



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio para el uso de hidrógeno verde en la línea
ferroviaria 122 Ávila-Salamanca

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Paredes Rojas, Mateo

Tutor/a: Villalba Sanchis, Ignacio

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio para el uso de hidrógeno verde en la línea
ferroviaria 122 Ávila-Salamanca

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Paredes Rojas, Mateo

Tutor/a: Villalba Sanchis, Ignacio

CURSO ACADÉMIC

INDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO..... | 9 |
| 1.2. OBJETIVOS | 10 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA | 11 |
| 2.1. DEFINICIÓN DEL MARCO DE ESTUDIO..... | 11 |
| 2.2. RECOPIACIÓN DE DATOS..... | 11 |
| 2.3. ANÁLISIS TÉCNICO | 12 |
| 2.4. ASPECTOS DE FACTORES MEDIO AMBIENTALES | 13 |
| 2.5. ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN..... | 13 |
| CAPÍTULO 3. MARCO REGULATORIO | 15 |
| 3.1. MARCO REGULATORIO A NIVEL EUROPEO | 15 |
| 3.2. MARCO REGULATORIO A NIVEL NACIONAL..... | 16 |
| CAPÍTULO 4. ÁMBITO DE ESTUDIO | 19 |
| 4.1. LOCALIZACIÓN DE LA LÍNEA 122 | 19 |
| 4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROVINCIAS DE ÁVILA Y SALAMANCA.... | 20 |
| 4.3. DESCRIPCIÓN LÍNEA 122 ENTRE ÁVILA – SALAMANCA | 21 |
| CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DE LA LÍNEA 122. | 23 |
| 5.1. ESTADO DE LAS VÍAS | 24 |
| 5.2. CAPACIDAD DE CARGA Y VELOCIDAD..... | 24 |
| 5.3. ELECTRIFICACIÓN Y SUMINISTRO DE ENERGÍA | 25 |
| 5.4. SEÑALIZACIÓN Y CONTROL DE TRAFICO | 25 |
| CAPÍTULO 6. HIDROGENO EN EL SECTOR FERROVIARIO..... | 27 |
| 6.1. LOS COLORES DEL HIDROGENO..... | 28 |
| CAPÍTULO 7. CADENA DE VALOR DEL HIDROGENO VERDE..... | 35 |
| 7.1. PRODUCCIÓN | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 7.2. ALMACENAMIENTO | 37 |
| 7.3. TRANSPORTE | 40 |
| 7.4. SUMINISTRO | 46 |
| 7.5. USOS FINALES | 48 |
| CAPÍTULO 8. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE FUENTES DE TRACCIÓN EN EL SISTEMA FERROVIARIO DE LA LÍNEA 122..... | 51 |
| CAPÍTULO 9. SELECCIÓN DE UBICACIÓN DE LA ESTACION DE REPOSTAJE PARA SUMINISTRAR LA LÍNEA 122. | 55 |
| 9.1. ALTERNATIVA 1 – ESTACION DE ÁVILA | 55 |
| 9.2. ALTERNATIVA 2 – ENTRE LA ESTACION DE SALAMANCA Y ÁVILA: | 57 |
| 9.3. ALTERNATIVA 3 – ESTACION DE SALAMANCA: | 59 |
| 9.4. ANÁLISIS | 61 |
| CAPÍTULO 10. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES..... | 63 |
| 10.1. FACTORES POSITIVOS..... | 63 |
| 10.2. FACTORES NEGATIVOS | 67 |
| 10.3. COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DESDE EL COMPONENTE AMBIENTAL..... | 68 |
| CAPÍTULO 11. DESARROLLO DE UNIDAD FERROVIARIA..... | 70 |
| CAPÍTULO 12. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE..... | 75 |
| CAPÍTULO 13. CONCLUSIONES | 78 |
| CAPITULO 14. BIBLIOGRAFIA | 81 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Estaciones Línea 122. (Fuente: Elaboración propia) | 26 |
| Tabla 2. Características del Hidrogeno. (Fuente: Elaboración propia) | 27 |
| Tabla 3. Consumo de hidrogeno anual. (Fuente: elaboración propia)..... | 29 |
| Tabla 4. Emisiones generadas por Hidrogeno Gris. Fuente: Elaboración propia). | 30 |
| Tabla 5. Emisiones generadas por Hidrogeno Amarillo. Fuente: Elaboración propia)..... | 30 |
| Tabla 6. Emisiones generadas por Hidrogeno Rosa. Fuente: Elaboración propia). | 31 |
| Tabla 7. Emisiones generadas por Hidrogeno Azul. Fuente: Elaboración propia). | 31 |
| Tabla 8. Emisiones generadas por Hidrogeno Marrón. Fuente: Elaboración propia)..... | 32 |
| Tabla 9. Emisiones generadas por Hidrogeno Verde. Fuente: Elaboración propia)..... | 32 |
| Tabla 10. Resumen de emisiones Anules por Colores. (Fuente: elaboración propia)..... | 33 |
| Tabla 11. Energía necesaria para la producción anual de hidrogeno para la línea ferroviaria 122. (Fuente: Elaboración propia)..... | 36 |
| Tabla 12. Estimación de coste de transporte de hidrogeno por carretera. (Fuente: Elaboración propia). | 42 |
| Tabla 13. Estimación de coste de transporte de hidrogeno por ferrocarril. (Fuente: Elaboración propia). | 44 |
| Tabla 14. Coste de capital de una Estacion de servicio de hidrogeno por tipo y capacidad. Fuente: (Griñan 2024) | 47 |
| Tabla 15. comparativa de alternativas de tracción ferroviaria en la línea 122. (Fuente: Elaboración propia). | 53 |
| Tabla 16. Comparativa entre ubicación de Repostaje de hidrogeno. (Fuente: Elaboración propia) | 61 |

| | |
|---|----|
| Tabla 17. Kms anuales recorridos por los trenes con itinerario Ávila – Salamanca. (Fuente: elaboración propia)..... | 63 |
| Tabla 18. Emisiones Anuales producidas por el Diesel en los trenes con itinerario Ávila - Salamanca. (Fuente: elaboración propia). | 64 |
| Tabla 19. Comparación de reducción de emisiones anuales por tipos de hidrogeno respecto al Diesel en la línea 122. (Fuente: elaboración propia)..... | 64 |
| Tabla 20. Emisiones de monóxido de carbono (CO) con Diesel en la línea 122. (Fuente: elaboración propia)..... | 65 |
| Tabla 21. Emisiones de monóxido de carbono (CO) con hidrogeno en la línea 122. (Fuente: elaboración propia). | 65 |
| Tabla 22. Reducción anual de CO respecto al uso del Hidrogeno..... | 66 |
| Tabla 23. Comparativa ambiental entre Diesel e Hidrogeno. (Fuente: Elaboración propia)..... | 69 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La elección de abordar el tema del uso del hidrógeno verde en la línea ferroviaria 122 entre Ávila y Salamanca para este Trabajo de Fin de Máster (TFM) surge de la necesidad de explorar alternativas sostenibles en el sector del transporte, especialmente en un contexto donde la reducción de emisiones contaminantes es esencial para combatir el cambio climático. Este estudio tiene una importancia significativa para la sociedad, ya que analiza la viabilidad del hidrógeno verde como combustible limpio y renovable, que podría reemplazar a los combustibles fósiles en rutas ferroviarias, mejorando la calidad del aire y reduciendo la huella de carbono.

El TFM se fundamenta en un estudio de la línea ferroviaria 122, considerando factores los trayectos, los tipos de trenes que operan en la línea, y los cálculos de emisiones actuales. Utilizando herramientas como Excel, se han realizado comparaciones exhaustivas para evaluar los impactos de implementar hidrógeno verde en términos de consumo energético y reducción de emisiones. Los resultados obtenidos reflejan un notable potencial para reducir las emisiones de gases contaminantes, subrayando la relevancia de este estudio no solo en términos técnicos y económicos, sino también en su contribución al desarrollo de un modelo de transporte más sostenible, que beneficie tanto al medio ambiente como a la sociedad en su conjunto.

La metodología comenzó con una fase de recopilación de información detallada posteriormente, se empleó Excel como herramienta informática principal para realizar cálculos relacionados con las emisiones, el consumo de energía, la producción de hidrógeno, entre otros. Estos resultados fueron comparados entre sí para cuantificar y diferenciar los impactos que tendría la implementación del hidrógeno verde en la línea ferroviaria.

A partir de estos cálculos, se desarrollaron diferentes suposiciones que permitieron estimar las emisiones producidas por un tren convencional y cómo estas podrían reducirse con el cambio a hidrógeno verde. Los resultados obtenidos mostraron valores consistentes, que permitieron ver un cambio notable y positivo en cuanto la reducción de emisiones de contaminantes y calidad del aire al realizar el cambio de un combustible fósil a un combustible sostenible, como lo es el hidrogeno verde.

Finalmente, el estudio permitió comprobar que el hidrógeno verde es el combustible más adecuado, el método de producción más eficiente, las opciones óptimas de almacenamiento, la logística de transporte, y el uso final del hidrógeno en la operación ferroviaria.

Abstract

The choice to address the use of green hydrogen in the railway line 122 between Ávila and Salamanca for this Master's Thesis (TFM) stems from the need to explore sustainable alternatives in the transportation sector, especially in a context where reducing pollutant emissions is essential to combat climate change. This study holds significant importance for society as it analyzes the viability of green hydrogen as a clean and renewable fuel that could replace fossil fuels on railway routes, improving air quality and reducing the carbon footprint.

The TFM is based on a study of the railway line 122, considering factors such as routes, the types of trains operating on the line, and current emission calculations. Using tools like Excel, exhaustive comparisons were made to evaluate the impacts of implementing green hydrogen in terms of energy consumption and emission reductions. The results obtained reflect a remarkable potential for reducing pollutant gas emissions, underscoring the relevance of this study not only in technical and economic terms but also in its contribution to developing a more sustainable transport model that benefits both the environment and society as a whole.

The methodology began with a phase of detailed information gathering, followed by the use of Excel as the main tool to perform calculations related to emissions, energy consumption, hydrogen production, among others. These results were compared to quantify and differentiate the impacts that green hydrogen implementation would have on the railway line.

Based on these calculations, different assumptions were developed that allowed for estimating the emissions produced by a conventional train and how these could be reduced with the shift to green hydrogen. The obtained results showed consistent values, revealing a notable and positive change in the reduction of pollutant emissions and air quality improvement when transitioning from a fossil fuel to a sustainable fuel like green hydrogen.

Finally, the study confirmed that green hydrogen is the most suitable fuel, the most efficient production method, optimal storage options, transportation logistics, and its final use in railway operations.

1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La contaminación ambiental en España, se ve significativamente afectada por las emisiones generadas por trenes y vehículos, que liberan contaminantes atmosféricos como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y partículas en suspensión, contribuyendo a la mala calidad del aire. En las grandes ciudades, donde la densidad del tráfico es alta, los niveles de contaminación pueden alcanzar cifras alarmantes. Aunque los trenes son generalmente más eficientes y producen menos emisiones por pasajero en comparación con los vehículos individuales, su uso de combustibles fósiles genera preocupaciones sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono.

La necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos asociados al transporte y demás sectores, contribuyendo así a mitigar el cambio climático y mejorar la calidad del aire del medio ambiente, mejorando así la calidad de aire a lo largo del tiempo, en este caso de la ruta ferroviaria 122 y todo su entorno.

Además, la transición hacia fuentes de energías más limpias es crucial para cumplir con los compromisos internacionales de España en materia de reducción de emisiones y promoción de energías renovables.

Por otro lado, este proyecto puede ofrecer oportunidades económicas y sociales significativas, como la creación de empleo en el sector de energías renovables, promoción de la innovación tecnológica y mejora de la competitividad, impulsando el desarrollo de infraestructuras a un futuro más sostenibles y próspero para las generaciones actuales y futuras.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la posibilidad de reemplazar el combustible diésel por hidrógeno verde, buscando como resultado una reducción porcentual significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos asociados con el uso de combustibles fósiles en el corredor ferroviario que conecta Salamanca y Ávila.

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar para la implementación del hidrogeno verde en el corredor ferroviario.
- Evaluación del impacto ambiental de la transición al hidrogeno verde, incluyendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos relacionados con los combustibles fósiles.
- Determinación del cumplimiento de las regulaciones y políticas gubernamentales existentes.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Este capítulo describe en detalle la metodología utilizada para estudiar la viabilidad del uso del hidrógeno verde como combustible en la línea ferroviaria 122 entre Ávila y Salamanca. La metodología se diseñó para abordar de manera sistemática los aspectos técnicos, ambientales y económicos del proyecto, utilizando tanto datos existentes como modelos predictivos para evaluar los resultados esperados de la implementación del hidrógeno verde.

2.1. DEFINICIÓN DEL MARCO DE ESTUDIO

Para comenzar, se estableció un marco de estudio que incluía una revisión exhaustiva de la literatura existente y un análisis normativo. Este marco permitió definir los límites del estudio y los objetivos específicos a alcanzar:

- Se recopiló y analizó la literatura académica y técnica relacionada con el uso del hidrógeno verde en el transporte ferroviario y la zona de estudio. Este análisis incluyó estudios previos sobre la ubicación del proyecto, producción, almacenamiento de hidrógeno, transporte, así como investigaciones sobre las tecnologías de conversión y los sistemas de propulsión ferroviaria.
- Revisión de las regulaciones actuales y futuras que puedan afectar la implementación del hidrogeno verde en el transporte ferroviario.

2.2. RECOPIACIÓN DE DATOS

La recopilación de datos se dividió en categorías principales: datos sobre el área de estudio, datos operativos de la línea ferroviaria y datos técnicos sobre la producción y uso del hidrógeno verde:

- Se recopiló información y datos sobre la zona de estudio par

- Se recopilaron, información y datos sobre la zona de estudio, la operación actual de la línea ferroviaria 122, incluyendo la frecuencia de los servicios, el número de trayectos, los tipos de trenes utilizados (específicamente el modelo S-599), y el consumo de diésel. Estos datos fueron proporcionados por la operadora ferroviaria y complementados con estudios de campo y entrevistas a personal técnico.
- Identificación y obtención de datos sobre la infraestructura ferroviaria y trenes que realizan su trayecto entre Salamanca y Ávila.
- Se obtuvieron datos de producción y almacenamiento de hidrógeno verde de fuentes industriales y académicas. Esto incluyó información sobre los métodos de producción como la electrólisis, la eficiencia energética, y las capacidades de almacenamiento. Se incluyó también información sobre la logística de transporte del hidrógeno, tanto por carretera como por ferrocarril y gasoducto.

2.3. ANÁLISIS TÉCNICO

- Se realizó un estudio sobre las modificaciones necesarias para adaptar los trenes de la línea 122 al uso de hidrógeno. Esto incluyó un análisis de los sistemas de propulsión, almacenamiento de hidrógeno a bordo, y los requisitos de infraestructura para la recarga en estaciones.
- Estudio de tecnologías de producción de hidrogeno verde, seleccionando la más adecuada para su implementación.
- Se desarrollaron varios escenarios de implementación utilizando herramientas de simulación en Excel configuraciones de infraestructura, rutas de suministro, y costos operativos. Estos escenarios ayudaron a identificar la opción más eficiente y rentable para la línea ferroviaria 122.

2.4. ASPECTOS DE FACTORES MEDIO AMBIENTALES

- Se realizó un estudio sobre las modificaciones necesarias para adaptar los trenes de la línea 122 al uso de hidrógeno. Esto incluyó un análisis de los sistemas de propulsión, almacenamiento de hidrógeno a bordo, y los requisitos de infraestructura para la recarga en estaciones.
- Estudio de tecnologías de producción de hidrógeno verde, seleccionando la más adecuada para su implementación.
- Se desarrollaron varios escenarios de implementación utilizando herramientas de simulación en Excel configuraciones de infraestructura, rutas de suministro, y costos operativos. Estos escenarios ayudaron a identificar la opción más eficiente y rentable para la línea ferroviaria 122.
- Para evaluar los beneficios ambientales del uso del hidrógeno verde, se realizó un análisis de emisiones comparativo.
- Se calcularon las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes atmosféricos asociados con el uso de diésel en la línea 122, este cálculo se basó en datos de consumo de combustible y factores de emisión estándar.
- Se utilizaron modelos de simulación para estimar las reducciones potenciales en las emisiones de GEI si se implementara el hidrógeno verde. Estos modelos tomaron en cuenta las características específicas del tren S-599, los datos de operación, y los factores de emisión del hidrógeno verde.

2.5. ESTRATEGIAS DE IMPLEMENTACIÓN

- Desarrollo de infraestructura, tal como invertir en la construcción de una estación de recarga de hidrógeno a lo largo de la línea ferroviaria, para garantizar su disponibilidad y operatividad.

- Evaluar el transporte del hidrógeno optimo desde las plantas de producción hasta las estaciones de repostaje, utilizando tanto carreteras como posibles gasoductos, dependiendo de la infraestructura disponible.
- Establecer sistemas que permitan medir en tiempo real las emisiones de los trenes impulsados por hidrógeno verde, comparándolos con los trenes diésel actuales.

