



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA ICAI**

**MÁSTER EN SISTEMAS FERROVIARIOS**

**CURSO 2017 / 2018**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**ESTUDIO DE SISTEMAS DE SUMINISTRO ENERGÉTICO ALTERNATIVOS  
AL DIÉSEL PARA LÍNEAS NO ELECTRIFICADAS Y EVALUACIÓN DE SU  
INTEGRACIÓN EN UN TREN PARA SERVICIO REGIONAL EN ESPAÑA**

Autor: Gema Ramírez Vargas

Director: Marcos Coca Sola

Julio 2018

## **FICHA TÉCNICA DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER**

---

ESTUDIO DE SISTEMAS DE SUMINISTRO ENERGÉTICO ALTERNATIVOS AL DIÉSEL PARA LÍNEAS NO ELECTRIFICADAS Y EVALUACIÓN DE SU INTEGRACIÓN EN UN TREN PARA SERVICIO REGIONAL EN ESPAÑA

Ramírez Vargas, Gema

Coca Sola, Marcos

Máster en Sistemas Ferroviarios | Curso 2017 / 2018

---

### **RESUMEN DEL PROYECTO**

#### **Introducción**

Existe en la actualidad una urgente necesidad de descarbonización del sector ferroviario a medio plazo en línea con las directrices establecidas por la Unión Europea para frenar el cambio climático, proteger y respetar el medio ambiente y fomentar políticas energéticas sostenibles.

Entre otros compromisos, se ha establecido que para 2050 se han de reducir las emisiones en el sector transporte en un 60% en comparación con los niveles de 1990.

Por tanto, se hace indispensable la búsqueda de soluciones alternativas al diésel que permitan reducir o eliminar las emisiones contaminantes en el marco del transporte ferroviario estatal.

El presente trabajo surge motivado por la necesidad de encontrar alternativas energéticas adecuadas que estén alineadas con las directrices establecidas por la UE.

#### **Objetivo**

Este trabajo se centra en identificar las tecnologías de suministro energético alternativas al diésel disponibles en la actualidad y evaluar cuál podría ser la más adecuada en base a diversos criterios (consumo, emisiones, coste, etc.) para realizar servicios regionales no electrificados en el ámbito de la RFIG.

#### **Metodología**

Para lograrlo se ha establecido un proceso de evaluación que ha constado de las siguientes fases:

- Estudio del contexto y selección de alternativas de interés. Resultado: GNL e hidrógeno
- Evaluación de estas tecnologías para servicio tipo regional de la RFIG mediante un proceso de simulación y posprocesado
- Análisis de los resultados obtenidos y conclusiones

## Conclusiones

Las conclusiones obtenidas se ilustran con la siguiente tabla:

	Consumo energético	Emisiones	Volumen	Coste actual	Evolución tecnológica
<b>Diesel</b>	☹️	😞	😊	😊	😊
<b>GNL</b>	☹️	☹️	😊	😊	☹️
<b>H2</b>	😊	😊	☹️	☹️	☹️

Lo más relevante es que desde el punto de vista medioambiental la mejor alternativa al diésel es por mucho el hidrógeno, mientras que, en la actualidad y con las referencias consideradas, el GNL es más competitivo económicamente.

## ÍNDICE

### MEMORIA

PARTE 1: INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
Capítulo 1. Resumen .....	1
Capítulo 2. Introducción.....	2
Capítulo 3. Objetivos .....	3
Capítulo 4. Tareas .....	3
Capítulo 5. Planificación .....	4
PARTE 2: DESARROLLO.....	5
Capítulo 1. Estado del arte .....	5
1.1 Movilidad sostenible en Europa .....	5
1.2 Situación del sector ferroviario .....	6
1.3 Sistemas de tracción y suministro energético en el material rodante .....	9
Capítulo 2. Alternativas energéticas destacadas.....	11
2.1 Hidrógeno.....	11
2.2 Gas natural .....	11
Capítulo 3. Evaluación de las tecnologías.....	11
3.1 Metodología .....	11
3.2 Desarrollo del proceso.....	13
3.3 Resultados .....	27
Capítulo 4. Conclusiones.....	29
PARTE 3: CONCLUSIONES Y APORTACIONES .....	32
ANEXOS	
A. Referencias .....	i

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustración de la metodología.....	1
Figura 2: Objetivos de reducción de GEH por sectores (Fuente: CE) .....	2

Figura 3: Planificación de tareas (Fuente: Elaboración propia) .....	4
Figura 4: Emisiones de CO <sub>2</sub> /pasajero en función del modo transporte (Fuente: EEA) .....	6
Figura 5: Tabla flota diésel viajeros (Fuente: Elaboración Interna).....	7
Figura 6: Mapa Tipos de Electrificación RFIG (Fuente: DRED 2018) .....	8
Figura 7: Indian railways (Fuente: Artículo Muhimu) .....	9
Figura 8: Medidas eficiencia con mayor impacto en FCC (Fuente: Artículo de Claudio Rodríguez).....	10
Figura 9: Proyectos piloto Renfe (Fuente: Presentación PTFE Robles, A) .....	10
Figura 10: Diagrama de la metodología (Fuente: Elaboración propia).....	12
Figura 11: Serie 598 (Fuente: Web Renfe) .....	14
Figura 12: Características básicas (Fuente: Elaboración propia, ver referencias).....	14
Figura 13: Peso y dimensiones S598 (Fuente: Elaboración propia, ver referencias).....	15
Figura 14: Características técnicas S598 (Fuente: Elaboración propia, ver referencias) .....	15
Figura 15: Coeficientes RAV de la serie 598 (Fuente: dinámica de los Trenes En alta velocidad – García, A (2015)) .....	16
Figura 16: Perfil del trayecto A (Fuente: Interna).....	16
Figura 17: Perfil del trayecto B (Fuente: Interna) .....	17
Figura 18: Perfil del trayecto C (Fuente: Interna) .....	17
Figura 19: Perfil del trayecto D (Fuente: Interna).....	17
Figura 20: Sistema de tracción mecánica(Fuente: Elaboración propia).....	18
Figura 21: Sistema de tracción mecánica-eléctrica(Fuente: Elaboración propia) .....	18
Figura 22: Sistema de tracción mecánica-eléctrica híbrida(Fuente: Elaboración propia).....	19
Figura 23: Sistema de tracción eléctrica(Fuente: Elaboración propia) .....	19
Figura 24: Sistema de tracción eléctrica híbrida (Fuente: Elaboración propia) .....	20
Figura 25: Esquema simulación (Fuente: Elaboración propia) .....	20
Figura 26: Curva de tracción S598 (Fuente: Elaboración propia).....	21
Figura 27: Ejemplo de tabla de datos extraída de las simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	22
Figura 28: Herramienta Excel desarrollada.....	23
Figura 29: Rendimientos (Fuente: Hoffrichter, A (2013)) .....	24
Figura 30: Rendimientos diésel (Fuentes: Apuntes asignatura Alta Velocidad e Intercity) .....	25
Figura 31: Referencias combustibles consideradas (Fuente: Elaboración propia).....	25
Figura 32: Características combustibles (Fuente: Hoffrichter, A (2013)).....	26
Figura 33: Costes Diésel y GNL (Fuente: Presentación PTFE Robles, A).....	26
Figura 34: Coste Hidrógeno (Fuente: Artículo Toyota Mirai) .....	27
Figura 35: Consumo energético en función de la tracción (Fuente: Elaboración propia).....	27
Figura 36: Consumo de combustible en función de la tracción (Fuente: Elaboración propia) ...	28

Figura 37: Emisiones en función de la tracción y del combustible (Fuente: Elaboración propia)	28
Figura 38: Emisiones promedio en función del combustible (Fuente: Elaboración propia).....	28
Figura 39: Costes en función de la tracción y del combustible (Fuente: Elaboración propia)....	29
Figura 40: Coste promedio en función del combustible (Fuente: Elaboración propia).....	29
Figura 41:Tabla ilustrativa de las conclusiones (Fuente: Elaboración propia) .....	32

## **MEMORIA**

## PARTE 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

Esta sección contiene la introducción al presente Trabajo Fin de Master.

En primer lugar se puede leer un breve resumen del concepto del trabajo, después se introducen los motivos que han llevado a su planteamiento y, por último, se presentan los objetivos, las tareas y la planificación prevista.

### Capítulo 1. Resumen

El presente trabajo surge motivado por la necesidad de encontrar alternativas energéticas adecuadas que estén alineadas con las directrices establecidas por la UE.

Para lograrlo se evalúan tres alternativas (diésel, GNL e hidrógeno), mediante una metodología basada en simulaciones cinemáticas, posprocesado y análisis de dichos datos.

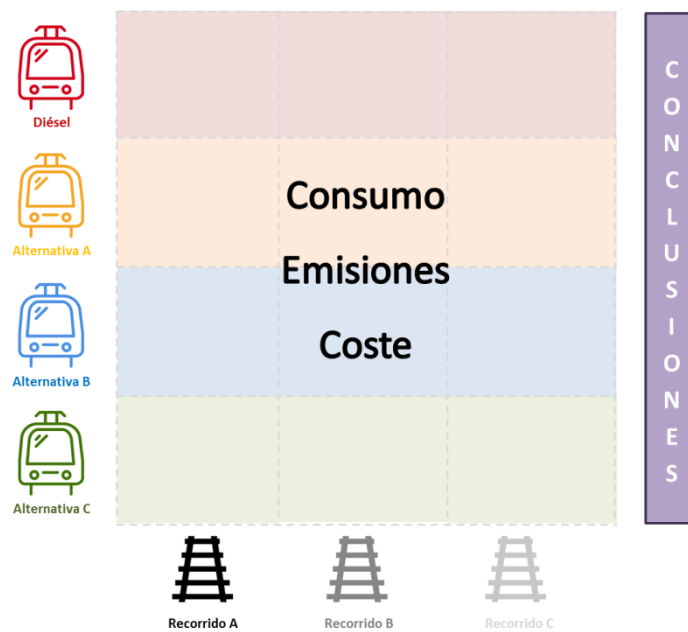


Figura 1: Ilustración de la metodología

A raíz de este proceso se establecen las conclusiones correspondientes.



