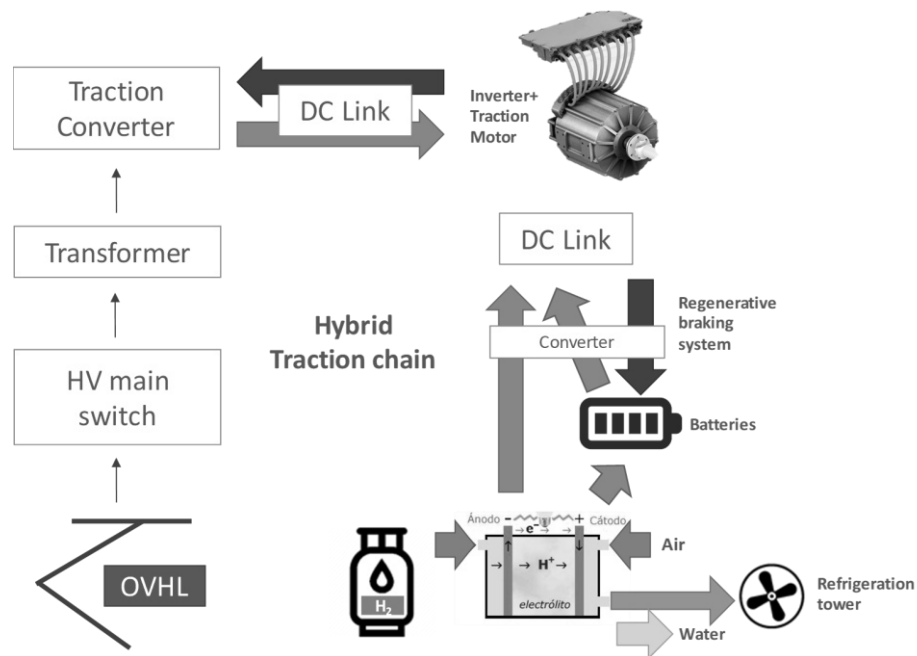


Figura 33 Esquema conceptual del sistema híbrido

8.5 HIDROGENERA

Además de diseñar la cadena de tracción, se definen y plantean los requisitos de la estación de suministro de hidrógeno. Debido a la ausencia de infraestructura dedicada al suministro de hidrógeno para trenes en España, se recurrirá a una estación móvil para el repostaje del tren.

Se tienen las siguientes dos configuraciones posibles:

1. Fija-móvil

Esta configuración cuenta con:

- Estación fija: Recibe el hidrógeno en estado gaseoso a 40 bar y lo almacena (Capacidad max. 50000 litros). Cuenta con un compresor de 20 kg/h para que, en conexión con la estación móvil, comprima el hidrógeno hasta alcanzar la presión necesaria, 350/700 bar.

- Estación móvil: Transporta el hidrógeno en tanques de alta presión y suministra al tren a través de un dispensador con capacidad de 200 kg/h.

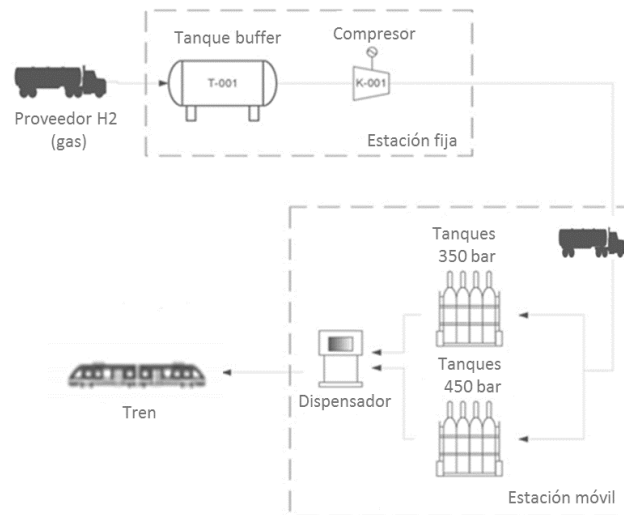


Figura 34 Esquema hidrogenera fija-móvil [20]

2. Móvil

Esta configuración es en su totalidad móvil, evitando así el almacenamiento externo al tren en una instalación fija. Se tendrían las siguientes dos configuraciones:

- Suministro de hidrógeno líquido:
 - 1) La estación móvil gasifica y comprime a la presión requerida para repostar el tren. Larga duración del repostaje, aprox. 10-12 horas, debido a la compresión.
 - 2) De haber sitio para los tanques en el camión (ver figura 32) la estación móvil gasifica, comprime y almacena. Corta duración del repostaje, una hora aprox.

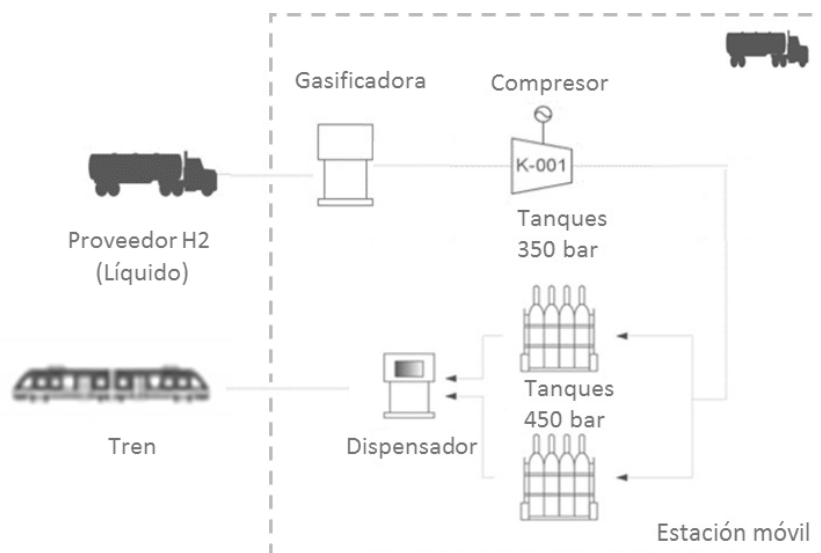


Figura 35 Esquema I hidrogenera móvil

II. Suministro de hidrógeno gas:

Una estación móvil que comprime, almacena en tanques a alta presión y suministra el hidrógeno al tren.

Se evita realizar el repostaje a la vez que la compresión.

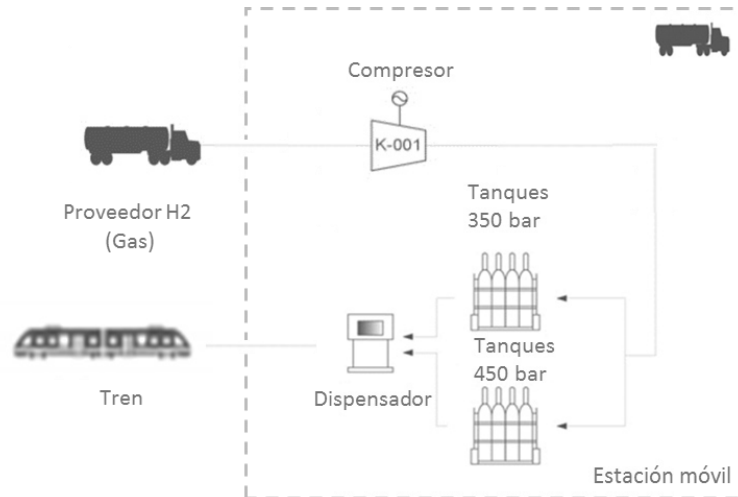


Figura 36 Esquema II hidrogenera móvil

Capítulo 9. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

9.1 ODS

El compromiso del tren de hidrógeno con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), elaborados por las Naciones Unidas [13] es fuerte. Si dividimos los objetivos en tres dimensiones: economía, sociedad y medioambiente, encontramos que este proyecto contribuye de la siguiente forma a cada uno de ellos:

Sociedad

- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante [21]
 - Potenciando el uso de energías renovables en el sector transporte y sustituyendo las fuentes de energía contaminantes actuales por otras limpias (7.2)
 - Impulsando y contribuyendo a las iniciativas internacionales de investigación e inversión en tecnología limpias, en este caso, el hidrógeno, libre de emisiones de carbono. (7.a)
 - Promoviendo el desarrollo de tecnologías relativas a las fuentes renovables (7.a). Aprovechamiento de los excedentes para la producción de hidrógeno.
- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles [22]
 - Contribución al sector de transporte a través de una nueva tecnología de tracción que favorece el desarrollo tecnológico del sector de manera sostenible (11.2)
 - Potenciar el sector ferroviario y su desarrollo para garantizar la continuidad del acceso de los ciudadanos a un medio de transporte seguro y fiable (11.2)

Economía

- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura [23]
 - Promoviendo el desarrollo de una nueva tecnología que potencia la industrialización sostenible, pudiendo contribuir en un futuro de forma indirecta al empleo y al PIB (9.2)
 - Contribuyendo a la innovación científica y a el aumento de la capacidad tecnológica de la industria. Inversión en investigación y desarrollo de un nuevo producto que cumple con los desafíos de la economía y del medioambiente (9.5)
- Objetivo 12: Producción y consumo responsables [24]
 - Luchando por la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales (12.2)
 - Impulsando la concienciación pública sobre el desarrollo sostenible y promoviendo estilos de vida, como usar el tren como transporte, que

contribuyan a reducir los efectos destructivos del transporte para la naturaleza (12.8)

Medioambiente:

- Objetivo 13: Acción por el clima [25]
 - Contribuyendo a los esfuerzos del sector transporte de reducir de manera considerable su impacto ambiental, potenciando una economía baja en carbono.

