



Universidad
Zaragoza

**TRABAJO FIN DE GRADO
INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Análisis y simulación de la capacidad de transporte logístico por ferrocarril con vehículos autopropulsados en la línea Zaragoza – Canfranc

Analysis and simulation of the logistical transport capacity by rail with self-propelled vehicles on the Zaragoza - Canfranc line

Autor

Cristian Andrés Asimbaya Alquinga

Director

Emilio Larrodé Pellicer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Noviembre 2018



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación):

D./Dª. Cristian Andrés Asimbaya Alquina,

con nº de DNI 73134965 W en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado, (Título del Trabajo)

Análisis y simulación de la capacidad de transporte logístico por ferrocarril con vehículos autopropulsados en la línea Zaragoza-Canfranc

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 23 Noviembre de 2018

Fdo:



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

RESUMEN

El objeto de este trabajo es analizar la capacidad transporte de mercancías por ferrocarril en la línea Zaragoza-Canfranc mediante una alternativa tecnológicamente asequible consistente en el uso de vagones autopropulsados. Con la composición de vagones autopropulsados tenemos un tren con tracción integral en cada vagón, permitiendo superar mayores rampas que en el caso clásico de tren con tracción en cabeza de la composición. Los vagones pueden ser transportados de forma individual, o bien creando composiciones hasta conseguir la longitud idónea que maximice la capacidad de transporte de la línea, analizándose el flujo logístico óptimo.

Debido a que la línea Zaragoza-Canfranc presenta una escasa explotación en lo referente a trenes de mercancías. Esta limitación es debida principalmente a la sinuosidad del trazado que evoluciona desde un tramo inicial prácticamente llano a un tramo final considerado de alta montaña que presenta unos gradientes elevados junto con curvas cuyos radios de curvatura son pequeños.

Todo ello hace que la mayor parte del tramo horario que podría dedicarse a la explotación trenes de mercancías se encuentre apenas sin explotación en cuanto a mercancías se refiere.

En la actualidad el flujo de transporte de mercancías se resume a tres trenes semanales con una capacidad anual de 124.000 t año, muy inferior a la que podría tener dado su flujo de transporte en la actualidad.

Mediante este estudio se plantea un nuevo sistema de explotación en contraposición al caso clásico de tren con tracción en cabeza de la composición que sea tecnológicamente asequible.

Con ello se pretende determinar las capacidades máximas que podrían tener cada vagón autopropulsado atendiendo a las características del trazado que posteriormente se simularán en el programa OpenTrack donde se determinara la capacidad máxima del flujo de transporte mediante vagones autopropulsados.

ÍNDICE

1. Objeto y justificación.....	1
2. Alcance	2
3. Descripción del problema	3
3.1 Datos y restricciones	3
3.2 Herramientas.....	3
3.2.1 Material rodante	3
3.2.2 Infraestructura	4
3.2.3 Horario	4
3.2.4 Simulación	4
3.2.3 Evaluación de resultados.....	4
3.3 Resultados esperados.....	4
4. Metodología	5
4.1 Caracterización de la línea	5
4.2 Vehículos y operatividad	5
4.3 Creación del modelo de simulación	5
4.4 Simulación en los diferentes escenarios	5
4.5 Resultados	6
5. Análisis de la línea de ferrocarril Zaragoza-Canfranc, consideraciones sobre las condiciones del trazado y limitaciones en cuanto a circulación e instalaciones.	7
5.1 Tramo Zaragoza-Tardienta:.....	7
5.1.1 Tramo Zaragoza-Villanueva de Gallego.....	7
5.1.2 Tramo Villanueva de Gallego-Tardienta.....	8
5.2 Tramo Tardienta-Variante de Huesca	9
5.3 Variante de Huesca-Canfranc.....	10
5.3.1 Tramo Variante de Huesca-Ayerbe	10
5.4 Tramo Ayerbe-Santa María y la Peña.....	11
5.5 Tramo Santa María y la Peña-Sabiñánigo	11
5.6 Tramo Sabiñánigo-Canfranc.....	11
5.7 Características del trazado: curvas.....	12
5.7.1 Tramo Zaragoza- Bifurcación de Canfranc	12
5.7.2 Tramo Bifurcación Canfranc –Jaca	12
5.7.3 Tramo Jaca-Canfranc.....	12
5.8 Explotación.....	13
6. Análisis de las capacidades y prestaciones de los vagones autopropulsados	14
6.1 Prestaciones de potencia de los vagones autopropulsados	14



6.2 Diseño Vagones Autopropulsados	18
6.2.1 Categoría A	18
6.2.2 Categoría B	19
7. Simulación del flujo de transporte en la línea.....	20
7.1 Caracterización de la línea en OpenTrack.....	20
7.2 Tiempos de recorrido del vagón del autopropulsado	23
7.2.1 Tramo Zaragoza-Canfranc	23
7.2.2 Tramo Canfranc-Zaragoza	24
7.3 Simulación	26
7.3.1 Escenario 1	26
7.3.2 Escenario 2	29
8. Análisis energético	31
8.1 Tramo Zaragoza-Canfranc	31
Consumo energético mercancías	31
Consumo energético vagón portacontenedores	32
Consumo energético vagón tolva.....	32
8.2 Tramo Canfranc-Zaragoza	33
Consumo energético mercancías	33
Vagones Autopropulsados	34
8.3 Resultados	34
9. Conclusiones y futura continuación del trabajo	35
10. Fuentes de información	36
Anexos.....	37
Anexo I.....	37
Anexo II.....	40
ANEXO III	42
Anexo IV	47
ANEXO V	49



LISTA DE REFERENCIAS

Figura 1: Módulos de simulación OpenTrack Fuente: OpenTrack.....	3
Figura 2: Apartadero Cogullada	8
Figura 3: Apartadero San Juan de Mozarrifar	8
Figura 4: Apartadero Villanueva de Gállego	8
Figura 5: Apartadero Zuera	9
Figura 6: Apartadero Tardienta.....	9
Figura 7: Variante de Huesca Fuente: Vía Libre.....	10
Figura 8: Apartadero Hoya de Huesca	11
Figura 9: Apartadero Plascencia del Monte.....	11
Figura 10: Potencia vs Velocidad	14
Figura 11: Esfuerzo tractivo vs Velocidad	15
Figura 12: Velocidad máxima vs Pendiente	16
Figura 13: Comprobación adherencia.....	16
Figura 14: Tolva TT5 Fuente: Renfe	18
Figura 15: Introducción de Estaciones OpenTrack.....	20
Figura 16: Introducción Características línea OpenTrack	20
Figura 17 Introducción Parámetros Motor OpenTrack.....	21
Figura 18: Introducción Parámetros Locomotoras	21
Figura 19: Introducción y Asignación de Itinerarios OpenTrack.....	22
Figura 20: Trazado Zaragoza-Canfranc OpenTrack	22
Figura 21: Malla Horaria Zaragoza Canfranc.....	23
Figura 22: Evolución de la velocidad recorrido Zaragoza-Canfranc.....	24
Figura 23: Tiempos de recorrido Canfranc-Zaragoza.....	24
Figura 24: Evolución de la velocidad Canfranc-Zaragoza.....	25
Figura 25: Malla horaria escenario 1 Tramo 6-23 h.....	26
Figura 26: Malla horaria escenario 1 Tramo 23-6.....	27
Figura 27: Trazado Zaragoza-Canfranc escenario 2 OpenTrack.....	29
Figura 28: Malla horaria escenario 2 Tramo 6-23 h	29
Figura 29: Malla horaria escenario 2 tramo 23-6 h	30
Figura 30: Consumo Energético Mercancías Zaragoza-Canfranc.....	31
Figura 31 Consumo energético vagón portacontenedores	32
Figura 32 Consumo energético vagón tolva	32
Figura 33: Esfuerzo tractivo vs velocidad mercancías	33
Figura 34: Esfuerzo tractivo vs velocidad vagones autopropulsados	34



LISTA DE REFERENCIAS

Tabla 1 Límite de carga por eje Fuente: ADIF	7
Tabla 2: Características Tramo Tardienta-Bifurcación Canfranc.....	9
Tabla 3: Tramo Ayerbe-Santa María y la Peña.....	11
Tabla 4: Tramo Santa María y la Peña-Sabiñánigo	11
Tabla 5: Tramo Sabiñánigo-Canfranc.....	12
Tabla 6: Curvas Tramo Zaragoza-Bifurcación Canfranc Fuente: Vía Libre.....	12
Tabla 7: Curvas Tramo Bifurcación Canfranc-Jaca Fuente: Vía Libre.....	12
Tabla 8: Curvas Tramo Jaca-Canfranc Fuente: Vía Libre.....	13
Tabla 9: Comprobación Potencia Pendiente 23 %.....	15
Tabla 10: Características Tolva TT5 Fuente: Renfe	18
Tabla 11: Composición Vagón Autopropulsado Tolva	18
Tabla 12: Características Vagón Portacontenedores MMC3 Fuente: Renfe	19
Tabla 13: Distribución de los contenedores en el vagón	19
Tabla 14: Composición Vagón Autopropulsado Portacontenedores.....	19
Tabla 15: Tiempo de Recorrido Zaragoza-Canfranc.....	23
Tabla 16: Resultados simulación escenario 1	27
Tabla 17: Tiempos de recorrido Zaragoza-Canfranc escenario 1.....	28
Tabla 18: Resultado simulación escenario 2.....	30
Tabla 19: Escenarios análisis energético.....	31
Tabla 20: Consumo energético Zaragoza-Canfranc	33
Tabla 21: Energía consumida Canfranc-Zaragoza	34



1. Objeto y justificación

El objeto de este trabajo es analizar la capacidad transporte de mercancías por ferrocarril en la línea Zaragoza-Canfranc mediante una alternativa tecnológicamente asequible consistente en el uso de vagones autopropulsados.

Con la composición de vagones autopropulsados tenemos un tren con tracción integral en cada vagón, permitiendo superar mayores rampas que en el caso clásico de tren con tracción en cabeza de la composición.

Los vagones pueden ser transportados de forma individual, o bien creando composiciones hasta conseguir la longitud idónea que maximice la capacidad de transporte de la línea, analizándose el flujo logístico óptimo.

Debido a que la línea Zaragoza-Canfranc presenta una escasa explotación en lo referente a trenes de mercancías. Esta limitación es debida principalmente a la sinuosidad del trazado que evoluciona desde un tramo inicial prácticamente llano a un tramo final considerado de alta montaña que presenta unos gradientes elevados junto con curvas cuyos radios de curvatura son pequeños.

Todo ello hace que la mayor parte del tramo horario que podría dedicarse a la explotación trenes de mercancías se encuentre apenas sin explotación en cuanto a mercancías se refiere.

En la actualidad el flujo de transporte de mercancías se resume a tres trenes semanales con una capacidad anual de 124.000 t año, muy inferior a la que podría tener dado su flujo de transporte en la actualidad.

Mediante este estudio se plantea un nuevo sistema de explotación en contraposición al caso clásico de tren con tracción en cabeza de la composición que sea tecnológicamente asequible.

Con ello se pretende determinar las capacidades máximas que podrían tener cada vagón autopropulsado atendiendo a las características del trazado que posteriormente se simularán en el programa OpenTrack donde se determinara la capacidad máxima del flujo de transporte mediante vagones autopropulsados.

Mediante esta alternativa de vagones autopropulsados con tracción integral se prevé que se puedan superar las elevadas rampas y curvas que presenta la línea a lo largo de sus 218 kilómetros con mayor facilidad obteniendo un incremento considerable del flujo de transporte al que presenta la línea en la actualidad.

Estos vagones podrían ser transportados en diferentes configuraciones tanto de forma individual o mediante composiciones cuya longitud máxima se podrá determinar al final de este estudio a través de un análisis que se llevará a cabo a continuación y que tendrá en cuenta las limitaciones presentes a lo largo de la línea como la de los vagones autopropulsados.

Una vez definido el trazado e identificadas las limitaciones técnicas del trazado se pretende llegar a unas conclusiones finales acerca de esta nueva alternativa de explotación.

2. Alcance

El estudio que se llevara a cabo tendrá lugar de la siguiente manera:

Se realizará un estudio previo del trazado en cuanto a rampas, pendientes y curvaturas para caracterizar con el mayor grado de definición la línea.

Se llevara a cabo un análisis de las instalaciones de la línea para determinar las limitaciones de la línea en cuanto a velocidades de circulación junto con los tiempos de espera que se dan en cada trayecto.

Se llevara a cabo un análisis acerca de los vehículos que circulan por la vía y a la demanda que hacen frente en la actualidad.

Se realizara una caracterización de los vehículos autopropulsados para la carga que se utilizaran buscando el mayor grado de adaptación y versatilidad para la demanda que presenta la línea en la actualidad.

Se realizará mediante el programa OPENTRACK, la simulación del flujo de transporte logístico una vez definido el modelo de simulación con las características técnicas y logísticas de la línea previamente analizada.