## Capítulo 2. Introducción

Uno de los objetivos fijados por la UE en el plan de acción por el clima y la energía es la reducción de gases de efecto invernadero respecto a 1990.

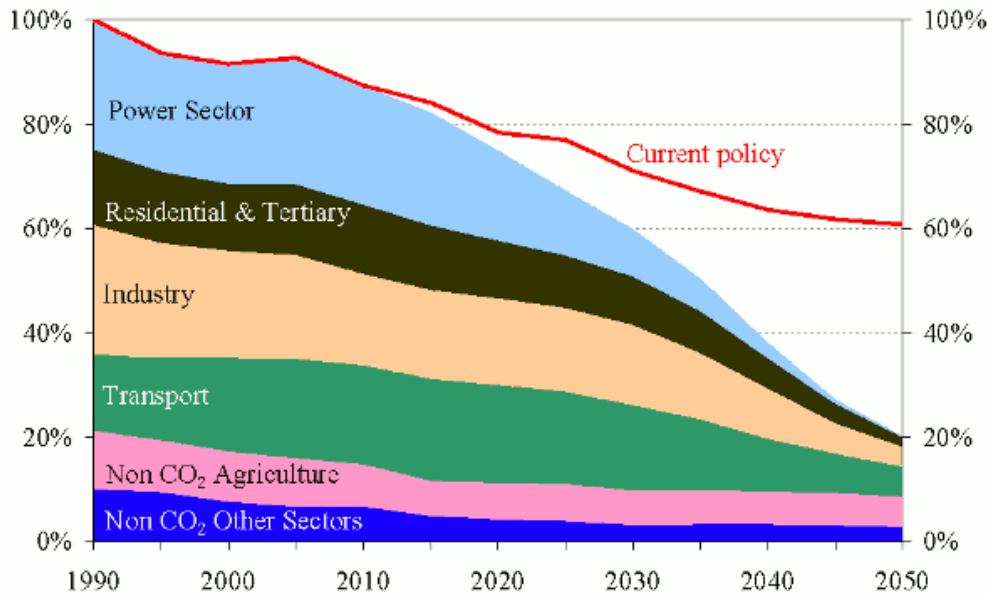


Figura 2: Objetivos de reducción de GEH por sectores (Fuente: CE)

Para mediados de siglo, en 2050, las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte deberán ser al menos un 60% más bajas que en 1990 y estar firmemente en el camino hacia cero.

En este sentido, una de las principales metas del sector ferroviario a medio plazo debe ser la mejora de su sostenibilidad medioambiental mediante estrategias que fomenten la reducción de emisiones contaminantes y la eficiencia energética.

En muchos casos se puede pensar en la electrificación como una de las acciones que mayor impacto puede tener de cara a alcanzar esta meta, ya que reduce las emisiones contaminantes locales y en ocasiones también las emisiones globales si la energía es producida en origen por fuentes renovables o fuentes de energía de bajas emisiones. No obstante, la electrificación no siempre es posible por motivos técnicos o económicos. Además, dependiendo del caso, habría que evaluar las emisiones producidas en la obra de electrificación y entender si finalmente resultaría medioambientalmente rentable.

Por ello, se hace indispensable la búsqueda de sistemas de suministro energético alternativos para la operación ferroviaria en líneas que no compense electrificar.



### **Capítulo 3. Objetivos**

Este trabajo se centra en identificar las tecnologías de suministro energético alternativas al diésel disponibles en la actualidad y evaluar cuál podría ser la más adecuada en base a diversos criterios (consumo, emisiones, coste, etc.) para realizar servicios regionales no electrificados en el ámbito de la RFIG.

Los objetivos específicos planteados son los siguientes:

1. Estado del arte de los sistemas de suministro energético presentes actualmente en el ferrocarril
2. Estudio de la oferta energética disponible para el sector transporte y selección de alternativas de interés
3. Evaluación de las alternativas energéticas en operación local
4. Conclusiones del estudio

### **Capítulo 4. Tareas**

Las tareas asociadas a cada objetivo específico se listan a continuación:

Objetivo 1. Estado del arte

T.1.1. – Documentación

T.1.2. – Redacción

Objetivo 2. Estudio de la oferta energética

T.2.1. – Documentación

T.2.2. – Selección de alternativas de interés

T.2.3. – Redacción

Objetivo 3. Evaluación de las alternativas energéticas seleccionadas

T.3.1. – Documentación

T.3.2. – Desarrollo metodología de evaluación

T.3.3. – Descripción del proceso e hipótesis consideradas

T.3.4. – Simulaciones y cálculos

T.3.5. – Síntesis y evaluación de los resultados obtenidos

T.3.6. – Redacción

Objetivo 4. Conclusiones del estudio

T.4.1. – Redacción

### Capítulo 5. Planificación

La planificación inicialmente prevista fue la siguiente:

Trabajo Fin de Máster	dic-17	ene-18	feb-18	mar-18	abr-18	may-18	jun-18	jul-18
<b>Documentación</b>	■	■	■					
<b>Definición de casos y proceso</b>			■	■				
<b>Simulaciones y evaluación</b>				■	■	■		
<b>Resultados y redacción</b>						■	■	
<b>Entrega</b>								■

Figura 3: Planificación de tareas (Fuente: Elaboración propia)

## PARTE 2: DESARROLLO

Esta sección contiene el desarrollo del presente Trabajo Fin de Master.

En primer lugar el estado del arte, seguido de la introducción a las tecnologías seleccionadas, después el desarrollo del estudio y por último las conclusiones.

### Capítulo 1. Estado del arte

#### 1.1 Movilidad sostenible en Europa

Existe en la actualidad una urgente necesidad de descarbonización del sector transporte a medio plazo en línea con los objetivos fijados por la UE para 2050 que buscan frenar el cambio climático, proteger y respetar el medio ambiente y fomentar políticas energéticas sostenibles. Para lograr estos objetivos, hay que promover no sólo el uso de medios colectivos de transporte, sino también medios de transporte más limpios.

Citando la comunicación de la Comisión Europea (CE) (COM/2016/0501 final) sobre la estrategia europea a favor de la movilidad de bajas emisiones:

*“La movilidad de bajas emisiones es un elemento fundamental en la transición más global hacia la economía circular hipocarbónica que necesita Europa para mantener su competitividad y satisfacer las necesidades de movilidad de personas y mercancías.*

*El transporte representa, al menos, un cuarto de las emisiones de gases de efecto invernadero de Europa y es la principal causa de contaminación en las ciudades. La respuesta de Europa ante estos retos pasa por un cambio definitivo hacia la movilidad de bajas emisiones de carbono y contaminantes atmosféricos. El objetivo es claro: a mitad de siglo, las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte tendrán que haberse situado, como mínimo, un 60 % por debajo de las de 1990 y estar claramente encaminadas a alcanzar el nivel de cero emisiones. Es necesario reducir drásticamente y sin demora las emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes del transporte, nocivas para nuestra salud. [...]*”

La comunicación identifica tres áreas prioritarias para la acción:

1. Aumentar la eficiencia del sistema de transporte aprovechando al máximo las tecnologías digitales, los precios inteligentes y alentando aún más el cambio a modos de transporte de menor emisión

2. Acelerar el despliegue de energías alternativas de bajas emisiones para el transporte, como los biocombustibles avanzados, la electricidad, el hidrógeno y los combustibles sintéticos renovables y eliminar los obstáculos a la electrificación del transporte
3. Avanzando hacia vehículos con cero emisiones. Si bien se necesitarán más mejoras en el motor de combustión interna, Europa necesita acelerar la transición hacia vehículos con emisiones bajas y cero emisiones.

Con esto queda claro el peso que tiene en Europa la búsqueda de alternativas energéticas de bajas emisiones y la mejora de los sistemas actuales con el mismo fin.

## 1.2 Situación del sector ferroviario

Como se puede observar en la siguiente imagen, el sector ferroviario es uno de los medios de transporte de personas más limpios que existen. Este posicionamiento se debe a su alta capacidad como transporte colectivo y del mix de sistemas de suministro energético que lo componen; en su mayor parte consumo de la red eléctrica en líneas electrificadas y diésel en las no electrificadas.

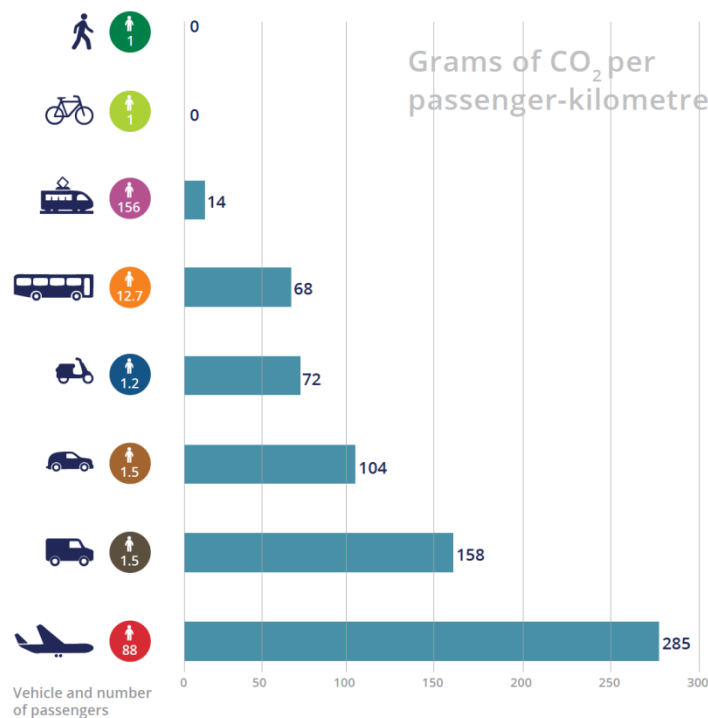


Figura 4: Emisiones de CO<sub>2</sub>/pasajero en función del modo transporte (Fuente: EEA)

A pesar de destacar como medio de transporte sostenible, el ferrocarril debe continuar su camino para lograr ser un modo de transporte completamente limpio, tal y como marcan las directrices europeas.