CAPÍTULO 3. MARCO REGULATORIO

3.1. MARCO REGULATORIO A NIVEL EUROPEO

Existe una gran variedad de directivas que afectan o tienen implicaciones sobre los diferentes usos del hidrogeno, a continuación, se presentan los más relevantes:

- **Directiva sobre energías renovables (EU) 2018/2001:** legislación de la unión europea que establece objetivos vinculantes para aumentar el uso de energías renovables en la UE, estableciendo políticas y medidas de apoyo para facilitar la inversión en tecnologías con el hidrogeno, reconociendo la importancia de este en la descarbonización de sectores como el transporte, la industria y la generación de energía (Parlamento Europeo 2018).
- **Directiva sobre infraestructura de combustibles alternativos 2014/94/UE:** tiene como función principal promover el desarrollo de infraestructura para combustibles alternativos en la unión europea, como el hidrogeno, el gas natural y los combustibles sintéticos, con el fin de diversificar las opciones de movilidad y reducir la dependencia de combustible fósiles (Parlamento Europeo 2014).
- **Directiva sobre Calidad de Combustible 98/70/EC:** Plantea estándares de calidad para los combustibles utilizados en la UE, teniendo como requisito de los combustibles reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y así mismo mejorar la calidad del aire mediante la regulación de la composición de los combustibles (Parlamento Europeo 1998).
- **Directiva (UE) 2015/652 del Consejo:** es aquella que establece normas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea mediante la aplicación del sistema de comercio de

derechos de emisión, estableciendo un límite máximo de emisiones para determinados sectores industriales y de producción de energía (Parlamento Europeo 2015).

Además de las directivas mencionadas anteriormente, proyectos como los de HyLaw ha identificado más de 50 actos legislativos de la Unión Europea que inciden de manera indirecta en el avance de la tecnología del hidrógeno, abarcando aspectos relacionados con la seguridad, la salud, el medio ambiente, el trabajo, el transporte, entre otros (HYLAW 2018).

Existen iniciativas destacadas como el Pacto Verde Europeo, una ambiciosa propuesta que busca transformar la economía y la sociedad hacia un modelo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Su principal objetivo es lograr la neutralidad climática para 2050, mediante la reducción de emisiones y la promoción de una transición hacia una economía circular y verde. Esto aseguraría un futuro más próspero y saludable para las generaciones venideras.

3.2. MARCO REGULATORIO A NIVEL NACIONAL

Desde el 2019, España ha establecido un Marco Estratégico de Energía y Clima con tres enfoques principales: mitigación, adaptación y transición justa. Este marco es fundamental para alcanzar la descarbonización de economía, proporcionando un marco normativo y jurídico para las medidas en curso, brindando seguridad a las inversiones y apoyando el desarrollo de las áreas afectadas por la transición energética (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico s. f.-b).

Las piezas claves que constituyen el marco son:

- **Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC):** en respuesta a los compromisos adquiridos ante la Unión Europea en materia de energía y cambio climático. Este plan tiene como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 23% con respecto a los niveles de 1990, lo que implica eliminar una de cada

tres toneladas de emisiones actuales. Además de cumplir con los compromisos europeos, el PNIEC busca aprovechar las oportunidades económicas y sociales que ofrece la transición hacia un modelo energético más limpio y eficiente (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2020).

- **Ley de Cambio Climático y Transición Energética:** Es una herramienta que facilita la adaptación gradual de nuestra realidad a las demandas de la acción climática, guiando el camino hacia la descarbonización de la economía española para 2050 (Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes 2021).
- **Hoja de ruta del Hidrogeno Renovable:** Proporciona una perspectiva a largo plazo para el 2030 y 2050, fijando objetivos ambiciosos para España en el 2030. Alcanzar estos objetivos garantizará la competitividad industrial y tecnológica de la economía a nivel comunitaria y la integración total del hidrogeno en la movilidad sostenible.

Así mismo, también incluye la aplicación de tecnologías en el sector ferroviario tal y como se muestra en la ilustración 1. *“2 líneas comerciales en trenes propulsados con Hidrogeno”* (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico s. f.-a).



Ilustración 1. Principales objetivos para 2030 de la hoja de ruta del hidrógeno en España. (Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico s. f.-a).

La implementación del hidrógeno verde abarca una variedad de sectores y, por lo tanto, se ve afectada por una amplia gama de normativas. Estas regulaciones están diseñadas para fomentar y regular el uso del hidrógeno como combustible alternativo en la movilidad y otros sectores. Por ejemplo, en el ámbito del transporte, existen normativas que establecen estándares para la seguridad y eficiencia de los vehículos de hidrógeno, así como para la infraestructura de recarga y repostaje. Además, en sectores como la industria y la energía, se han implementado normativas relacionadas con la producción, almacenamiento y distribución segura del hidrógeno verde. Estas regulaciones juegan un papel crucial en la promoción de un entorno propicio para la adopción generalizada del hidrógeno verde como parte integral de la transición hacia una economía más limpia y sostenible.

CAPÍTULO 4. ÁMBITO DE ESTUDIO

En este capítulo se ofrecerá una breve descripción de la zona de estudio por la que transcurre la línea ferroviaria 122, destacando sus áreas más relevantes. El propósito es proporcionar una referencia geográfica básica y familiarizarnos de manera general con el entorno por el que se desarrolla esta línea.

4.1. LOCALIZACIÓN DE LA LÍNEA 122

La línea ferroviaria se encuentra cerca de las fronteras con otras importantes comunidades autónomas, como Madrid y Extremadura, lo que resalta su relevancia estratégica tanto a nivel regional como en la conectividad con otras zonas del país. La combinación de estos factores convierte a la línea 122 en un corredor ferroviario clave, no solo por su valor histórico y cultural.



Ilustración 2. Comunidades Autónomas de España. Fuente: (Delgado 2024).



Ilustración 3. Comunidades Autónomas de España. Fuente:(ADIF s. f.).

4.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROVINCIAS DE ÁVILA Y SALAMANCA

A continuación, se realiza una breve descripción de las provincias donde transcurre la línea 122 (DIPUTACION DE AVILA 2019) y (Provincia de Salamanca 2024).

PROVINCIA DE ÁVILA

- Localización y Geografía:

Se encuentra en el sur de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, en el centro-oeste de España, Limita al norte con las provincias de Valladolid y Segovia, al este con Madrid, al sur con Toledo y Cáceres, y al oeste con Salamanca.

La geografía de Ávila puede Variar un poco, debido a que tiene la presencia de la Sierra de Gredos en su parte sur, que forma parte del sistema Central. Esta zona montañosa es conocida por su espectacular paisaje, que incluye picos altos, gargantas profundas y extensas zonas boscosas. Al norte, la provincia se abre a la Meseta Norte, una vasta llanura que domina el centro de la península ibérica.

- Población:

Ávila es una de las provincias menos densamente pobladas de España, con una población que ronda los 157,000 habitantes. La mayoría de la población se concentra en la capital, Ávila, mientras que el resto vive en pequeños municipios rurales.

PROVINCIA DE SALAMANCA

- Localización y Geografía:

Se encuentra en el oeste de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, haciendo frontera con Portugal al oeste. Limita al norte con Zamora, al este con Ávila, al sureste con Cáceres, y al suroeste con la provincia portuguesa de Guarda.

Está situada en la Meseta Norte, una gran planicie que caracteriza gran parte de Castilla y León. El río Tormes atraviesa la provincia, proporcionando un importante recurso hídrico para la agricultura y el consumo humano.

- Población:

Tiene una población de aproximadamente 330,000 habitantes, de los cuales cerca de la mitad residen en la capital. Al igual que Ávila, el resto de la población se distribuye en pequeños municipios rurales.

4.3. DESCRIPCIÓN LÍNEA 122 ENTRE ÁVILA – SALAMANCA

El ferrocarril entre Salamanca y Ávila no solo conecta dos ciudades importantes de la comunidad de Castilla y León, sino que también desempeña un papel esencial en la mejora de la conectividad en la región. Con aproximadamente 111 kilómetros de longitud, esta línea ferroviaria es una de las rutas clave en el oeste

de España, facilitando el transporte diario de pasajeros y mercancías. Esta conexión es vital para la cohesión territorial, ya que reduce las barreras geográficas entre las áreas urbanas y rurales. El ferrocarril ofrece un acceso crucial para los residentes de pequeños municipios a lo largo de la ruta, como Peñaranda de Bracamonte y otros núcleos rurales. En una región con una población dispersa, la línea ferroviaria proporciona una alternativa de transporte accesible y regular que mejora la movilidad y reduce el aislamiento. Según datos recientes de Renfe, en 2023, más de 500.000 pasajeros utilizaron esta ruta, destacando su importancia como un medio de transporte seguro, cómodo y eficiente.

Además, el ferrocarril es un componente vital para el desarrollo económico regional. En 2023, se transportaron más de 200.000 toneladas de mercancías a lo largo de esta línea, lo que subraya su papel como infraestructura clave para el comercio y la industria. La capacidad del ferrocarril para manejar grandes volúmenes de carga de manera eficiente no solo facilita el movimiento de bienes entre Ávila y Salamanca, sino que también conecta la región con otros mercados importantes en España, fomentando así el crecimiento económico (Peris Torner 1972).

CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DE LA LÍNEA 122.

La línea ferroviaria Ávila-Salamanca, ubicada en la comunidad autónoma de Castilla y León, opera bajo el estándar de ancho ibérico (1668mm) y está gestionada por la Administración de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF). Con una extensión de 111,1 kilómetros, esta vía desempeña un papel crucial en la conectividad entre las ciudades de Ávila y Salamanca, siendo designada por ADIF como la línea 122. Su importancia radica en su contribución al transporte de pasajeros y mercancías, así como a la integración regional y el desarrollo económico en la zona (Peris Torner 1972).

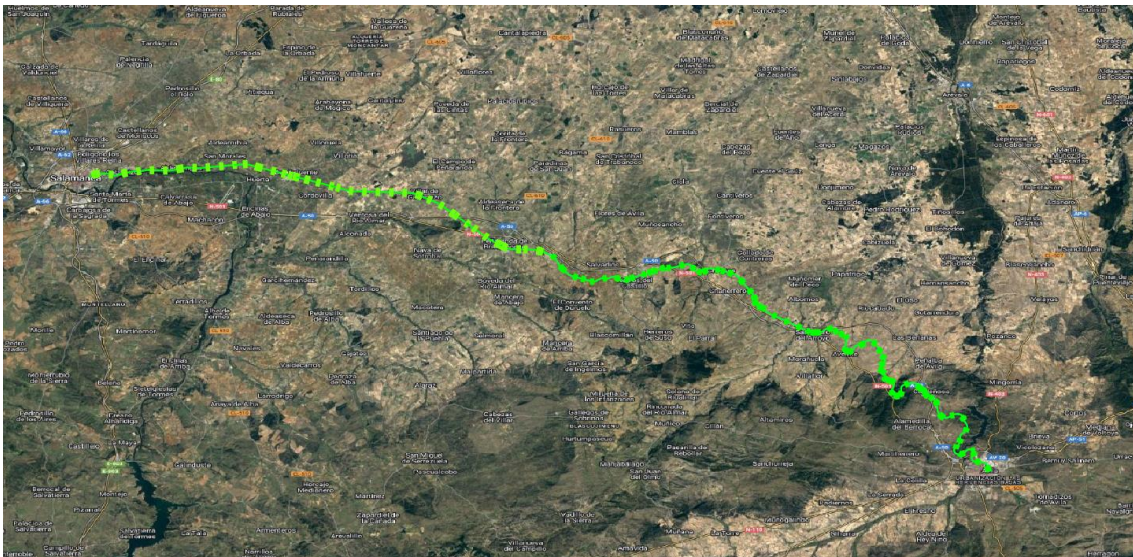


Ilustración 4. traza ferroviaria de la línea 122. Fuente: (elaboración propia).

La Línea 122 no se encuentra electrificada, por lo que aún se utiliza el Diesel para el transporte en ese tramo y tiene una sola vía.



Ilustración 5. Principales Terminales de Transporte de Mercancías, Puntos fijos de Suministro de Gasoil, Longitud máxima de los Trenes de Mercancías, Básculas dinámicas, Rampas características en milésimas y Puertos de Interés General con Convenio de Conexión a la RFIG. Fuente: (ADIF 2023)

5.1. ESTADO DE LAS VÍAS

El estado de las vías ferroviarias en general es óptimo, con un mantenimiento adecuado. Estos incluyen reparaciones en rieles, traviesas y balasto en varios tramos de la línea, lo cual es fundamental para asegurar la seguridad y la comodidad del transporte ferroviario. La atención constante a estas labores de mantenimiento garantiza que la infraestructura ferroviaria pueda cumplir con los estándares de calidad y fiabilidad necesarios para el transporte de pasajeros y mercancías de manera eficiente y segura.

5.2. CAPACIDAD DE CARGA Y VELOCIDAD

La línea convencional cuenta con una capacidad óptima para manejar trenes de carga de gran peso y alta velocidad, gracias a un diseño de vías que permite operaciones a velocidades elevadas. Este diseño optimizado no solo favorece el transporte eficiente de pasajeros, sino también el de mercancías. La capacidad para soportar trenes de carga pesados y rápidos es fundamental para garantizar la eficacia del transporte ferroviario, ya que permite movilizar grandes volúmenes de mercancías de manera segura y oportuna. La infraestructura adecuada para este propósito es esencial para mantener la competitividad y la eficiencia en el transporte de carga en la región.

5.3. ELECTRIFICACIÓN Y SUMINISTRO DE ENERGÍA

Esta línea férrea comprendida entre Ávila y Salamanca no se encuentra electrificada, tal y como se muestra en la siguiente figura.

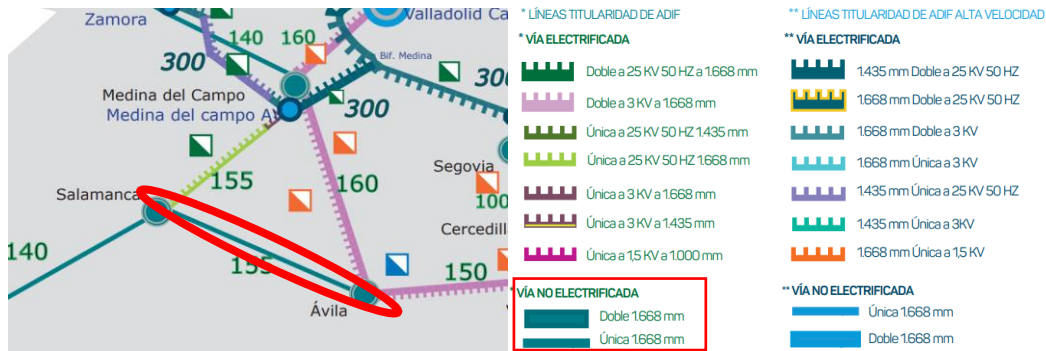


Ilustración 6. Velocidades máximas, Tipos de Electrificación y Catenarias. Fuente: (ADIF 2023).

5.4. SEÑALIZACIÓN Y CONTROL DE TRAFICO

La línea férrea dispone de sistema de señalización y de control de tráfico a lo largo de la línea. Las señales, semáforos y dispositivos de detección están bien mantenidos y operan de manera correcta, lo que garantiza una operación segura y eficiente del tráfico ferroviario.

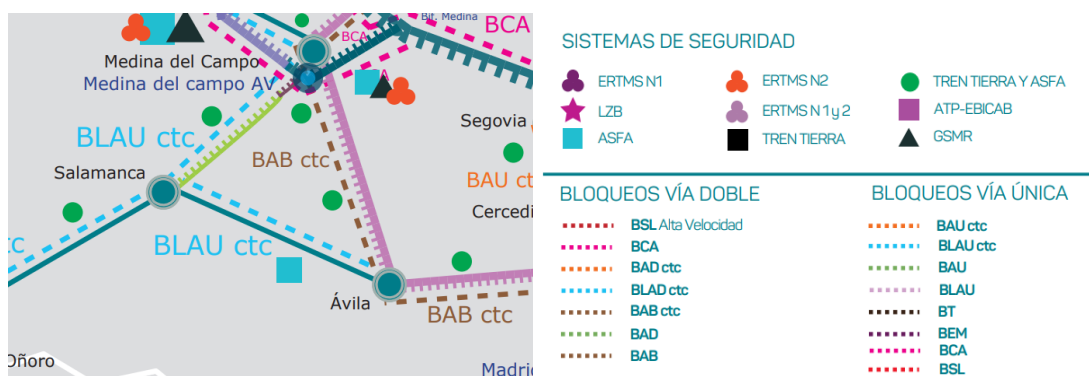


Ilustración 7. Sistemas de Seguridad, Bloqueos. Fuente: (ADIF 2023).

5.5. ESTACIONES Y ACCESIBILIDAD

El tramo ferroviario entre Ávila y Salamanca está comprendido por un total de 8 estaciones, las cuales se encuentran en buen estado y son accesibles para pasajeros con movilidad reducida disponiendo de rampas y otras facilidades para garantizar la accesibilidad de todo tipo de usuario.

| Estación | Km |
|-------------------------|--------|
| Ávila | 0 |
| Cardeñosa de Ávila | 15,707 |
| San Pedro del Arroyo | 36,104 |
| Crespos | 47,656 |
| Peñaranda de Bracamonte | 70,792 |
| Villar de Gallimazo | 80,481 |
| Babilafuente | 92,159 |
| Salamanca | 110,67 |

Tabla 1. Estaciones Línea 122. Fuente:(Elaboración propia).

CAPÍTULO 6. HIDROGENO EN EL SECTOR FERROVIARIO

El hidrógeno es un elemento químico fundamental, distinguido por su simplicidad, ya que su átomo consta únicamente de un protón y un electrón. Su forma más estable se presenta en moléculas diatómicas (H_2). A nivel atmosférico, se encuentra en estado gaseoso.