Se realizaran diferentes simulaciones teniendo en cuenta diferentes escenarios y configuraciones de las composiciones.

Se realizarán unas tablas de resultados con cuantificación de variables de circulación y de capacidad de la línea en malla ferroviaria.

Se realizara un análisis energético del diferente escenario expuestos con anterioridad.

Se realizaran un análisis final una vez realizadas todas las simulaciones para llegar a unas conclusiones finales sobre los resultados obtenidos a lo largo del estudio que se ha llevado a cabo.



3. Descripción del problema

3.1 Datos y restricciones

Como datos del trayecto se parte de un trazado montañoso con elevadas rampas, curvas y limitaciones de velocidad que no permiten maximizar el flujo de transporte que debería tener la línea.

3.2 Herramientas

El programa utilizado para el estudio es: OpenTrack. Esta herramienta de simulación es utilizada por empresas ferroviarias, empresas de suministros consultoras y universidades de diferentes países.

OpenTrack nos permite realizar las siguientes tareas:

- Determinar las necesidades para una infraestructura ferroviaria.
- Analizar la capacidad de infraestructuras y estaciones.
- Construcción de horarios permitiendo el análisis de la solidez de los mismos.
- Análisis de varios sistemas de señales, como el sistema de cantones discretos, cantones cortos, LZB, ETCS, nivel 1, ETCS nivel 2, ETCS nivel 3 (cantones móviles) o el ERTMS.
- Analizar los efectos de fallos del sistema y retrasos.
- Calcular el consumo de potencia necesario para los servicios ferroviarios.

El interfaz de usuario con el programa se presenta en la siguiente figura:

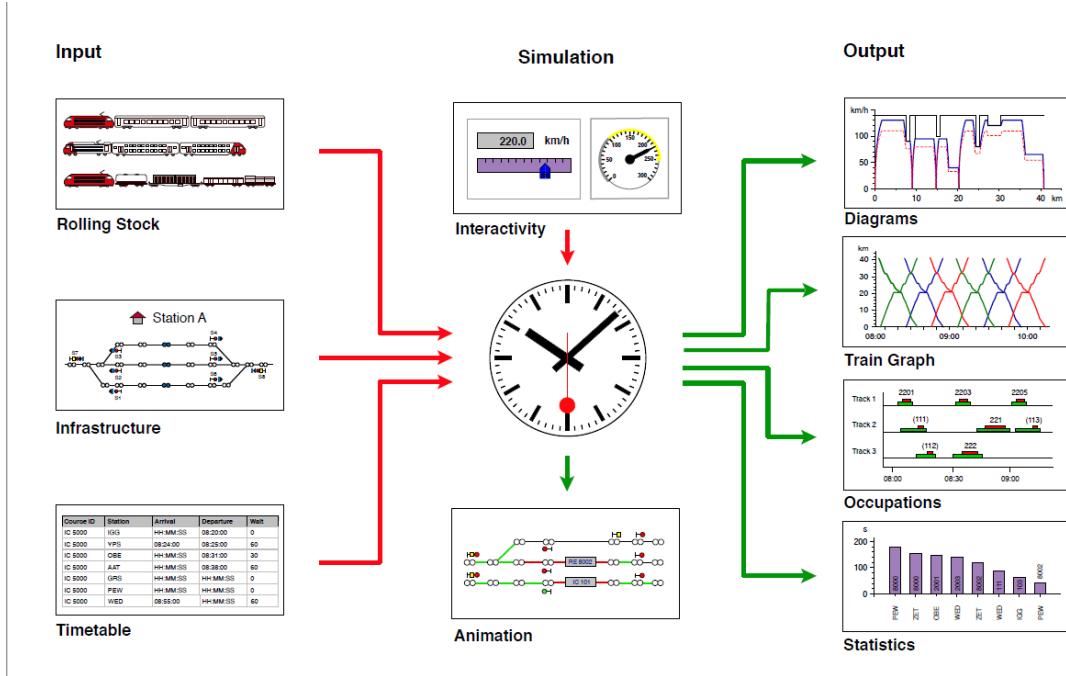


Figura 1: Módulos de simulación OpenTrack Fuente: OpenTrack

Como podemos ver a partir de unas entradas que puede establecer el usuario como son:

3.2.1 Material rodante

El programa permite caracterizar cada locomotora en función de sus datos técnicos como son el esfuerzo de tracción, diagramas de velocidad, peso, longitud, factor de adherencia y sistema de potencia.



A la hora de realizar una simulación se puede asignar a cada locomotora los remolques o vagones que componen el conjunto para los distintos tipos de circulaciones.

3.2.2 Infraestructura:

La red ferroviaria se puede definir en forma de gráficos denominados "gráficos de doble vértice" que permiten establecer los diferentes nudos y cantones que componen la red y que se pueden editar mediante las diferentes herramientas del programa.

En cada elemento de la vía se pueden definir los distintos atributos que caracterizan a la línea como por ejemplo: longitud, rampa, velocidades máximas para los distintos tipos de tren... Además de los nudos y los cantones se pueden crear y gestionar otros elementos de la infraestructura como las señales e itinerarios.

3.2.3 Horario

El programa permite definir el horario de salida de trenes de las distintas estaciones, apeaderos y las relaciones en los enlaces entre los trenes que durante la simulación los trenes tratarán de cumplir.

3.2.4 Simulación

La simulación permite al usuario ver los trenes en movimiento por la infraestructura, visualizar las secciones de itinerarios ocupadas o reservadas además del estado de las señales.

Durante la simulación los trenes tratan de cumplir con el horario establecido.

El movimiento de los trenes se calcula mediante la ecuación fundamental del movimiento determinada a partir de la fuerza de tracción disponible, la resistencia al avance y los parámetros de la infraestructura.

3.2.3 Evaluación de resultados

OpenTrack nos permite una gran cantidad de medios para evaluar los resultados de la simulación.

Para cada tren se puede visualizar:

- Diagrama de velocidad/distancia
- Diagrama de distancia/tiempo
- Diagrama de energía/distancia

Para cada sección de línea nos permite obtener la malla de horarios y la ocupación de los cantones.

Finalmente para cada estación quedaran registradas las horas de paso, las horas efectivas, la ocupación de las vías y los retrasos.

3.3 Resultados esperados

Mediante el estudio de la explotación del trazado utilizando vagones autopropulsados se espera incrementar notablemente el flujo de transporte de la línea compatibilizando su explotación con los trenes de viajeros que actualmente circulan por la línea.

Por otro lado se espera que para este aumento de explotación conlleve también una disminución del consumo energético en comparación con los trenes de mercancías utilizados en la actualidad de manera que sea un medio de explotación más eficaz al utilizado en la actualidad.

4. Metodología

La resolución del problema desarrollado anteriormente se ha dividido en las siguientes etapas:

4.1 Caracterización de la línea

En esta etapa del estudio se procederá a realizar la caracterización de la línea. Para ello se realizará una búsqueda de las distintas fuentes de información donde se recojan datos de la línea así como de las restricciones que presenta el trazado en la actualidad en cuanto a curvas, rampas, velocidad máxima en cada tramo, señalización, que presenta a lo largo de toda su infraestructura. En esta búsqueda se realizará un especial énfasis en la información que nos pueda suministrar la compañía encargada de la gestión de la línea (ADIF) así como de la información que se recoja en los diferentes estudios realizados previamente sobre la línea para obtener el mayor grado de definición para realizar su caracterización.

A continuación seleccionarán los datos más relevantes que se trasladarán posteriormente al modelo de simulación y finalmente se realizará una búsqueda de datos en cuanto a la operatividad de la línea en la actualidad tanto de trenes de viajeros como de mercancías.

4.2 Vehículos y operatividad

En esta fase se realizará una búsqueda de los posibles vehículos que pueden ser aptos para circular en este trazado atendiendo a las restricciones que presenta el mismo.

A continuación se procederá a determinar las prestaciones del vehículo para su correcto funcionamiento. Para ello se determinará el margen operativo a lo largo del trazado teniendo en cuenta el cumplimiento en todo momento tanto de limitaciones de potencia como de adherencia a las que se tenga que enfrentar a lo largo del trazado. Finalmente se seleccionará el vehículo más adecuado para cumplir con los requerimientos de los seleccionados inicialmente atendiendo a la demanda que tiene la línea en la actualidad.

4.3 Creación del modelo de simulación

En primer lugar se realizará la traslación de todos los datos recogidos a lo largo de los estudios previos (rampas, curvas, señalización, límites de velocidad, túneles...) al programa de simulación con el objeto de obtener la mayor grado de definición en el modelo de simulación con las herramientas que nos otorga OpenTrack.

Una vez obtenido el modelo de simulación de la línea Zaragoza-Canfranc se procederá a introducir todos los parámetros que caracterizan a los vagones autopropulsados.

Finalmente una vez definidos todos los aspectos necesarios para la caracterización de la línea como de los vagones autopropulsados se procederá a realizar la simulación con el programa OpenTrack.

4.4 Simulación en los diferentes escenarios

En primer lugar se procederá a realizar la simulación del flujo de transporte en el escenario que se tiene en la actualidad. La simulación se realizará dividiendo la misma en dos franjas horarias para el análisis de su capacidad máxima anual teniendo atendiendo a las restricciones que presenta la línea en cuanto a operatividad y mantenimiento.

Una vez finalizada la primera simulación se procederá a realizar un análisis de los resultados obtenidos en la simulación así como el planteamiento de alternativas que mejorarían la explotación de la línea en base a la interpretación de los mismos.



En segundo lugar se realizará la implementación de las modificaciones planteadas para el trazado en el programa una vez determinados las limitaciones que presenta la línea en la actualidad y se procederá a la simulación en el programa OpenTrack.

Finalmente se realizará un estudio energético en diferentes escenarios para determinar el grado que este nuevo sistema de explotación puede llegar aportar en contraposición del tren de mercancías que actualmente presta servicio a la línea de ferrocarril

4.5 Resultados

Una vez realizada la simulación de los diferentes casos planteados se procederá a realizar un análisis de los mismos para determinar el grado de mejora obtenido respecto a la situación de partida.

Finalmente se decidirá si el nuevo sistema de explotación planteado para el trazado Zaragoza-Canfranc cumple modificaciones cumplen con las expectativas planteadas inicialmente.

5. Análisis de la línea de ferrocarril Zaragoza-Canfranc, consideraciones sobre las condiciones del trazado y limitaciones en cuanto a circulación e instalaciones.

Se ha realizado el análisis de las características de la línea de ferrocarril Zaragoza-Canfranc atendiendo a los siguientes aspectos técnicos:

- Estructura de la vía y ancho de la vía
- Características del trazado: rampas, curvas y restricciones de velocidad.
- Explotación de la línea.

Las líneas de ferrocarril se clasifican en nueve categorías en función del tipo de traviesa, carril junto con el estado de la estructura y superestructura como muestra la siguiente tabla [1]:

Tipo de línea	Masa Máxima	
	Por Eje	Por Metro
A	16,0 t	5,0 t
B1	18,0 t	5,0 t
B2	18,0 t	6,4 t
C2	20,0 t	6,4 t
C3	20,0 t	7,2 t
C4	20,0 t	8,0 t
D2	22,5 t	6,4 t
D3	22,5 t	7,2 t
D4	22,5 t	8,0 t

Tabla 1 Límite de carga por eje Fuente: ADIF

La línea del Canfranc está catalogada como tipo D por lo tanto la capacidad de la línea es de 20 t/eje. Esta limitación de capacidad se respetara a lo largo de todo el estudio en todos los tramos de la línea.

En cuanto a la electrificación de la línea, existen dos tensiones diferentes de electrificación a lo largo de la misma: una de 25000 V y otra de 3000 V correspondientes a la línea de ancho internacional (UIC) y a la línea de ancho ibérico respectivamente

Una vez catalogada la línea se procede a analizar el trazado. Para ello se ha dividido el estudio del trazado en diferentes tramos a partir de los datos obtenido por la empresa encargada de la gestión de la línea que se adjuntan en el ANEXO I:

5.1 Tramo Zaragoza-Tardienta:

Este tramo comprendido entre Zaragoza y el final de la variante de Huesca (94km) se caracteriza por rampas moderadas y curvas de gran radio, superiores a 1000 m, donde coexisten dos vías:

- Ancho internacional (1435 m) electrificada
- Ancho ibérico (1668 m) electrificada

Dentro de estos tramos podemos dividir el análisis en distintos subtramos para ver los aspectos más característicos del trazado:

5.1.1 Tramo Zaragoza-Villanueva de Gallego

Este tramo de 20,9 km presenta un perfil suave con rampas máximas que no superan las 9 %.