Como se ha detallado arriba, en relación a los cinco objetivos de desarrollo sostenible, el proyecto está alineado con muchas de las metas planteadas para 2030. La interacción del proyecto con todos los puntos mencionados proviene de las implicaciones directas e indirectas del proyecto en el que está englobado el estudio que aquí se desarrolla. En definitiva, el proyecto de desarrollo de un tren híbrido hidrógeno-baterías se plantea como una solución de transporte que contribuye a promover el uso e investigación de energías limpias (ODS 7), que surge como resultado de invertir en la innovación tecnológica para encontrar soluciones sostenibles a desafíos de la actualidad, como es todo lo relacionado con el medioambiente (ODS 9). Un proyecto que apuesta por la expansión del ferrocarril, un medio seguro, con mayor accesibilidad y más ventajas medioambientales que otros medios de transporte (ODS 11) y que contribuye a la acción contra el cambio climático (ODS 13). Por último, promueve un uso sostenible de los recursos con el objetivo de caminar hacia economías verdes (ODS 12).

9.2 CÁLCULO DE EMISIONES REDUCIDAS

Con objeto de cuantificar su impacto medioambiental se realizó un estudio de su contribución en la reducción de las emisiones.

La calidad ambiental se ve afectada por las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NOx), óxido de azufre, y materia particulada (PM); además de por la contaminación acústica y los gases de efecto invernadero (GEI). Según declara Adif en su Memoria Ambiental [12], los valores de las emisiones debidas a la tracción diésel en su infraestructura en los últimos años han sido los siguientes:

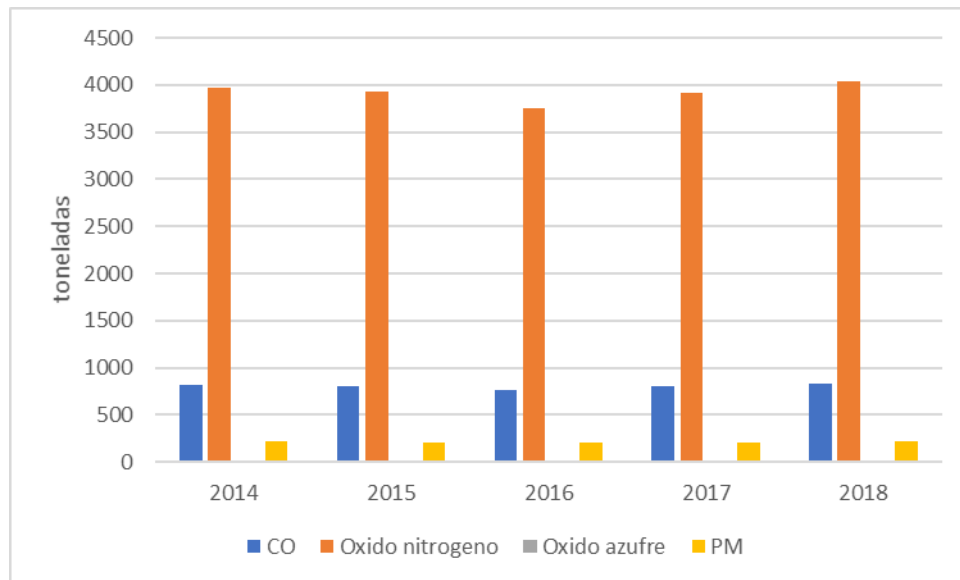


Figura 37 misiones de la tracción diésel en infraestructura titularidad de Adif

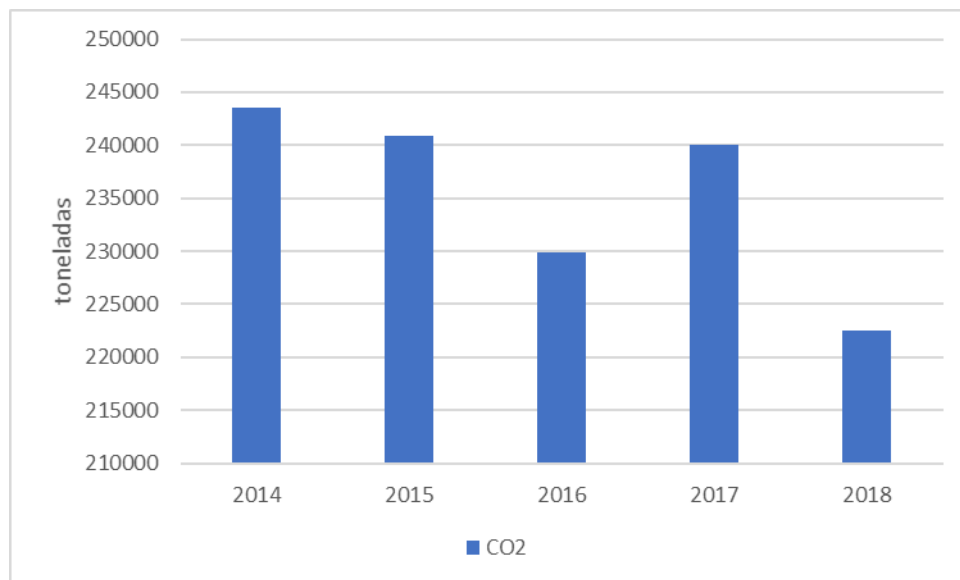


Figura 38 Dióxido de carbono equivalente

A continuación, se estudió el impacto ambiental que supondría la transición de la tracción diésel a hidrógeno. Para ello, se tomó como caso de estudio uno de los tramos simulados, Calatayud-Lérida, con una distancia total de recorrido, ida y vuelta, de 442 km. Para realizar la comparación se mantuvo la misma potencia instalada de 900 kW. El cálculo de la cantidad consumida de combustible y las emisiones se realizó de la siguiente forma:

a. Tren híbrido hidrógeno-batería:

- La demanda total de energía en llanta es de 3481,4 kWh, de los cuales:
 - 1987 kWh provienen de las pilas de combustible (hidrógeno)
 - 1494,4 kWh provienen de las baterías

- Aplicando los valores de eficiencia de la cadena de tracción del 92% y de la pila de hidrógeno del 50% se reduce la capacidad energética del hidrógeno en llanta de 36kWh/kg a 16,6 kWh/kg. La energía consumida en la pila es de 4319,56 kWh.
 - La cantidad de combustible, en este caso hidrógeno, necesario es de 120 kg.
 - Cero emisiones (suponiendo origen verde del hidrógeno y que la batería inicialmente está cargada con energía renovable).
- b. Tren cercanías diésel convencional:
- La demanda total de energía en llanta es de 4447,28 kWh (Mayor porque no tiene capacidad de regeneración, no hay baterías en las que almacenar)
 - Aplicando los valores de rendimiento: 92% de la cadena de tracción, 98% del rectificador y 92% del generador, la potencia entregada a la cadena por el motor diésel es de 5361,57 kWh.
 - El consumo del combustible es de 210 g/kWh entregados por el motor; por lo que la cantidad total de combustible consumido es de 1125 kg.

De acuerdo a la directiva 2004/26/EC del Parlamento europeo y del Consejo [26], que establece los valores máximos de emisión según el tipo de motor, se tiene:

- Emisiones de monóxido de carbono gCO/kWh=3,5
- Emisiones de Hidrocarburos gHC/kWh=0,5
- Óxidos de nitrógeno gNOx/kWh=6
- Partículas gPM/kWh=0,2

*Estos valores son kWh entregados por el motor y los gramos, combustible introducido. El motor diésel tiene una eficiencia del 40%.