Este elemento, de hecho, es el más abundante en el universo, constituyendo aproximadamente el 75% de la materia conocida, aunque rara vez se encuentra en forma aislada. Suele combinarse con el oxígeno para formar moléculas de agua (H_2O), o con el carbono para generar compuestos orgánicos. Por esta razón, el hidrógeno no se considera un combustible natural, sino más bien un vector energético. Es decir, actúa como un portador de energía que puede ser liberada de manera controlada. Los vectores energéticos se distinguen de las fuentes primarias de energía en que no se encuentran disponibles directamente en la naturaleza y requieren un proceso de obtención que implica la inversión de una cierta cantidad de energía. (IBERDROLA CORPORATIVA 2024a)

| | |
|-------------------------------------|--|
| Densidad (Estado Líquido) | 0,0889 kg/m ³ (0°C y 1,013 bar) |
| Densidad (Estado Gaseoso) | 70,79 kg/m ³ (-253°C y 1 bar) |
| Temperatura de ebullición | -252,761°C |
| Poder calorífico superior | 141,86 MJ/kg |
| Poder calorífico inferior | 120.1 MJ/kg – 10,05 kJ/m ³ |
| Temperatura de llama en aire | 2045 °C |

Tabla 2. Características del Hidrogeno. Fuente:(Elaboración propia).

6.1. LOS COLORES DEL HIDROGENO

El hidrogeno no es un combustible primario que se encuentre directamente en la naturaleza, sino que siempre está ligado a otros elementos formando compuestos. Es un elemento el cual debe ser producido a partir de diversas fuentes de energía y mediante varios métodos de producción, tal y como se muestra en la siguiente figura:

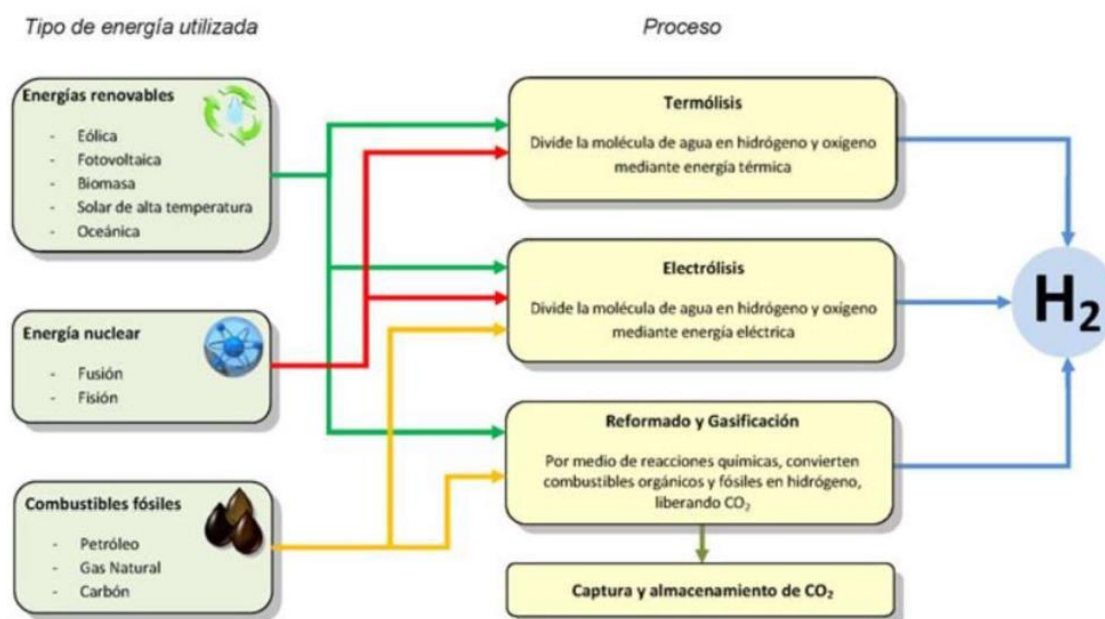


Ilustración 8. Proceso del Hidrogeno. Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2023).

En España el hidrogeno que más es consumido es del tipo gris, mayormente empleado como materia prima en refinerías (aproximadamente el 70%) y en la fabricación de productos químicos (alrededor del 25%). El restante porcentaje residual se destina a sectores como el metalúrgico. Frecuentemente, la producción se lleva a cabo dentro de las propias instalaciones de consumo mediante procesos de reformado con vapor de gas natural (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2023).



Ilustración 9. Colores y tipos de Hidrogeno. Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2023).

Dependiendo del tipo de energía utilizada y el método de producción aplicado, se pueden identificar distintas formas de energía, clasificadas según los estándares establecidos por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), es por eso que a continuación se realizara una comparativa de las emisiones generadas por cada uno de los tipos de hidrogeno que se podrían aplicar a la línea 122.

Para partir hacia el cálculo de las emisiones de CO₂ generadas por el hidrogeno tendremos se tomará como modelo de tren de ejemplo el S-599 el cual es el que frecuente en la línea 122 y es el más apto para el cambio o aplicación del uso de este combustible sostenible, así mismo se tendrán como partida inicial los siguientes valores (Alstom 2022; RENFE 2023).

| | | |
|--------------------------------------|--------|-----------------------|
| Consumo S - 599 | 0,45 | kgH ₂ /km |
| Trayecto (Ida y vuelta) | 222 | km |
| Cantidad de trenes | 9 | ud/día |
| Recorrido Total Diario | 1998 | km/día |
| Consumo trayecto Total Diario | 899,1 | kgH ₂ /día |
| Consumo trayecto Total anual | 323676 | kgH ₂ /año |

Tabla 3. Consumo de hidrogeno anual. Fuente: (elaboración propia).

- **HIDROGENO GRIS:** es producido a partir de gas natural u otros hidrocarburos ligeros como metano o gases licuados de petróleo mediante procesos de reformado. Actualmente, el 99% del hidrogeno consumido en España es de este tipo.

A continuación, se realiza el cálculo de la cantidad de emisiones que generaría el uso del hidrogeno gris en la línea 122.

| GRIS | | |
|---|------------------|--------------|
| Cantidad de Hidrogeno Producido anual | 323676 | kg H2/año |
| Factor de Conversión de gas natural a hidrogeno | 0,29 | kgH2/kg |
| Factor de emisión de CO2 del gas natural | 2,75 | kgCO2/kg |
| Emisiones de CO2 | 257241,50 | kgCO2 |

Tabla 4. Emisiones generadas por Hidrogeno Gris. Fuente: (Elaboración propia).

- **HIDROGENO AMARILLO:** es generado a partir de electricidad precedente de la red primaria, utilizando como materia prima el agua mediante el proceso de electrolisis.

A continuación, se presenta la cantidad de emisiones que generaría el uso del hidrogeno amarillo en la línea 122.

| AMARILLO | | |
|--|-------------------|--------------|
| Cantidad de Hidrogeno Producido anual | 323676 | kg H2/año |
| Factor de emisión de CO2 del gas natural | 25,00 | kgCO2/kgH2 |
| Emisiones de CO2 | 8091900,00 | kgCO2 |

Tabla 5. Emisiones generadas por Hidrogeno Amarillo. Fuente: (Elaboración propia).

- **HIDROGENO ROSA:** es generado a partir de electricidad precedente de una energía nuclear, utilizando con materia prima el agua, mediante un proceso de electrolisis.

A continuación, se presenta la cantidad de emisiones que generaría el uso del hidrogeno rosa en la línea 122.

| ROSA | | |
|--|------------------|--------------|
| Cantidad de Hidrogeno Producido anual | 323676 | kg H2/año |
| Factor de emisión de CO2 del gas natural | 0,60 | kgCO2/kgH2 |
| Emisiones de CO2 | 194205,60 | kgCO2 |

Tabla 6. Emisiones generadas por Hidrogeno Rosa. Fuente: (Elaboración propia).

- **HIDROGENO AZUL:** este tipo de hidrogeno es producido a partir de fuentes de energía fósil al igual que el gris, pero las técnicas de captura, uso y almacenamiento de carbono es diferente ya que logra y permite reducir hasta un 95% las emisiones de CO2 generadas durante el proceso.

A continuación, se presenta la cantidad de emisiones que generaría el uso del hidrogeno azul en la línea 122.

| AZUL | | |
|--|------------------|--------------|
| Cantidad de Hidrogeno Producido anual | 323676 | kg H2/año |
| Factor de emisión de CO2 del gas natural | 0,95 | kgCO2/kgH2 |
| Emisiones de CO2 | 307492,20 | kgCO2 |

Tabla 7. Emisiones generadas por Hidrogeno Azul. Fuente: (Elaboración propia).

- **HIDROGENO MARRÓN:** es generado a partir pirolisis de metano, en el cual se genera carbono sólido, por lo que a diferencia del hidrogeno azul, no es necesaria la captura del carbono resultante.

A continuación, se presenta la cantidad de emisiones que generaría el uso del hidrogeno marrón en la línea 122.

| MARRÓN | | |
|--|-------------------|--------------|
| Cantidad de Hidrogeno Producido anual | 323676 | kg H2/año |
| Factor de emisión de CO2 del gas natural | 25,64 | kgCO2/kgH2 |
| Emisiones de CO2 | 8299052,64 | kgCO2 |

Tabla 8. Emisiones generadas por Hidrogeno Marrón. Fuente: (Elaboración propia).

- **HIDROGENO VERDE:** es generado a partir de electricidad renovable, utilizado como materia prima el agua, mediante un proceso de electrolisis. Así mismo, el hidrogeno obtenido mediante el reformado del biogás o la conservación bioquímica de la biomasa, siempre que se cumplan los requisitos de sostenibilidad establecidos, tendrá carácter renovable.

A continuación, se presenta la cantidad de emisiones que generaría el uso del hidrogeno verde en la línea 122.

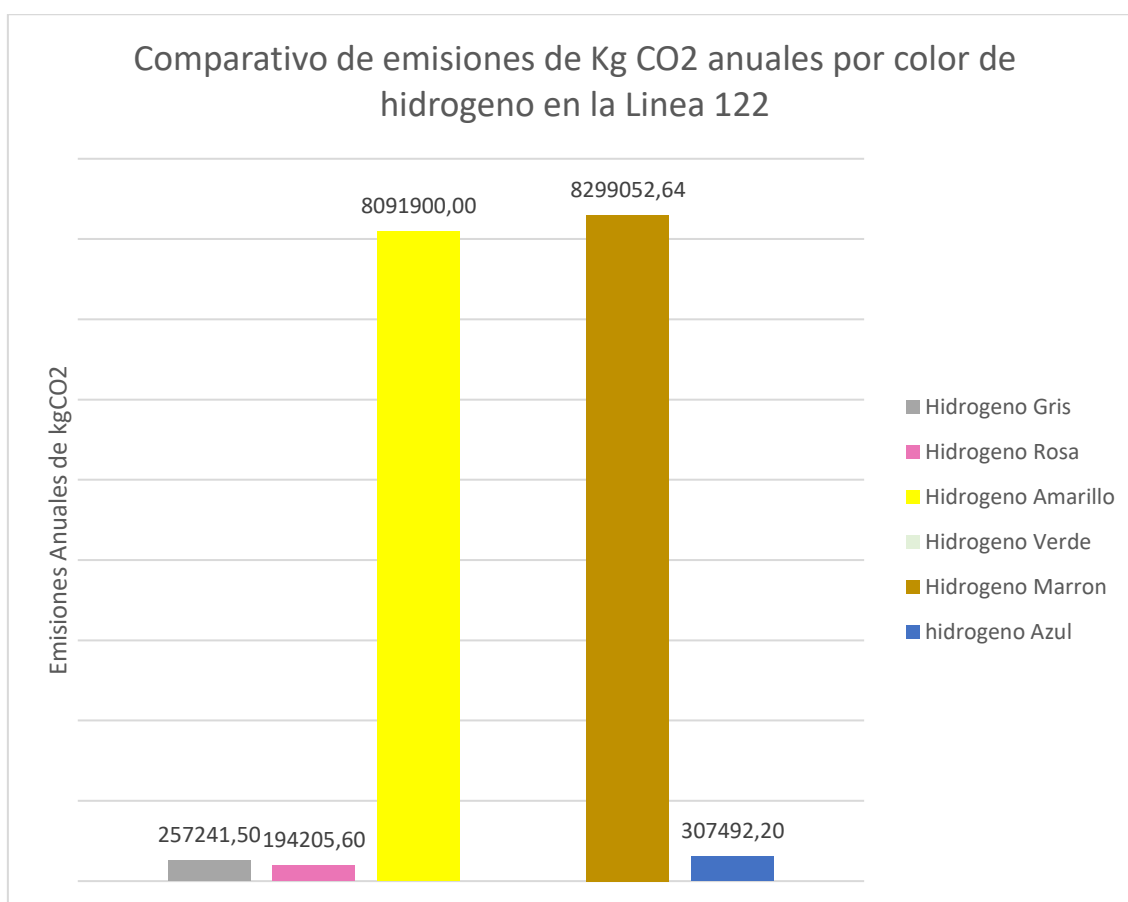
| VERDE | | |
|--|-------------|--------------|
| Cantidad de Hidrogeno Producido anual | 323676 | kg H2/año |
| Factor de emisión de CO2 del gas natural | 0,00 | kgCO2/kgH2 |
| Emisiones de CO2 | 0,00 | kgCO2 |

Tabla 9. Emisiones generadas por Hidrogeno Verde. Fuente: (Elaboración propia).

A continuación, se muestra la tabla resumen respecto a la cantidad de kgCO2 anuales producidos por cada uno de los tipos de hidrógenos que se podrían utilizar en la línea ferroviaria 122.

| EMISIONES ANUALES | | |
|--------------------|-------------------|-------|
| Hidrogeno Gris | 257241,50 | kgCO2 |
| Hidrogeno Rosa | 194205,60 | kgCO2 |
| Hidrogeno Marrón | 8299052,64 | kgCO2 |
| hidrogeno Azul | 307492,20 | kgCO2 |
| Hidrogeno Amarillo | 8091900,00 | kgCO2 |
| Hidrogeno Verde | 0,00 | kgCO2 |

Tabla 10. Resumen de emisiones Anuales por Colores. Fuente: (Elaboración propia).



Grafica 1. Comparación de emisiones de CO2 producidas por tipos de hidrogeno en la línea férrea 122.

Fuente: (Elaboración propia).

cómo se puede observar el hidrógeno marrón tiene las mayores emisiones de CO_2 entre los tipos de hidrógeno considerados, debido a la alta intensidad de carbono del proceso de gasificación del carbón. comparado con otras opciones, el hidrógeno marrón tiene un impacto ambiental significativamente mayor, lo que lo hace menos atractivo desde el punto de vista de las emisiones de gases de efecto invernadero a comparación del hidrogeno verde que sus emisiones son nulas.

a partir de lo anterior se ratifica el uso del hidrogeno verde como la selección más apropiada a la aplicación de la línea ferroviaria 122.

CAPÍTULO 7. CADENA DE VALOR DEL HIDROGENO VERDE

A continuación, se abordan las tecnologías relacionadas con la producción y el almacenamiento del hidrógeno verde, ofreciendo una amplia visión sobre los distintos usos y aplicaciones de este recurso energético renovable. Posteriormente, se detallan los eslabones fundamentales de la cadena de valor del hidrógeno, desglosando cada uno de ellos para la implementación en el presente proyecto (Ana 2023; TresCantos 2023).

7.1. PRODUCCIÓN

Este constituye el punto inicial de la cadena, marcando el inicio del proceso donde se emplean diversas tecnologías. En esta etapa, se exploran diferentes métodos de producción que aprovechan fuentes de energía renovable, su producción es obtenida mediante el proceso de electrolisis del agua, el cual consiste en la descomposición de las moléculas de agua en oxígeno e hidrógeno, tal como se muestra en la siguiente figura.

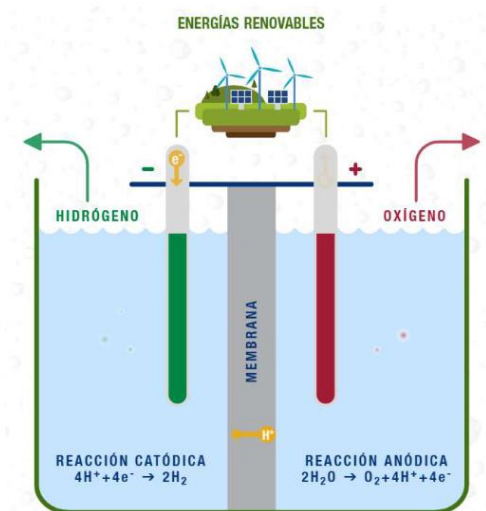


Ilustración 10. producción del hidrogeno verde. Fuente:(IBERDROLA CORPORATIVA 2024b).

Este método de generación energética utiliza una tecnología consolidada, como la electrólisis del agua, para aprovechar los excedentes de energía eléctrica y producir hidrógeno verde.

Teniendo en cuenta lo anterior, en España, se tiene una de las plantas de hidrógeno verde más eficientes de la Unión Europea es operada por Fertiberia en Puertollano, Castilla-La Mancha, a tan solo 355 km de la ciudad de Ávila, con una capacidad de producción superior a 200,000 toneladas anuales. Iberdrola colabora en este proyecto para impulsar la producción de hidrógeno sostenible.