En Europa, más del 30% de las flotas ferroviarias trabajan todavía con motores diésel. En concreto en España, la flota de material rodante diésel para el transporte de viajeros es todavía numerosa:

Serie	Nº de Unidades	Año de Fabricación
S592	67	1981-84
S594	21	1998-01
S596	17	1982-84
S598	19	2004-05
S599	50	2008-11
S2400	7	1983-86
S2600	11	1969
S2700	9	2009-10
S2900	11	2010-11

Figura 5: Tabla flota diésel viajeros (Fuente: Elaboración Interna)

Esto se debe a la cantidad de líneas no electrificadas que forman parte de la RFIG. En concreto, según la Declaración sobre la Red de Adif de 2018, los kilómetros no electrificados de la RFIG suponen aproximadamente un 44% del total de la Red Ferroviaria Titularidad de Adif

A continuación se muestra un mapa con los tipos de líneas presentes en la RFIG: electrificadas (varios colores según tipo de electrificación) y no electrificadas (verde oscuro).

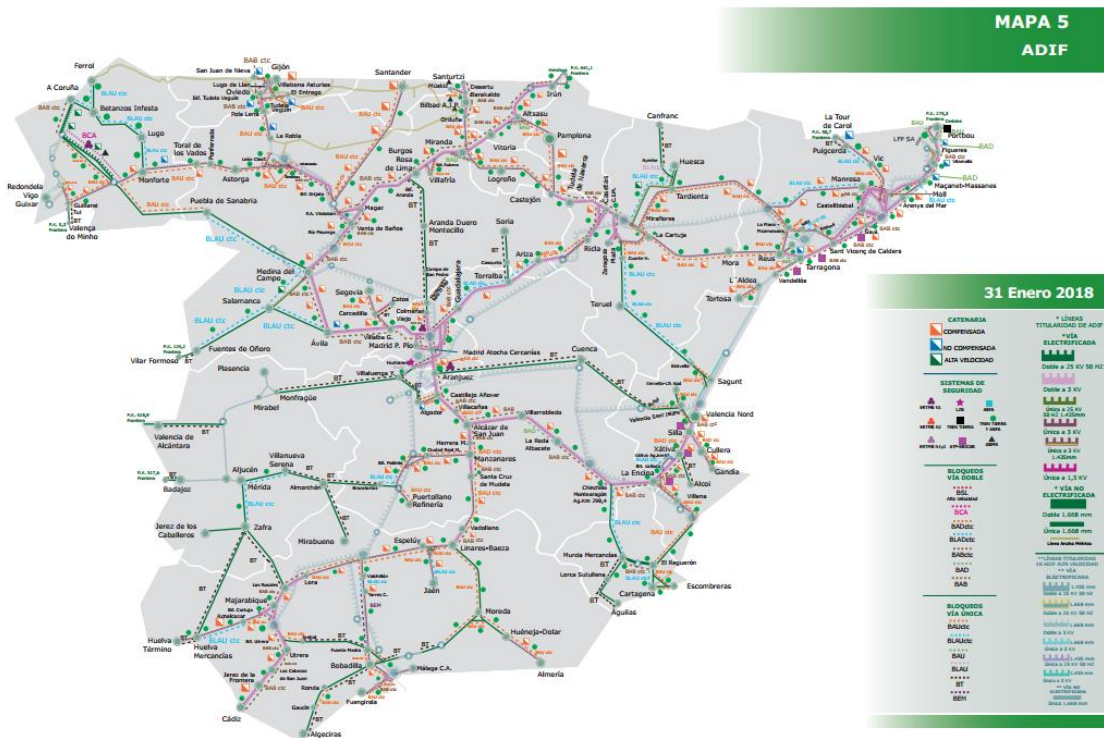


Figura 6: Mapa Tipos de Electrificación RFIG (Fuente: DRED 2018)

Dado el elevado coste que tiene la electrificación y su viabilidad según las circunstancias, se deben de buscar alternativas para lograr reducir las emisiones contaminantes fruto de la operación ferroviaria.

Renfe, como operador principal en España, tiene la responsabilidad de llevar a cabo acciones en línea con este objetivo. De hecho, en 2016, publicó un informe de RSE y gobierno corporativo en el que aborda esta problemática y expone su compromiso con el medio ambiente y la sostenibilidad. En el informe se puede leer lo siguiente:

*“Renfe es consciente de que un sistema de transporte más sostenible es esencial para limitar el calentamiento global por debajo de 2 grados y de que, a pesar de ser el modo más eficiente en términos de emisiones, el ferrocarril es un modo de transporte a gran escala que tiene también una elevada responsabilidad en mejorar su eficiencia.*

*El cuidado del planeta es una responsabilidad de todos: empresas, gobiernos, instituciones, clientes. Renfe lleva años trabajando para reducir sus emisiones al mínimo posible en su operativa diaria, buscando atraer cada vez más clientes con un esfuerzo de gestión y*

*modernización que siga aumentando el atractivo del tren, permitiéndoles reducir su huella de carbono en sus desplazamientos.”*

Hoy en día, Renfe destaca por su compromiso y proactividad en la mejora de la sostenibilidad en la operación del ferrocarril, siendo un referente dentro del sector ferroviario.

Con las ideas expuestas en este punto se busca reflejar la importancia que a día de hoy tiene en el sector ferroviario nacional el tema abordado en el presente trabajo.

### **1.3 Sistemas de tracción y suministro energético en el material rodante**

En la actualidad, los sistemas de tracción más empleados en el ferrocarril son la tracción eléctrica y la tracción diésel, ambos en sus múltiples formatos.

También existen desde hace años otros sistemas como la tracción de vapor (origen de la tracción ferroviaria) y la tracción por turbina de gas, aunque sean menos utilizados en la actualidad.

Con el avance cada vez más rápido de las tecnologías y la preocupación creciente por el medio ambiente, están apareciendo nuevas alternativas energéticas muy interesantes. Cabe destacar las siguientes:

- Evolución de los combustibles tradicionales para su uso en los sistemas ya integrados (ej. Biodiesel en lugar de diésel)
- Incorporación de las energías renovables en el tren (ej. Paneles solares):



*Figura 7: Indian railways (Fuente: Artículo Muhimu)*

- Desarrollo de nuevas tecnologías de suministro energético:
  - o Motores de Gas Natural
  - o Tecnologías de hidrógeno (motores o pilas de combustible)
- Mejora de los sistemas de almacenamiento energético (ej. Supercondensadores, baterías de litio, etc.)



Como se observa en la siguiente imagen, el hidrógeno y el gas natural destacan como medidas de eficiencia energética para el sector ferroviario:



Figura 8: Medidas eficiencia con mayor impacto en FCC (Fuente: Artículo de Claudio Rodríguez)

Por tanto, de las alternativas inicialmente citadas, se va a seleccionar el gas natural y el hidrógeno para su evaluación en el presente trabajo.

Hay que destacar que en España Renfe está apostando por estas dos alternativas a través del desarrollo de proyectos de I+D.

Dos soluciones en formato “ensayo” adaptadas a la actualidad

- ❖ Tranvía de hidrógeno H2
- ❖ GNL para transporte de viajeros

H2 y GNL Dos ensayos piloto en Renfe para líneas NO electrificadas.

Figura 9: Proyectos piloto Renfe (Fuente: Presentación PTFE Robles, A)

## Capítulo 2. Alternativas energéticas destacadas

### 2.1 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo.

Las tecnologías de generación energética mediante hidrógeno basan su funcionamiento en la combinación de hidrógeno con oxígeno, lo que produce como resultado energía, agua y calor.

Existen dos tipos de tecnologías para la generación de energía mediante hidrógeno:

- Motores de combustión interna con hidrógeno
- Pilas de combustible

Ambos tipos han sido considerados en el presente trabajo.

### 2.2 Gas natural

El gas natural es un hidrocarburo compuesto en su mayor parte por metano. Es un combustible que está de moda, ya que puede suponer una alternativa real a los combustibles tradicionales (diésel y gasolina).

El gas natural resulta interesante porque tiene menor porcentaje de carbono en su composición respecto a los combustibles habituales, lo que se traduce en menores emisiones de dióxido de carbono. Además, también son mucho menores el resto de emisiones contaminantes.

Su utilización en el material rodante es a través de motores de combustión, similares a los diésel actuales, pero con las características propias de esta nueva alternativa.

## Capítulo 3. Evaluación de las tecnologías

Este capítulo evalúa las tecnologías energéticas escogidas en su operación local para trayectos de tipo regional.

### 3.1 Metodología

La metodología seguida para el estudio de las tecnologías ha sido la siguiente:

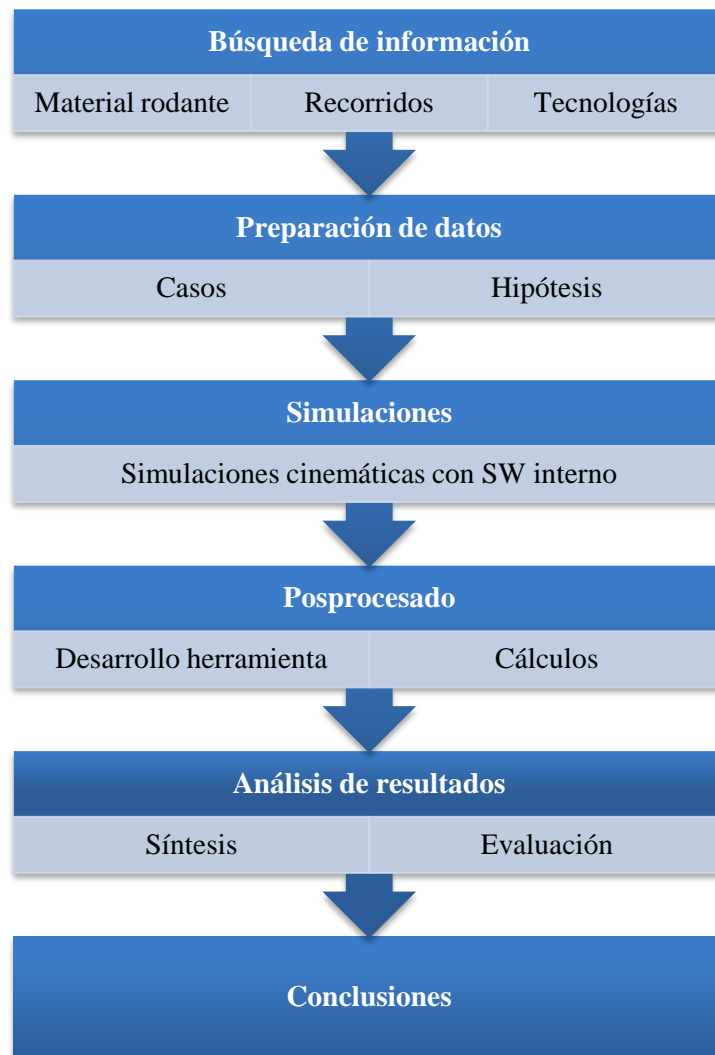


Figura 10: Diagrama de la metodología (Fuente: Elaboración propia)

### **Búsqueda de información**

El primer paso ha sido la recopilación de datos para poder realizar un estudio consistente. Se ha buscado información sobre material rodante de viajeros que opere en servicio regional, sobre líneas tipo regional de la red convencional y sobre las tecnologías energéticas seleccionadas.