Considerando que el motor del tren está diseñado para los valores límite de la directiva, el resultado de emisiones emitidas por el tren diésel y que por tanto se ahorrarían con un tren de hidrógeno serían:

Tipo de emisión	kg por trayecto	ton. acumulado 30 años
CO	18,77	402,74
HC	2,68	57,53
NOx	32,17	690,42
PM	1,07	23,01

Tabla 22 Emisiones del tren con tracción diésel en el recorrido de estudio

Por otro lado, se calcularon las emisiones de dióxido de carbono (GEI) a partir de los factores de emisión:

- [27] 3193,71 kg CO₂/ton. gasóleo, lo que supone un total de 3593 kg de CO₂
- [28] 440 g CO₂/kWh, lo que supone un total de 2359 kg CO₂

Tomando un valor intermedio de 2976 kg CO₂, una vida útil del tren de 30 años, con dos trayectos por día de 442 km y un coeficiente de no disponibilidad del 98% el valor acumulado de emisiones que se reducirían sería de 63,87 kton de CO₂.

Si establecemos una comparación por pasajero, para el mismo recorrido, con otro medio de transporte como es el coche, tenemos:

- Para una ocupación media del tren diésel de 160 pasajeros, las emisiones del tren son de **18,6 kg CO₂/ pasajero/trayecto**. (2,37 veces menos que el coche)
- Un coche medio genera aproximadamente 170 g de CO₂/km, dando lugar a un total de emisiones en el recorrido de 75,14 kg de CO₂. Calculando las emisiones por pasajero y considerando que la ocupación media de un coche es de 1,7 personas tenemos una generación de **44,2 kg CO₂/pasajero/trayecto**.

A partir de estos valores se puede reflejar el impacto de reducción de emisiones por trayecto (442 km) en número de coches equivalentes de la siguiente forma:

1. Transición coche-tren diésel: Eliminación de una flota de **55 coches**
2. Transición tren diésel- tren H₂: Eliminación de una flota de **39 coches**
3. Transición coche- tren H₂: Eliminación de una flota de **94 coches**

*Se ha considerado un movimiento de 160 pasajeros en el trayecto

CO ₂ /pasajero	/Trayecto	/km
Tren diésel	18,6	0,004
Coche	44,2	0,1

Tabla 23 Resumen emisiones

En conclusión, la inversión en la tecnología del hidrógeno como sustituta a la tracción diésel contribuye positivamente con los objetivos medioambientales de descarbonización del sector transporte. El caso de estudio muestra su contribución a nivel tren, ahora bien, el proyecto de desarrollo de una cadena de tracción híbrida con hidrógeno contribuye además con el Plan de Lucha Contra el Cambio Climático de Adif/Adif-AV [29] de reducción de las emisiones de GEI por el cambio modal del transporte de viajeros y mercancías al ferrocarril.

En la figura 39 se recogen las metas anuales de reducción de emisiones de GEI publicadas por Adif. Adif prevé alcanzar, por el cambio modal en respuesta a sus futuras actuaciones, una reducción de las emisiones de GEI de hasta 1578 kton CO_{2eq} en 2030.

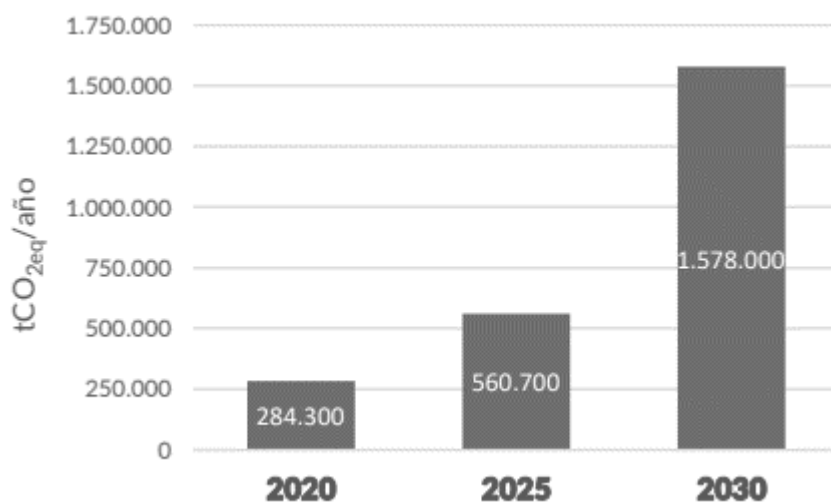


Figura 39 Metas anuales de reducción de emisiones de GEI (t CO_{2eq}/año) por el cambio modal

Adicionalmente, el proyecto de desarrollo de un tren de hidrógeno se presenta como una solución ante la necesidad de aumentar la operabilidad o de eliminar el consumo de diésel de las líneas ferroviarias sin electrificar o parcialmente electrificadas. El informe de la Comisión técnico-científica para el estudio de mejoras en el sector ferroviario (2014) afirma: “Si se electrifica el 30% de las líneas que aún no son eléctricas y que tienen una mayor carga de tráfico, se ahorrarían 54 millones de litros de gasóleo al año” [30]

Capítulo 10. CONCLUSIONES

Con objeto de diseñar la cadena de tracción de un tren híbrido hidrógeno-batería-catenaria se ha desarrollado una herramienta de cálculo de recorrido, que, en base a unas variables de entrada, permite conocer los valores determinantes del recorrido del tren para definir los requisitos funcionales de los equipos que la configuran.

En base a los cálculos de recorrido realizados y el estudio preliminar de la operación con hidrógeno que en este documento se detalla, se pudieron determinar los elementos que configuran la instalación de este nuevo sistema de tracción, así como las especificaciones técnicas que estos deberán cumplir para garantizar no sólo un funcionamiento adecuado del tren sino también seguridad en su futura operación.

Aunque este estudio se haya basado en las características de un tren de alta velocidad, el objetivo final es incorporar esta tecnología en el desarrollo de los trenes cercanías. Así se han orientado las simulaciones de recorrido y se ha elaborado la especificación técnica del nuevo sistema híbrido hidrógeno-baterías. Es para este tipo de tren, para el que la tecnología de hidrógeno mantiene la competitividad del tren en términos técnicos, económicos, de tiempo, calidad y fiabilidad, mientras ofrece una solución limpia y sostenible.

Por otro lado, ha quedado demostrado el potencial del hidrógeno como alternativa energética al diésel y la oportunidad que presenta la tecnología de pila de combustible para el desarrollo sostenible del sector ferroviario de acuerdo con las exigencias de los desafíos actuales, medioambiental y energético. Contribuyendo a un gran número de los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas, desarrollar esta tecnología supondrá entre otras muchas cosas una reducción importante de las emisiones de GEI. Por un lado, por cada tren diésel intercambiado por un tren de hidrógeno se estaría reduciendo un valor acumulado a lo largo de su vida útil (30 años) de 63,87 kton de CO₂. Además, si se considera el cambio modal del coche al tren y se toma como ejemplo un trayecto de 442 km, la reducción de emisiones sería equivalente a la eliminación de una flota de 94 coches, lo que implicaría una reducción de 7 toneladas de CO₂ por trayecto, siendo el total acumulado de 150.000 kton de CO₂.

Por último, el tren de hidrógeno, frente a un tren diésel, presenta costes más elevados de producción, por los nuevos elementos que configuran la cadena de tracción pero que se ven compensados por los gastos asociados al consumo de combustible aportando una solución competitiva no solo desde el punto de vista medioambiental sino también económico.

A continuación, un cuadro resumen de las características finales para el diseño del tren:

Características del tren:

- Dinámicas y capacidades:
 - Velocidad máxima: 160 km/h
- Consumo y alcance
 - Consumo de combustible: 0,27 kg de H₂/km
 - Recorrido medio por tanque: 450 km
- Sistema de hidrógeno a bordo
 - Presión: 350 bar
 - Número de tanques: 15
 - Capacidad de almacenamiento: 126 kg
 - Sistema de pila de combustible: Ballard, modelo HD100 FC
 - Potencia de pila de combustible: 600 kW
- Tren de potencia:
 - Tipo de motor de tracción: T350
 - Sistema de hibridación: Baterías de ión de litio-Toshiba
 - Potencia:
 - Conjunto tracción+auxiliares: 600 kW
 - Tracción: 300 kW+Auxiliares: 250 kW
 - Capacidad de almacenamiento de energía
 - Conjunto tracción+auxiliares: 911 kWh
 - Tracción: 390 kWh+Auxiliares: 543 kWh
- Coste:
 - Material rodante: 2360 k€
 - Infraestructura: 1000 k€
 - Combustible de hidrógeno: 27 k€ (3000 kg para pruebas)
 - Ingeniería: 743 k€