A sí mismo, se podría formar una alianza con Fertiberia, Iberdrola y demás empresas que en el futura quieran iniciar con el desarrollo del hidrogeno verde. Por otro lado, sería de gran importancia saber cuánta energía consumiría la producción del hidrogeno verde para abastecer anualmente la línea 122, suponiendo que el proceso de electrolisis tiene una eficiencia de un 70% y que 1 kg de hidrógeno tiene un poder calorífico de 38.58 kWh/kg (Lipúzcoa 2022) se obtiene lo siguiente:

| Energía necesaria para la producción anual de hidrogeno para la línea ferroviaria 122 | | |
|--|--------------------|------------|
| Trayecto (Ida y vuelta) | 111 | km |
| Cantidad de trenes | 9 | Ud/día |
| Recorrido Total Diario | 1998 | km/día |
| Eficiencia de electrolisis % (Supuesto) | 70% | |
| Hidrogeno diario Necesario (kg) | 899,1 | kgH2/día |
| Poder Calorífico de energía del hidrogeno | 38,58 | kWh |
| Energía Necesaria diaria (kWh) | 49553 | kWh |
| Energía Necesaria anual (kWh) | 17839171,54 | kWh |

Tabla 11. Energía necesaria para la producción anual de hidrogeno para la línea ferroviaria 122. Fuente: (Elaboración propia).

Estos cálculos proporcionan una estimación de la producción de hidrógeno verde y la energía necesaria que requeriría las empresas para poder abastecer de manera adecuada y para operar en línea ferroviaria 122, tales como:

Además, Cepsa planea inaugurar en 2027 parques energéticos en San Roque (Cádiz) y Palos de la Frontera (Huelva), posicionándose como uno de los mayores proyectos en Europa. Enagás, Naturgy, Fertiberia, y Vestas, junto con Copenhagen Infrastructure Partners (CIP), desarrollan un consorcio para producir hidrógeno y amoníaco en Teruel (Aragón), con el objetivo de abastecer el 30% del mercado español o Repsol que lidera varios proyectos de producción de hidrógeno verde a futuro. El consorcio HyDeal España, liderado por DH2 Energy e integrado por ArcelorMittal, Enagás y Grupo Fertiberia, también planea construir una planta de hidrógeno (Nuevo 2024).

Teniendo en cuenta lo anterior podemos afirmar que en relación a la producción del hidrogeno podríamos contar en el presente y en el futuro con diferentes puntos de producción de hidrogeno verde para poder abastecer la línea 122, la cual sería unos 17839171,54 kWh por año, cabe aclarar que este sería para el suministro del modelo S-599.

7.2. ALMACENAMIENTO

El sector ferroviario ofrece varias ventajas en comparación con otros medios de transporte, especialmente en lo que respecta a la capacidad de incorporar dispositivos de gran tamaño. Las dimensiones de los trenes permiten integrar equipos voluminosos y pesados sin comprometer la eficiencia operativa. Esta capacidad facilita la implementación de tecnologías avanzadas, como sistemas de almacenamiento de hidrógeno a alta presión, grandes baterías, o equipos de electrificación, contribuyendo a una mayor flexibilidad y potencial de innovación en la infraestructura ferroviaria.

El hidrógeno puede almacenarse en distintos estados: gaseoso, líquido o sólido, dependiendo de las condiciones de almacenamiento y transporte. La selección

de la opción óptima depende de diversos factores, como la distancia a recorrer, la infraestructura disponible y las necesidades específicas de cada aplicación. Es esencial analizar las tecnologías y sistemas adecuados para garantizar un almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno, así como su posterior distribución a los puntos de consumo.

El almacenamiento de hidrógeno no solo es una tecnología prometedora para la descarbonización de sectores donde la electrificación no es suficiente, sino que también ofrece una solución al desafío de la intermitencia de las fuentes de energía renovables. Permite almacenar el excedente de energía generado durante periodos favorables y utilizarlo en momentos de baja producción para satisfacer la demanda energética.

A continuación, se presentan las alternativas para determinar la mejor opción de almacenamiento y transporte a considerar en la aplicación de la línea ferroviaria 122.

| | |
|-----------------------------|--|
| GAS COMPRIMIDO |  |
| LIQUIDO |  |
| CRIO- COMPRIMIDO |  |

Ilustración 11. Métodos de Almacenamiento de hidrogeno Verde. Fuente: (Elaboración propia).

Para este proyecto, el almacenamiento de hidrógeno en el ferrocarril puede realizarse en tanques, ya sea en estado líquido o gaseoso. El almacenamiento en estado líquido requiere mantener el hidrógeno a temperaturas extremadamente bajas, utilizando técnicas que aún no están completamente desarrolladas.

Para este proyecto, se seleccionará uno de los métodos más conocidos y ampliamente estudiados para almacenar hidrógeno en trenes: el uso de tanques a alta presión. Este método consiste en comprimir el hidrógeno producido hasta alcanzar una presión de aproximadamente 35 MPa (350 bar). Luego, este hidrógeno comprimido se almacena en tanques diseñados específicamente para soportar altas presiones, fabricados con materiales robustos y ligeros, como compuestos de fibra de carbono, para garantizar seguridad y eficiencia. Estos tanques están equipados con válvulas y reguladores de presión que mantienen el hidrógeno en condiciones seguras, evitando fugas y gestionando la presión interna de manera efectiva.

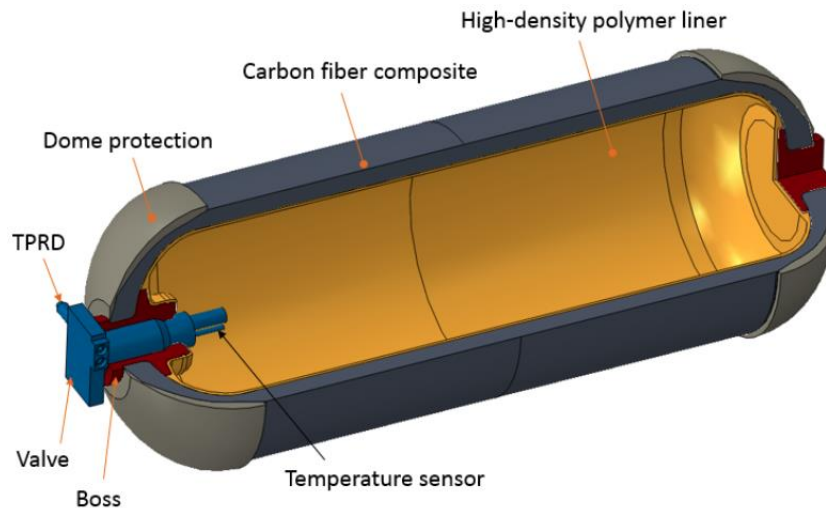


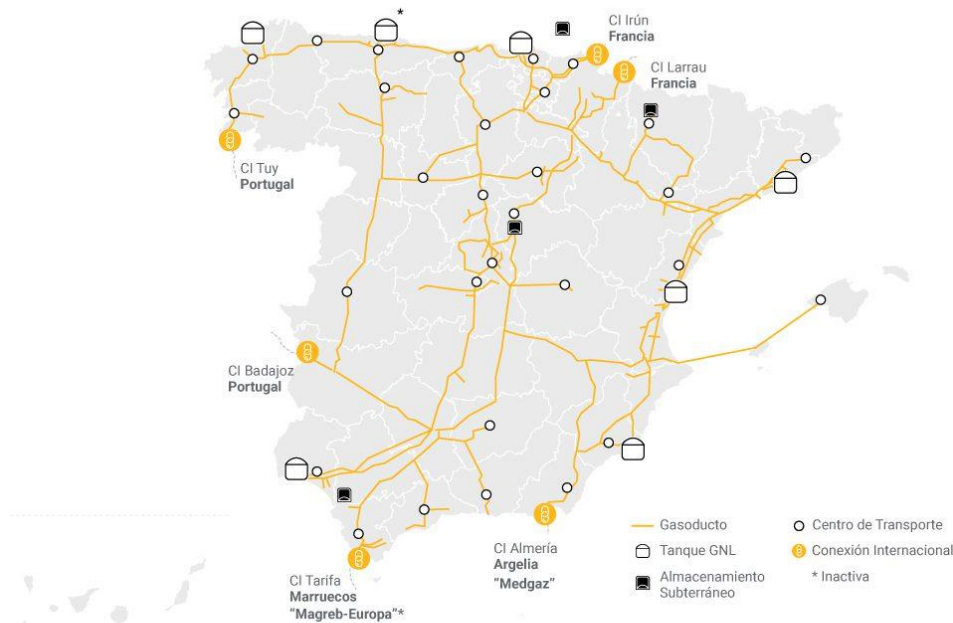
Ilustración 12. Tanque de material compuesto de hidrógeno comprimido. Fuente: (ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY 2019).

7.3. TRANSPORTE

Para el transporte de hidrógeno, la distancia entre el lugar de producción y el de consumo es crucial, especialmente a lo largo del recorrido entre Ávila y Salamanca. Esto es esencial para evitar fugas y mantener la pureza del hidrógeno verde. A continuación, se describen los tipos de transporte que podrían utilizarse para este combustible:

7.3.1. Gasoducto

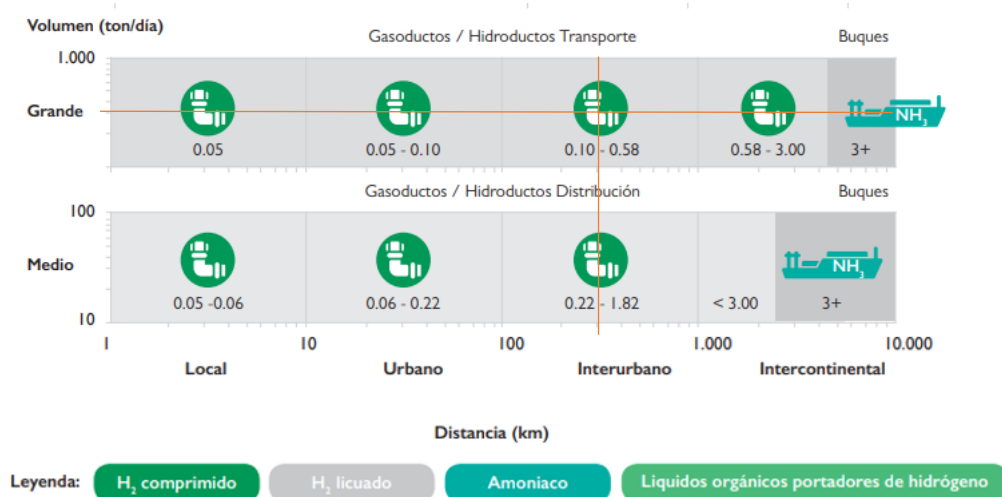
Este tipo de transporte puede aprovechar una amplia variedad de infraestructuras ya existentes en España y ofrece un método de bajo coste operativo. Sin embargo, cuando se trata de transportar grandes cantidades de hidrógeno, pueden surgir desafíos específicos que necesitan ser abordados para asegurar la eficiencia y seguridad del proceso (Enagás 2024).



Fuente: ENAGAS
 (*) El gasoducto Magreb-Europa se encuentra inactivo desde el 31 de octubre de 2021.

Ilustración 13. Gaseoductos existentes en España. Fuente: (Delgado 2024).

Con base en lo anterior, se estima un costo de transporte utilizando la gráfica 2 y considerando como criterios iniciales la distancia de aproximadamente 300 km entre la planta de hidrógeno de Fortiberia en Puertollano y la estación de Ávila, seleccionada previamente como el punto de repostaje para abastecer la línea 122.

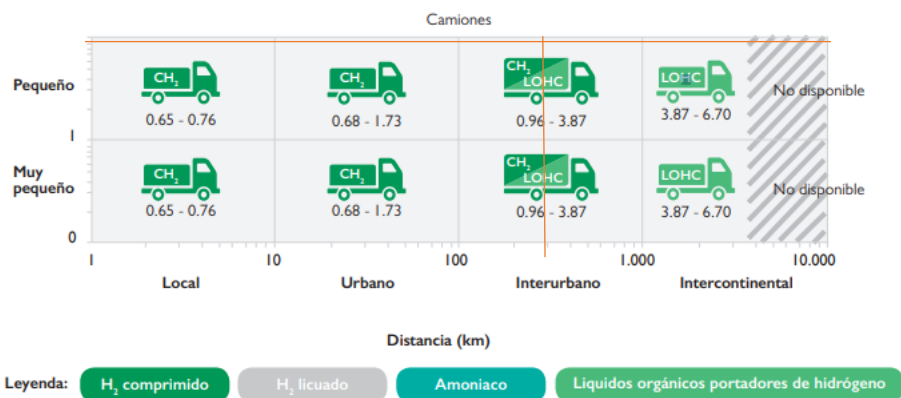


Grafica 2. Costes de transporte de hidrogeno en función de la distancia recorrida y volumen transportado (\$/kg). Fuente: (Hydrogen Economy 2020).

Se observa que, para una distancia aproximada de 300 km y un consumo anual de hidrógeno de 357 toneladas anuales, el costo de transporte a través de gasoducto podría alcanzar los 0,34 \$/kg, equivalentes a 0,29 €/kg. Esto implica que el coste anual estimado para transportar el hidrógeno necesario para abastecer la línea ferroviaria 122 sería de aproximadamente 93.866,04 €. Este cálculo refleja la inversión necesaria exclusivamente en el transporte del hidrógeno.

7.3.2. Transporte por Carretera

Este medio de transporte puede realizarse en camiones cisterna o en botellas, con capacidades de hasta 360 kg de hidrógeno comprimido y 4.300 kg de hidrógeno líquido. El uso de botellas ofrece flexibilidad, permitiendo suministrar hidrógeno en diferentes purzas y cantidades variables según las necesidades específicas.



Grafica 3. Costes de transporte de hidrogeno en función de la distancia recorrida y volumen transportado (\$/kg). Fuente: (Hydrogen Economy 2020).

Para este caso de transporte es interesante recalcar el medio de almacenamiento escogido para suministrar hidrogeno a la línea 122 para un tren modelo S-599, el cual era mediante hidrogeno comprimido almacenado en tanques el cual puede soportar altas presiones, tal y como se observa en la siguiente tabla:

| Coste transporte por Carretera | | |
|--|----------|-----------|
| Consumo S - 599 | 0,45 | kgH2/km |
| Trayecto (Ida y vuelta) | 222 | km |
| Cantidad de trenes | 9 | ud/día |
| Recorrido Total Diario | 1998 | km/día |
| Consumo trayecto Total Diario | 899,1 | kgH2/día |
| Consumo trayecto Total Diario | 1 | TonH2/día |
| Consumo trayecto Total Anual | 323676 | kgH2/año |
| Consumo trayecto Total Anual | 357 | TonH2/año |
| Capacidad De camión hidrogeno comprimido | 360 | kg |
| Cantidad de camiones Anual | 899,1 | ud/año |
| Coste Transporte en carretera (Estimado) | 2,4 | \$/Kg |
| Coste Transporte en carretera (conversión) | 2,17 | €/kg |
| Coste Transporte en carretera | 702376,9 | €/año |

Tabla 12. Estimación de coste de transporte de hidrogeno por carretera. Fuente: (Elaboración propia).

Según la tabla anterior, se puede observar que el consumo diario estimado para el trayecto de la línea 122 es de aproximadamente 899 kg de hidrógeno. Para satisfacer esta demanda, se requerirían diariamente 2,5 camiones pequeños, cada uno con una capacidad de transporte de 2 toneladas de hidrógeno comprimido. Esto se traduce en aproximadamente 899 camiones anuales.

Según la gráfica 3, el coste de transporte por carretera se sitúa en torno a 2,4 \$/kg, lo que equivale a 2,17 €/kg. Considerando la distancia de 300 km entre la planta productora de hidrógeno y la estación de Ávila, el coste anual aproximado para el transporte de hidrógeno por carretera se estima en 703.376,9 €.

7.3.3. Transporte por Ferrocarril

Este método de transporte puede realizarse mediante el uso de vagones cisterna, que tienen mayores dimensiones que los camiones cisterna. Cada vagón puede transportar entre 2.900 y 9.100 kg de hidrógeno (Badía 2019), lo que permite el traslado eficiente de grandes cantidades de este combustible.

Ahora bien, suponiendo que el vagón cisterna especializado pueda transportar 10 Ton de hidrogeno comprimido, considerando que la distancia entre la planta de hidrógeno de Fortiberia en Puertollano y la estacion de Ávila es de 300 km se podría asumir que:

| Coste transporte por ferrocarril | | |
|--|----------|-----------|
| Consumo S - 599 | 0,45 | kgH2/km |
| Trayecto (Ida y vuelta) | 222 | km |
| Cantidad de trenes | 9 | ud/día |
| Recorrido Total Diario | 1998 | km/día |
| Consumo trayecto Total Diario | 899,1 | kgH2/día |
| Consumo trayecto Total Diario | 1 | TonH2/día |
| Consumo trayecto Total Anual | 323676 | kgH2/año |
| Consumo trayecto Total Anual | 357 | TonH2/año |
| Capacidad de un vagón de hidrogeno comprimido | 10000 | kg |
| Cantidad de Vagones Anual | 35,7 | ud/año |
| Coste viaje Transporte vía ferroviaria | 800 | €/viaje |
| Coste Transporte vía ferroviaria | 0,08 | €/kg |
| Coste Transporte vía ferroviaria | 25894,08 | €/año |

Tabla 13. Estimación de coste de transporte de hidrogeno por ferrocarril. Fuente: (Elaboración propia).