En este tramo se encuentran tres apartaderos cuyos detalles se muestran en las siguientes figuras:

Apartadero Cogullada

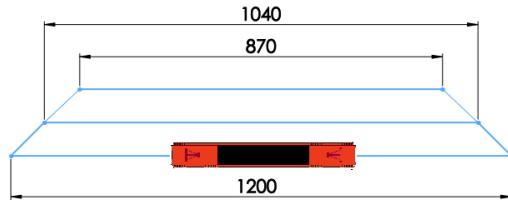


Figura 2: Apartadero Cogullada

Apartadero de San Juan de Mozarrifar

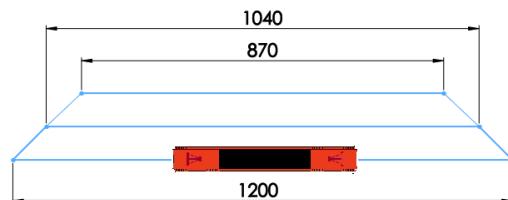


Figura 3: Apartadero San Juan de Mozarrifar

Apartadero Villanueva de Gállego

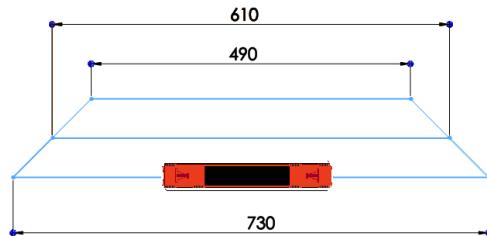


Figura 4: Apartadero Villanueva de Gállego

La velocidad máxima que pueden desarrollar los trenes de mercancías en este tramo es de 160 km/h

5.1.2 Tramo Villanueva de Gallego-Tardienta

En este tramo de aproximadamente 40 km el trazado presenta rampas que no superan las 12 %.

En este tramo existen dos apartaderos cuyos detalles se muestran a continuación:



Apartadero de Zuera

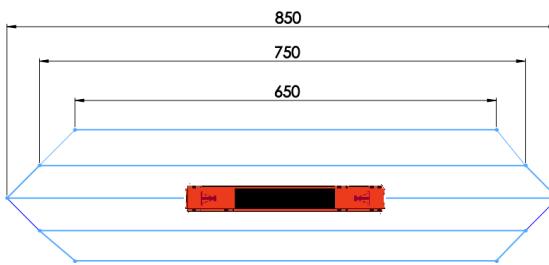


Figura 5: Apartadero Zuera

Apartadero Tardienta

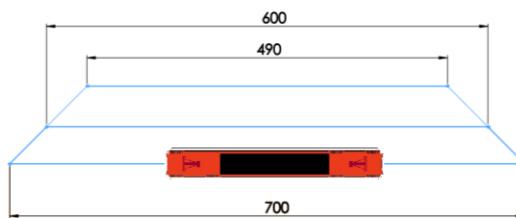


Figura 6: Apartadero Tardienta

Las estaciones de este tramo permiten la explotación de la línea con una vía de cada ancho y están adaptadas para la circulación de trenes de alta velocidad con enclavamientos electrónicos en las estaciones de: Villanueva de Gallego, Zuera, Almudévar y Tardienta.

La velocidad máxima que pueden desarrollar los trenes de mercancías en este tramo es de 160 km/h.

5.2 Tramo Tardienta-Variante de Huesca

Desde Tardienta hasta el inicio de la variante de Huesca es de vía única, con tercer carril, por lo que los trenes de distinto ancho comparten la misma plataforma.

En la siguiente figura se muestran las características del tramo:

Tramo	Longitud (km)	Velocidad máxima(km/h)	Rampa máxima (%) ZGZ-CFN
Tardienta-Bifurcación Canfranc	15,7	160	12

Tabla 2: Características Tramo Tardienta-Bifurcación Canfranc

Esta variante se inicia en el punto kilométrico 15,683 de la línea Tardienta-Huesca permitiendo la circulación directa de los trenes sin pasar por Huesca.

Dispone además de un bypass para las circulaciones Huesca-Jaca-Canfranc que se inicia en el punto kilométrico 18,1 de la línea Huesca-Canfranc con una longitud de 10,2 km en su recorrido principal a la que hay que añadir los 1,7 km de la vía de enlace.

Dispone de un puesto de adelantamiento y estacionamiento de trenes entre los puntos kilométricos 2,8-4,0.



La velocidad máxima a lo largo de la variante es de 160 km/h mientras que en la vía de enlace la velocidad máxima es de 115 km/h.

En la siguiente figura se muestra con más detalles las características de este tramo del trazado [2]:

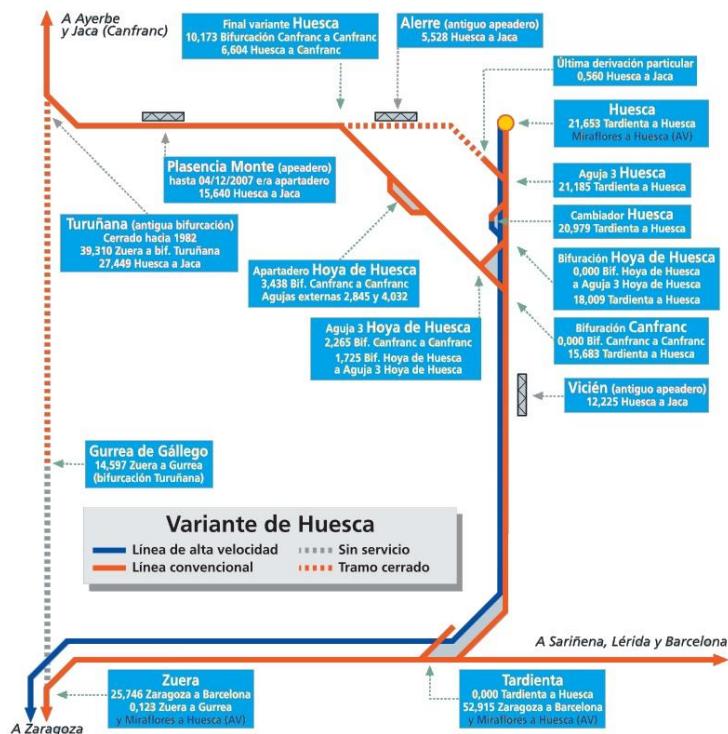


Figura 7: Variante de Huesca Fuente: Vía Libre

5.3 Variante de Huesca-Canfranc

Este tramo en el que la vía es de ancho ibérico sin electrificar presenta fuertes desniveles con rampas que llegan a alcanzar las 23 %. Las curvas en este tramo presentan radios de curva que oscilan entre los 300 y 500 m en diferentes puntos del recorrido.

En este tramo se atraviesan 19 túneles con una longitud total de 5594 m, 19 puentes metálicos y el Viaducto de Cenarbe.

A continuación se analiza cada tramo más detalladamente mediante los distintos subtramos que componen el trayecto:

5.3.1 Tramo Variante de Huesca-Ayerbe

En ese tramo nos encontramos con un gradiente máximo de 16 % siendo la velocidad máxima del mismo de 160 km/h correspondientes a la circulación a lo largo de la variante de Huesca.

Esta velocidad se ve notablemente reducida una vez se sale de la variante en dirección Plasencia del Monte donde la velocidad disminuye hasta los 50 km/h en este tramo.



A lo largo de este tramo nos encontramos con dos apartaderos cuyas longitudes se representan en la siguiente figura:

Apartadero Hoya de Huesca

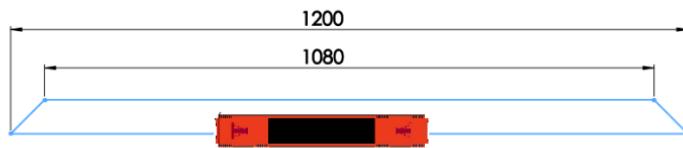


Figura 8: Apartadero Hoya de Huesca

Apartadero Plascencia del Monte

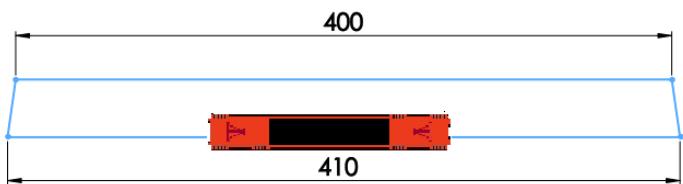


Figura 9: Apartadero Plascencia del Monte

5.4 Tramo Ayerbe-Santa María y la Peña

A lo largo de este tramo nos encontramos con 6 túneles y un puente metálico y una curva cuyo radio es muy pequeño siendo la pendiente máxima durante este tramo de 17 %. En la siguiente tabla se muestran más detalladamente las características de este tramo:

Tramo	Longitud (km)	Velocidad máxima(km/h)	Rampa máxima (%) ZGZ-CFN
Ayerbe-Riglos Concilio	6,7	60	17
Riglos Concilio-Riglos	3,3	70	17
Riglos-Santa María y la Peña	8,4	65	17

Tabla 3: Tramo Ayerbe-Santa María y la Peña

5.5 Tramo Santa María y la Peña-Sabiñánigo

A lo largo de este tramo se atraviesan 8 túneles mientras que la pendiente sigue siendo elevada siendo la rampa máxima de (17 %). Los detalles de este tramo se ven en la siguiente tabla:

Tramo	Longitud (km)	Velocidad máxima(km/h)	Rampa máxima (%) ZGZ-CFN
Santa María y la Peña-Azáñigo	6	70	17
Azáñigo-Caldearenas	13,1	65	17
Caldearenas-Sabiñánigo	21,8	70	17

Tabla 4: Tramo Santa María y la Peña-Sabiñánigo

5.6 Tramo Sabiñánigo-Canfranc

Es en este tramo donde se alcanza los valores máximos de pendiente que unidos a que la infraestructura de la línea no presenta un buen estado es uno de los tramos más limitantes del trazado. La velocidad máxima durante la mayor parte de este trayecto es de 50 km/h. La siguiente tabla contiene los detalles más relevantes de este tramo:

Tramo	Longitud (km)	Velocidad máxima(km/h)	Rampa máxima (%)
			ZGZ-CFN
Sabiñánigo-Jaca	15,9	70	18
Jaca-Castiello	8,7	50	20
Castiello-Villanúa	8,7	50	23
Villanúa-Canfranc	7,3	50	23

Tabla 5: Tramo Sabiñánigo-Canfranc

5.7 Características del trazado: curvas

A continuación se va a realizar un análisis más detallado de las curvas que existen a lo largo del trazado dado que debido a su pequeño radio presentan una limitación relevante en cuanto a la capacidad de explotación que pueda presentar la línea. Para ello se ha dividido es estudio de las curvas en los siguientes tramos [3]:

5.7.1 Tramo Zaragoza- Bifurcación de Canfranc

Presenta pendientes suaves que no superan las 12 %o y el radio mínimo de las curvas es superior a 1000 m por lo que no presenta limitaciones significativas para su explotación.

Tramo	Radio (m)	Velocidad máxima (km/h)	
		Viajeros	Mercancías
Zaragoza-Tardienta	>1000	200	160
Tardienta-Huesca	1000	160	140

Tabla 6: Curvas Tramo Zaragoza-Bifurcación Canfranc Fuente: Vía Libre

5.7.2 Tramo Bifurcación Canfranc –Jaca

Este tramo presenta rampas que alcanzan las 18 %o (Caldearenas-Jaca) con radios de curvatura de 300 m presentando una importante resistencia al paso de los trenes.

A continuación se presentan las zonas puntos más característicos del trazado en función del radio de curvatura de este tramo:

Tramo	Rampa característica (%)	Radio mínimo (m)	Velocidad máxima (km/h)	
			Viajeros	Mercancías
Huesca-Plascencia del Monte	16	700	95	80
Plascencia del Monte-Ayerbe	15	300	80	60
Ayerbe-Riglos	16	300	50	50
Riglos-Sta. María y La Peña	16	300	50	50
Sta. María y La Peña-Azáñigo	5	400	60	60
Azáñigo-Caldearenas	5	300	60	60
Caldearenas-Sabiñánigo	5	300	60	60
Sabiñánigo-Jaca	18	300	60	60

Tabla 7: Curvas Tramo Bifurcación Canfranc-Jaca Fuente: Vía Libre

5.7.3 Tramo Jaca-Canfranc

Este tramo es el que presenta mayores dificultades a la circulación de trenes debidas principalmente a las condiciones climatológicas como la sinuosidad del terreno.

Las rampas alcanzan las 20 %o y las curvas presentan unos radios de curvatura de entre 200 y 400.



Las velocidades máximas en función de las características del radio de curvatura en este tramo son las siguientes:

Tramo	Rampa característica (%)	Radio mínimo (m)	Velocidad máxima (km/h)	
			Viajeros	Mercancías
Jaca-Castiello Pueblo	19	200	60	60
Castiello Pueblo –Villanúa	20	300	65	60
Villanúa-Canfranc	20	400	50	50

Tabla 8: Curvas Tramo Jaca-Canfranc Fuente: Vía Libre

5.8 Explotación

En la actualidad el servicio prestado por la línea Zaragoza-Canfranc es mixto: viajeros y mercancías. Se distinguen los siguientes servicios:

- Tren regional: cuatro servicios diarios en cada sentido con paradas en las estaciones de Zaragoza, Villanueva de Gállego, Tardienta y Huesca.
- Tren regional exprés: dos servicios diarios en cada sentido que se prolongan hasta Canfranc con paradas en las estaciones de Ayerbe, Riglos, Santa María y la Peña, Azáñigo, Caldearenas, Sabiñánigo, Jaca, Castiello-Pueblo, Villanúa además de las paradas en Tardienta y Huesca.
- AVE (Madrid –Huesca): un servicio diario en cada sentido con paradas en Tardienta y Huesca.