### **Preparación de datos**

El segundo paso ha sido organizar toda esta información, definiendo los casos que resultaba interesante evaluar y prepararlos para realizar las simulaciones y los cálculos necesarios.



### **Simulaciones**

El tercer paso ha sido simular los casos gracias a un paquete de software interno que permite calcular el recorrido de un tren a lo largo de una línea de ferrocarril con instrucciones de conducción.

### **Posprocesado**

El cuarto paso ha sido extraer la información necesaria de los resultados obtenidos de las simulaciones. Esto se ha realizado mediante una herramienta de posprocesado desarrollada para este trabajo. Dicha herramienta toma los datos relevantes de la simulación y, considerando las características de las tecnologías seleccionadas, calcula en cada caso los indicadores establecidos para su evaluación.

### **Análisis de datos**

El quinto paso ha consistido en sintetizar dichos indicadores presentándolos en forma de gráficas y efectuar su análisis.

### **Conclusiones**

El sexto y último paso ha consistido en establecer las conclusiones del estudio en base al análisis realizado y a los criterios considerados relevantes, como por ejemplo: la reducción de emisiones locales.

## **3.2 Desarrollo del proceso**

### **Material rodante - Serie 598**

El material rodante seleccionado como base del estudio ha sido el automotor diésel S598.



Figura 11: Serie 598 (Fuente: Web Renfe)

La razón que ha llevado a escoger este tren es sencilla: ha sido el material rodante de tipo regional y diésel para el que se ha encontrado más información.

A continuación, se muestran algunos datos relevantes de este material (proviene de distintas fuentes que se encuentran listadas en el apartado de referencias del presente trabajo):

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS	
SERIE	598
Fabricante	CAF
Año	2004 - 2005
UDs Fabricadas	21
UDs Actuales	21
Composición	Mc - R - Mc
PMA [t]	193.6
Tara tren [t]	151.8
Ancho [mm]	1668
Motores	Diesel (x4)
Modelo Motor	MAN D2866 LUE 605
Potencia de Utilización del Motor [kW]	338
Vmax [km/h]	160
Transmisión	Hidráulica
Enganche	Schafenberg
Freno	Dinámico incorporado en la transmisión
Plazas sentadas	188 (187 + 1 PMR)

Figura 12: Características básicas (Fuente: Elaboración propia, ver referencias)

PESO Y DIMENSIONES	
SERIE	598
Longitud del tren [mm]	75930
Longitud coche [mm]	25425
Longitud remolque [mm]	23480
Anchura de la caja [mm]	2940
Altura libre interior [mm]	2197.5
Altura máxima caja [mm]	4170
Peso del tren [t]	151.8
Peso del coche motor [t]	Tara / PMA 55 / 66
Peso del remolque [t]	Tara / PMA 49,4/61,6
Masa del tren en carga máxima [t]	193.6
Masa máxima por eje [t]	12.6

Figura 13: Peso y dimensiones S598 (Fuente: Elaboración propia, ver referencias)

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
SERIE	598
Composición Mínima	Mc - R - Mc
Composición Múltiple	Triple composición
Ancho [mm]	1668
Puertas por costado	3
Vmax [km/h]	160
Aceleración media (0-40 km/h) [m/s <sup>2</sup> ]	0.48
Plazas sentadas por unidad de tren	188
Motores de tracción diesel	4
Potencia del motor a 2000 rpm [kW]	338
Potencia nominal continua [kW]	1352
Motores auxiliares [kW]	2
Esfuerzo de arranque [kN]	119
Número de cilindros	6 horizontal
Tipo de transmisión	Oleodinámica
Alimentación de auxiliares	Motor MAN D 2866 LUE 605 230 kW a 1500 rpm 220/380 Vca 50Hz
Cajas inclinables	Basculación activa
Estructura de caja	Aluminio
Deceleración emergencia [m/s <sup>2</sup> ]	0.96
Deceleración de servicio [m/s <sup>2</sup> ]	0.96
Diámetro de ruedas nuevas/usadas [mm]	850/780
Freno	Neumático
Aparato de enganche	Schafenberg

Figura 14: Características técnicas S598 (Fuente: Elaboración propia, ver referencias)

Tren	Masa Unidad t	Coeficientes absolutos			Coeficientes específicos		
		A daN	B daN/km/h	C daN/(km/h) <sup>2</sup>	a daN/t	b daN/[L(km/h)]	C daN/[L(km/h)] <sup>2</sup>
<b>Trenes remolcados</b>							
Locomotora tipo BB	80	100	0,8	0,0300	1,25	10 x 10 <sup>-3</sup>	3,75 x 10 <sup>-4</sup>
Locomotora tipo CC	120	150	1,2	0,0300	1,20	10 x 10 <sup>-3</sup>	2,5 x 10 <sup>-4</sup>
2 Locomotora y 6 coches	400	462	3,90	0,0906	1,15	9,75 x 10 <sup>-3</sup>	2,87 x 10 <sup>-4</sup>
Clásico viajeros	Variable	/	/	/	1,5 a 2	0	2,22 x 10 <sup>-4</sup>
Mercancías bogies	Variable	/	/	/	1,5 a 2	0	2,50 x 10 <sup>-4</sup>
Clásico mercancías	Variable	/	/	/	1,5 a 2	0	6,25 x 10 <sup>-4</sup>
<b>Trenes autopropulsados de viajeros</b>							
TRD 598 (3 coches)	173	204	0,57	0,03	1,17	/	/
S 448	150,40	188	1,805	0,06016	1,250	/	/
S 594 (V=140 km/h) (2coches)	108	70	1,060	0,04000	0,650	/	/
S 554	90	75	0,720	0,01830	0,838	/	/

Figura 15: Coeficientes RAV de la serie 598 (Fuente: *dinámica de los Trenes En alta velocidad* – García, A (2015))

### Recorridos disponibles

Para realizar las simulaciones cinemáticas, se ha podido disponer de información relativa a cuatro líneas de la red convencional en la que se operan servicios regionales.

A continuación se presentan algunas características relevantes de dichos servicios:

#### ➤ Trayecto A

- Longitud: ~ 170 km
- Nº paradas intermedias: 4
- Tiempo de parada: 1 min
- Velocidad máxima: 120 km/h (restricción de la línea)

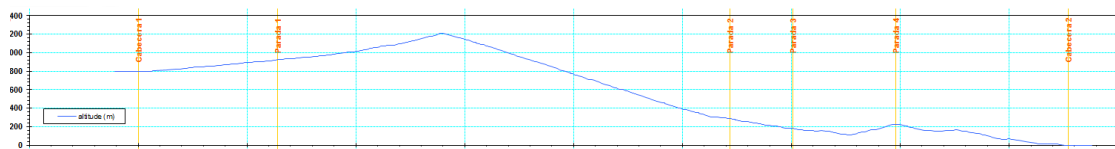


Figura 16: Perfil del trayecto A (Fuente: Interna)

#### ➤ Trayecto B

- Longitud: ~ 92 km
- Nº paradas intermedias: 6
- Tiempo de parada: 1 min
- Velocidad máxima: 160 km/h

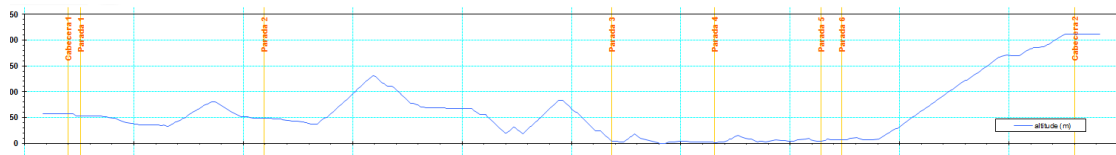


Figura 17: Perfil del trayecto B (Fuente: Interna)

➤ Trayecto C

- Longitud: ~ 272 km
- Nº paradas intermedias: 7
- Tiempo de parada: 1 min
- Velocidad máxima: 160 km/h

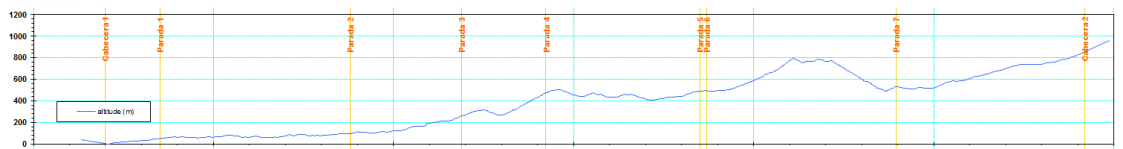


Figura 18: Perfil del trayecto C (Fuente: Interna)

➤ Trayecto D

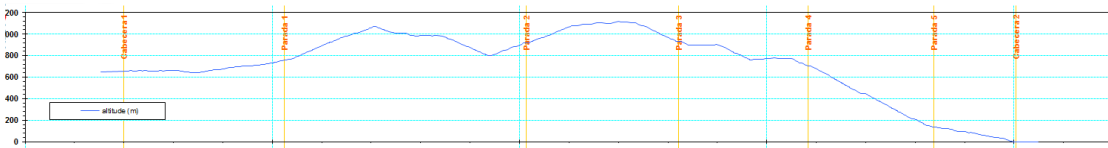


Figura 19: Perfil del trayecto D (Fuente: Interna)

- Longitud: ~ 180 km
- Nº paradas intermedias: 5
- Tiempo de parada: 1 min
- Velocidad máxima: 160 km/h

**Sistemas a evaluar**

Como se ha comentado anteriormente, las tecnologías de interés son el GNL y el hidrógeno.