Figura 40 Cuadro resumen características del tren prototipo

Capítulo 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FCH Hydrogen Train Study Workshop.
- [2] Acuerdo de París (COP21)
https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es
- [3] White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system.
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:en:PDF>
- [4] Alstom, “Coradia iLint-The world’s 1st hydrogen powered train”
<https://www.alstom.com/our-solutions/rolling-stock/coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-train>
- [5] Alstom, “Pedido de Fahma a Alstom” <https://www.alstom.com/es/press-releases-news/2019/5/fahma-filial-de-rmv-realizo-un-pedido-para-la-mayor-flota-de-trenes>
- [6] Railway gazette, “Pesa y PKN Orlen”<https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/pesa-and-pkn-ornlen-to-develop-hydrogen-fuel-cell-trains/55352.article>
- [7] Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE)- Estudio de las fuentes de energía existentes en el ferrocarril: Estado del arte
- [8] Enagás Transporte S.A.U- El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril más sostenible.
[file:///C:/Users/ponga/Downloads/ce54_08_gnl_combustiblealternativo%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ponga/Downloads/ce54_08_gnl_combustiblealternativo%20(1).pdf)
- [9] Adif: Declaración sobre la red (2020)
http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/DR-20_V0_DocCompl.pdf
http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/DR-20_V0_Mapas.pdf
- [10] Adif: Líneas de alta velocidad
http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/lineas_de_alta_velocidad.shtml
http://www.adifaltavelocidad.es/es_ES/conocenos/doc/CA_DRed_Mapas.pdf
- [11] Renfe: Informe Anual de Responsabilidad Social, Empresarial y Gobierno Corporativo (2017)
<http://www.renfe.com/docs/RENFE%20Memoria%20RSE%202017%20v21.pdf>
- [12] Adif: Memoria Medioambiental (2018)
http://www.adif.es/gl_ES/conoceradif/doc/Memoria_Ambiental_Adif_2018.pdf
- [13] Objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

-
- [14] ABC, “Desmontando mitos sobre el hidrógeno”
https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-desmontando-mitos-sobre-coche-hidrogeno-201905060136_noticia.html
- [15] Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE)- Estudio práctico sobre el consumo de potencia
- [16] ES-0306-000-00-Estudio de consumos eléctricos para servicios auxiliares.
- [17] Reglamento (CE) Nº79/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo
<https://www.boe.es/doue/2009/035/L00032-00046.pdf>
- [18] Reglamento (UE) Nº 406/2010 de la Comisión
<https://www.boe.es/doue/2010/122/L00001-00107.pdf>
- [19] Catálogo “ Hexagon Composites Hydrogen Type 4 Cylinder Information”-
<http://www.hexagon-composites.com/resources/brochures/brochures>
- [20] H2 Ports- <https://h2ports.eu/about/>
- [21] Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>.
- [22] Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- [23] Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- [24] Objetivo 12: Producción y consumo responsables
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- [25] Objetivo 13: Acción por el clima
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- [26] Directiva 2004/26/EC del Parlamento europeo y del Consejo- Medidas contra la emisión de gases y partículas contaminantes
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32004L0026R%2801%29>
- [27] European Environment Agency: Railways
[file:///C:/Users/ponga/Downloads/1.A.3.c%20Railways%202019%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ponga/Downloads/1.A.3.c%20Railways%202019%20(1).pdf)
- [28] Sistema Español de Inventario de Emisiones: Transporte Ferroviario
https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-0802-transporte-ferroviario_tcm30-430163.pdf
- [29] Plan de Lucha Contra el Cambio Climático de Adif/Adif-AV
http://www.adif.es/es_ES/compromisos/lccc/lccc.shtml
- [30] Ministro de Fomento, Gobierno de España, 2014 Informe de la Comisión técnico-científica para el estudio de mejoras en el sector ferroviario
- [31] Hydrogen Safety Panel- Safety Planning for Hydrogen and Fuel Cell Projects
- [32] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking- Safety Planning for Hydrogen and Fuel Cell Projects

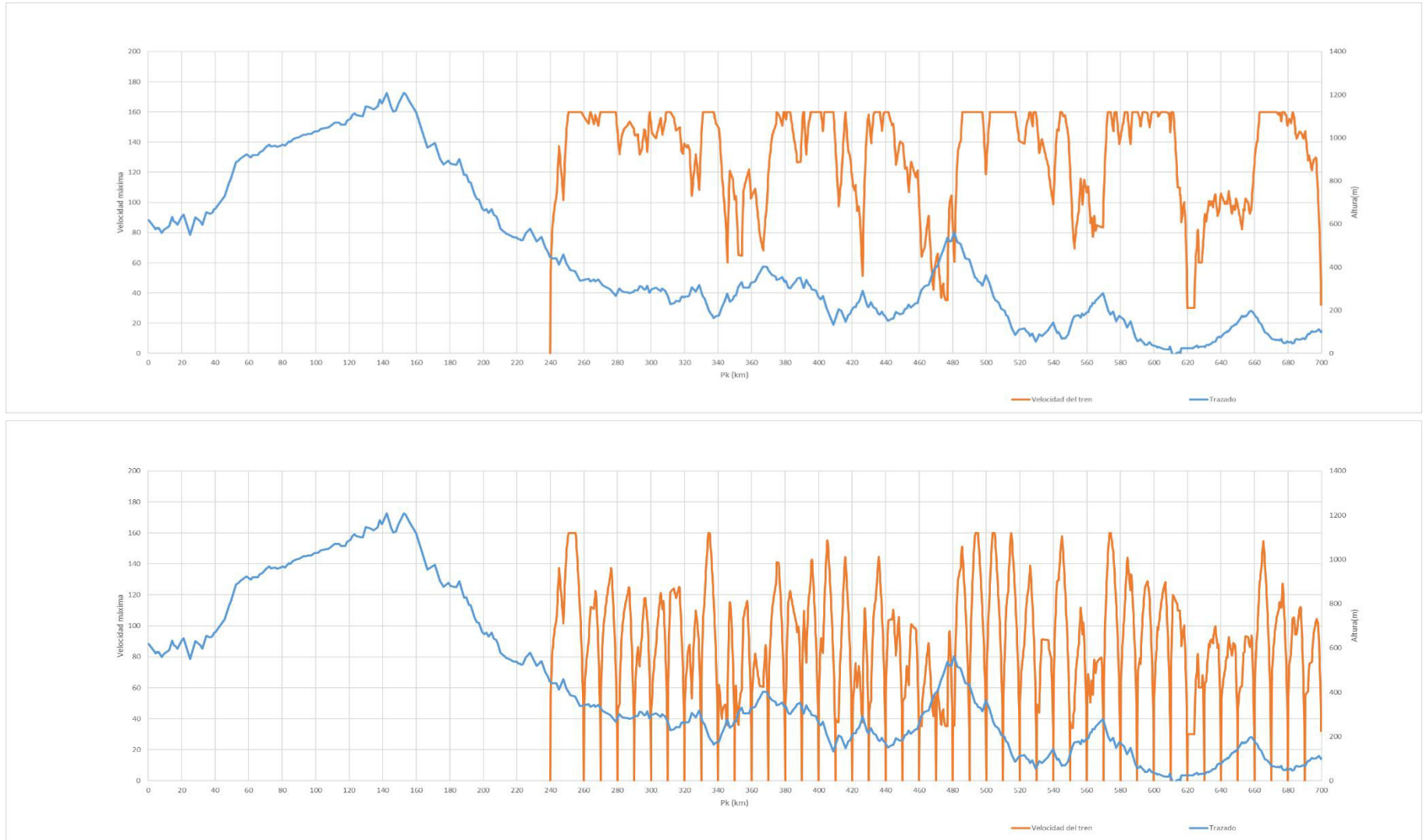
ANEXO I

En este apartado se recogen los resultados de las simulaciones:

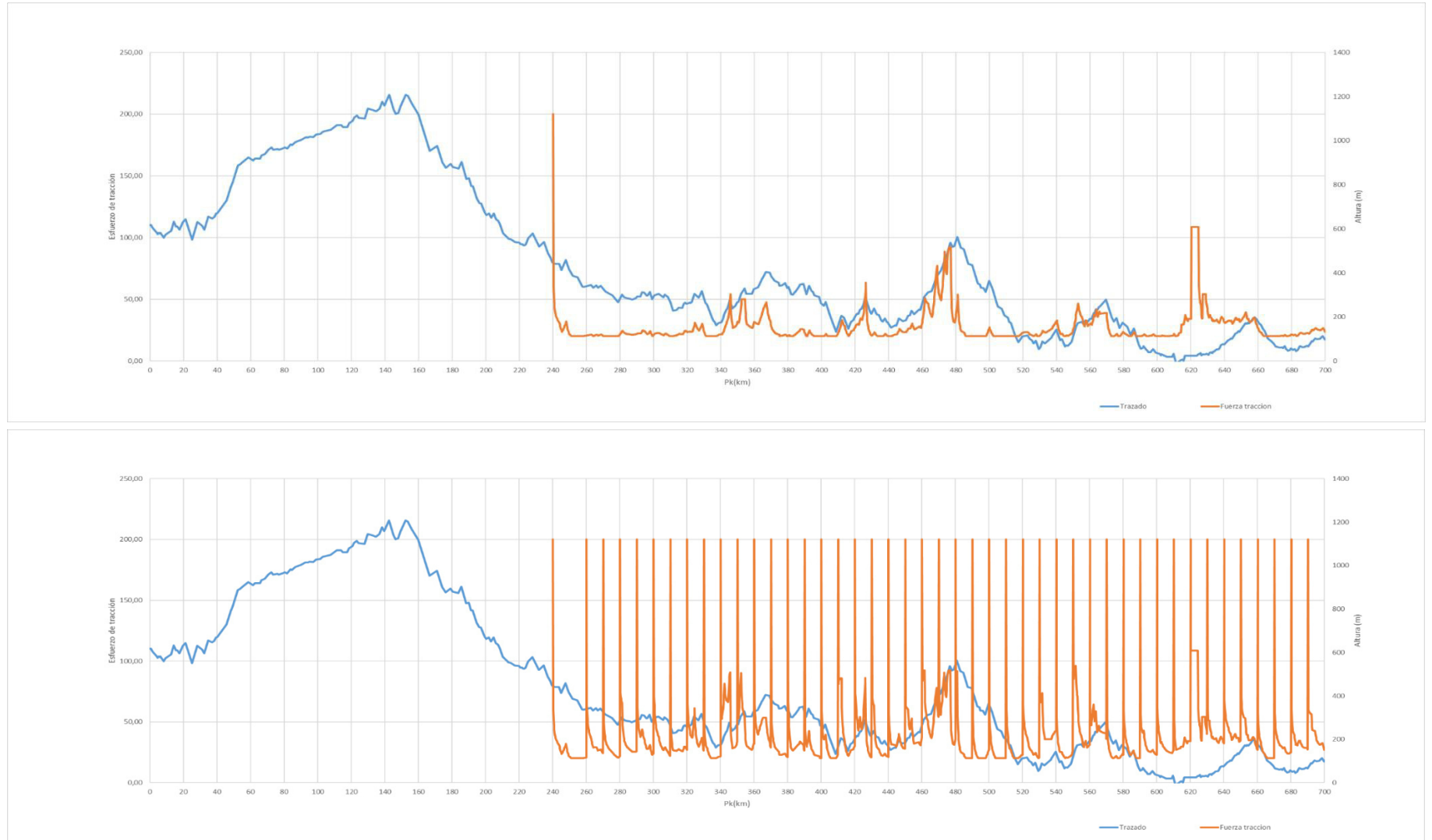
1. Simulación Madrid-Barcelona

A continuación, se incluyen las gráficas obtenidas de la simulación del recorrido Madrid-Barcelona. Con la simulación reiterada de este primer recorrido se pudo perfeccionar el modelo de simulación en base al estudio de prueba y error de las paradas a introducir en el recorrido con el fin de mejorar la capacidad regenerativa del tren. Los resultados se muestran en la comparativa de las gráficas obtenidas para el recorrido de ida sin paradas y con paradas cada 10 km.

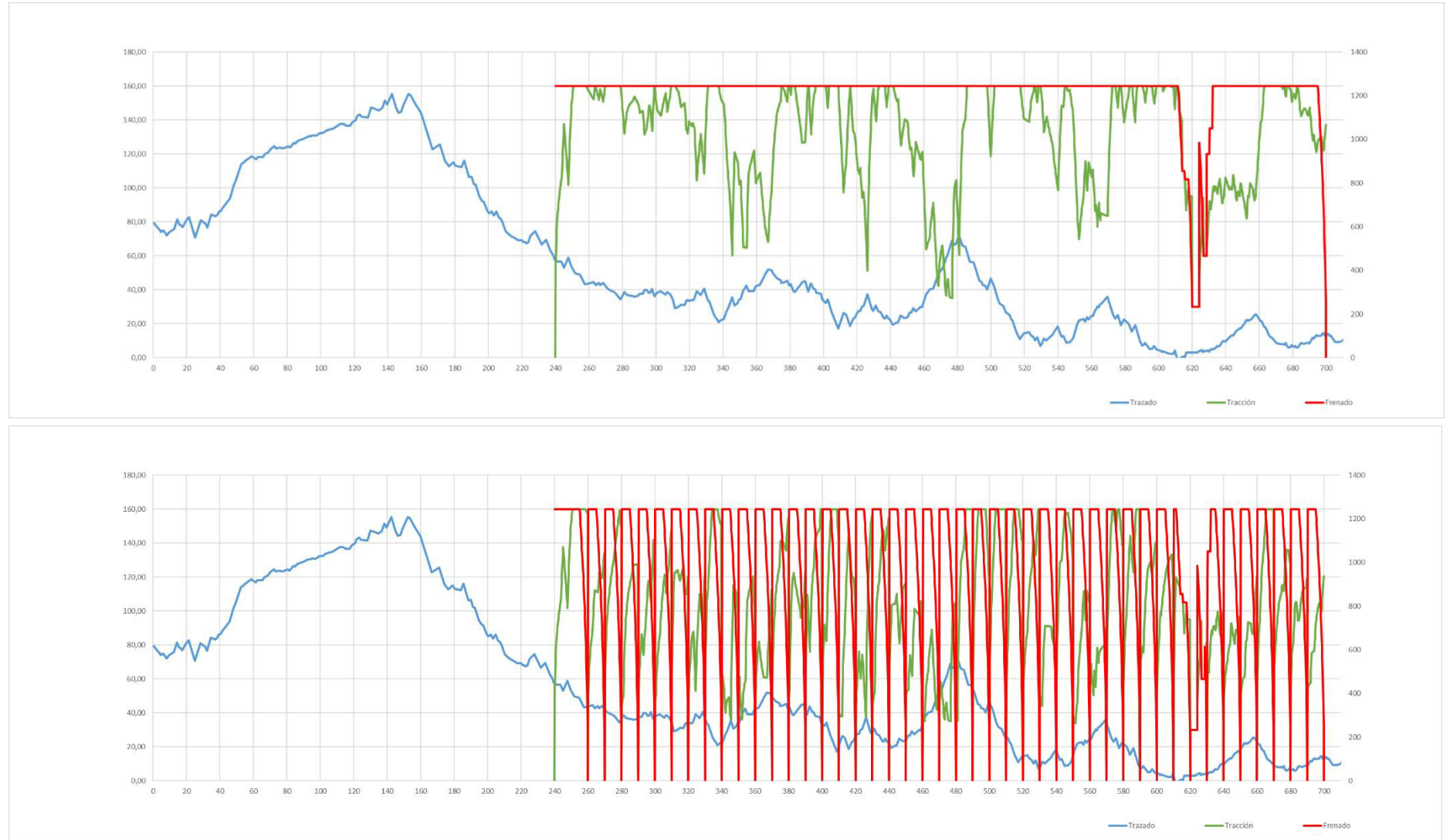
Velocidad del tren a lo largo del recorrido