En cuanto al servicio de mercancías varía entre 3-5 trenes semanales dependiendo de la demanda.

El material rodante empleado para el servicio de alta velocidad es el tren TALGOV 350 con una velocidad media de 200 km/h. El servicio regional exprés es cubierto por trenes TRD de la serie 594 adaptados para circular por ambos anchos.

A la hora de realizar el estudio únicamente se tendrá en cuenta el tráfico de viajeros y los horarios y tiempos de espera [4]. Estos se recogen con más detalle en el ANEXO 2.



6. Análisis de las capacidades y prestaciones de los vagones autopropulsados

6.1 Prestaciones de potencia de los vagones autopropulsados

Una vez realizado un análisis detallado de la línea Zaragoza-Canfranc se procede a diseñar/calcular todos los componentes que requerirá el vagón su posterior simulación.

En primer lugar se ha procedido se ha calculado las necesidades de potencia para el vagón comprobando que cumpla en todo su rango de operación con las limitaciones tanto de adherencia como de potencia atendiendo a los siguientes parámetros:

- **Límite de carga por eje**

Como se ha mencionado anteriormente la línea está catalogada como tipo D por lo tanto nuestro vagón tendrá un peso máximo de 80 toneladas disponiendo de cuatro ejes.

- **Gradiente máximo**

Como condición de funcionamiento límite se ha establecido que para los tramos de la línea donde la pendiente alcanza las 24 % la velocidad máxima a la que puedan circular los vagones por esa zona sea de 50 km/h.

Una vez establecidos los parámetros relevantes se procede al cálculo de la potencia necesaria que requerirá el vagón. Para ello se ha utilizado las siguientes ecuaciones:

$$W_T = \frac{P * \Psi * v}{75} [CV]$$

Siendo:

P : Peso total vagón autopropulsado [t]

Ψ : Esfuerzo teórico=R. Rodadura + R. Pendiente + R. Curva [kp/ton]

v : Velocidad media en cada tramo [m/s]

Una vez realizados los cálculos se han obtenido los resultados que se muestran a continuación los cuales pueden verse con mayor detalle en el anexo III:

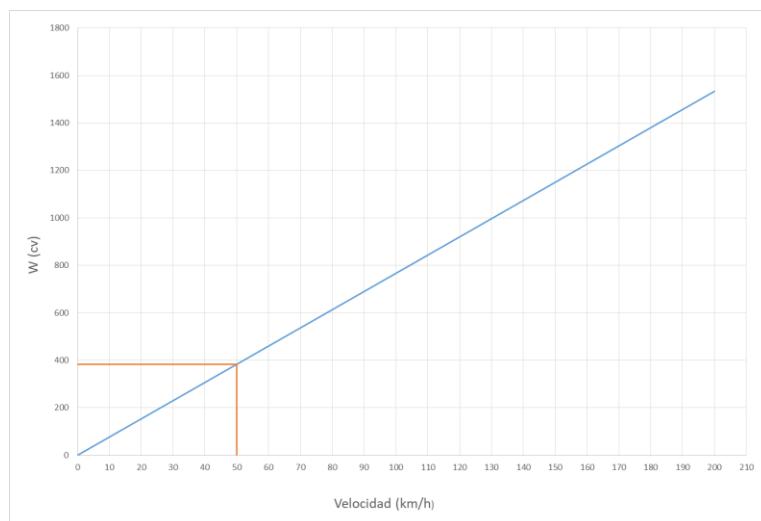


Figura 10: Potencia vs Velocidad



Pendiente: 23 %o

Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	Potencia (cv)
0	0	0,00
5	1,39	38,33
10	2,78	76,67
15	4,17	115
20	5,56	153,33
25	6,94	191,67
30	8,33	230
35	9,72	268,33
40	11,11	306,67
45	12,50	345,00
50	13,89	383,33

Tabla 9: Comprobación Potencia Pendiente 23 %o

Como se puede observar se necesitará un motor cuya potencia sea mayor o igual a 383,33 CV para cumplir la condición de potencia:

$$W_{\text{máquina}} \geq W_T$$

A continuación se ha procedido a la obtención de las curvas de esfuerzo tractive en función de la velocidad. Para ello se ha realizado una interpolación lineal de las curvas de los motores que se utilizan actualmente por Renfe para posteriormente introducirlo en OpenTrack para realizar la simulación. La curva que tendrá el motor se muestra en la siguiente figura:

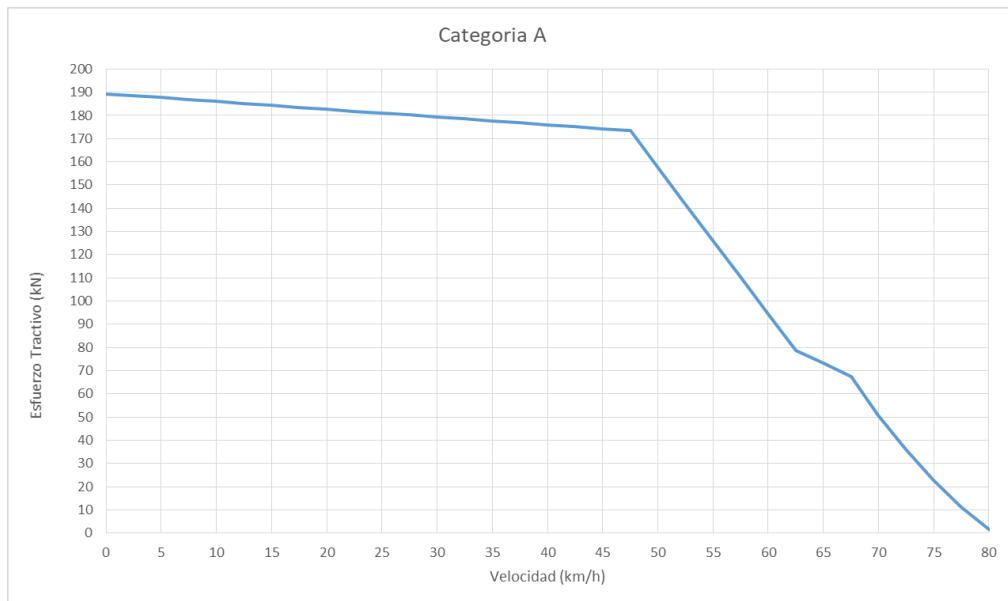


Figura 11: Esfuerzo tractivo vs Velocidad

Como se puede observar la velocidad máxima que puede alcanzar en llano es de 80 km/h.

En la siguiente figura se muestra la velocidad en función del gradiente del mismo:

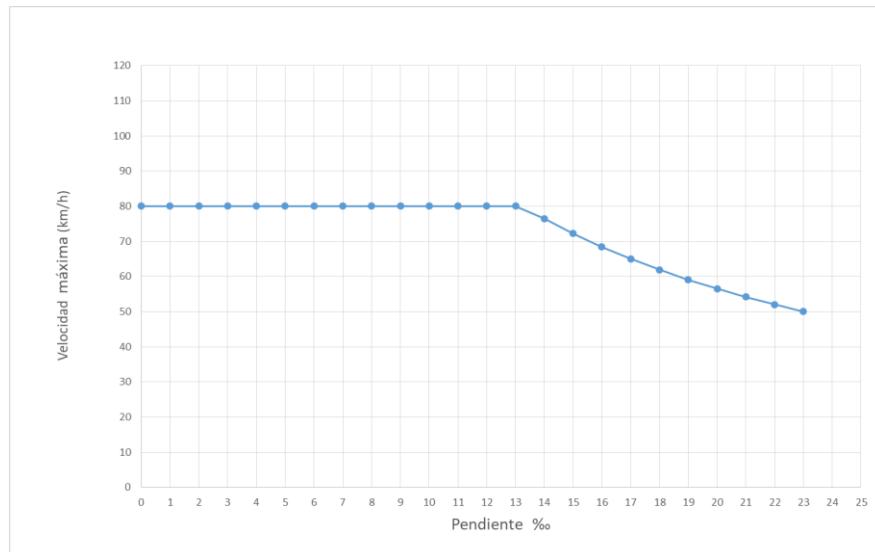


Figura 12: Velocidad máxima vs Pendiente

Por último se ha procedido a realizar la comprobación de adherencia del motor propuesto. Para ello se han utilizado las siguientes ecuaciones:

$$W = \frac{100}{27} * \frac{\varphi_o}{1 + 0.01 * v} * P * v$$

Siendo:

W : Potencia máxima que se puede aplicar a un eje [CV]

P : Peso adherente [ton]

v : Velocidad del tren [km/h]

φ_o : Coeficiente de adherencia en arranque

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica:

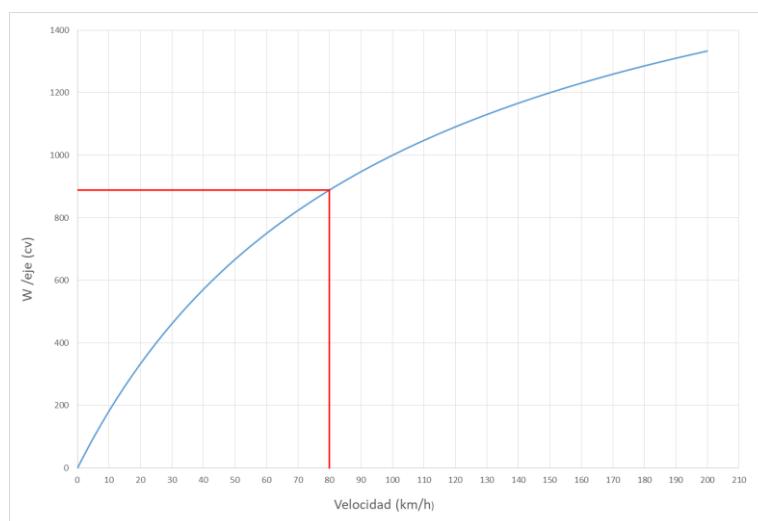


Figura 13: Comprobación adherencia



Como podemos observar para que se produjera una pérdida debida a adherencia tendríamos que aplicar una potencia de 833,33 CV/eje que es muy inferior a la que puede llegar a alcanzar el vagón que sería de unos 100 CV /eje por lo que se deduce que no se presentara ningún problema en cuanto a adherencia.

Una vez definidas las capacidades y prestaciones de los vagones autopropulsados se procede a su diseño. Para ello se ha decidido dividir su estudio en dos categorías atendiendo a la demanda actual que tiene en la línea.



6.2 Diseño Vagones Autopropulsados

6.2.1 Categoría A

Esta primera categoría consiste en un vagón tolva que se suele utilizar para el transporte de minerales, carbón, material para construcción, carbón o balasto para el mantenimiento de la estructura ferroviaria.

El vagón tolva que se ha elegido para realizar el estudio es el *TT5* cuyas características se muestran a continuación [5]:



Figura 14: Tolva TT5 Fuente: Renfe

Carga máxima (t)	56
Tara media (t)	24
Carga máxima por eje (t)	20
Freno	Aire comprimido
Velocidad máxima (km/h)	100
Longitud entre topes (m)	14.16
Altura máxima (m)	4,28
Volumen útil (m ³)	75

Tabla 10: Características Tolva TT5 Fuente: Renfe

Finalmente una vez definido todos los componentes que componen el vagón autopropulsado se ha procedido a establecer las limitaciones funcionales del mismo en conjunto que se muestra en la siguiente tabla:

Carga máxima composición (t)	80
Tara (t)	24
Carga útil (t)	56
Carga máxima por eje (t)	20

Tabla 11: Composición Vagón Autopropulsado Tolva

6.2.2 Categoría B

En esta categoría está formada por vagones plataforma portacontenedores que permiten el transporte de contenedores facilitando el transporte intermodal entre ferrocarril y camión.