Según la tabla anterior, se puede observar que el consumo diario estimado para el trayecto de la línea 122 es de aproximadamente 899 kg de hidrógeno. Para satisfacer esta demanda, se requerirían diariamente 1 Vagón por día, cada uno con una capacidad de transporte de 1 tonelada de hidrógeno comprimido, sin embargo, este al poder transportar 10 ton por vagón, se puede ahorrar costes en logística, Esto se traduce en aproximadamente 46 vagones anuales aproximadamente.

El coste de transporte por ferrocarril se sitúa en torno a 800 €/viaje, lo que equivale a 0,08 €/kg. Considerando la distancia de 300 km entre la planta productora de hidrógeno y la estación de Ávila, el coste anual aproximado para el transporte de hidrógeno por ferrocarril se estima en 25.894,08 € anuales.

7.3.4. Transporte Marítimo

Este medio de transporte puede llevarse a cabo utilizando tanques de hasta 70 toneladas, aunque se reserva principalmente para grandes cantidades y destinos muy distantes.

Sin embargo, para el caso de la línea 122, no lo aplicaremos debido a que no sería necesaria transportar hidrógeno por medio de barcos, ya que tenemos la posibilidad de producir este combustible verde dentro del país o en países vecinos, moviéndolo por tierra.

A partir de lo anterior se puede realizar una comparación de costes para sacar las mejores alternativas en relación al transporte del hidrógeno hacia el punto que suministrara la línea 122.

En conclusión, el transporte de hidrógeno por gasoducto generalmente resulta ser más económico que el transporte por carretera debido a los menores costos operativos y la capacidad de mover grandes volúmenes de gas a largas distancias. Sin embargo, comparado con el transporte ferroviario, el uso de gasoductos puede ser más costoso, especialmente si es necesario construir nueva infraestructura o realizar conversiones significativas en los gasoductos existentes para adaptarlos al transporte de hidrógeno.

El transporte por gasoducto es particularmente ventajoso si se puede aprovechar la infraestructura ya existente, la cual podría ser modificada para el transporte de hidrógeno a un coste relativamente bajo. En tal caso, la economía de escala y la reducción de emisiones asociadas con este método hacen que sea una opción atractiva.

No obstante, si no se dispone de gasoductos adecuados o si las modificaciones necesarias son demasiado costosas, la forma más económica y eficiente de transportar hidrógeno verde a la estación de Ávila sería mediante ferrocarril. El transporte ferroviario permite una flexibilidad significativa en términos de rutas y horarios y puede ser más rentable en escenarios donde se deben transportar cantidades específicas de hidrógeno a distancias relativamente largas sin los altos costos de inversión inicial requeridos para la construcción o conversión de gasoductos.

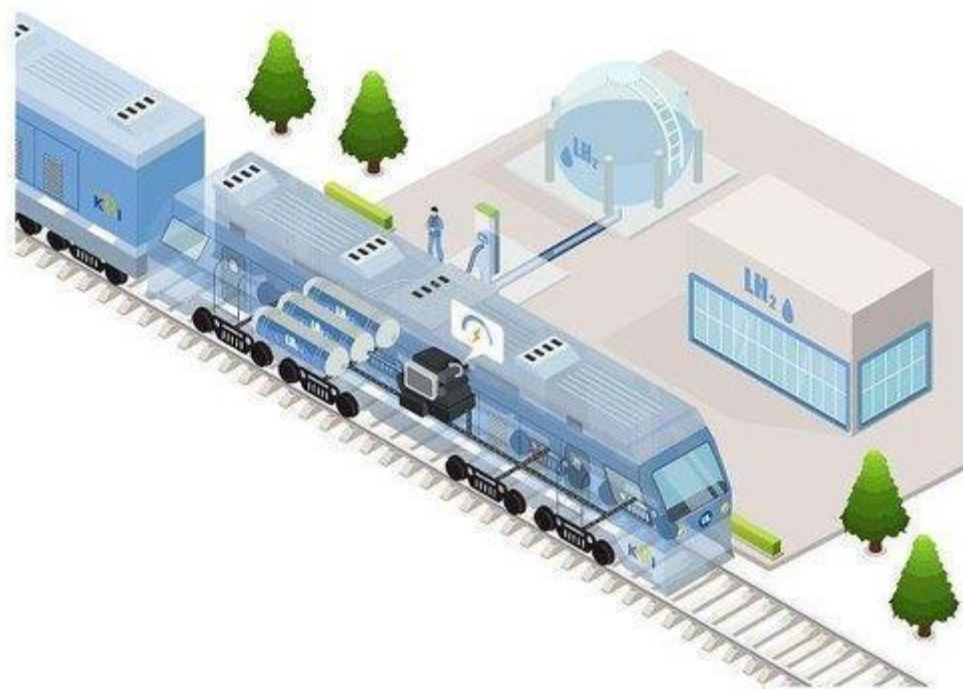
7.4. SUMINISTRO

El repostaje del hidrógeno verde es comparable al de diésel o gasolina, ofreciendo una ventaja significativa en comparación con las baterías eléctricas. Mientras que cargar completamente un vehículo eléctrico puede llevar entre 5 y 6 horas, el repostaje de hidrógeno solo requiere aproximadamente 5 minutos.

En el contexto del sistema ferroviario, conforme a la medida 16 de la Hoja de Ruta del Hidrógeno en España, se está comprometido con el desarrollo de una infraestructura nacional ferroviaria de hidrógeno. Por lo tanto, es crucial implementar estaciones de servicio que suministren hidrógeno para asegurar el funcionamiento efectivo de estos trayectos.

Así mismo, es fundamental establecer una estación de repostaje de hidrógeno a lo largo del recorrido. La implementación de esta estación debe considerar varios factores clave, como la accesibilidad, la infraestructura existente, la demanda y la distancia entre estaciones, con el objetivo de optimizar el uso del hidrógeno y minimizar las interrupciones en el servicio. En este contexto, se han propuesto tres alternativas:

A continuación, se presenta un ejemplo de una estación de repostaje de hidrógeno, que podría implementarse en la estación de Ávila.



Il·lustració 14. Ejemplo de una Estacion de Repostaje. Fuente:(Instituto de Investigación Ferroviaria de Corea del Sur 2021).

"El coste de inversión de una hidrogenera en 2023 oscila entre 0,2 y 2 millones de euros y depende del tipo de hidrogenera y de la capacidad de dispensación de hidrógeno" (Instituto de Investigación Ferroviaria de Corea del Sur 2021).

En los próximos 5 a 10 años, los costes de instalación (CAPEX) previstos, son los siguientes

| Capacidad hidrogenera (kg Hidrógeno / día) | Tipo de hidrogenera | | | |
|--|----------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|
| | Reformado de vapor on-site | Electrólisis on-site | Hidrógeno verde gaseoso off-site | Hidrógeno líquido off-site |
| 100 | 0,9-2,6 | 1,0-2,6 | 1,1-1,8 | 0,7-2,1 |
| 480 | 1,9-4,6 | 1,9-5,4 | 1,9-2,4 | 1,5-2,9 |
| 1.000 | 3,2-4,8 | 4,0-7,9 | 3,2 | 2,4 |

Tabla 14. Coste de capital de una Estacion de servicio de hidrogeno por tipo y capacidad. Fuente: (Griñan 2024).

Teniendo en cuenta la anterior tabla y sabiendo ya que el consumo diario de hidrogeno en la línea 122 son de 899kg, el coste aproximado podría ser alrededor de 3,2 millones de euros, estos precios podrán variar según la ubicación, tamaño, etc.

7.5. USOS FINALES

El hidrógeno verde ofrece una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores, incluyendo la industria, la generación de energía, el sector residencial y la movilidad. En la industria, se utiliza como materia prima en la producción de productos químicos, refinación de petróleo y fabricación de acero, entre otros. En el sector energético, se emplea en sistemas de almacenamiento de energía, cogeneración y generación de electricidad a partir de pilas de combustible. En el ámbito residencial, se utiliza para calefacción, cocina y electrificación de viviendas. En la movilidad, el hidrógeno se utiliza como combustible en vehículos de pila de combustible y en aplicaciones de transporte pesado, como autobuses, camiones y ferrocarriles (Griñan 2024).

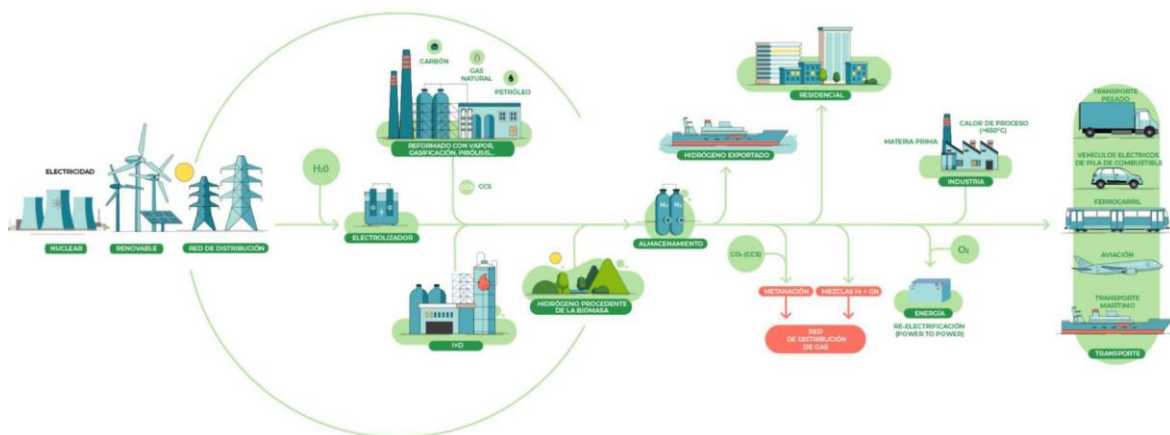


Ilustración 15. cadena de valor del hidrogeno. Fuente: (Asociación Española del Hidrógeno 2024).

Es por eso que el hidrógeno renovable, también conocido como hidrógeno verde, se posiciona como un recurso energético esencial proveniente de fuentes renovables y libre de emisiones de CO₂.

Así mismo el uso del hidrogeno verde en la línea ferroviaria 122, se posiciona como una alternativa prometedora, ya que su producción y uso contribuirían significativamente a mitigar los impactos negativos del cambio climático, al tiempo que fomentaría la innovación tecnológica en el ámbito ferroviario, siendo un ejemplo a seguir para demás proyectos relacionados con la mitigación del CO₂, en el ámbito del transporte y movilidad sostenible.

Por otro lado, tanto en los trenes regionales como en los de carga, la utilización de baterías de hidrógeno se presenta como una solución viable y sostenible, adaptándose perfectamente a las necesidades de la línea 122 entre Ávila y Salamanca.

La implementación de trenes con baterías de hidrógeno en la línea 122 contribuiría a una significativa reducción de emisiones de CO₂, mejorando la calidad del aire en las áreas urbanas y rurales por donde pasa el tren. Además, los trenes de hidrógeno son conocidos por su funcionamiento silencioso, lo que resultaría en una disminución notable de la contaminación acústica a lo largo de la ruta, la cual se verá en capítulos posteriores.

La tecnología de baterías de hidrógeno permite que los trenes operen eficientemente en líneas no electrificadas, como es el caso de la línea 122, sin necesidad de grandes inversiones en infraestructura de electrificación. Esto no solo es económicamente viable, sino que también facilita la descarbonización del transporte ferroviario, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.

En resumen, la adopción de baterías de hidrógeno en la línea 122 representa una oportunidad para avanzar hacia un transporte ferroviario más limpio y eficiente, aprovechando una tecnología que ofrece múltiples ventajas ambientales y operativas.

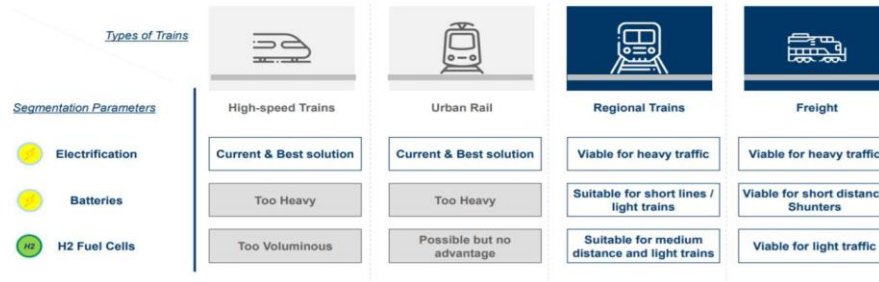


Ilustración 16. Tipos de trenes y tecnologías. Fuente: (IACpartners 2024).

Como se observa en la ilustración 17 ("Tipos de trenes y tecnologías"), las baterías de hidrógeno comprimido son especialmente adecuadas para trenes de media distancia que operan en rutas con un tráfico no demasiado intenso. Estas baterías ofrecen una solución eficiente y sostenible, ya que proporcionan la energía necesaria para cubrir distancias moderadas sin las emisiones contaminantes asociadas con los combustibles fósiles.

La línea 122 entre Ávila y Salamanca es un claro ejemplo de una ruta donde el uso de baterías de hidrógeno comprimido puede resultar ventajoso. Dado que esta línea tiene un tráfico moderado y se trata de una distancia relativamente corta, el uso de trenes equipados con esta tecnología, como el modelo S-599, permite no solo mantener un servicio regular y fiable. Además, la implementación de esta tecnología encaja bien con las necesidades operativas de la línea, asegurando una transición eficiente hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

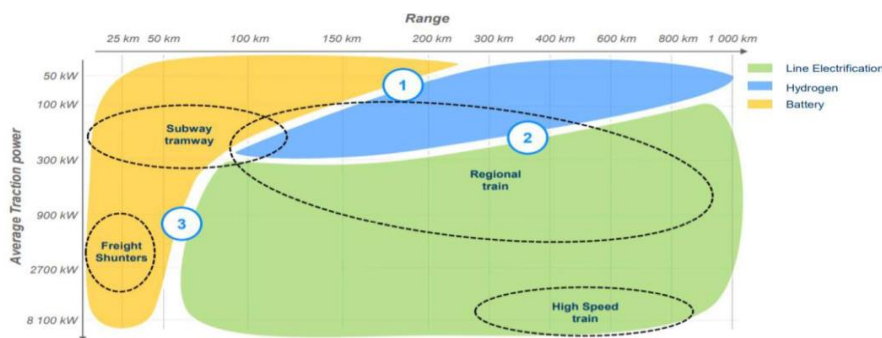


Ilustración 17. Rango de aplicación del hidrogeno en el ferrocarril. Fuente: (IACpartners 2024).

CAPÍTULO 8. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE FUENTES DE TRACCIÓN EN EL SISTEMA FERROVIARIO DE LA LÍNEA 122

En este capítulo se realizará un comparativo respecto a las diferentes tecnologías como fuentes de tracción que podrían aplicarse a la línea 122. Las tecnologías analizadas incluyen sistemas de almacenamiento de energía como las baterías, el gas natural, y el hidrógeno. Estos sistemas se evalúan en función de varios criterios fundamentales como la eficiencia, las emisiones, el suministro, la seguridad operacional y otras características funcionales clave.

Esta comparación es esencial para identificar la tecnología más adecuada que se adapte a las necesidades específicas de la línea, garantizando un equilibrio entre la sostenibilidad medioambiental, la eficiencia operativa. A continuación, se detallan brevemente cada una de las tecnologías antes de pasar a la tabla comparativa:

- **Sistemas de Almacenamiento de Energía:** Este tipo de tracción, generalmente asociado a baterías, volantes de inercia y supercondensadores, ofrece una eficiencia alta, pero depende completamente de la fuente externa de energía que se utilice para su recarga. Aunque no emite contaminantes directamente, su impacto ambiental puede variar según cómo se genere la electricidad. En términos de seguridad, presenta un riesgo relativamente bajo condiciones normales, aunque puede ser vulnerable a fallos eléctricos en caso de accidentes.
- **Gas Natural:** El gas natural se utiliza de diferentes formas, ya sea comprimido o licuado. Presenta una alta eficiencia, especialmente en términos de uso de energía, y emite menos CO₂ y NO_x que los combustibles fósiles tradicionales, pero sigue siendo una fuente de energía no renovable. En cuanto a su disponibilidad, es una opción viable debido a la existencia de una amplia red de suministro, aunque está sujeta a la fluctuación del mercado del

petróleo. Sin embargo, la seguridad en el manejo de gas a alta presión es crucial para prevenir accidentes.

- **Hidrogeno:** Tal y como se ha comentado a lo largo del trabajo es una tecnología emergente en el sector del transporte ferroviario, particularmente en su forma comprimida. Aunque su eficiencia es moderada comparada con otras tecnologías, el hidrógeno ofrece una ventaja significativa en cuanto a emisiones, ya que no genera contaminantes durante su uso en pilas de combustible o motores de combustión interna. Sin embargo, uno de sus mayores desafíos radica en la falta de una red de suministro establecida, ya que todavía se encuentra en fase experimental.