Fuerza de tracción



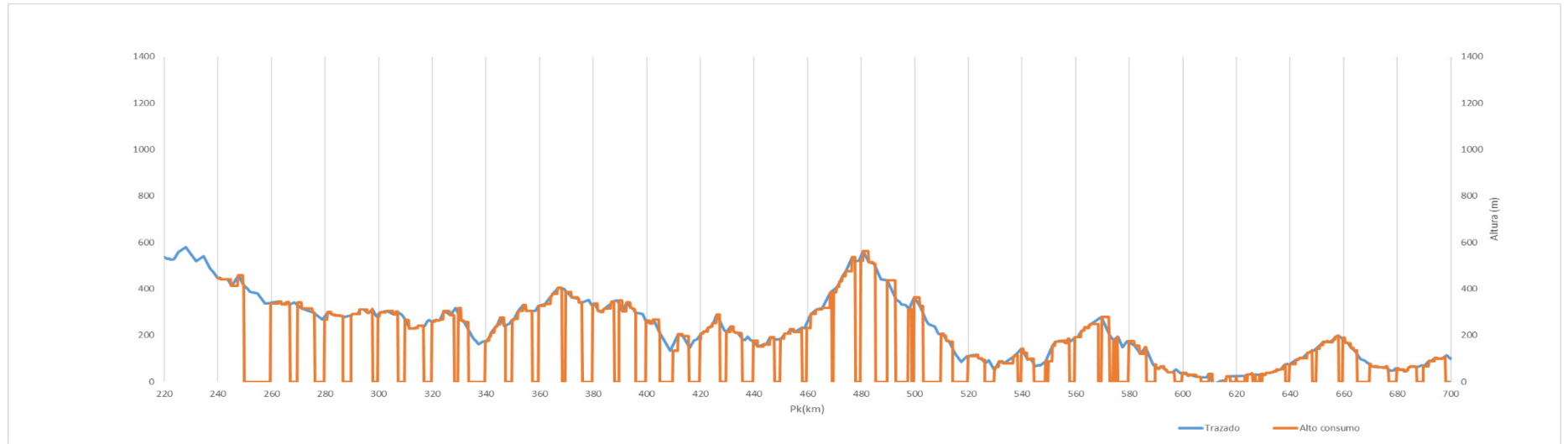
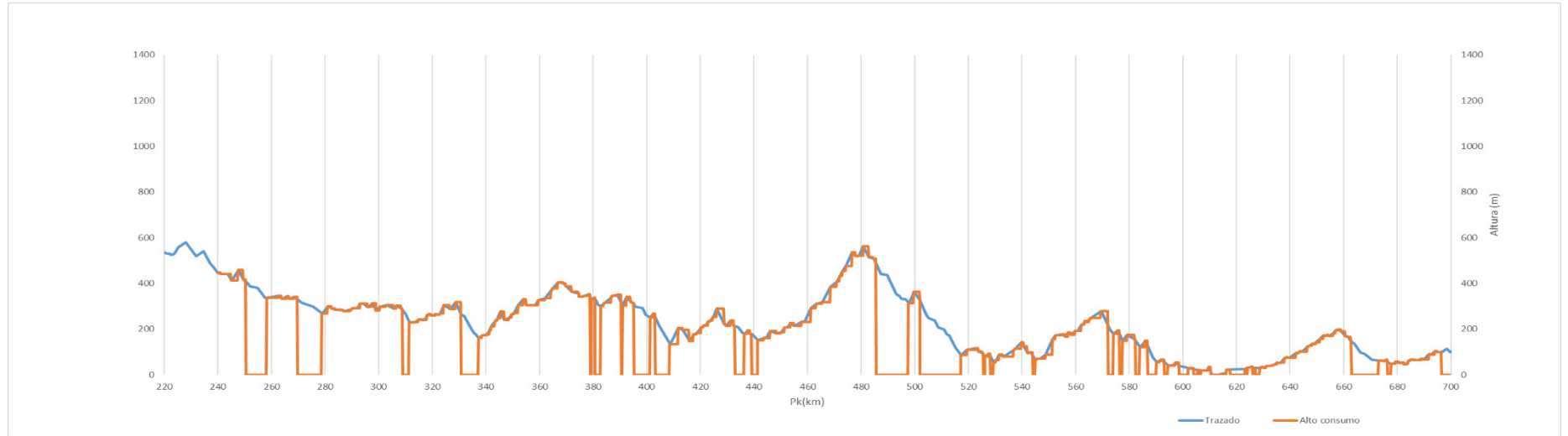
Curva de tracción vs Curva de frenado



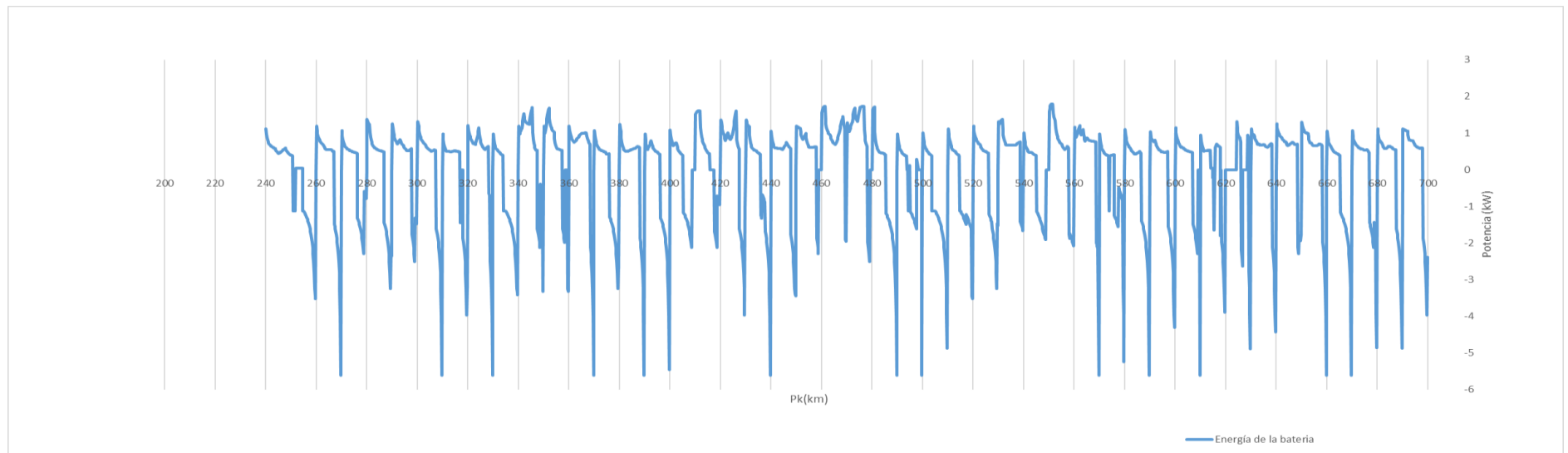
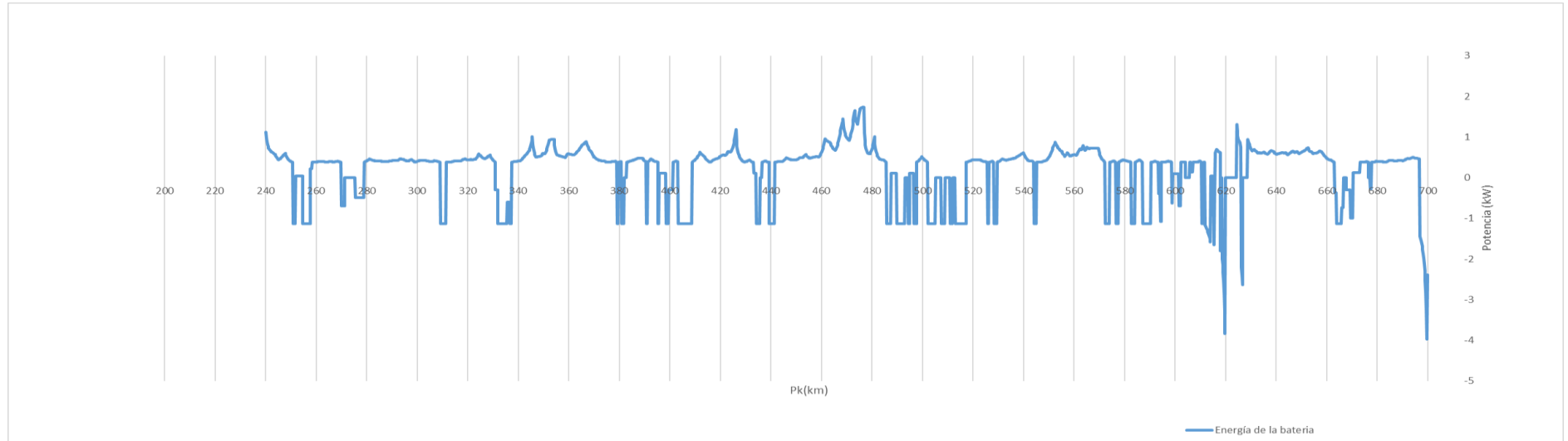
Consumo energético y potencia