La plataforma que se ha elegido es la MMC3 cuyas características se muestran a continuación [5]:



Carga máxima (t)	60
Tara media (t)	20
Freno	Aire Comprimido
Velocidad máxima (km/h)	120
Longitud entre topes (m)	19.90
Altura Apoyo Contenedores (m)	1,21
Largo (m)	18.66
Ancho (m)	2,10

Tabla 12: Características Vagón Portacontenedores MMC3 Fuente: Renfe

Esta plataforma nos permite diferentes en función de los distintos tipos de contenedores y capacidades:

Número de contenedores	Longitud Contenedor (pies)
3	20
2	40-20
2	30
2	20-30
2	20
1	45
1	40

Tabla 13: Distribución de los contenedores en el vagón

Finalmente la disposición final del vagón atendiendo a todos los datos anteriormente expuestos es la siguiente:

Carga máxima composición (t)	80
Tara (t)	25
Carga útil (t)	55
Carga máxima por eje (t)	20

Tabla 14: Composición Vagón Autopropulsado Portacontenedores



Ilustración 1

7. Simulación del flujo de transporte en la línea

7.1 Caracterización de la línea en OpenTrack

Una vez analizado tanto la línea como obtenida la configuración de los vagones autopropulsados se procede a realizar la simulación en OPENTRACK.

En primer lugar se ha procedido a introducir todas las estaciones que componen la línea Zaragoza-Canfranc en función de la distancia a la que se encuentran, altitud sobre la superficie del mar, que se va a realizar el estudio como se muestra en la figura siguiente:

ID	Name	Type	Comp. ID	Dept. ID	Coord. X
1	Zaragoza		0	0	1
10	Caldearenas		0	0	150
11	Sabinanigo		0	0	172
12	Jaca		0	0	188
13	Castillejo-Pueblo		0	0	194
14	Castillejo		0	0	197
15	Villanúa		0	0	205
16	Canfranc		0	0	213
2	Villanueva de Gallego		0	0	21
3	Tardienta		0	0	53
4	Huesca		0	0	84
5	Ayerbe		0	0	113
6	Riglos-Concilio		0	0	119
7	Riglos		0	0	123
8	Santa María y La Peña		0	0	132

Figura 15: Introducción de Estaciones OpenTrack

A continuación se han introducido los diferentes puntos que configuraran la línea ferroviaria mediante gráficos de “doble vértice” que permiten establecer los diferentes nudos y cantones que componen la red en cada sentido de circulación.

Una vez introducidos los diferentes vértices que componen la red se ha procedido a unirlos y establecer los distintos atributos que caracterizan a la línea como: longitud, rampa, curvas, velocidades máximas... Las siguientes figuras muestran:

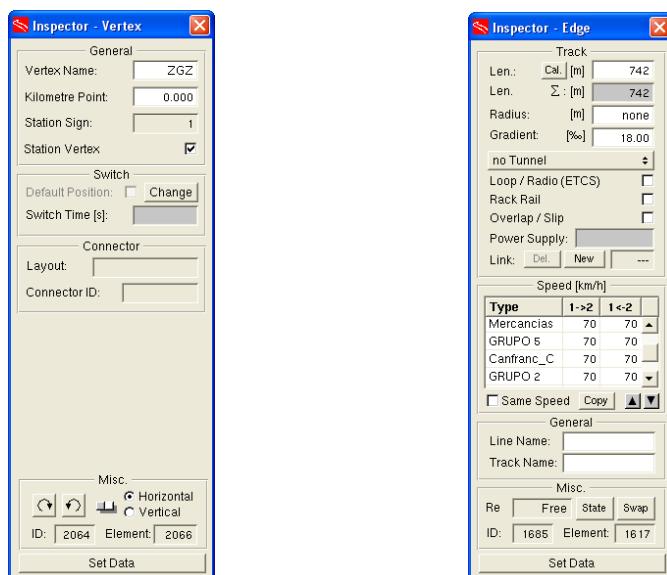


Figura 16: Introducción Características línea OpenTrack



Una vez se han introducido todos los parámetros que caracterizan la red en el programa se ha procedido a introducir las características de potencia que van a definir el comportamiento de los vagones autopropulsados, trenes de pasajeros, mercancías sobre los que se va a realizar el estudio introduciendo sus datos técnicos: esfuerzo de tracción, diagramas de velocidad, peso, longitud, factor de adherencia y sistema de potencia como se muestra en las siguientes figuras:

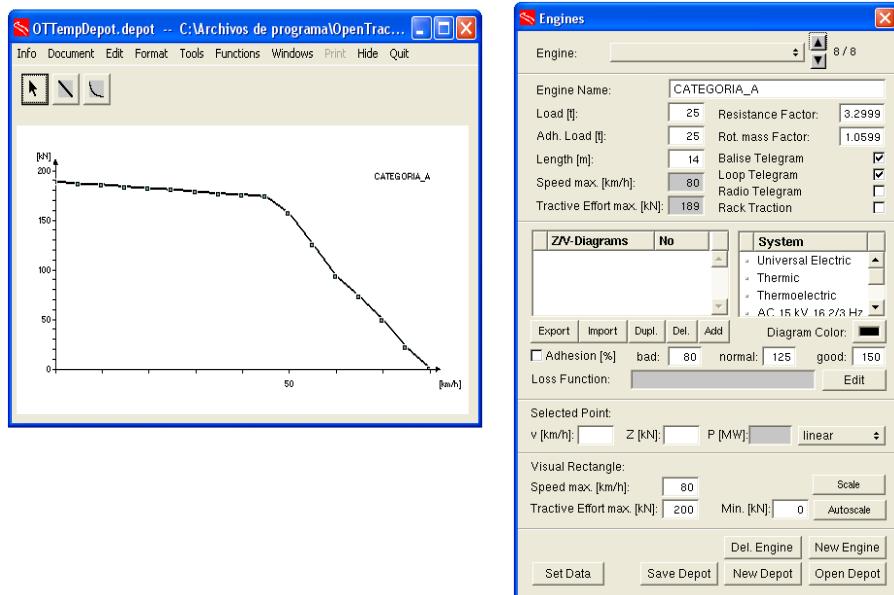


Figura 17 Introducción Parámetros Motor OpenTrack

Una vez definidas las características de los motores se procede a asignar a cada locomotora los vagones que componen el conjunto para los distintos tipos de circulaciones como se muestra en la siguiente figura:

This dialog box is used to define train configurations. It includes fields for 'Train Name' (LOCO_333.33), 'Type' (Freight Train), and 'Category' (Category 1). Under 'Engines', there's a table for 'SERIE 333.33' with 'Load [t]' (120) and 'Len. [m]' (22). The 'Trailers' section lists three trailers with loads of 80, 80, and 80 respectively, totaling 880. It also includes sections for 'Resistance Equation' (Strahl / Sauthoff Formula), 'Acceleration' (Max Acceleration [m/s^2] 3.00), 'Deceleration' (Deceleration Function, From [km/h] 0 To [km/h] 0 Max. Dec. [m/s^2] -0.60), and 'Braked Weight Percentage (BWP)' (Formula: $a = -(C1 + C2 \cdot BWP)$, C1: 100, C2: 0).

Figura 18: Introducción Parámetros Locomotoras



Una vez definidas todas las características de las locomotoras de las cuales se va a realizar el estudio se procede a elaborar los itinerarios de los diferentes trenes de pasajeros que circulan por la línea.

Como se ha mencionado anteriormente la línea Zaragoza-Canfranc presta seis servicios diarios que son los que delimitarán la capacidad total de la línea con vagones autopropulsados. Por lo tanto una vez definidas todas las características de las locomotoras se procede a elaborar los itinerarios de los diferentes trenes de pasajeros que circulan por la línea como se muestra en la siguiente figura:

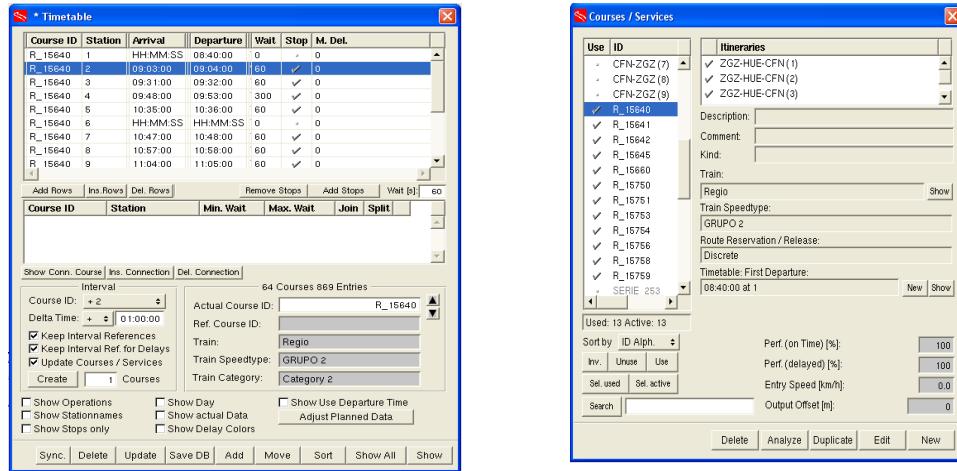


Figura 19: Introducción y Asignación de Itinerarios OpenTrack

Como se puede observar OpenTrack nos permite establecer el horario de salida, llegada de cada tren junto con los tiempos de espera que tiene que realizar en cada estación permitiendo establecer el funcionamiento del tren en función de los retrasos o adelantos que lleve a lo largo de su ruta.

Una vez definidos todos los parametros en el programa la representacion grafica de la linea Zaragoza-Canfranc se muestra en la siguiente figura donde se pueden observar las distintas estaciones que la componen juto con los apartaderos y señalizacion de la misma:

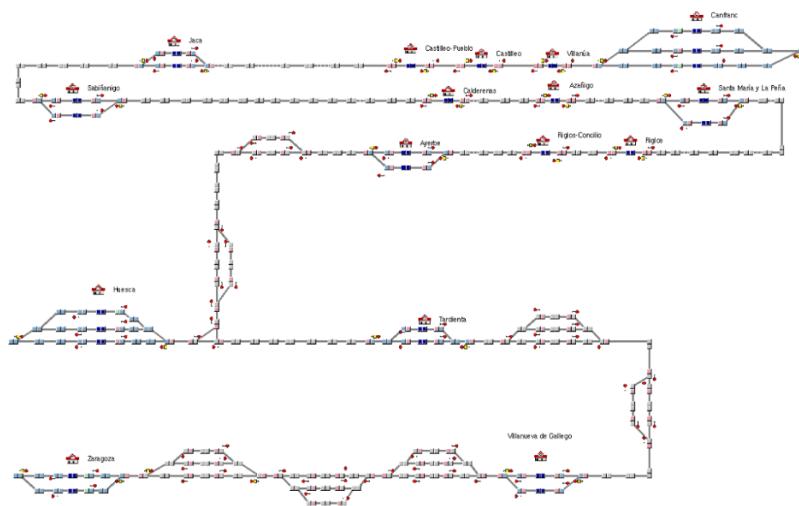


Figura 20: Trazado Zaragoza-Canfranc OpenTrack



Inicialmente se ha realizado una simulación se ha procedido a la simulación del flujo de transporte de trenes de viajeros que presenta la línea en la actualidad para obtener la malla a partir a partir de la cual se analizara los distintos escenarios de actuación para llevar a cabo la explotación de los vagones autopropulsados:

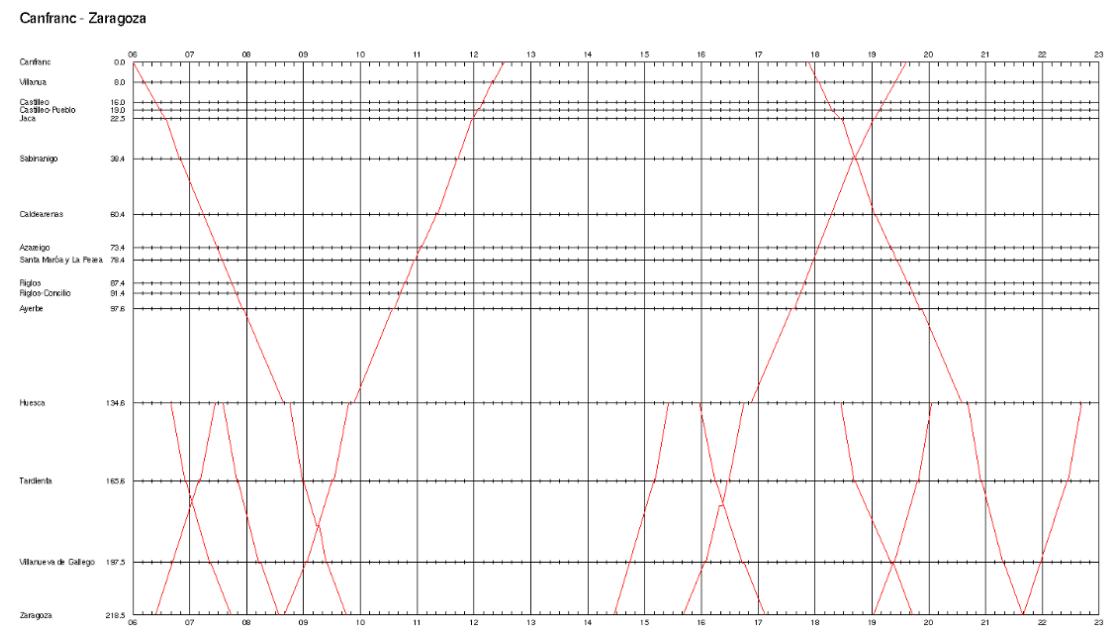


Figura 21: Malla Horaria Zaragoza-Canfranc

A continuación se ha procedido a realizar la simulación de un vagón autopropulsado con la carga máxima con la que puede circular (80t) para determinar su comportamiento y el tiempo en el que realiza cada uno de los recorridos.