A partir de lo anterior, se presenta una tabla comparativa (ver tabla 15) de los diferentes métodos de tracción que podrían utilizarse como alternativa a los combustibles fósiles. Esta comparación busca identificar la mejor alternativa en cuanto a sostenibilidad, que ayuden a reducir la contaminación y avanzar hacia un modelo de transporte más ecológico y respetuoso con el medio ambiente.

| | Sistemas de almacenamiento de Energía | Gas Natural | Hidrogeno |
|------------------------------------|---|--|---|
| Factor | <ul style="list-style-type: none"> Baterías. Volantes de Inercia. Supercondensadores. | <ul style="list-style-type: none"> Gas licuado. Gas Natural Comprimido. Gas Licuado de Petróleo. | <ul style="list-style-type: none"> Motor de combustible interna. Pilas de combustible. |
| Eficiencia | Alta | Alta | Media |
| Emisiones | Depende de la fuente externa de energía. | Media - Alta Emite CO2 y poca cantidad NOx. | Baja Cero emisiones a nivel tren. |
| Suministro | N/A | Media - Alta <ul style="list-style-type: none"> gran cantidad de instalaciones, puntos de suministro, etc. Derivados del petróleo por lo que dependen del mercado. Reservas limitadas. | Media <ul style="list-style-type: none"> 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. Gran Cantidad de reservas. Tecnología relativamente nueva. |
| Seguridad Operacional | Media-Alta <ul style="list-style-type: none"> no presentaría ningún riesgo en ocasiones comunes. En caso de algún accidente produciría descargas eléctricas. | Alta Medidas estrictas para la operación en el transporte de este este combustible a presiones muy altas. | Media-Baja <ul style="list-style-type: none"> En espacios Abierto se disipa y no genera peligro. En espacios cerrados podría generar explosiones. |
| Características Funcionales | Baja <ul style="list-style-type: none"> Peso elevado. Autonomía limitada. | Alta Compatible con locomotoras diésel. | Medio – Alta <ul style="list-style-type: none"> Volumen condicionado por la presión, pero factor limitante Reducción del ruido, vibraciones y emisiones. |

Tabla 15. comparativa de alternativas de tracción ferroviaria en la línea 122. Fuente: (Elaboración propia).

A partir de la tabla 15 desarrollada anteriormente sobre las distintas alternativas de tracción ferroviaria, se puede decir que los sistemas de tracción de energía, cuando se comparan directamente, ofrecen una solución altamente competitiva para la línea ferroviaria 122. Sin embargo, el hidrógeno presenta ventajas significativas en términos de peso y densidad energética. La densidad energética (energía por peso) y la densidad de potencia del hidrógeno son superiores a las de los sistemas de almacenamiento de energía tradicionales, lo que permite reducir los tiempos de recarga considerablemente. En términos logísticos, la recarga de hidrógeno en estado gaseoso requiere mayor volumen, lo que representa una desventaja significativa. Por ello, es necesario comprimir el hidrógeno para optimizar su almacenamiento y transporte.

Considerando las exigencias del desafío energético actual, el hidrógeno se perfila como una opción más competitiva a largo plazo en términos de emisiones para la línea ferroviaria 122, especialmente en comparación con el uso de gas natural. Una de las limitaciones técnicas de las pilas de combustible es su incapacidad para encenderse y apagarse en intervalos cortos de tiempo la cual no debería ser problema para la línea en estudio ya que solo posee 222 km de trayecto entre ida y vuelta. Sin embargo, cuando se combinan con una batería, las pilas de combustible pueden proporcionar energía continua para el movimiento del tren y, simultáneamente, recargar la batería durante el recorrido.

La generación de hidrógeno es un combustible versátil, liviano y altamente reactivo, que se obtiene mediante un proceso químico llamado electrólisis. Este método utiliza corriente eléctrica para separar el hidrógeno y el oxígeno presentes en el agua, lo que significa que, si la electricidad se obtiene de fuentes renovables, no se emitirá dióxido de carbono a la atmósfera.

Así mismo es fundamental conocer las diferentes características del hidrogeno tales como las propiedades, obtención, transporte, suministro e implementación.

CAPÍTULO 9. SELECCIÓN DE UBICACIÓN DE LA ESTACION DE REPOSTAJE PARA SUMINISTRAR LA LÍNEA 122.

9.1. ALTERNATIVA 1 – ESTACION DE ÁVILA

Esta primera alternativa consiste en instalar la estación de repostaje en la estación de tren de Ávila, que actúa como un nodo estratégico dentro de la línea ferroviaria. Esta localización es conveniente porque Ávila es una ciudad de mayor tamaño en comparación con los otros puntos en la línea, lo que permitiría una infraestructura más compleja y la posibilidad de conectar la estación de repostaje con otras iniciativas de transporte sostenible.



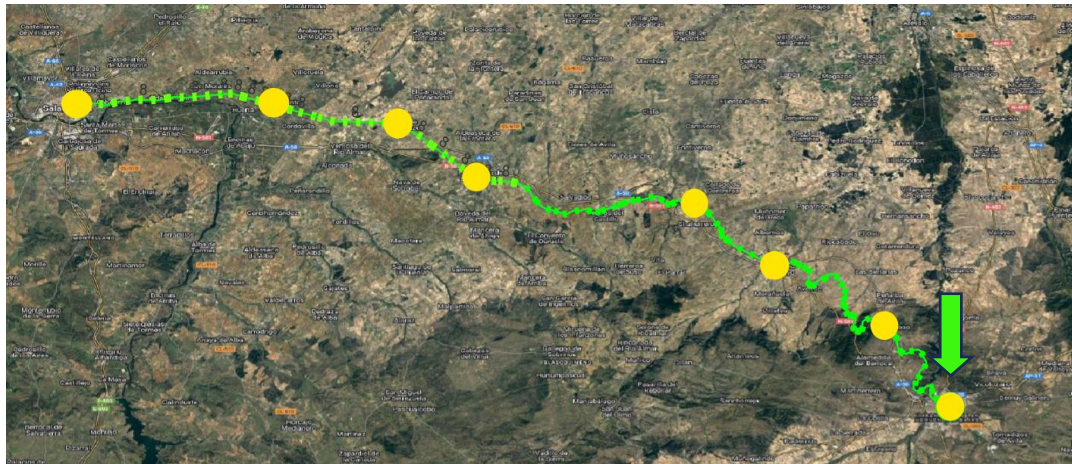
Ilustración 18. Estacion de Ávila. Fuente: (Google Earth)

- **Valoración económica**

- **Capacidad estimada:** Aproximadamente para 900 Kg de hidrogeno diarios (ver tabla 14), considerando una demanda similar con Salamanca debido a que el recorrido es de ida y vuelta, sin embargo, a futuro la demanda podrá ser menor que la de salamanca, ya que salamanca al ser más grande la estacion podría tender a una mayor afluencia de trenes y pasajeros.
- **Coste de terreno:** Ávila siendo una ciudad más pequeña, presenta menores precios de suelo, en el rango de 23 €/m² a 100 €/m² en áreas industriales o de desarrollo (Parcelas urbanas o solares en venta en Ávila (Localidad) 2024).
- **Coste Estimado Total:** El coste de una estacion para la demanda que requiere la línea 122 entre Ávila y salamanca seria aproximadamente entre 3,2 millones de euros según la tabla 14.

- **Logística del transporte**

En una ciudad como Ávila, se cuenta con una infraestructura más desarrollada, tanto en términos de transporte como en la disponibilidad de suministros. Esto significa que el transporte de hidrógeno hacia una estación de repostaje dentro de la ciudad sería más barato. Hay acceso a redes de carreteras mejoradas. Por lo tanto, los costos de transporte del hidrógeno hacia una ubicación urbana son menores.



Il·lustración 19. Alternativa 1, Estacion de repostaje de hidrogeno. Fuente: (Elaboración propia).

9.2. ALTERNATIVA 2 – ENTRE LA ESTACION DE SALAMANCA Y ÁVILA:

Esta segunda alternativa consiste en instalar la estación de repostaje entre Salamanca y Ávila, que actuaría como un punto intermedio dentro de la línea ferroviaria.

- **Valoración económica**
 - **Capacidad estimada:** Aproximadamente para 900 Kg de hidrogeno diarios (ver tabla 14), considerando una demanda de recogida tanto de Ávila y salamanca, teniendo una totalidad por tren recorrido diaria 222km el cual es el de ida y vuelta, sin embargo.
 - **Coste de terreno:** Al estar en una zona intermedia, es probable que el coste del terreno sea considerablemente menor que en las zonas urbanas de Ávila o Salamanca. Se puede estimar que el coste del suelo sería de entre 10 y 50 euros por metro cuadrado, dependiendo de la cercanía a núcleos poblacionales o áreas industriales.

- **Coste Estimado Total:** El coste de una estación para la demanda que requiere la línea 122 entre Ávila y Salamanca sería aproximadamente entre 3,2 millones de euros según la tabla 14.

- **Logística del transporte**

Cuando la estación está ubicada en una zona intermedia o rural, como Peñaranda de Bracamonte o Crespos, se enfrenta a mayores desafíos logísticos. El hidrógeno tendría que transportarse a una ubicación menos accesible, probablemente en camiones o mediante otros medios especializados como la vía ferroviaria, lo que aumenta el coste del transporte. La distancia desde los centros de producción o almacenamiento es mayor, y al estar en un área menos poblada, las rutas de acceso son menos desarrolladas. Estos factores elevan los costos de transporte.

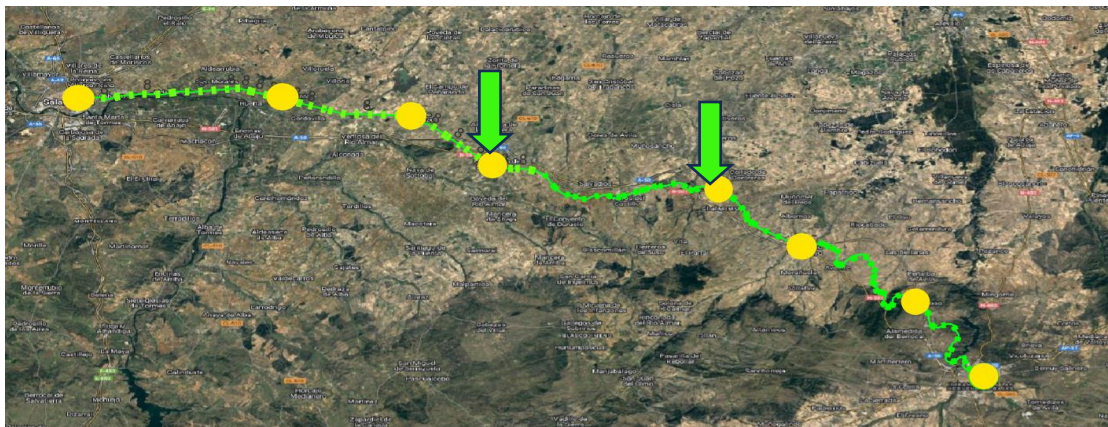


Ilustración 20. Alternativa 2, Estacion de repostaje de hidrogeno. Fuente: (Elaboración propia).

9.3. ALTERNATIVA 3 – ESTACION DE SALAMANCA:

Esta Tercera alternativa consiste en instalar la estación de repostaje en la estación de tren de Salamanca, que actúa como un nodo estratégico dentro de la línea ferroviaria. Esta localización es conveniente porque Salamanca es la ciudad con mayor tamaño en comparación de Ávila y otros puntos en la línea, lo que permitiría una infraestructura más compleja y la posibilidad de conectar la estación de repostaje con otras iniciativas de transporte sostenible.



Ilustración 21. Estacion de Salamanca. Fuente: (Google Earth)

- **Valoración económica**
 - **Capacidad estimada:** Aproximadamente para 900 Kg de hidrogeno diarios (ver tabla 14), considerando una demanda similar con Ávila debido a que el recorrido es de ida y vuelta (222 km/día), sin embargo, a futuro la demanda podrá ser Mayor ya que al ser una ciudad más grande, la estacion podría tender a una mayor afluencia de trenes y pasajeros hacia otros lugares a futuro.

- **Coste de terreno:** Salamanca al ser una más grande, presenta mayores precios de suelo, los cuales están por el rango de 50 €/m² a 200 €/m² en áreas industriales o de desarrollo (Parcelas urbanas o solares en venta en Salamanca (Localidad) 2024).
- **Coste Estimado Total:** El coste de una estación para la demanda que requiere la línea 122 entre Ávila y Salamanca sería aproximadamente entre 3,2 millones de euros según la tabla 14.

- **Logística del transporte**

En una ciudad como Salamanca, se cuenta con una infraestructura más desarrollada, tanto en términos de transporte como en la disponibilidad de suministros. Esto significa que el transporte de hidrógeno hacia una estación de repostaje dentro de la ciudad sería más barato. Hay acceso a redes de carreteras mejoradas. Por lo tanto, los costos de transporte del hidrógeno hacia una ubicación urbana son menores.

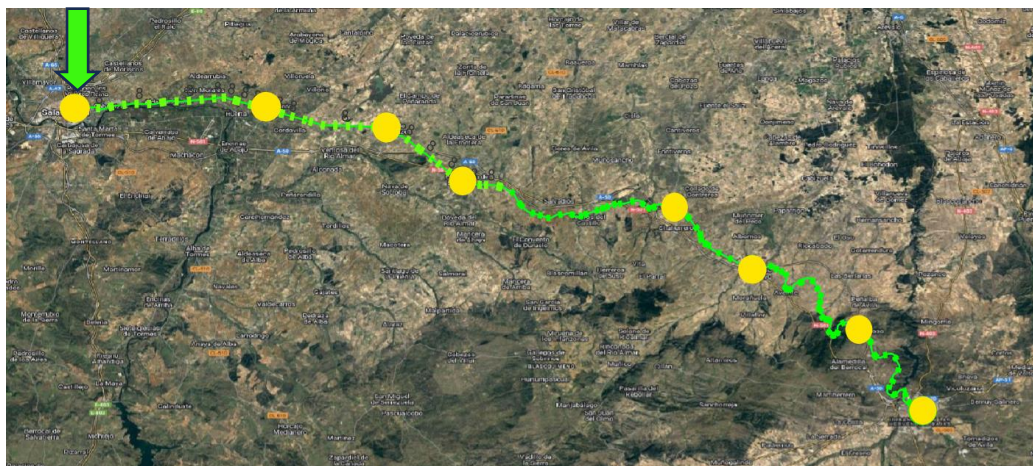


Ilustración 22. Alternativa 3, Estacion de repostaje de hidrogeno. Fuente: (Elaboración propia).

| | Ávila | Entre Ávila y Salamanca | Salamanca |
|---------------------------------|---|--|--|
| Coste de instalación | 3,5 millones de euros | 3,5 millones de euros | 3,5 millones de euros |
| Coste de operación | Moderado (0,29 €/kg por gasoducto, 2,17 €/kg por camión y por tren 0,08 €/kg) | Alto (0,33 €/kg por gasoducto, de 2,53 €/kg por camión y por tren 0,09 €/kg) | Alto (0,39 €/kg por gasoducto, de 2,89 €/kg por camión y por tren 0,10 €/kg) |
| Coste de Terreno | Medio-Bajo (30-100 €/m ²) | Bajo (10-50 €/m ²) | Alto (50-200 €/m ²) |
| Capacidad de repostaje | 900 kg/día (lo necesario para satisfacer los trayectos diarios) | 900 kg/día (lo necesario para satisfacer los trayectos diarios) | 900 kg/día (lo necesario para satisfacer los trayectos diarios) |
| Reducción de emisiones | Alta en entorno urbano | Media, ya que no hay grandes poblaciones alrededor | Alta en entorno urbano |
| Impacto medioambiental | Positivo, mejora de calidad del aire | Bajo impacto local | Positivo, mejora de calidad del aire |
| Accesibilidad | Alta | Baja | Alta |
| Posibilidad de expansión | Media | Alta | Media |

Tabla 16. Comparativa entre ubicación de Repostaje de hidrogeno. Fuente: (Elaboración propia)

9.4. ANÁLISIS

Teniendo en cuenta la tabla 16 anterior podemos observar que los costes de instalación son similares en las tres ubicaciones, por lo que este factor no influye significativamente en la decisión final, ya que deberá satisfacer el mismo consumo diario, en cuanto al costo de operación en Ávila es moderado, con precios competitivos tanto en el transporte por gasoducto como por tren y camión. Esto la hace más eficiente en términos de costes operativos en comparación con las ubicaciones intermedias y Salamanca, donde los costes de operación son más elevados, particularmente en el transporte por camión. El coste del terreno en Ávila es medio-bajo (30-100 €/m²), lo que la posiciona como

una opción económica, especialmente frente a Salamanca, donde el coste del terreno es considerablemente más alto.

Por otro lado, Ávila presenta una alta reducción de emisiones, al igual que Salamanca, ya que se trata de un entorno urbano, donde los beneficios de mejorar la calidad del aire son más evidentes y necesarios. La ubicación intermedia, aunque funcional, no tiene un impacto significativo en la reducción de emisiones debido a la baja densidad poblacional. En Ávila, la mejora de la calidad del aire es importante, lo que genera un impacto medioambiental positivo en un área urbana. Esta ventaja también se observa en Salamanca, pero no en la ubicación intermedia, donde el impacto es menor por la ausencia de grandes núcleos urbanos.

Ávila cuenta con una accesibilidad alta, lo que facilita la logística de repostaje y el acceso a la estación, mientras que la ubicación intermedia presenta limitaciones en este aspecto. también, Aunque Ávila tiene una posibilidad de expansión media, es suficiente para cubrir las necesidades a medio plazo, ofreciendo un equilibrio entre capacidad y coste en comparación con otras opciones.

En resumen, Ávila se destaca como la opción más equilibrada en términos de costes operativos, accesibilidad y beneficio medioambiental. A pesar de que Salamanca tiene un impacto medioambiental similar, los mayores costes operativos y del terreno hacen que sea menos viable económicamente. La ubicación intermedia, aunque con un coste de terreno más bajo, presenta limitaciones en accesibilidad y un menor impacto medioambiental, lo que la convierte en una opción menos favorable. se descarta la segunda alternativa debido a que presenta más desventajas en comparación con las otras opciones, esta estación intermedia tiene una mayor complejidad logística porque el transporte de hidrógeno a una ubicación remota es más costoso y complicado. Además, la demanda de repostaje en esta ubicación sería menor que en Salamanca, lo que dificulta la eficiencia operativa de la estación. Estos factores incrementan los costes tanto de transporte como de operación en comparación con una ubicación urbana como Salamanca.