Para poder analizar y obtener conclusiones según el tipo de tecnología sea evaluado la integración de estas tecnologías en varios sistemas de tracción.

Los sistemas de tracción evaluados son los siguientes:

➤ Sistemas con tracción mecánica



Motor de combustión (diésel, GNL o hidrógeno) + Transmisión hidráulica

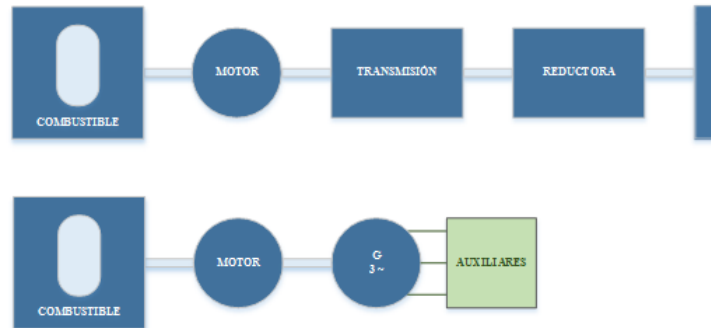


Figura 20: Sistema de tracción mecánica(Fuente: Elaboración propia)

➤ Sistemas con tracción mecánica-eléctrica

Motor de combustión (diésel, GNL o hidrógeno) + Transmisión eléctrica

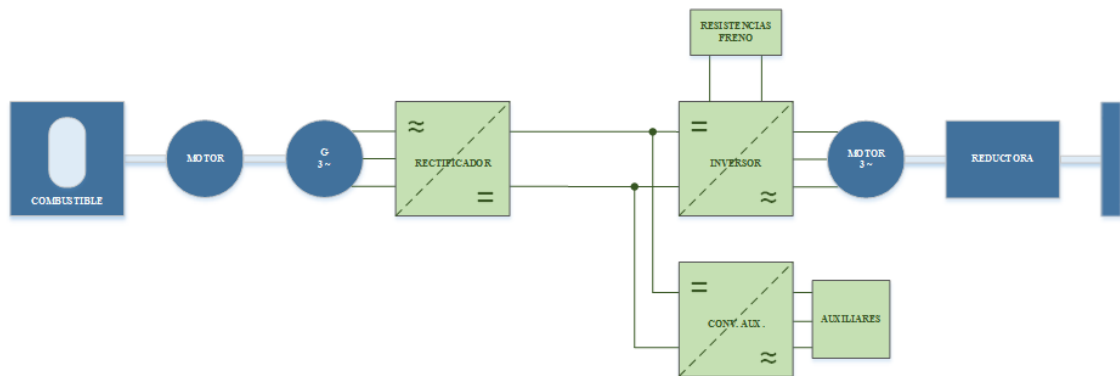


Figura 21: Sistema de tracción mecánica-eléctrica(Fuente: Elaboración propia)

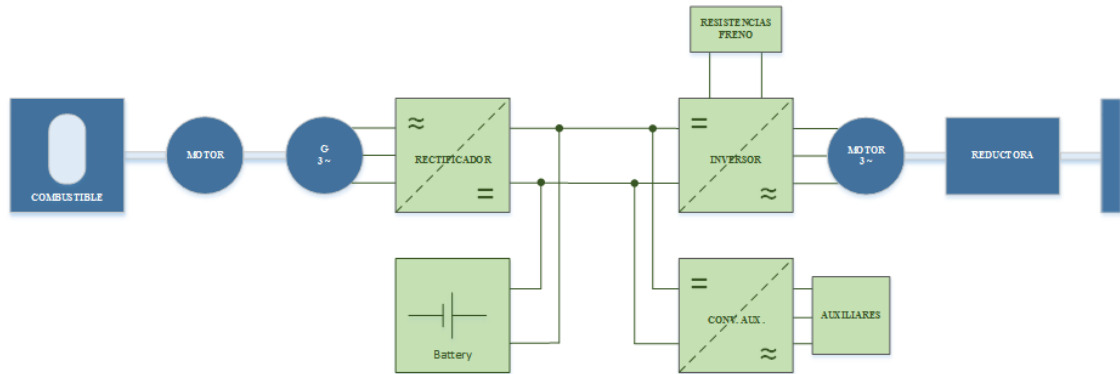


Figura 22: Sistema de tracción mecánica-eléctrica híbrida(Fuente: Elaboración propia)

➤ Sistemas con tracción eléctrica

Pilas de combustible (hidrógeno) + Transmisión eléctrica

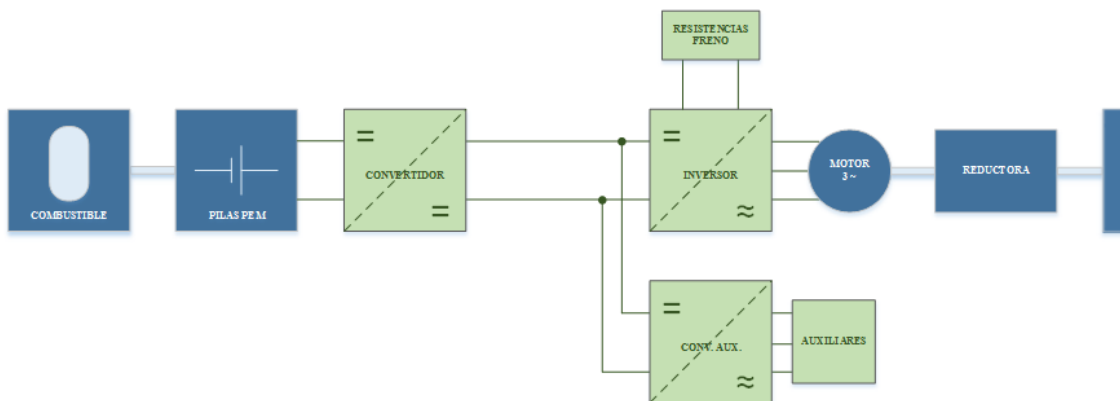


Figura 23: Sistema de tracción eléctrica(Fuente: Elaboración propia)

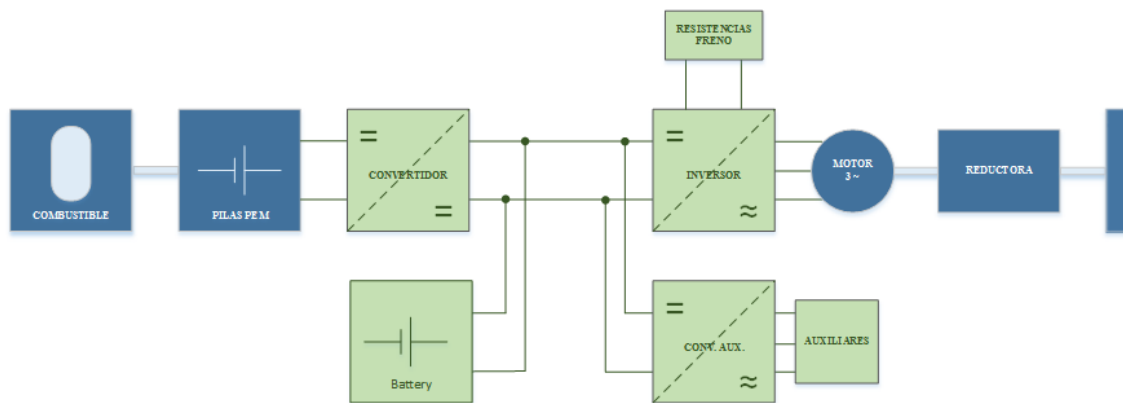


Figura 24: Sistema de tracción eléctrica híbrida (Fuente: Elaboración propia)

### Simulación

La siguiente figura muestra el esquema de simulación, es decir, los inputs necesarios para el software de simulación cinemática y el output.

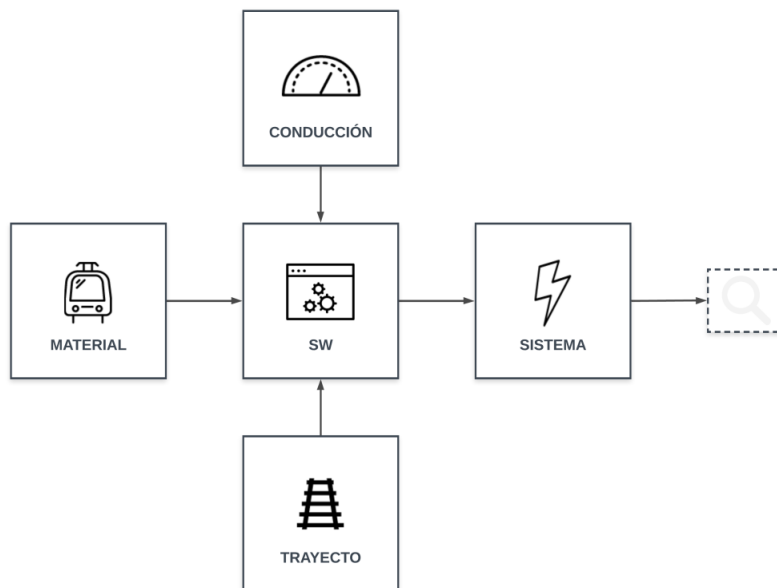


Figura 25: Esquema simulación (Fuente: Elaboración propia)

En el software se introducen los datos del material, del trayecto y del tipo de conducción a realizar, obteniéndose como resultado distintos parámetros.