Puntos de alto consumo del recorrido

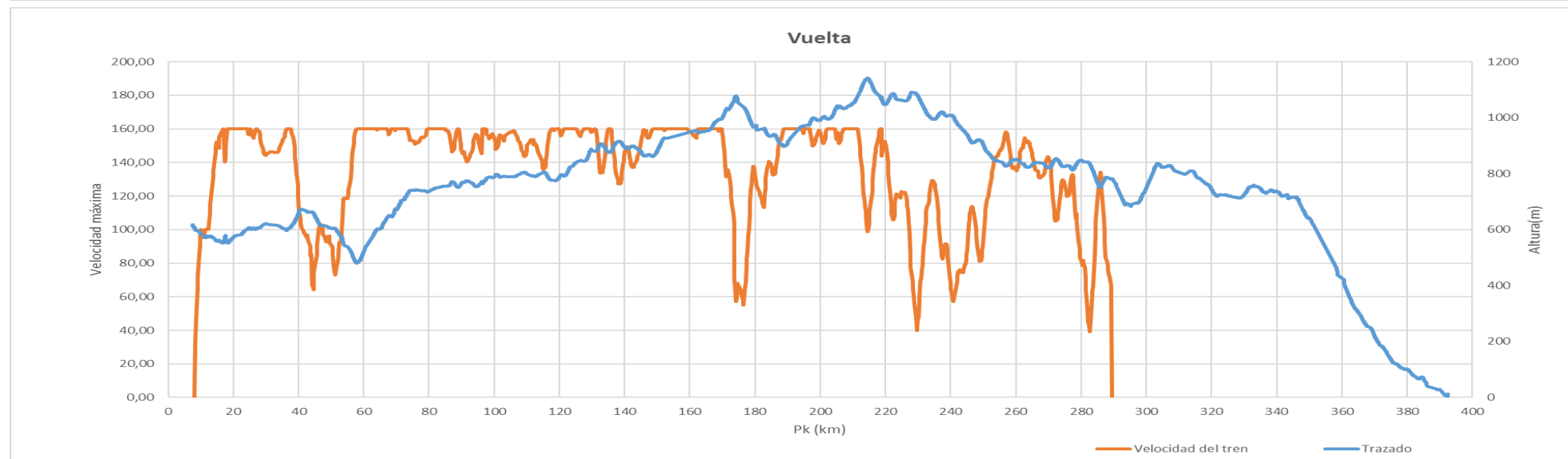
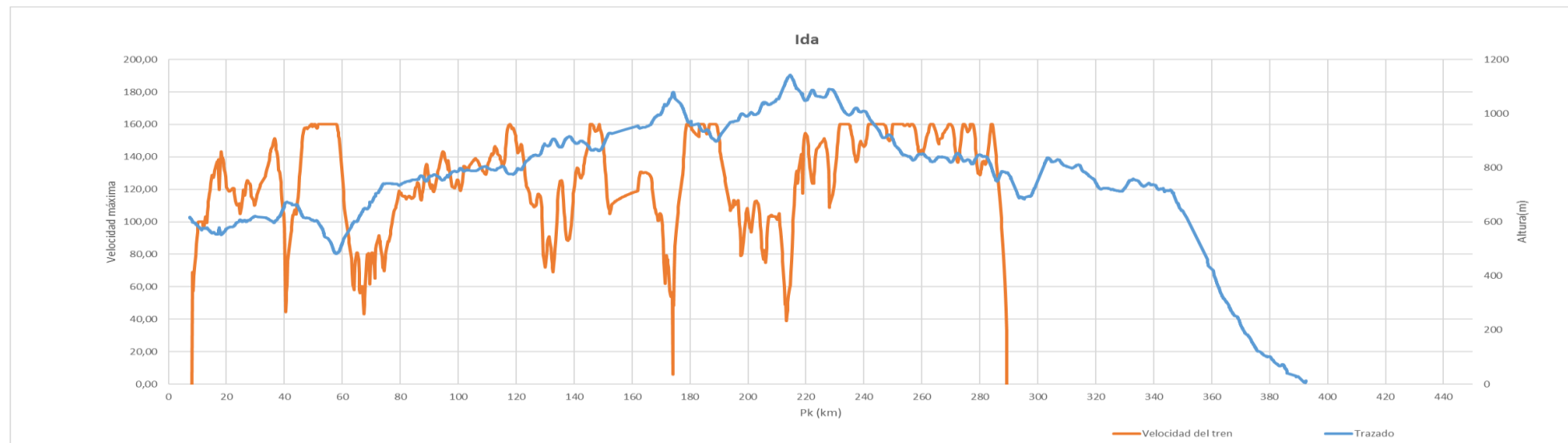


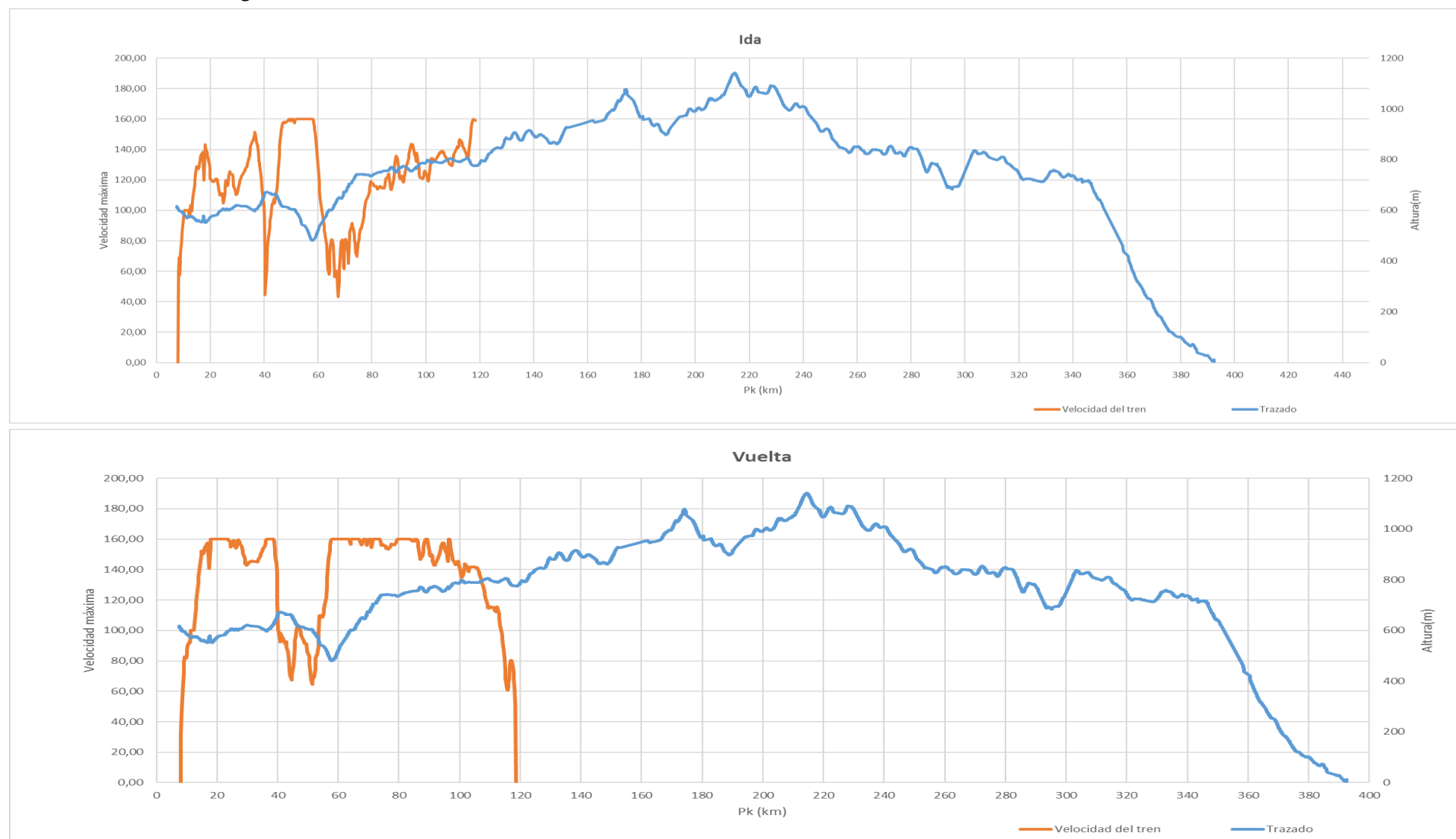
Energía de las baterías



2. Simulación Madrid-Valencia

Para el recorrido Madrid- Valencia sin paradas, se obtuvo que no era posible llegar a Valencia con la potencia instalada ya que, a mitad de camino, por el perfil del recorrido el tren perdía mucha velocidad. En este apartado se recoge la comparación de la velocidad del tren en el recorrido de ida y vuelta para el tramo Madrid- Minglanilla.