CAPÍTULO 10. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

La implementación del hidrógeno verde en la línea férrea entre Ávila y Salamanca podría tener factores ambientales tanto positivos como negativos, tales como:

10.1. FACTORES POSITIVOS

Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero:

- **Disminución del CO₂:** Al usar hidrógeno verde, tal y como se ha comentado a lo largo del documento, se reducirán las emisiones de dióxido de carbono en comparación con los trenes que funcionan con combustibles fósiles, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático.

Teniendo en cuenta que los trenes que circulan por la línea 122 son de media distancia, recorriendo de ida o vuelta una longitud de 111,1 km, y que operan con una frecuencia de 9 trenes diarios durante todo el año, se pueden calcular la cantidad aproximada de Dióxido de carbono que se reduciría anualmente por flota:

| | | |
|---------------------------|-------------------|---------------|
| Km por Viaje ida y vuelta | 222,20 | km |
| Trenes Diarios | 9,00 | Ud. |
| Km diario ida y vuelta | 3999,60 | km/día |
| Km Anuales | 1459854,00 | km/año |

Tabla 17. Kms anuales recorridos por los trenes con itinerario Ávila – Salamanca. Fuente: (Elaboración propia).

A partir de la estimación de los km anuales recorridos en la línea 122, aplicaremos el factor de emisión de trenes Diesel para obtener las emisiones generadas de CO₂.

| DIESEL | | |
|---|--------------------|---------------|
| Consumo de Combustible por tren MD | 3,50 | L/km |
| Factor de Emisión CO2 | 2,68 | kg CO2/L |
| Emisiones de CO2 por tren | 9,38 | kg CO2 |
| Emisiones Anuales de CO2 Línea 122 | 13693430,52 | kg CO2 |

Tabla 18. Emisiones Anuales producidas por el Diesel en los trenes con itinerario Ávila - Salamanca.

Fuente: (Elaboración propia).

Ahora aplicando la reducción de CO2 respecto al hidrogeno podemos demostrar lo siguiente:

| Reducción de Emisiones Anual de CO2 de Línea 122 | | | |
|--|--------------------|--------------|-------------|
| Hidrogeno Gris | 13436189,02 | kgCO2 | 98% |
| Hidrogeno Rosa | 13499224,92 | kgCO2 | 99% |
| Hidrogeno Marrón | 5394377,88 | kgCO2 | 39% |
| hidrogeno Azul | 13385938,32 | kgCO2 | 98% |
| Hidrogeno Amarillo | 5601530,52 | kgCO2 | 41% |
| Hidrogeno Verde | 13693430,52 | kgCO2 | 100% |

Tabla 19. Comparación de reducción de emisiones anuales por tipos de hidrogeno respecto al Diesel en la línea 122. Fuente: (Elaboración propia).

La implementación de cualquier tipo de hidrógeno reduciría significativamente las emisiones en comparación que el combustible fósil, sin embargo, como también se puede observar en el hidrogeno gris, rosa, azul no producen gran cantidad de CO2 a excepción del hidrogeno verde que es nulo durante su uso, contribuyendo de manera sustancial a la disminución de la huella de carbono del sistema ferroviario entre Ávila y Salamanca, promoviendo un transporte más limpio y sostenible.

- **Eliminación de otros contaminantes:** El uso del hidrógeno verde eliminaría la emisión de otros contaminantes como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno (NOx) y las partículas en suspensión.

A continuación, se presenta un ejemplo respecto al monóxido de carbono (CO), aplicado a la línea 122 teniendo como supuesto el factor de emisiones, teniendo en cuenta que el valor puede variar mínimamente.

| Emisiones de monóxido de carbono (CO) con Diesel en la línea 122 | | |
|---|------------------|-------------|
| Gasóleo (Diesel) | 1,5 | €/l |
| Consumo S - 599 | 4,2 | l/km |
| Trayecto (Ida y vuelta) | 222 | Km |
| Cantidad de trenes | 9 | ud/dia |
| Recorrido Total Diario | 1998 | km/dia |
| Consumo trayecto Total Diario | 8391,6 | L/dia |
| Factor de emisión de CO | 0,021 | kgCO/l |
| Emisiones Diarias de CO | 176,2236 | kgCO |
| Emisión Anual de CO | 63440,496 | kgCO |

Tabla 20. Emisiones de monóxido de carbono (CO) con Diesel en la línea 122. Fuente: (Elaboración propia).

| Emisiones de monóxido de carbono (CO) con hidrogeno en la línea 122 | | |
|--|----------------|-------------|
| Hidrogeno Verde | 9 | €/kgH2 |
| Consumo S - 599 | 0,45 | kgH2/km |
| Trayecto (Ida y vuelta) | 222 | Km |
| Cantidad de trenes | 9 | ud/dia |
| Recorrido Total Diario | 1998 | km/dia |
| Consumo trayecto Total Diario | 899,1 | kgH2/dia |
| Factor de emisión de CO | 0,001 | kgCO/l |
| Emisiones Diarias de CO | 0,8991 | kgCO |
| Emisión Anual de CO | 323,676 | kgCO |

Tabla 21. Emisiones de monóxido de carbono (CO) con hidrogeno en la línea 122. Fuente: (Elaboración propia).

| Reducción Anual de CO (%) | | |
|-----------------------------------|---------------|------|
| Emisión Anual de CO del Diesel | 63440,496 | kgCO |
| Emisión Anual de CO del Hidrogeno | 323,676 | kgCO |
| Reducción Anual de CO (%) | 99,49% | |

Tabla 22. Reducción anual de CO respecto al uso del Hidrogeno. Fuente: (Elaboración propia)

El uso de hidrógeno como combustible prácticamente elimina las emisiones de monóxido de carbono (CO) a un 99,49% respecto al Diesel tal y como se muestra en la tabla 22. En este caso, el hidrógeno ofrece una alternativa mucho más limpia en términos de emisiones de CO respecto al diésel en la línea 122.

Mejora de la calidad del Aire:

- **Aire más limpio:** el hidrogeno verde al no emitir emisiones contaminantes tal y como se ha demostrado anteriormente, el uso de este en la línea ferroviaria 122, mejoraría considerablemente el aire de la zona por donde circule.

Reducción del ruido:

- **Menor ruido:** Los trenes de hidrógeno suelen ser más silenciosos que los trenes diésel. Considerando que los trenes diésel emiten aproximadamente 85 dB y los trenes de hidrógeno alrededor de 75 dB, la reducción en el nivel de ruido sería de 10 dB. Esto mejora significativamente la calidad de vida en las áreas cercanas al reducir la contaminación acústica. Cabe mencionar que la exactitud de estas estimaciones dependerá de los datos específicos y de mediciones realizadas in situ, las cuales no están contempladas en el alcance del presente TFM.

Fomentos de energías renovables:

- **Impulso a la energía limpia:** La producción de hidrógeno verde como combustible en la línea ferroviaria 122 fomentaría el uso de energías renovables como la eólica para poder iniciar el proceso de la producción del hidrogeno en España, contribuyendo a una matriz energética más sostenible y amigable con el medio ambiente en la zona.

10.2. FACTORES NEGATIVOS

Consumo de recursos Naturales

- **Agua:** La producción de hidrógeno verde mediante electrólisis implica el uso de grandes cantidades de agua (H_2O) para separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno. Según la estequiometría de la reacción, se requieren aproximadamente 9 litros de agua para producir 1 kg de hidrógeno. Dado que el consumo diario de hidrógeno para cubrir los 222 km de recorrido de la línea ferroviaria 122 es de 899 kg/día, la cantidad de agua necesaria sería de aproximadamente 8,091 litros por día. Esto equivale a un consumo anual de alrededor de 2,912,760 litros de agua para producir el hidrógeno necesario para abastecer la línea ferroviaria.

Es por lo anterior que el uso excesivo de agua en áreas ya vulnerables podría exacerbar problemas de sequía y afectar negativamente a las comunidades locales y ecosistemas

- **Energía:** Aunque la producción de hidrógeno verde se basa en energía renovable, la alta demanda de electricidad para generar hidrógeno puede presionar los recursos energéticos renovables disponibles, especialmente en momentos de baja producción (por ejemplo, días nublados o sin viento).

- **Contaminación del agua y el suelo:** Durante el almacenamiento y manejo del hidrógeno, existe el riesgo de fugas o accidentes que podrían contaminar el suelo y las aguas subterráneas, especialmente si se utilizan materiales auxiliares en el proceso que sean potencialmente contaminantes.
- **Producción de Subproductos No Deseados:** Aunque el hidrógeno verde es limpio en su uso, los procesos industriales relacionados, como la producción de equipos o el transporte, pueden generar residuos y emisiones que deben ser gestionados adecuadamente para evitar impactos ambientales locales.

En resumen, aunque el uso del hidrógeno verde tiene potencial para reducir las emisiones de carbono y avanzar hacia un transporte más sostenible, existen varios factores ambientales negativos que deben ser cuidadosamente gestionados. La evaluación y mitigación de estos impactos ambientales es crucial para asegurar que la implementación del hidrógeno verde en la línea 122 sea verdaderamente sostenible y no cause daños colaterales significativos al entorno natural y a las comunidades locales.

10.3. COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS DESDE EL COMPONENTE AMBIENTAL.

De acuerdo con lo anterior, para el presente trabajo se implementó una evaluación cuantitativa y cualitativa de los factores tanto positivos como negativos descritos anteriormente para cada una de las alternativas de combustible propuestas, con el fin de conocer cuál de ellas es la más viable para implementar a nivel ambiental.

La evaluación realizada se puntuó con un rango de 0 a 100; donde 0 hace referencia a la alternativa que mayor impacto generará sobre el medio ambiente y 100 hace referencia a la alternativa que menor impacto generara sobre el medio ambiente; siendo así la más viable.

| Componente | Descripción Impacto | Diésel | Hidrogeno | Método | Ideal | Puntaje Diesel | Puntaje Hidrogeno |
|----------------------|--|---------------|-----------|--------|--------|----------------|-------------------|
| Emisiones | Emisiones de CO ₂ (Kg CO ₂) | 13,693,430.52 | 0.01 | Menor | 0.01 | 0.00 | 100.00 |
| | Eliminación de Monóxido de carbón (KgCO) | 63,440.49 | 323.67 | Menor | 323.67 | 0.51 | 100.00 |
| Calidad del Aire | Mejora en calidad del aire | 0.01 | 100 | Menor | 0.01 | 100.00 | 0.01 |
| Ruido | Generación de Ruido (dB) | 85 | 75 | Menor | 75.00 | 88.24 | 100.00 |
| TOTAL PUNTAJE | | | | | | 47.19 | 75.00 |

Tabla 23. Comparativa ambiental entre Diesel e Hidrogeno. Fuente: (Elaboración propia)

Así las cosas, se concluye que la alternativa más viable a nivel ambiental es la implementación del hidrógeno verde como combustible, con un impacto significativamente menor en todas las categorías evaluadas. El combustible diésel, por otro lado, genera niveles mucho más altos de emisiones de gases de efecto invernadero y monóxido de carbono, contribuye mínimamente a la mejora de la calidad del aire y genera más ruido.

CAPÍTULO 11. DESARROLLO DE UNIDAD FERROVIARIA

El hidrógeno presenta múltiples ventajas como combustible, destacándose por sus reducidas o nulas emisiones en el punto de uso y su capacidad para reducir la dependencia del petróleo. Estas características han generado el desarrollo de vehículos impulsados por esta tecnología. En el ámbito ferroviario, el hidrógeno ofrece el potencial de combinar las ventajas de la tracción diésel y eléctrica, permitiendo operaciones autónomas sin emisiones locales.

Actualmente, existen muy pocas unidades ferroviarias comerciales con tracción de hidrógeno. Un ejemplo notable es el Alstom Coradia iLint, un tren franco-alemán que ha estado en servicio desde 2018, destacándose por su eficiencia y sostenibilidad (Coradia iLint de Alstom 2022).

En este capítulo, se propone el desarrollo general de una unidad ferroviaria con tracción de hidrógeno, tomando como base el modelo diésel español CAF S-599. Este modelo se utiliza habitualmente en la línea 122, que cubre trayectos regionales o de media distancia. La conversión a hidrógeno de estos trenes no solo eliminaría las emisiones contaminantes actuales generadas por el diésel, sino que también aprovecharía las ventajas inherentes del hidrógeno como fuente de energía limpia y sostenible, tal como se ha estado hablando a lo largo de este proyecto, teniendo en cuenta que no profundizaremos en un diseño como tal de una unidad ferroviaria.

Al adoptar esta tecnología, se podría mejorar significativamente la eficiencia energética y reducir la huella de carbono del transporte ferroviario en esta línea, promoviendo un futuro más sostenible para el sector

Las condiciones o requisitos para seleccionar el tipo de unidad férrea fueron las siguientes:

- Destinado a vías férreas sin electrificar, tales como la línea 122.
- Avanzado y moderno.
- Prestaciones, versatilidad y fiabilidad excelentes.
- Unidad que opere para RENFE.
- Apto para personas de movilidad reducida.

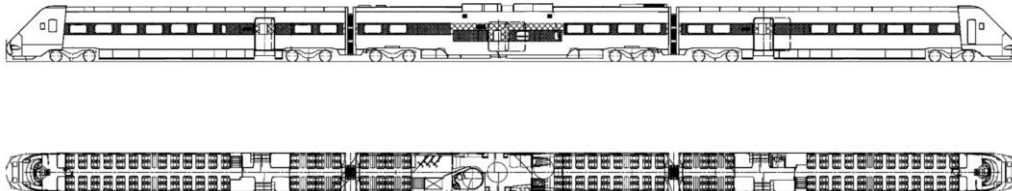


Ilustración 23. Unidad ferroviaria Diesel CAF S-599. Fuente: (RENFE 2023).

El modelo CAF S-599 ofrece importantes ventajas en términos de competitividad y eficiencia. Este tren cumple con todas las condiciones necesarias para la implementación de tecnologías avanzadas descritas previamente. Una característica distintiva del modelo es su compatibilidad con una unidad eléctrica similar, el modelo de Media Distancia S-499 o R-499. Esta compatibilidad facilita la conversión a una tracción híbrida eléctrico-hidrógeno, aprovechando las tecnologías existentes y reduciendo la necesidad de infraestructuras completamente nuevas (RENFE 2023).

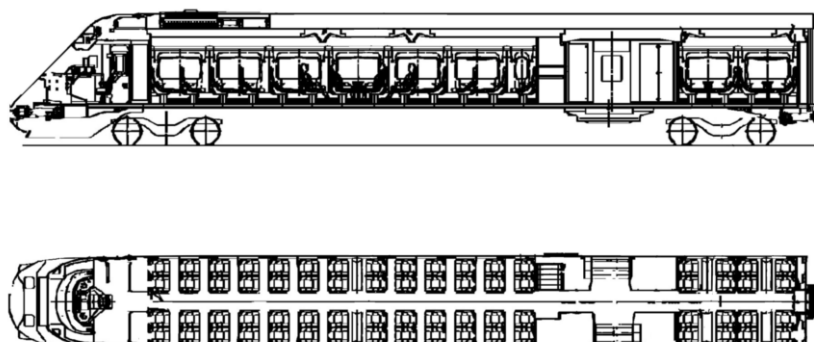


Ilustración 24. Coche CAF S-599. Fuente: (RENFE 2023).

La posibilidad de convertir estos trenes a un sistema de tracción hidrógeno-eléctrico no solo eliminaría las emisiones contaminantes actuales generadas por el diésel, sino que también ofrecería una solución más sostenible y eficiente en términos energéticos. Este tipo de conversión permitiría al tren operar con la misma eficacia y capacidad que sus contrapartes eléctricas, pero con la ventaja adicional de utilizar hidrógeno como una fuente de energía limpia.

La existencia de una unidad similar eléctrica, como el modelo S-499 o R-499, es particularmente ventajosa. Esta similitud permite una transición más fluida hacia la tecnología de hidrógeno, utilizando la infraestructura y el diseño del tren eléctrico como base para la integración del sistema de hidrógeno. Esto no solo reduce los costos y el tiempo de implementación, sino que también asegura que los trenes mantengan un alto nivel de fiabilidad y rendimiento.

El modelo CAF S-599 ha sido seleccionado para este proyecto debido a su posición como el material rodante de pasajeros con tracción diésel más avanzado tecnológicamente, especialmente diseñado para itinerarios no electrificados. Este modelo opera diariamente en la vía ferroviaria entre Ávila y Salamanca, sirviendo como un componente clave en el servicio de media distancia de Renfe, además ofrece una combinación de velocidad, confort y flexibilidad, satisfaciendo las necesidades de los pasajeros en trayectos de rango medio.

El CAF S-599 se posiciona como una opción competitiva a nivel de mercado, proporcionando un equilibrio óptimo entre flexibilidad operativa y prestaciones avanzadas en un amplio rango de condiciones.

Por lo tanto, el modelo S-599 transformado a tracción de base hidrogeno, podría demostrar la viabilidad del uso del hidrogeno en la línea ferroviaria como combustible para garantizar el servicio, operatividad y sostenibilidad en el sector de movilidad.