En el caso particular de este estudio, los casos simulados han sido los siguientes:

- Material: S598 siempre bajo las mismas condiciones (hipótesis a continuación)
- Trayectos: A, B, C y D (ida y vuelta en todos)

- Conducción: *All-out* en todo caso (no es objeto de este estudio optimizar la conducción)

Hipótesis consideradas en el material rodante:

- Masa estática simulada: 166840 kg (condiciones de carga nominal: 188 pasajeros x 80 kg)
- Masas rotativas: 11000 (estimación con un  $C_m=1.07$  aprox.)
- Velocidad máxima: 160 km/h
- Aceleración máxima:  $1 \text{ m/s}^2$
- Deceleración máxima:  $0.5 \text{ m/s}^2$
- Jerk máximo(freno y tracción):  $0.6 \text{ m/s}^3$
- Coeficientes RAV:
  - o  $A = 2040 \text{ N}$
  - o  $B = 5.7 \text{ N/KM/H}$
  - o  $C = 0.3 \text{ N/kph}^2$
- Potencia en llanta máxima: 1100 kW
- $\mu_{\text{tracción}}=0.2$
- $\mu_{\text{freno}}=0.15$
- Curva de tracción:

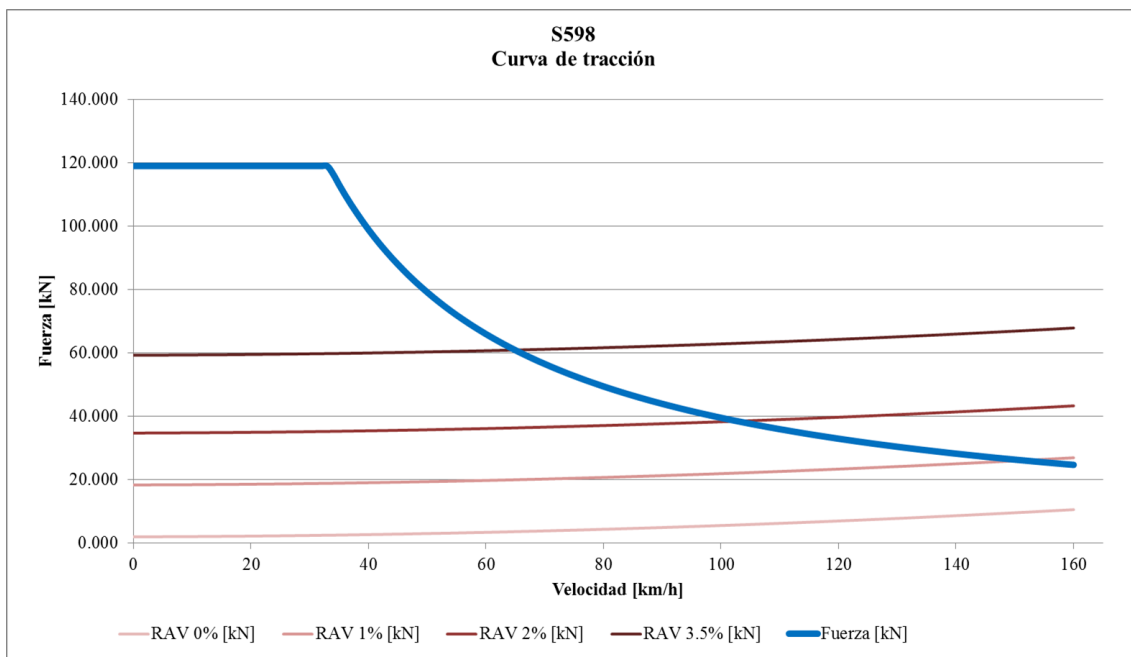


Figura 26: Curva de tracción S598 (Fuente: Elaboración propia)

## Posprocesado

De cada simulación se extraen los siguientes parámetros:

- Kp
- Tiempo
- Velocidad
- Fuerzas en llanta (tracción y freno)

KP (m)	TIME (s)	speed (km/h)	force (N)	electric brake force (N)	friction brake force (N)
13080.33	374.59	156.44	19826	0	0
13167.24	376.59	156.44	19826	0	0
13211.67	377.61	156.44	19826	0	0
13211.67	377.61	156.44	-69094	58912	10182
13297.58	379.61	152.84	-69449	60299	9149
13363.87	381.19	150.00	-69723	61440	8283
13386.04	381.72	149.04	-69814	61836	7978
13461.97	383.57	145.70	-71497	63253	8245
13541.91	385.57	142.10	-71830	64855	6974
13587.64	386.74	140.00	-72020	65829	6191
13664.42	388.74	136.40	-72339	67566	4773
13739.19	390.74	132.80	-72650	69398	3252
13795.97	392.30	130.00	-72886	70892	1993
13796.04	392.30	130.00	-72886	70894	1992
13867.26	394.30	126.40	-71830	71830	0

Figura 27: Ejemplo de tabla de datos extraída de las simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Estos valores, de cada una de las simulaciones, son los que se toman como base de cálculo en la herramienta desarrollada.

## Cálculos

Para evaluar estos recorridos según la tracción y la tecnología y obtener indicadores relevantes se ha desarrollado una herramienta en Excel que, teniendo como base de cálculo los resultados obtenidos de las simulaciones, los procesa en función del tipo de tracción (aplicando rendimientos específicos) y de la tecnología (aplicando datos característicos) y calcula dichos indicadores.



# Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI Máster en Sistemas Ferroviarios

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet with a complex layout. It contains numerous columns and rows of data, organized into sections. Key sections include:

- Header Rows:** Labeled with letters from F to AA, containing various data points.
- Columns:** Many columns contain numerical values, some with units or specific identifiers.
- Formulas:** Some cells contain mathematical expressions or references to other cells.
- Summary Tables:** Located at the bottom, these tables aggregate data from the main spreadsheet into a more compact format.

Figura 28: Herramienta Excel desarrollada

A continuación, se detallan las consideraciones relevantes en el desarrollo de estos cálculos:

➤ Rendimientos considerados

- Tracción mecánica: 0.332
- Auxiliares tracción mecánica: 0.8 (los grupos electrógenos modernos pueden tener un rendimiento de más del 90% gracias a la electrónica, aun así se ha considerado el 80%)
- Tracción mecánica-eléctrica: 0.3 LHV
- Auxiliares tracción mecánica-eléctrica: 0.9 (valor típico)
- Tracción eléctrica: 0.42 LHV
- Auxiliares tracción eléctrica: 0.9 (valor típico)

Los rendimientos de las diversas cadenas de tracción se han determinado en base a las siguientes fuentes:

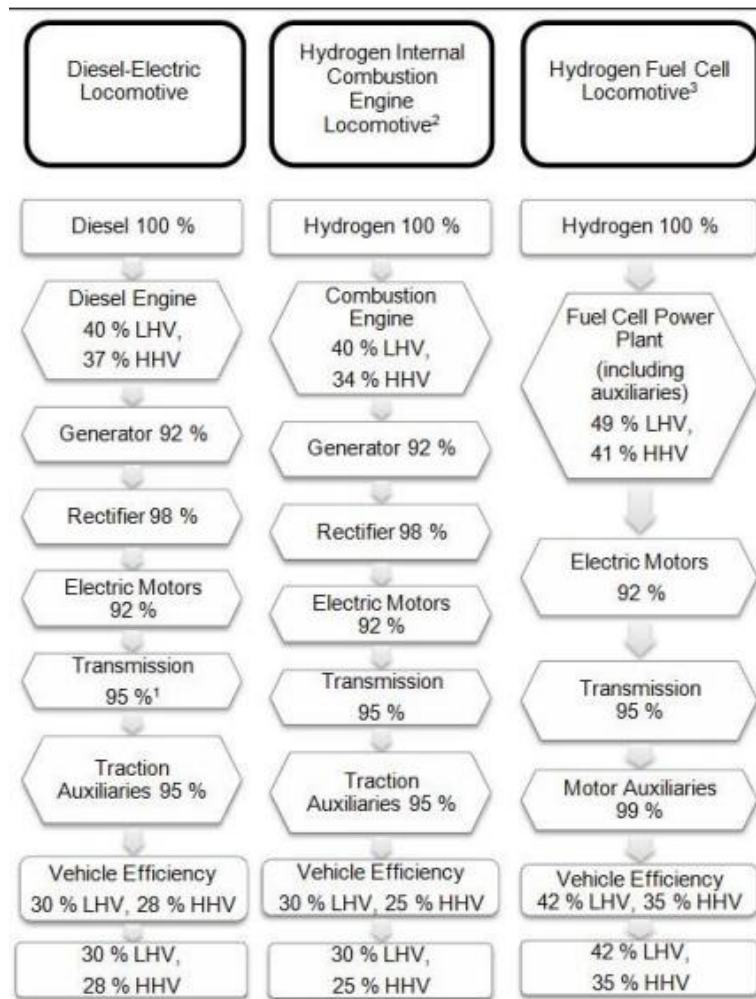
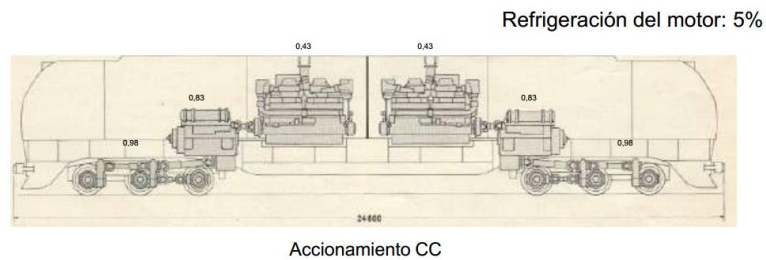


Figura 29: Rendimientos (Fuente: Hoffrichter, A (2013))