7.2 Tiempos de recorrido del vagón del autopropulsado

7.2.1 Tramo Zaragoza-Canfranc

Una vez realizada la simulación se han obtenido los siguientes resultados:

Estaciones	Tiempo de recorrido (min)
Zaragoza	0
Villanueva de Gállego	17,30
Tardienta	26,08
Ayerbe	55,90
Riglos-Concilio	6,37
Santa María y la Peña	11,88
Azáñigo	4,53
Caldearenas	12,13
Sabiñánigo	19,17
Jaca	13,33
Castiello-Pueblo	4,13
Castiello	3,60
Villanúa	9,60
Canfranc	12,97

Tabla 15: Tiempo de Recorrido Zaragoza-Canfranc



Como se puede observar se obtiene un tiempo total de recorrido de 3 horas y 17 minutos teniendo como tramo de mayor duración al correspondiente entre las estaciones de Ayerbe y Tardienta con una longitud aproximada de 60 km.

En la siguiente figura se representa el desarrollo de la velocidad del vagón en cada tramo de la red como puede observarse mantiene una velocidad constante de 80 km/h hasta la variante de Huesca a partir de la cual empieza el tramo montañoso del recorrido y la velocidad del vagón llega a reducirse hasta los 50 km/h.

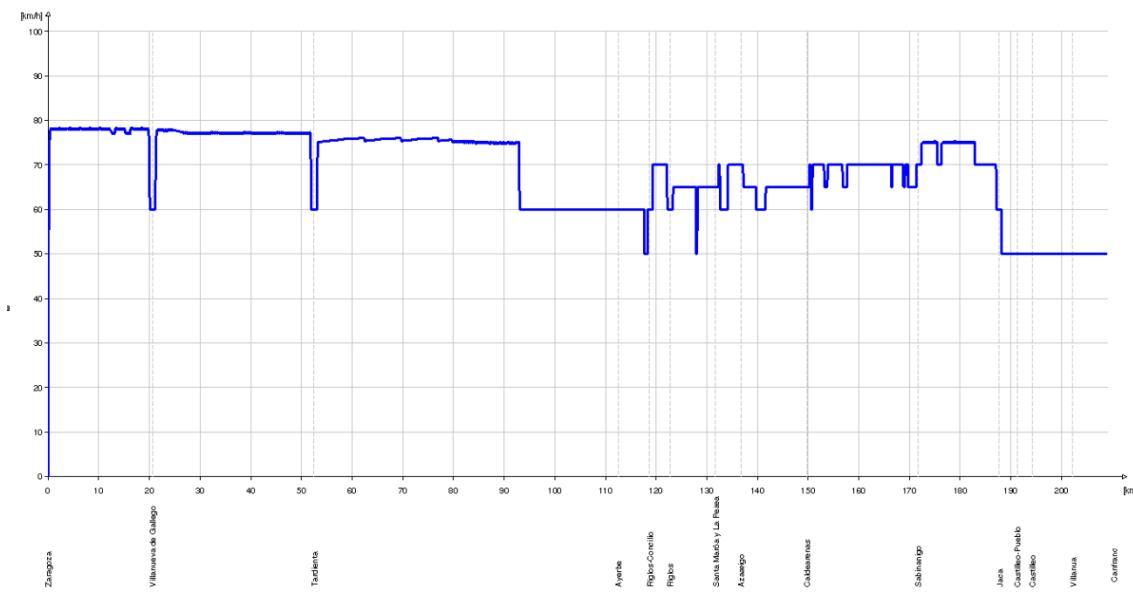


Figura 22: Evolución de la velocidad recorrido Zaragoza-Canfranc

7.2.2 Tramo Canfranc-Zaragoza

En cuanto al tramo Canfranc-Zaragoza se ha realizado la correspondiente simulación obteniéndose los siguientes resultados:

Estaciones	Tiempo de recorrido (min)
Canfranc	0
Villanúa	9,50
Castiello	9,60
Castiello-Pueblo	3,60
Jaca	4,12
Sabiñánigo	12,78
Caldearenas	19,18
Azáñigo	12,12
Santa María y la Peña	4,57
Riglos-Concilio	8,35
Ayerbe	9,87
Tardienta	50,98
Villanueva de Gállego	26,07
Zaragoza	15,97

Figura 23: Tiempos de recorrido Canfranc-Zaragoza



En este caso la duración del recorrido medio de un vagón es de 3 horas y 6 minutos con un comportamiento en cuanto a velocidad a lo largo de la línea que se muestra en la siguiente figura:

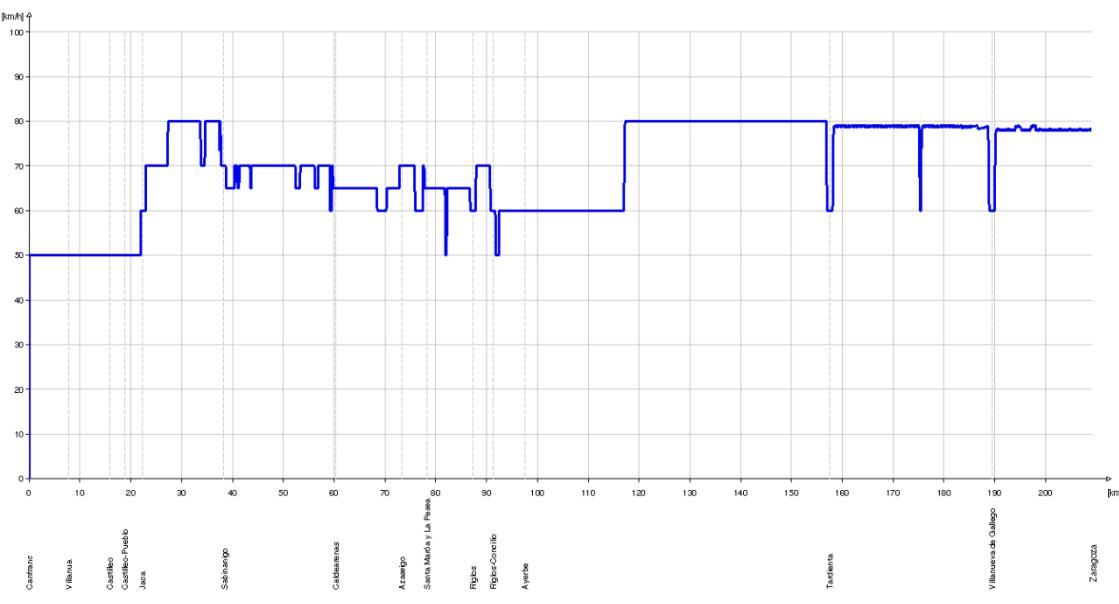


Figura 24: Evolución de la velocidad Canfranc-Zaragoza

Con todos los datos obtenidos se ha realizado un análisis previo de los mismos para realizar una primera estimación de la capacidad que esperamos alcanzar. Analizada la ocupación de los trenes de viajeros y el funcionamiento de los vagones se puede esperar conseguir como mínimo una explotación de 20 vagones diarios lo que se correspondería con una capacidad anual de 584.000 toneladas/año.

Esto supondría un incremento notable con respecto a la situación de explotación actual de la línea.



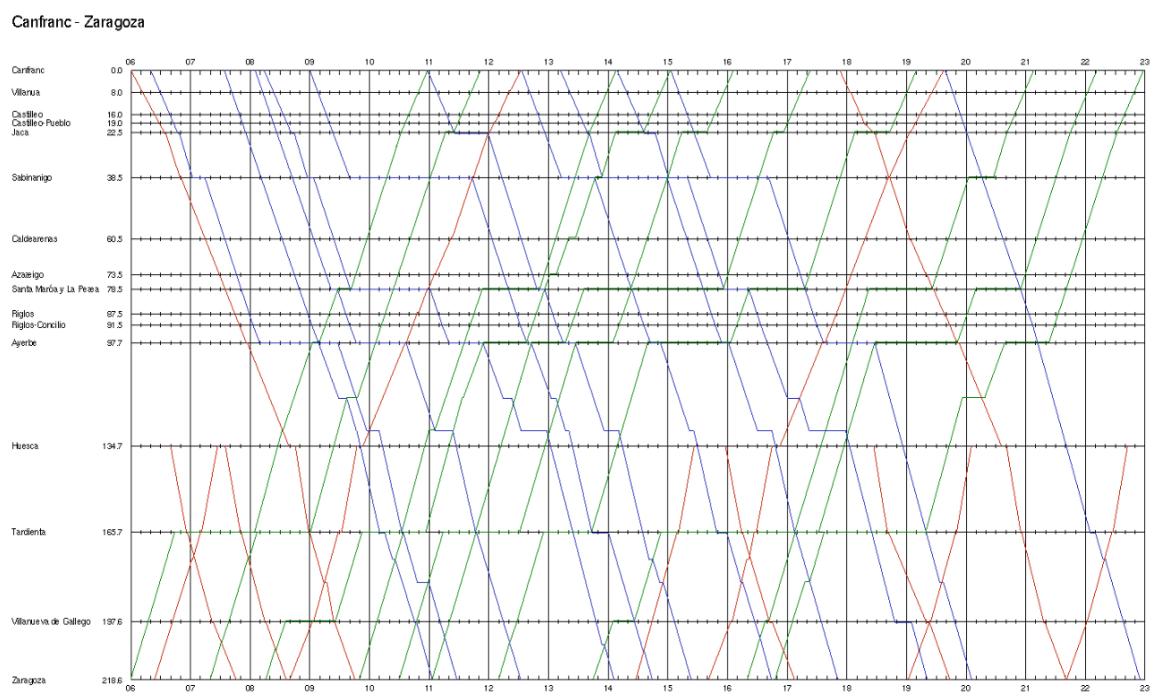
7.3 Simulación

7.3.1 Escenario 1

Una vez realizada una primera estimación se procede a realizar el análisis en OpenTrack. Para ello se ha decidido dividir el mismo en dos franjas horarias. La primera correspondiente a un flujo de circulación mixto tanto de trenes de viajeros como mercancías mientras que la segunda se corresponde a un flujo de transporte únicamente de mercancías.

Tramo 6:00-23:00

En este primer tramo horario se produce una circulación mixta tanto de mercancías como de trenes de viajeros.





Tramo 23:00 -6:00

En este segundo tramo horario se produce únicamente la circulación de trenes de mercancías.

Canfranc - Zaragoza

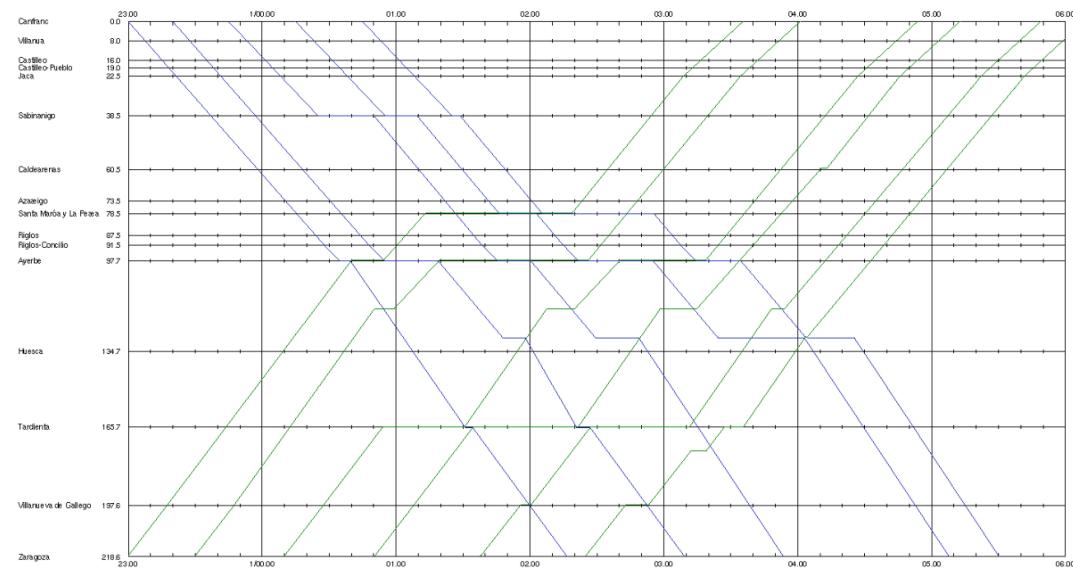


Figura 26: Malla horaria escenario 1 Tramo 23-6

Resultados

Una vez realizada la simulación se ha obtenido una capacidad máxima teórica de 21 vagones en la primera franja horaria que coincide con la capacidad real.