Velocidad del tren a lo largo del recorrido: Madrid- Minglanilla

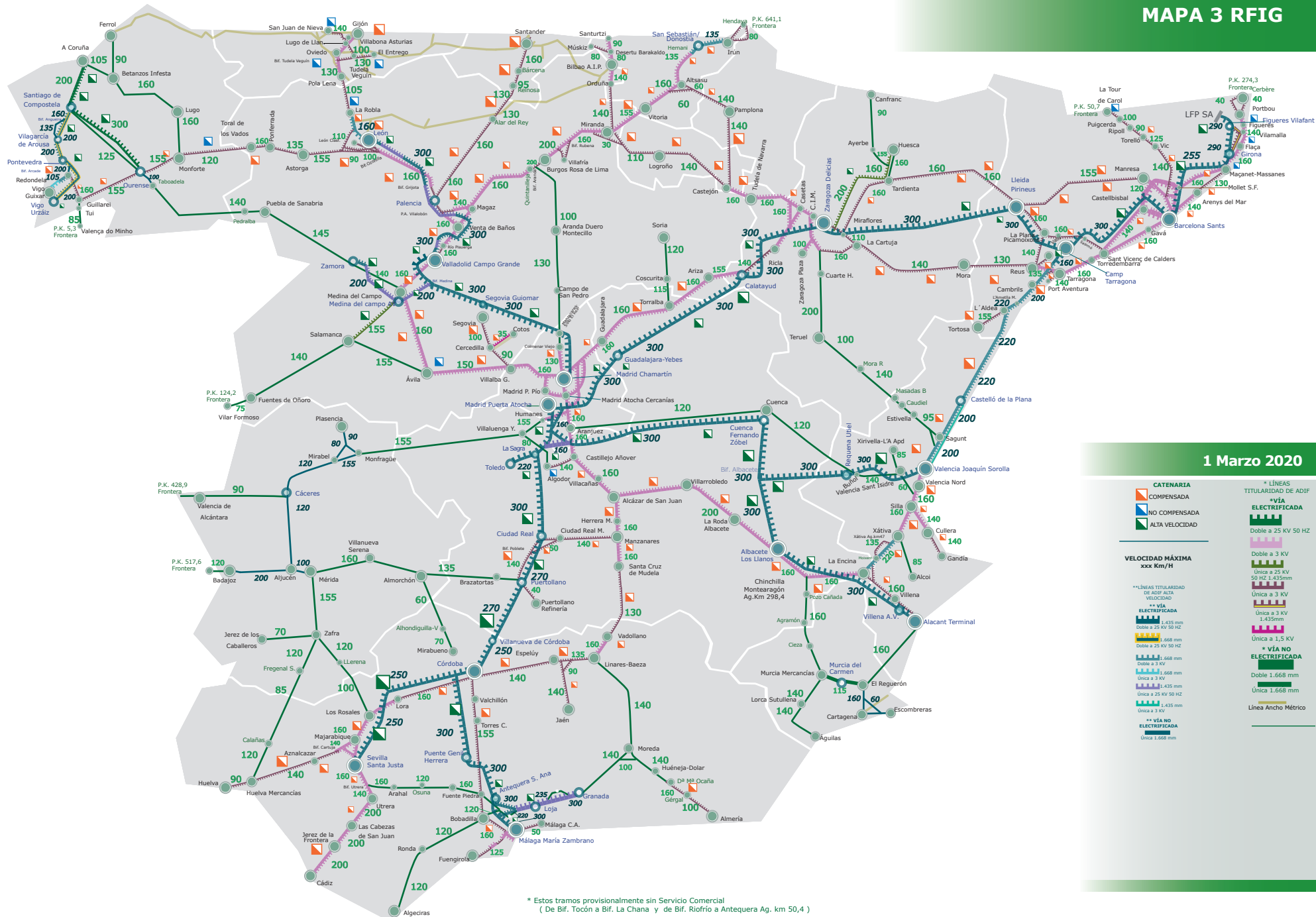
Velocidad del tren a lo largo del recorrido: Madrid- Tarancón

ANEXO II

En este apartado se muestra la información obtenida de la declaración de la red ferroviaria española:

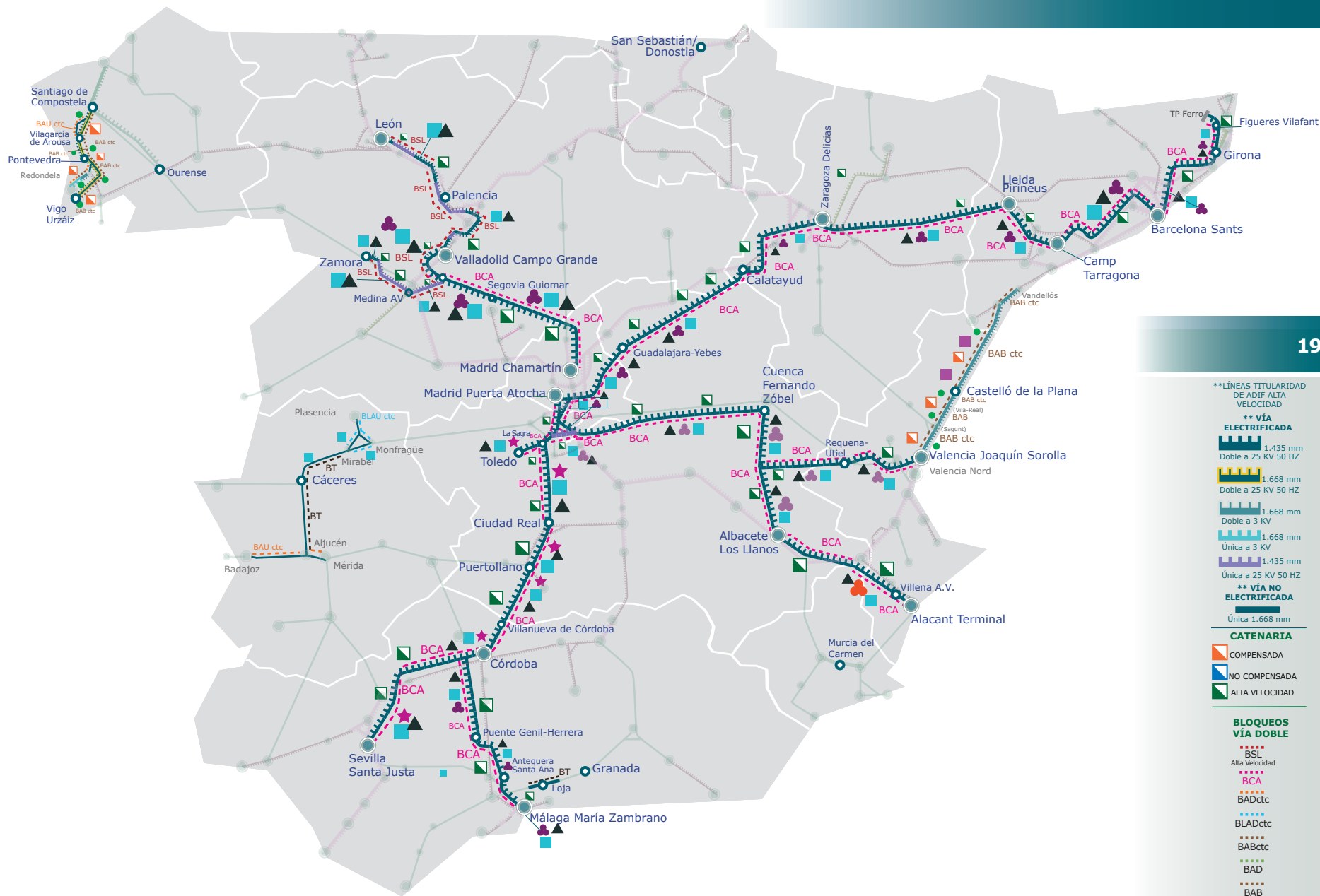
- 1.** Mapa 3 RFIG: Estado de electrificación de las líneas titularidad de Adif
- 2.** Mapa 4: Extensión de la red de alta velocidad de Adif AV

MAPA 3 RFIG



MAPA 4

ADIF ALTA VELOCIDAD



19 enero 2017

**** LÍNEAS TITULARIDAD DE ADIF ALTA VELOCIDAD**

**** VÍA ELECTRIFICADA**

1,435 mm
Doble a 25 KV 50 HZ

1,668 mm
Doble a 25 KV 50 HZ

1,668 mm
Doble a 3 KV

1,668 mm
Única a 3 KV

1,435 mm
Única a 25 KV 50 HZ

**** VÍA NO ELECTRIFICADA**

Única 1,668 mm

CATENARIA

COMPENSADA

NO COMPENSADA

ALTA VELOCIDAD

BLOQUEOS VÍA ÚNICA

BSL
Alta Velocidad

BCA

BADctc

BLADctc

BABctc

BAD

BAB

*** LÍNEAS TITULARIDAD DE ADIF**

*** VÍA ELECTRIFICADA**

Doble a 25 KV 50 HZ

Doble a 3 KV

Única a 25 KV 50 HZ

Única a 3 KV

Única a 1,5 KV

*** VÍA NO ELECTRIFICADA**

Doble 1,668 mm

Única 1,668 mm

SISTEMAS DE SEGURIDAD

ERTMS N1

L2B

ASFA

GSMR

TREN TIERRA

TREN TIERRA Y ASFA

ERTMS N1+2

ATP-EDCAB