## La transmisión hidráulica



- Los rendimientos son medios. A plena potencia, son más altos
- Calor específico del combustible : 42.800 kJ/kg
- Según datos de carga de motor, consumo medio: 202 g/KWh
- Rendimiento del motor:  $\eta = 0,43$
- **RENDIMIENTO TOTAL DE LA CADENA DIESEL HIDRÁULICA = 0,332**

Figura 30: Rendimientos diésel (Fuentes: Apuntes asignatura Alta Velocidad e Intercity)

➤ Datos relevantes de las tecnologías

	<b>LHV</b>	<b>LHV</b>	<b>Emisiones</b>	<b>Coste</b>
<b>Combustible</b>	MJ/kg	kWh/kg	kg Co2/kWh	€/kg
GNL	47.141	13	0.203	0.754
H2	120.21	33	0	9.500
Diesel	42.791	12	0.263	0.951

Figura 31: Referencias combustibles consideradas (Fuente: Elaboración propia)

Estos datos se han extraído de las siguientes fuentes:



Table 3: LHV and HHV of Fuels and Their CO<sub>2</sub> Content

Fuel	LHV (MJ/kg) <sup>b</sup>	HHV (MJ/kg) <sup>b</sup>	HHV/LHV	LHV/HHV	LHV CO <sub>2</sub> (kg/kWh) <sup>c</sup>	HHV CO <sub>2</sub> (kg/kWh)
<b>Gaseous Fuels at 0°C (32°F) and 1 atm</b>						
Natural Gas	47.141	52.225	1.108	0.903	0.203	0.183
Hydrogen	120.21	142.18	1.183	0.845	0	0
<b>Liquid Fuels</b>						
Crude Oil <sup>a</sup>	42.686	45.543	1.067	0.937	0.279	0.261
Diesel	42.791	45.766	1.07	0.935	0.263	0.246
Liquid Hydrogen	120.07	141.8	1.181	0.847	0	0
Residual Oil <sup>a</sup>	39.466	42.21	1.07	0.935	0.279	0.261
<b>Solid Fuels</b>						
Coal (wet basis)	22.732	23.968	1.054	0.948	0.326	0.309

<sup>a</sup>Emissions based on fuel oil

<sup>b</sup>U.S. DOE (2008a)

<sup>c</sup>AEA (2009)

Figura 32: Características combustibles (Fuente: Hoffrichter, A (2013))

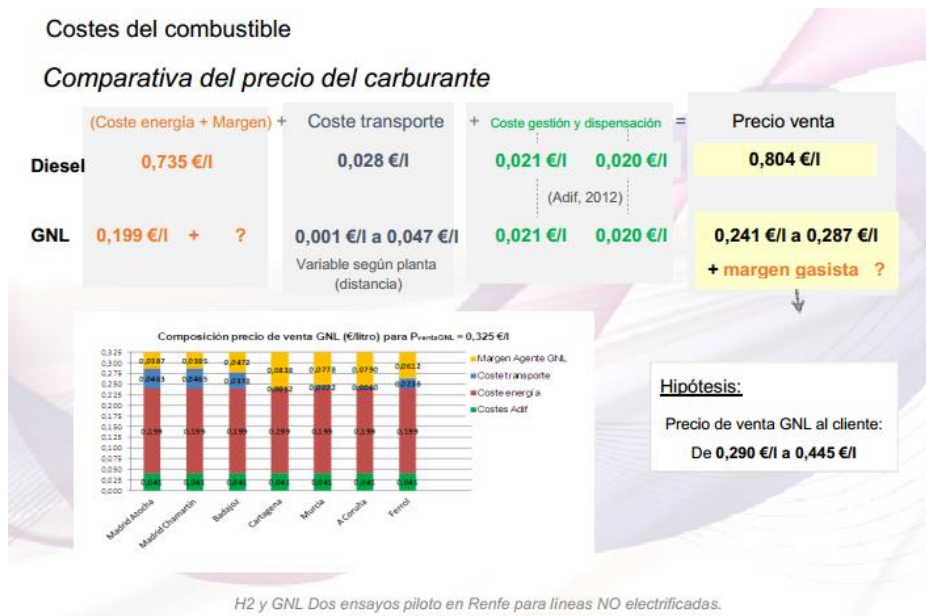


Figura 33: Costes Diésel y GNL (Fuente: Presentación PTFE Robles, A)



Figura 34: Coste Hidrógeno (Fuente: Artículo Toyota Mirai)

Como resultado de los cálculos se obtienen los siguientes indicadores:

- Emisiones en kg\_CO2/pas.km
- Consumo en kg/km
- Consumo en kWh/km
- Coste en €/km

### 3.3 Resultados

#### Resultados energéticos

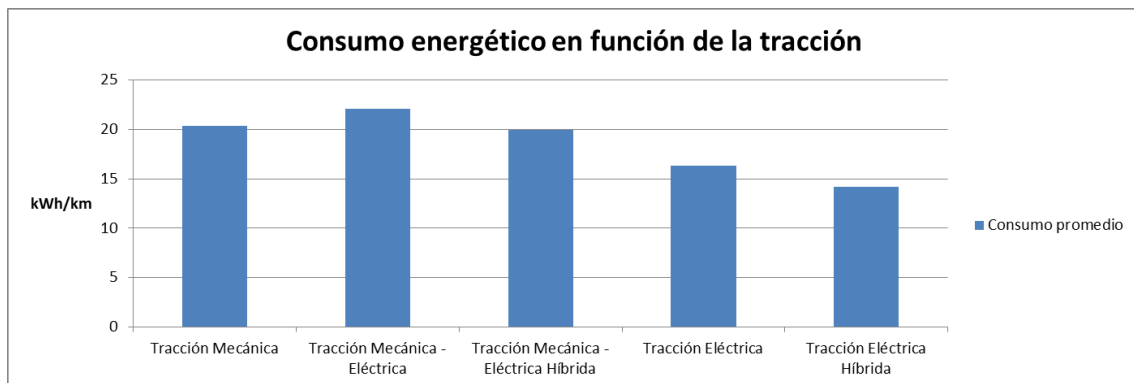


Figura 35: Consumo energético en función de la tracción (Fuente: Elaboración propia)

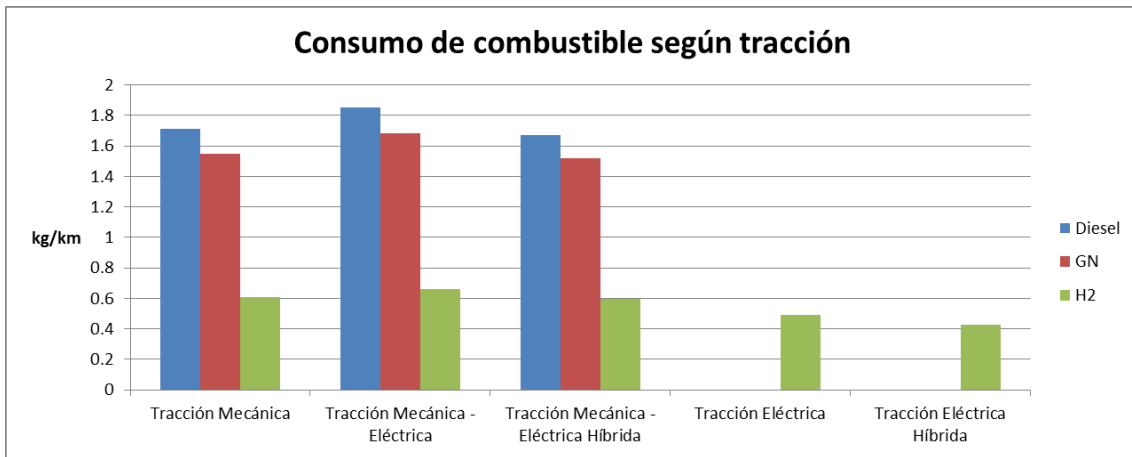


Figura 36: Consumo de combustible en función de la tracción (Fuente: Elaboración propia)

### Resultados de emisiones

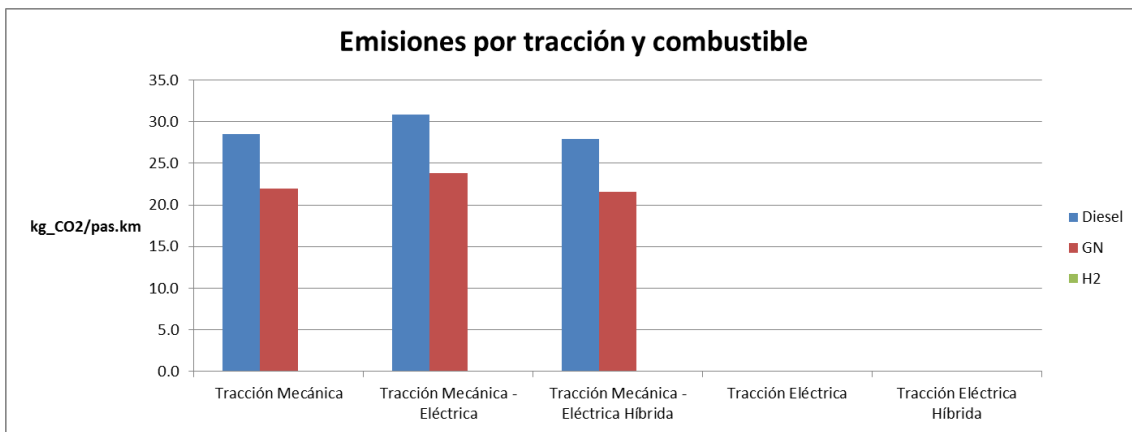


Figura 37: Emisiones en función de la tracción y del combustible (Fuente: Elaboración propia)