En cuanto a la segunda franja horaria inicialmente se ha obtenido una capacidad teórica de 13 vagones. Sin embargo la capacidad real se ve reducida en un 15% que se reserva para llevar a cabo acciones de mantenimiento y mejora de la línea durante esta franja horaria. Por lo tanto la capacidad final de la línea será de 11 vagones.

En el siguiente cuadro se ve un resumen de la simulación del primer escenario.

Numero de vagones	Capacidad (t/día)	Capacidad (t/año)
32	2560	934.440

Tabla 16: Resultados simulación escenario 1

Como se puede determinar los resultados reflejados superan notablemente las expectativas iniciales.

Cabe destacar que esta capacidad ha sido obtenida considerando que se envía únicamente un solo vagón autopropulsado en cada viaje. Por lo tanto el flujo de transporte se podría verse incrementado notablemente en caso de enviarlos en conjuntos de 2 o más dado que la longitud de los diferentes tramos de la línea permite dicha explotación.

Un análisis más detallado de esta primera simulación atendiendo tanto a la malla resultante de la simulación realizada como a los tiempos de recorrido de los vagones en cada tramo:

Tramo	Tiempo recorrido (min)
Zaragoza-Villanueva de Gallego	17,30
Villanueva de Gallego-Tardienta	26,08
Tardienta-Ayerbe	55,90
Ayerbe-Santa María y La Peña	18,25



Santa María y La Peña-Sabiñánigo	35,84
Sabiñánigo-Jaca	13,33
Jaca-Canfranc	30,30

Tabla 17: Tiempos de recorrido Zaragoza-Canfranc escenario 1

Como se puede observar uno de los tramos mas restrictivos es el correspondiente a Tardienta-Ayerbe que limita la capacidad horaria de la linea notablemente dado que a pesar de ser un tramo de gran velocidad confluyen una gran cantidad de trenes siendo el uso de la vía compartido para ambos sentidos.

Otra zonas limitantes en cuanto a explotacion se corresponderia con los tramos de Santa María y La Peña-Sabiñanigo y Jaca-Canfranc dado que la distancia entre los distintos cantones es notable y no existe un apartadero que permita adelantamientos o esperas de los distintos vagones por lo que tienen que esperar que los respectivos trenes lleguen a cada estacion para volver a iniciar la marcha en caso de que el tramo este ocupado.

7.3.2 Escenario 2

Una vez vista la capacidad de la línea se ha procedido a calcular el flujo de transporte atendiendo a las limitaciones que esta presenta en la actualidad. Por lo tanto se ha decidido analizar el efecto de realizar alguna modificación en el trazado. Estas modificaciones consisten en la realización de dos apartaderos en el tramo de Tardienta-Bifurcación Canfranc y en el tramo Santa María y La Peña –Sabiñánigo respectivamente. La disposición final de estas modificaciones en el programa de simulación queda reflejada en la siguiente figura:

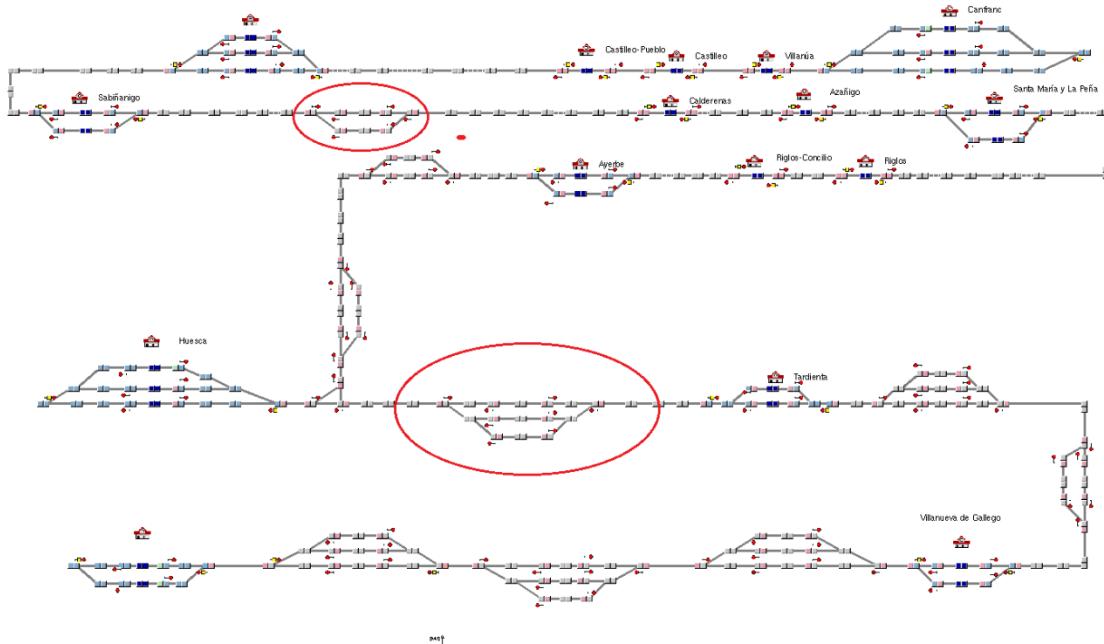


Figura 27: Trazado Zaragoza-Canfranc escenario 2 OpenTrack

A continuación se ha procedido a realizar la simulación para cada tramo horario obteniéndose los siguientes resultados:

Tramo 6:00 -23:00

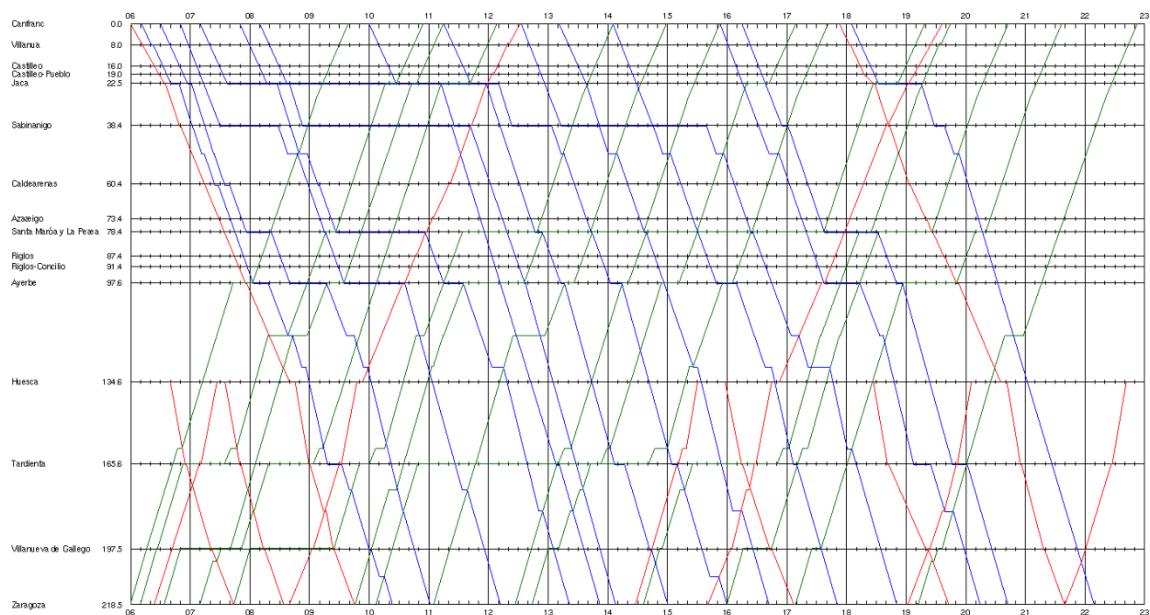


Figura 28: Malla horaria escenario 2 Tramo 6-23 h



Tramo 23:00-6:00

Canfranc - Zaragoza

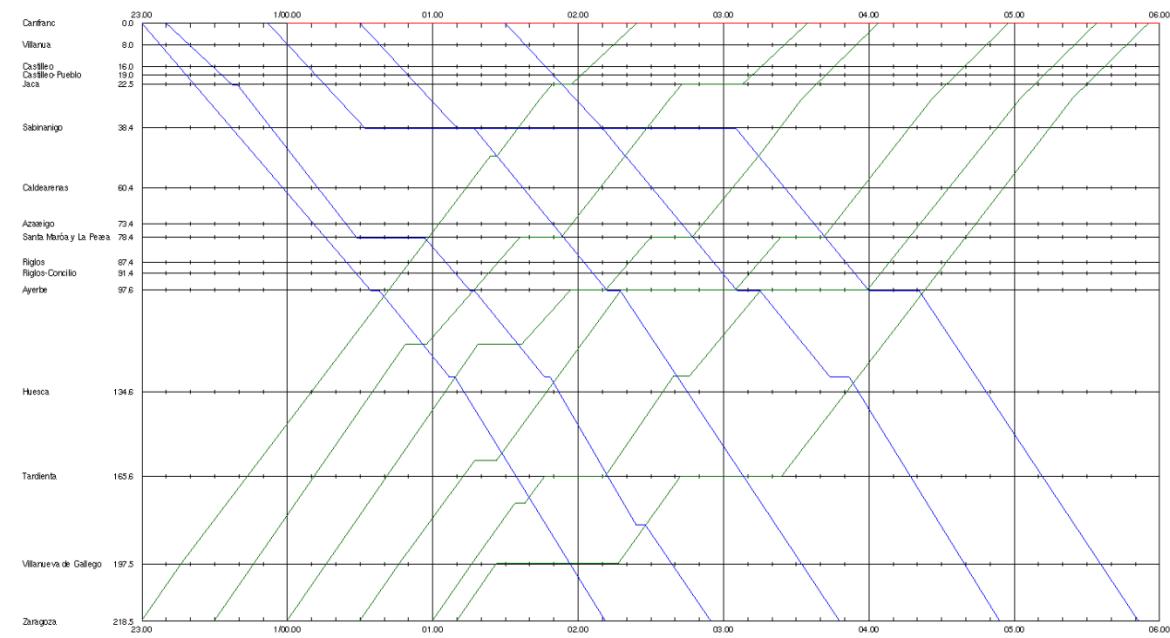


Figura 29: Malla horaria escenario 2 tramo 23-6 h

Resultados

Como se puede observar la capacidad de explotación de la línea obtenida es de 38 vagones lo que supone un aumento de aproximadamente el 23% de su capacidad inicial.

Este aumento se refleja con mayor acento en la primera franja horaria dado que es donde se produce un flujo mixto de circulación de trenes.

En cuanto a la segunda franja horaria podemos ver que la explotación es la misma esto es debido a que es un tramo horario más corto y existe la limitación de acuerdo a realizar distintas operaciones de mantenimiento de la línea por lo que conseguir un aumento de su capacidad es complicado.

En la siguiente tabla se recoge con más detalle los resultados obtenidos de la simulación:

Numero de vagones	Capacidad (t/día)	Capacidad (t/año)
38	3040	1.109.600

Tabla 18: Resultado simulación escenario 2

Finalmente una vez estudiados los dos escenarios podemos llegar a la conclusión de que realizar una modificación no supondría una mejora significativa demasiado grande como para justificar una gran inversión en la creación de estos dos apartaderos.

Esto es debido a que como se ha mencionado anteriormente existe la posibilidad de enviar vagones autopropulsados simultáneamente con lo que se podría duplicar o triplicar la explotación obtenida en el escenario 2 y sin necesidad de realizar ninguna inversión en cuanto a infraestructura de la línea.

8. Análisis energético

En este apartado se procederá a realizar una comparación con el objetivo de determinar el consumo energético que tendrá cada vagón autopropulsado y realizar una comparación con el consumo energético que tiene el servicio de tren de mercancías a lo largo de la línea para en la actualidad.

Este servicio consiste en trenes que se dedican al transporte de cereales que en el tramo Zaragoza-Canfranc suelen ir vacíos mientras en el tramo Canfranc-Zaragoza el conjunto vuelve con cada uno de sus vagones cargados de materias primas como cereales.

La locomotora que realiza este trayecto pertenece a la serie: 233.33 cuyas características se adjunta en el anexo IV .El conjunto estará compuesto por 14 vagones tolva TT5 con una capacidad máxima de 80 toneladas. En la actualidad estos trenes de mercancías circulan vacíos en el tramo Zaragoza-Canfranc mientras que en el tramo de vuelta circulan cargados.