Como se puede observar en la siguiente ilustración, para poder adaptar un tren Diesel en uno de hidrogeno, lo primero que se debe hacer es retirar el tanque de almacenamiento de Diesel y el motor de combustión empleado en este tipo de trenes, luego se deberá incluir en el tren un tanque de hidrogeno, una pila de combustible de hidrogeno, baterías, un sistema transformador y un motor eléctrico.

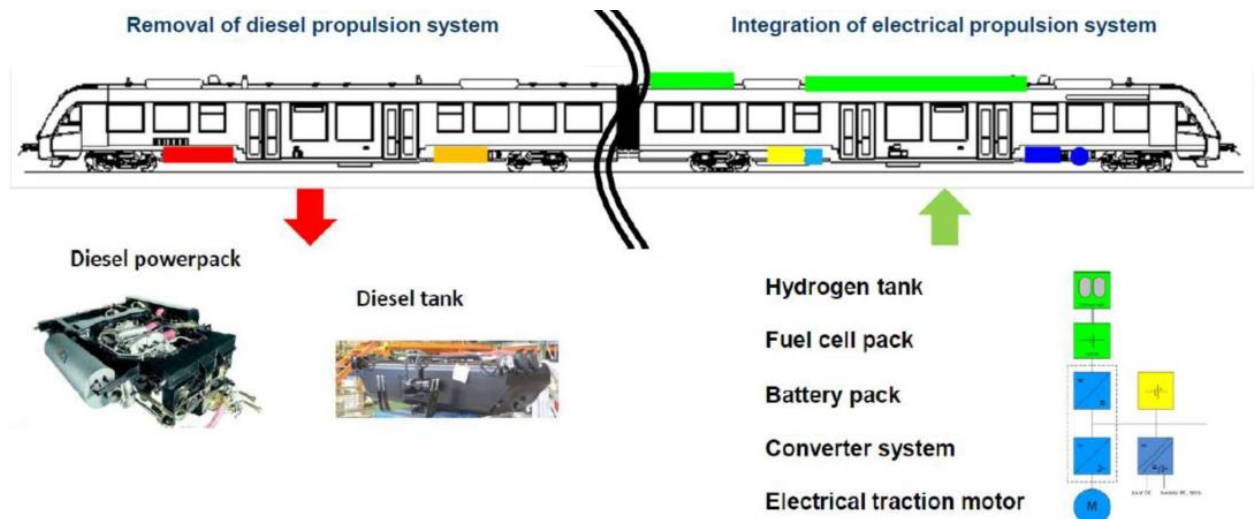


Ilustración 25. Esquema tren Diesel vs tren hidrogeno. Fuente:(Coradia iLint de Alstom 2022).

En el esquema de funcionamiento de un tren de hidrógeno, es fundamental almacenar la energía a bordo del tren. Para ello, se utiliza un tanque de almacenamiento que contiene el hidrógeno necesario para la generación de electricidad mediante una pila de combustible de hidrógeno.

El hidrógeno almacenado en el tanque se convierte en electricidad gracias a la pila de combustible. La electricidad generada es en forma de corriente continua, la cual se almacena en una batería específica diseñada para absorber las variaciones de potencia.

Desde esta batería, la electricidad pasa a través de un inversor de corriente que la convierte en corriente alterna adecuada para alimentar el motor eléctrico del tren. Este proceso asegura que el motor eléctrico reciba un suministro estable de energía, optimizando el rendimiento y la eficiencia del tren.

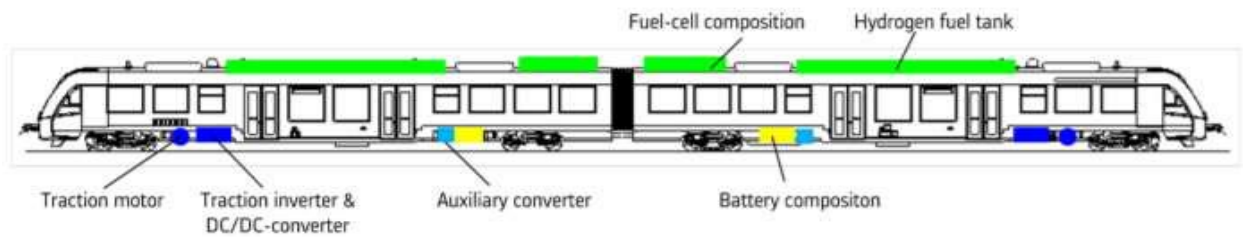


Ilustración 26. Esquema tren de hidrogeno. Fuente: (Coradia iLint de Alstom 2022).

CAPÍTULO 12. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El compromiso del tren de hidrógeno verde en la línea 122 Ávila – Salamanca con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) reviste una gran importancia, considerando los aspectos económicos, sociales y medioambientales. Este proyecto se asocia y contribuye de manera significativa a cada uno de estos objetivos de la siguiente manera (NACIONES UNIDAS 2015).

SOCIEDAD

- Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante (poner referencia)

En relación con el Objetivo 7, se establece una conexión directa y una solución al objetivo mediante la adopción de una fuente de energía limpia, como el hidrógeno verde. Al ser un combustible limpio, su uso no solo mitigaría las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, sino que también contribuiría a la preservación del medio ambiente.

- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles (poner referencia)

En relación al Objetivo 11, la existencia de una línea ferroviaria que utilice hidrógeno verde como combustible proporcionaría importantes ventajas medioambientales en el transporte, promoviendo la creación de ciudades y comunidades más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

ECONOMÍA

- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura

En relación con el Objetivo 9, la incorporación de hidrógeno verde en la línea ferroviaria impulsaría el crecimiento de las industrias dedicadas a la producción, almacenamiento y transporte de este combustible limpio.

Además, fomentaría la inversión en tecnologías innovadoras para abordar de manera más sostenible los desafíos relacionados con la sostenibilidad y el medio ambiente.

- Objetivo 12: Producción y consumo responsables.

En relación con el Objetivo 12, la integración del hidrógeno verde en la línea ferroviaria se presenta como un impulso hacia el uso responsable de los recursos naturales, acogiendo el camino hacia una economía verde y sostenible en el futuro. Esta iniciativa no solo busca reducir la dependencia de los combustibles fósiles, sino también promover prácticas de consumo y producción más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

MEDIOAMBIENTE

- Objetivo 13: Acción por el clima

en relación con el objetivo 13, la integración del hidrógeno en la línea ferroviaria desempeña un papel crucial en la acción climática al contribuir significativamente a la reducción de los efectos contaminantes en el medio ambiente. Al emplear el hidrógeno como combustible limpio, se reducen drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos asociados con los combustibles fósiles.

- Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres

En relación con el objetivo 15, radica en la mitigación de los impactos ambientales negativos derivados del uso de combustibles fósiles en el transporte terrestre. Al adoptar el hidrógeno verde como fuente de energía, se contribuye a preservar la calidad del aire, lo que tiene un efecto directo en la salud de los ecosistemas terrestres y la biodiversidad que los habita. Además, esta transición ayuda a reducir la degradación

ambiental, la pèrdua de hàbitats naturals y el deterioro de la qualitat del sòl, promovent así la salut y la resiliència a llarg plaç de los ecosistemes terrestres.

CAPÍTULO 13. CONCLUSIONES

- La transición del uso de diésel a hidrógeno verde en la línea 122 podría resultar en una eliminación de una gran cantidad de las emisiones contaminantes actuales tal y como se representa en la tabla 18. Esto es crucial, dado que la línea conecta dos ciudades importantes y su operación afecta directamente la calidad del aire en las áreas urbanas y rurales circundantes. La implementación de trenes que operen a futuro con hidrógeno verde podría contribuir significativamente a la mejora de la calidad del aire, lo que beneficiaría a la salud pública y al medio ambiente.
- La línea 122, al no estar electrificada, presenta un desafío en términos de sostenibilidad. Sin embargo, el uso de hidrógeno verde permitiría operar trenes en esta línea sin la necesidad de grandes inversiones en infraestructura de electrificación. Esto no solo es económicamente viable, sino que también facilita la descarbonización del transporte ferroviario, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.
- El estudio ha demostrado que la línea 122 puede adaptarse a la tecnología de hidrógeno verde sin necesidad de realizar modificaciones significativas en los trenes existentes. Esto implica que la transición puede llevarse a cabo de manera más rápida y eficiente, utilizando la infraestructura actual con algunas adaptaciones menores para el uso de hidrógeno.
- La línea 122 presenta una oportunidad favorable para la logística del hidrógeno, ya que la distancia entre los puntos de producción y consumo puede ser optimizada. Esto podría reducir los costos asociados con el transporte del hidrógeno, haciendo que la implementación sea más atractiva desde un punto de vista económico. Además, la utilización de trenes de hidrógeno, que son conocidos por su funcionamiento silencioso, podría disminuir la contaminación acústica en las áreas por donde transita la línea.

- La adopción del hidrógeno verde en la línea 122 no solo tiene beneficios ambientales, sino que también puede mejorar la percepción social del transporte ferroviario. Al ofrecer un medio de transporte más limpio y eficiente, se podría fomentar un mayor uso del ferrocarril, contribuyendo a una movilidad más sostenible en la región.
- La producción de hidrógeno verde requiere una gran cantidad de energía renovable. En momentos de baja producción de energía (por ejemplo, días nublados o sin viento), la capacidad de generar hidrógeno puede verse comprometida. Esto podría llevar a una dependencia de fuentes de energía no renovables para satisfacer la demanda, lo que podría contradecir el objetivo de sostenibilidad del proyecto.
- Aunque el hidrógeno verde es considerado limpio en su uso, su producción y manejo pueden conllevar riesgos ambientales. La posibilidad de fugas durante el almacenamiento y transporte puede contaminar el suelo y las aguas subterráneas. Además, el hidrógeno es altamente inflamable, lo que plantea riesgos de seguridad en caso de accidentes.
- La tecnología de pilas de combustible de hidrógeno, aunque prometedora, presenta limitaciones, como la incapacidad para encenderse y apagarse rápidamente. Esto podría ser un inconveniente en una línea como la 122, que tiene un trayecto relativamente corto y podría requerir paradas frecuentes.
- Existen otras alternativas de tracción ferroviaria, como la electrificación directa o el uso de biocombustibles, que podrían ser más viables y menos costosas en comparación con el hidrógeno verde. La competencia entre estas tecnologías podría desviar recursos y atención del desarrollo del hidrógeno, limitando su implementación en la línea 122.

- Ávila es la opción más óptima para una estación de repostaje de hidrógeno debido a su coste operativo moderado, un impacto ambiental positivo al mejorar la calidad del aire urbano, y su alta accesibilidad. Aunque el coste de terreno no es el más bajo, sigue siendo competitivo frente a Salamanca, y su capacidad para reducir emisiones en un entorno urbano la hace más efectiva que una ubicación intermedia, donde el impacto sería menor. Además, ofrece un buen potencial de expansión, lo que refuerza su viabilidad a largo plazo.

CAPITULO 14. BIBLIOGRAFIA

- ADIF. 2023. «Declaración sobre la red - Adif». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (https://www.adif.es/sobre-adif/conoce-adif/declaracion-sobre-la-red?p_l_back_url=%2Fsearch%3Fq%3DDECLARACION%2BSOBRE%2BLA%2BRED).
- ADIF. s. f. «Mapa de la Red Ferroviaria Española - Adif». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.adif.es/informacion-al-usuario/mapa>).
- Alstom. 2022. «Alstom's Coradia iLint Successfully Travels 1,175 Km without Refueling Its Hydrogen Tank». *Alstom*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/9/alstoms-coradia-ilint-successfully-travels-1175-km-without-refueling-its>).
- Ana. 2023. «Viaje por la cadena de valor del hidrógeno: desde la producción hasta su consumo». *Good New Energy*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://goodnewenergy.enagas.es/innovadores/viaje-por-la-cadena-de-valor-del-hidrogeno-desde-la-produccion-hasta-su-consumo/>).
- Asociación Española del Hidrógeno. 2024. «Asociación Española del Hidrógeno - Aeh2». *Asociación Española del Hidrógeno*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://aeh2.org/>).
- Badía, Clara Fernández-Bolaños. 2019. «3.3 Distribución del Hidrógeno».
- Coradia iLint de Alstom. 2022. «El tren de hidrógeno Coradia iLint de Alstom recorre 1.175 km sin repostar». *Alstom*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.alstom.com/es/press-releases-news/2022/9/el-tren-de-hidrogeno-coradia-ilint-de-alstom-recorre-1175-km-sin>).
- Delgado, Jennifer. 2024. «Las provincias de España explicadas para niños». *SerPadres*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (https://www.serpadres.es/educacion/47039.html#google_vignette).
- DIPUTACION DE AVILA. 2019. «Nuestros pueblos». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.diputacionavila.es/la-provincia/nuestros-pueblos/>).
- Enagás. 2024. «Gasoductos - Infraestructuras Energéticas - Enagás». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.enagas.es/es/transicion-energetica/red-gasista/infraestructuras-energeticas/red-transporte/gasoductos/>).
- ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. 2019. «Physical Hydrogen Storage». *Energy.Gov*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>).

- Griñan, Guillermo. 2024. «¿Dónde podre llenar mi vehículo de hidrógeno y a qué precio?» *REPSOL*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://openroom.fundacionrepsol.com/content/openroom/master/es/contenidos/donde-llenar-vehiculo-hidrogeno-precio.html>).
- Hydrogen Economy. 2020. «'Hydrogen Economy' Offers Promising Path to Decarbonization». *BloombergNEF*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://about.bnef.com/blog/hydrogen-economy-offers-promising-path-to-decarbonization/>).
- HYLAW. 2018. «HYLAW, RESUMEN». *FUNDACIÓN HIDRÓGENO*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://hidrogenoaragon.org/es/proyectos/hylaw/>).
- IACpartners. 2024. «Créez des stratégies et produits compétitifs et décarbonés». *IACpartners*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.iacpartners.com/>).
- IBERDROLA CORPORATIVA, IBERDROLA. 2024a. «El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta». *Iberdrola*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>).
- IBERDROLA CORPORATIVA, IBERDROLA. 2024b. «El hidrógeno verde: una alternativa para reducir las emisiones y cuidar nuestro planeta». *Iberdrola*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/hidrogeno-verde>).
- Instituto de Investigación Ferroviaria de Corea del Sur. 2021. «El Gobierno promoverá la producción del hidrógeno limpio como la fuente de energía nº 1 para 2050 | AGENCIA DE NOTICIAS YONHAP». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://sp.yna.co.kr/view/ASP20211126002300883>).
- Lipúzcoa, Carlos. 2022. «Hidrógeno verde a precio competitivo». *diariodenavarra.es*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.diariodenavarra.es/noticias/negocios/dn-management/2022/02/26/hidrogeno-verde-precio-competitivo-518755-2541.html>).
- Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes. 2021. «BOE-A-2021-8447 Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética.» Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-8447>).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2020. «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030». *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html>).
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2023. «Sitio web del Hidrógeno». *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto*

Demográfico. Recuperado 14 de septiembre de 2024
(<https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html>).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. s. f.-a. «Hoja de Ruta del Hidrógeno». *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Recuperado 14 de septiembre de 2024
(<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/hidrogeno.html>).

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. s. f.-b. «Marco estratégico de Energía y Clima». *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Recuperado 14 de septiembre de 2024
(<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/marco-estrategico-energia-clima.html>).

NACIONES UNIDAS. 2015. «Objetivos y metas de desarrollo sostenible». *Desarrollo Sostenible*. Recuperado 14 de septiembre de 2024
(<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>).

Nuevo, David. 2024. «La mayor planta de hidrógeno verde de España | Formación de ingenieros». *Energías Renovables*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.tecpa.es/hidrogeno-verde/>).

Parcelas urbanas o solares en venta en Ávila (Localidad). 2024. «Parcelas urbanas o solares en venta en Ávila (Localidad)». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://avila.terrenos.es/venta/avila/urbano>).

Parcelas urbanas o solares en venta en Salamanca (Localidad). 2024. «Parcelas urbanas o solares en venta en Salamanca (Localidad)». Recuperado 14 de septiembre de 2024
(<https://avila.terrenos.es/venta/avila/urbano>).

Parlamento Europeo. 1998. «BOE.es - DOUE-L-1998-82312 Directiva 98/70/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de octubre de 1998, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo y por la que se modifica la Directiva 93/12/CEE del Consejo.» Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1998-82312>).

Parlamento Europeo. 2014. «BOE.es - DOUE-L-2014-83154 Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de octubre de 2014, relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos.» Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2014-83154>).

Parlamento Europeo. 2015. «BOE.es - DOUE-L-2015-80791 Directiva (UE) 2015/652 del Consejo, de 20 de abril de 2015, por la que se establecen métodos de cálculo y requisitos de notificación de conformidad con la

Directiva 98/70/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo.» Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2015-80791>).

Parlamento Europeo. 2018. *Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (versión refundida) (Texto pertinente a efectos del EEE.)*. Vol. 328.

Peris Torner, Juan. 1972. «Spanish Railway » Blog Archive » Ávila a Salamanca». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.spanishrailway.com/avila-a-salamanca/>).

Provincia de Salamanca. 2024. «Provincia de Salamanca». *Portal de Turismo de la Junta de Castilla y León*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.turismocastillayleon.com/es/patrimonio-cultura/ruta-duero/provincia-salamanca>).

RENFE. 2023. «Automotor diésel S-599». Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes/s-599>).

TresCantos. 2023. «La Cadena de Valor del Hidrógeno». *ARIEMA*. Recuperado 14 de septiembre de 2024 (<https://www.ariema.com/la-cadena-de-valor-del-hidrogeno>).