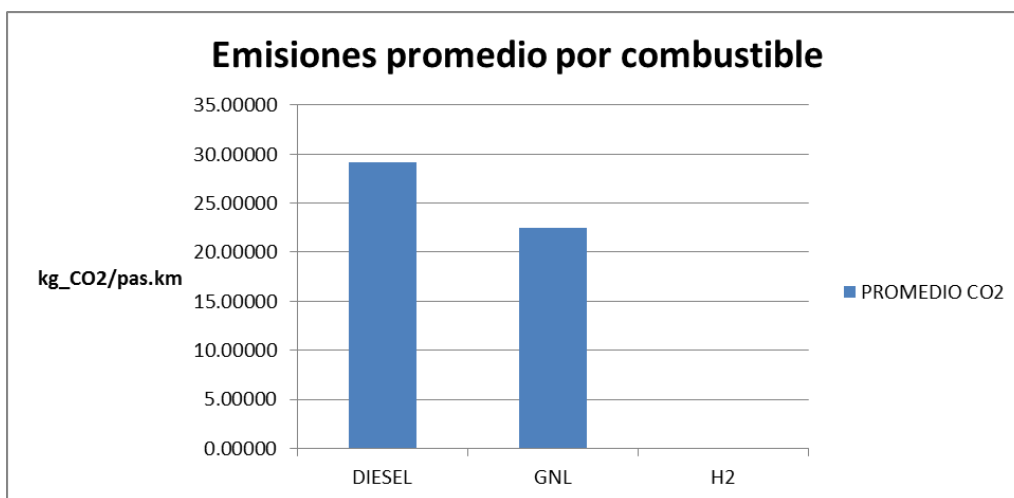


Figura 38: Emisiones promedio en función del combustible (Fuente: Elaboración propia)

### Resultados de costes

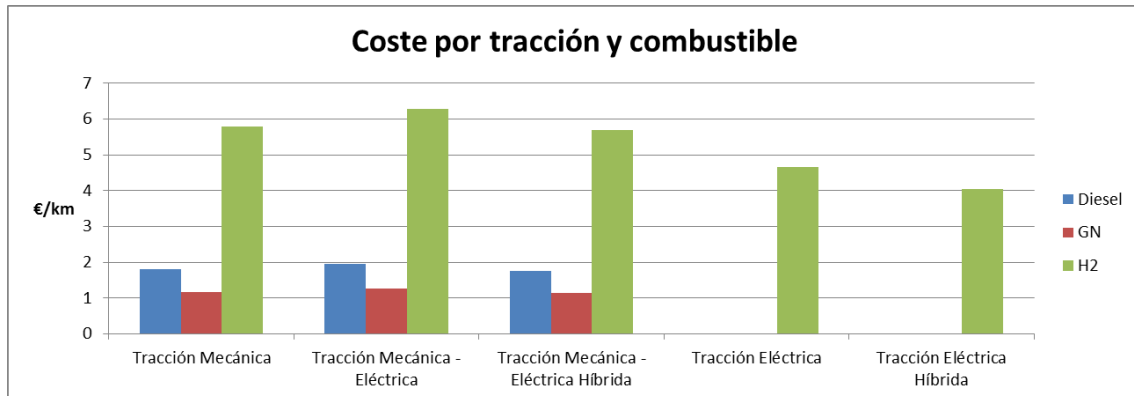


Figura 39: Costes en función de la tracción y del combustible (Fuente: Elaboración propia)

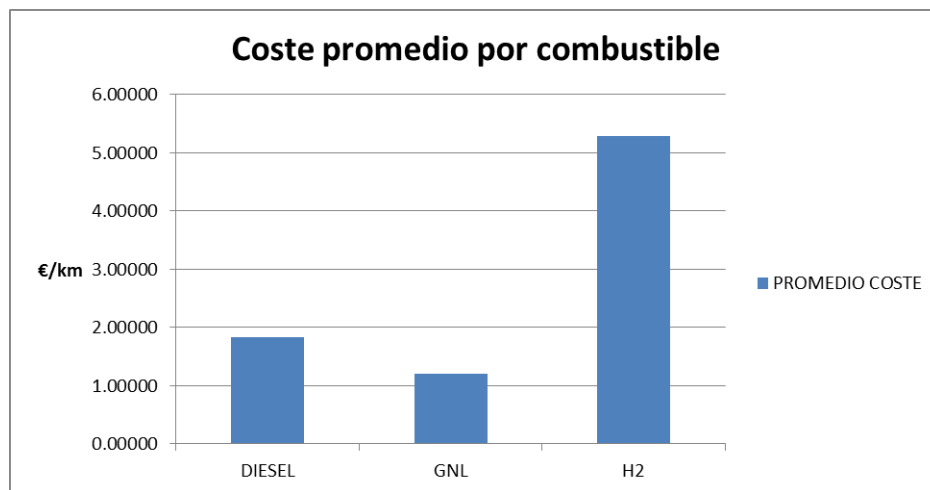


Figura 40: Coste promedio en función del combustible (Fuente: Elaboración propia)

## Capítulo 4. Conclusiones

Existen distintas conclusiones según el criterio con el que se analice los resultados. A continuación se comentan cada una de ellas:

### Criterio energético

Desde el punto de vista del tipo de tracción, la mejor alternativa en cuanto a eficiencia (sin entrar en las tecnologías específicas) es la tracción eléctrica. Seguida de la tracción puramente mecánica (diésel, H2 o GNL) y de la mecánica-eléctrica, en este orden.



Estos resultados tienen sentido, puesto que la tracción mecánica-eléctrica (eg. Diésel-eléctrica) tiene más etapas que la puramente mecánica y el rendimiento global definido era menor.

Para los casos de tracción mecánica-eléctrica y solo eléctrica, se observa como la hibridación con baterías hace que mejore el rendimiento energético del sistema.

Desde el punto de vista del tipo de combustible, el ganador es el hidrógeno. Esto se debe a su alto poder calorífico en comparación con el GNL o el diésel (ver tabla). Entre el GNL y el diésel no hay tanta diferencia, siendo mejor el GNL.

No obstante, aunque el poder calorífico del hidrógeno sea mucho mayor, la baja densidad de este elemento hace que el volumen de almacenamiento requerido alto, en desventaja frente a la densidad del diésel o del GNL.

### **Criterio emisiones**

Desde el punto de vista de las emisiones el combustible ganador vuelve a ser el hidrógeno. Esta vez se debe a que su uso en generadores de energía (pilas de combustible o MCI) está completamente libre de emisiones contaminantes, tal y como se explica en la introducción a esta alternativa.

Respecto al GNL y al diésel, el GNL reduce las emisiones contaminantes locales respecto del diésel.

### **Criterio coste**

Desde el punto de vista del coste, en este momento y con las referencias encontradas, el hidrógeno supone una alternativa bastante más cara que el diésel y el GNL. Siendo el GNL la alternativa más económica.

Hay que tener en cuenta que la referencia que se ha considerado para el coste del hidrógeno ha sido un artículo que habla del coste puntual del hidrógeno en una hidrogenera en Alemania. Esto se ha debido a que no es sencillo encontrar referencias, no tiene un valor concreto en la actualidad al ser un combustible “en evolución”.

En este sentido será necesario realizar estudios más profundos y con una mejor visión de conjunto para poder sacar conclusiones económicas adecuadas.

### **Conclusión final**

Desde el punto de vista ambiental, la tecnología más adecuada es el hidrógeno. Si bien es cierto que según las referencias consideradas su coste no parece competitivo, es el combustible con más futuro en términos de movilidad sostenible.

La generación de hidrógeno para su uso como combustible puede llevar asociadas emisiones contaminantes. Esto dependerá exclusivamente de la tecnología con la que dicho hidrógeno sea generado, pudiendo ser un proceso completamente limpio y sostenible si la generación se realiza con energías renovables.

Además, el hidrógeno es el elemento más abundante en el universo lo que también aporta garantías de futuro, no siendo un recurso susceptible de agotarse.

Es una de las pocas tecnologías actualmente desarrolladas que puede asegurar un crecimiento sostenible y libre del yugo de los combustibles fósiles.

Por todo ello, la apuesta por tecnologías de hidrógeno en un sector tan importante como el del ferrocarril fomentará su aplicación y desarrollo en otros sectores claves.

Desde el punto de vista económico, la tecnología más adecuada es el GNL. Este combustible reduce de manera significativa las emisiones y los costes que en la actualidad produce el uso del diésel. Además, como punto a favor de este combustible, cabe decir que su integración en el material y su uso es similar al de los motores de combustión diésel actuales, lo que facilita la transición.

### PARTE 3: CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Como conclusión al trabajo se muestra la siguiente tabla ilustrativa de las conclusiones obtenidas:

	Consumo energético	Emisiones	Volumen	Coste actual	Evolución tecnológica
Diesel					
GNL					
H2					

Figura 41:Tabla ilustrativa de las conclusiones (Fuente: Elaboración propia)

Las aportaciones conseguidas gracias a este trabajo han sido las inicialmente previstas:

1. Análisis comparativo de las alternativas energéticas destacadas
2. Desarrollo de un proceso manual de simulación y cálculo que permita evaluar las alternativas
3. Visión del contexto actual y estimación de la futura evolución

## **ANEXOS**





### A. Referencias

#### Bibliografía

Apuntes asignatura Alta Velocidad e Intercity (2017/2018)

Dinámica de los trenes en alta velocidad – Alberto García (2015)

Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril – Alberto García (2011)

Thesis: Hydrogen as an energy carrier for railway traction - Andreas Hoffrichter (2013)

EUCOM 501/2016 - Estrategia europea a favor de la movilidad de bajas emisiones

Unidades basculantes serie 598 - J. C. Alonso Mostaza

Informe RSE y gobierno corporativo 2016 – Renfe

Artículo Vía Libre Técnica: El GNL, un combustible alternativo para un ferrocarril aún más sostenible – Claudio Rodríguez (2018)

Declaración sobre la Red 2018 – Adif

Jornada Técnica de la PTFE: H2 y GNL Dos ensayos piloto en Renfe para líneas NO electrificadas – Amador Robles (2015)

#### Páginas webs

Comisión Europea: <https://ec.europa.eu>

Agencia Europea de Medio Ambiente: <https://www.eea.europa.eu/>

U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov/>

Renfe: <http://www.renfe.com/>

Ferropedia: <http://ferropedia.es/>

Asociación Española del Hidrógeno: <http://www.aeh2.org/>

Asociación Ibérica del Gas Natural para la Movilidad: <http://gasnam.es/>

Coste del hidrógeno: [Artículo Toyota Mirái \(2017\)](#)