Una vez se han establecido los distintos parámetros de explotación se procede a realizar el estudio donde se analizaran los diferentes escenarios que se exponen en la siguiente tabla:

	Zaragoza-Canfranc	Canfranc-Zaragoza
Vagón Tolva	Vacio	Cargado
Vagón portacontenedores	Cargado	Cargado
Mercancías	Vacio	Cargado

Tabla 19: Escenarios análisis energético

8.1 Tramo Zaragoza-Canfranc

Una vez establecidos todos los escenarios de estudio se procede a la realización de la simulación en la que se han obtenido los siguientes resultados en el análisis de la explotación en el sentido Zaragoza-Canfranc:

Consumo energético mercancías

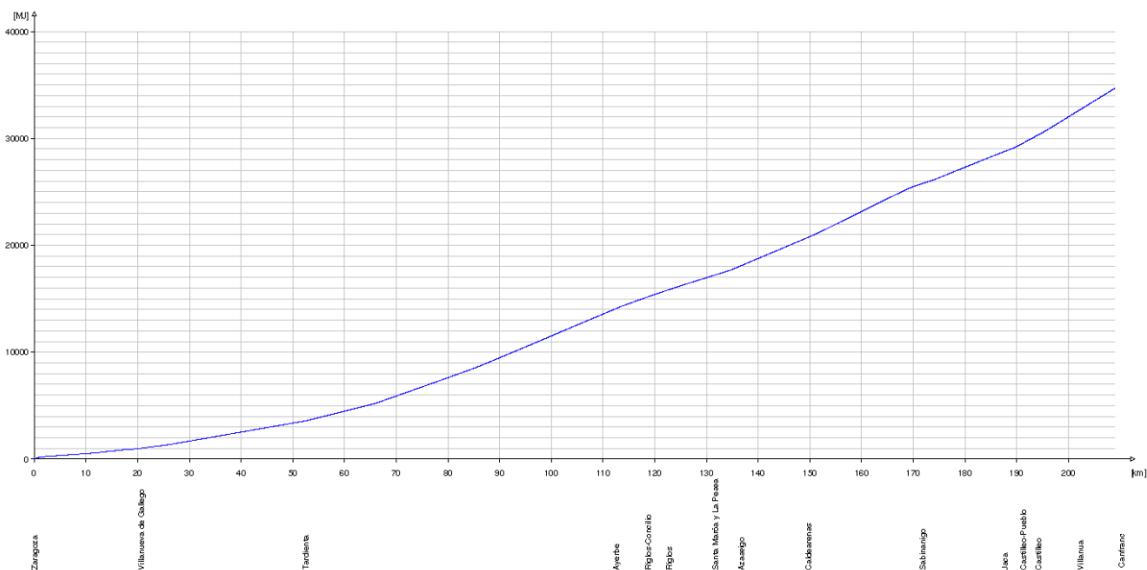


Figura 30: Consumo Energético Mercancías Zaragoza-Canfranc



Consumo energético vagón portacontenedores

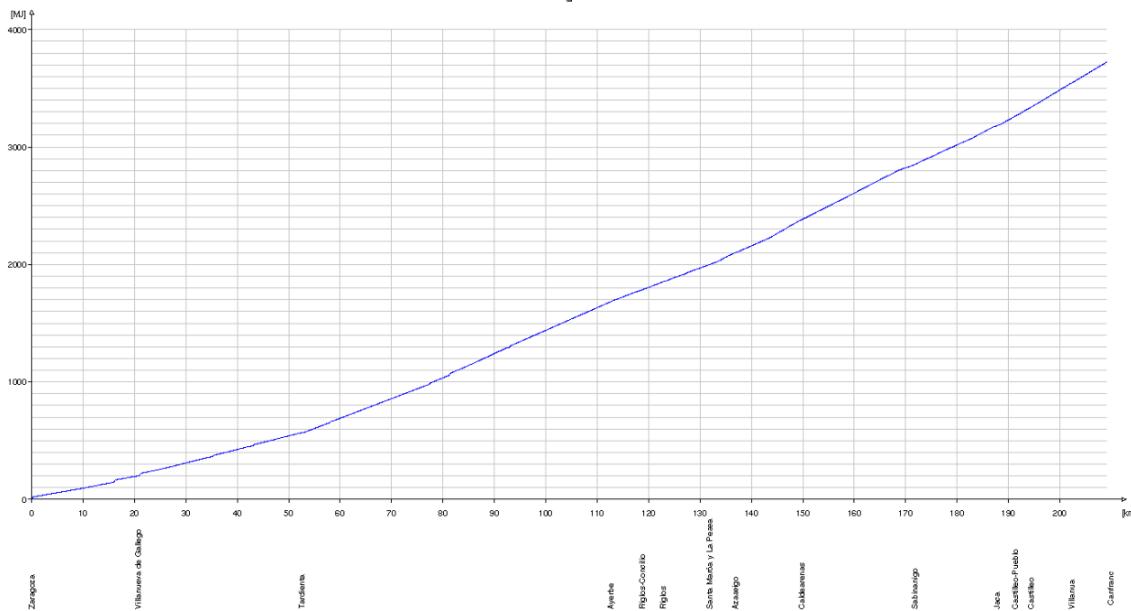


Figura 31 Consumo energético vagón portacontenedores

Consumo energético vagón tolva

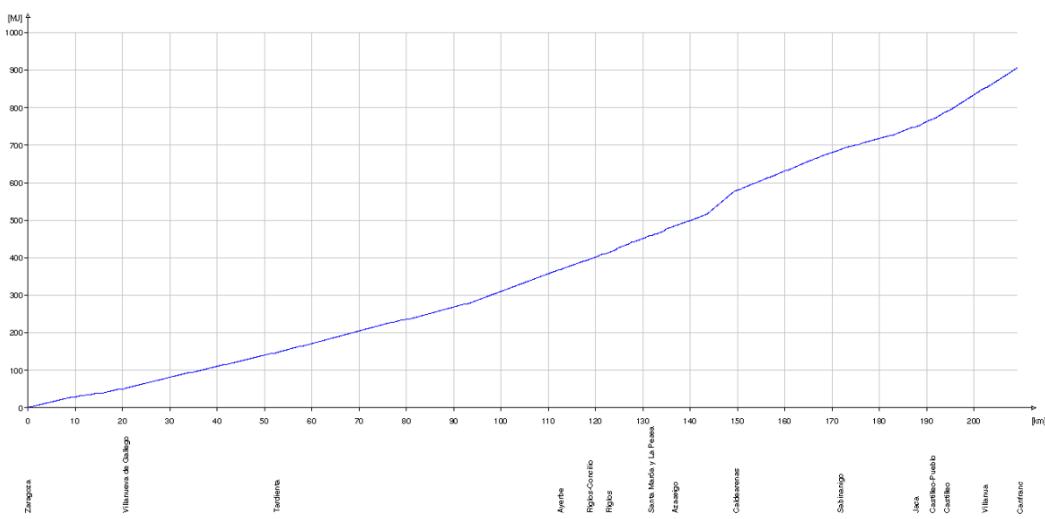


Figura 32 Consumo energético vagón tolva

Como se puede observar la energía consumida se muestra en megajulios pero para realizar un análisis en términos energéticos se ha transformado a kWh mediante la siguiente relación:

$$1 \text{ kw} * \text{h} = 1000 \text{ w} * 3600\text{s} = 1000 \frac{\text{J}}{\text{s}} * 3600\text{s} = 3,6 \text{ MJ}$$

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos tras la simulación donde para poder comparar las distintas composiciones se presentan los consumos energéticos por tonelada transportada:



	Energía Consumida (kWh)	Energía consumida (kWh/t)
Mercancías	9.722	21,32
Vagón portacontenedores	1.028	13,02
Vagón Tolva	250	10,41

Tabla 20: Consumo energético Zaragoza-Canfranc

8.2 Tramo Canfranc-Zaragoza

A continuacion se realizara el analisis del tramo Canfranc-Zaragoza. En este tramo se considera que tanto el vagón autopropulsado tolva como el portacontenedores realizan el trayecto con la carga maxima 80t. En este análisis se va a utilizar las gráficas de esfuerzo en función del gradiente para ver con más detalle a que es debido el consumo energético que se tiene al final:

Una vez introducidos los datos en el programa se ha procedido a realizar la simulacion obteniendose los siguientes resultados:

Consumo energetico mercancias

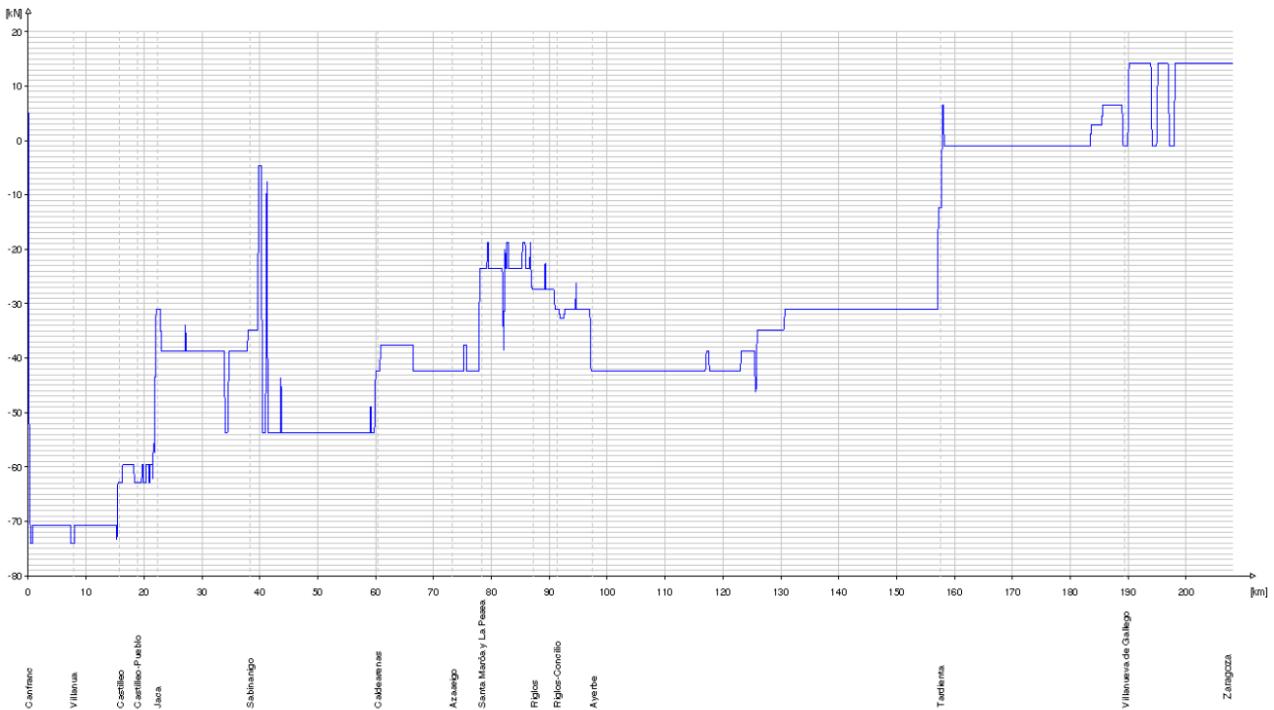


Figura 33: Esfuerzo tráctivo vs velocidad mercancías



Vagones Autopropulsados

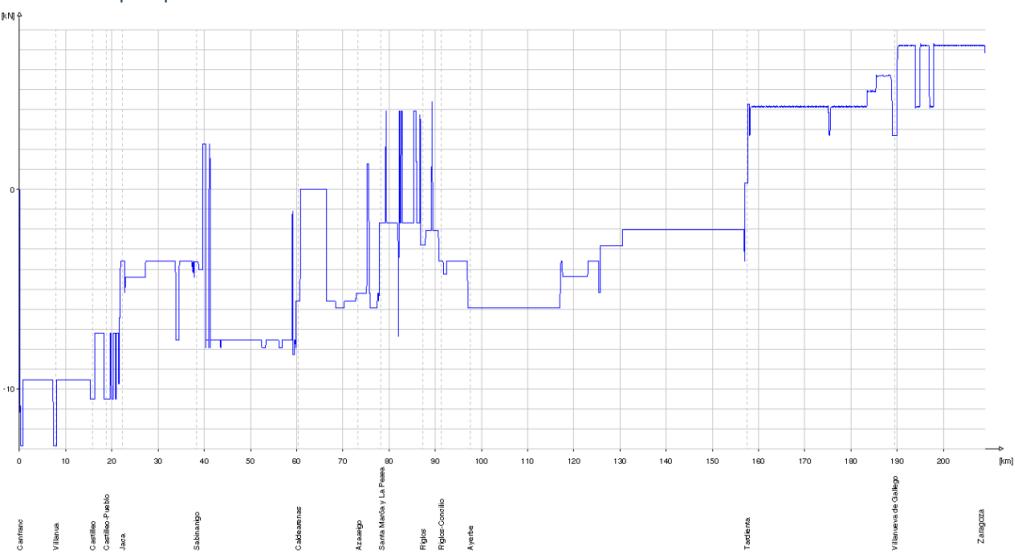


Figura 34: Esfuerzo tractivo vs velocidad vagones autopropulsados

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos tras la simulación:

	Energía Consumida (kWh)	Energía Consumida (kWh/t)
Mercancías	3.611	2,91
Vagón portacontenedores	120	1,5
Vagón Tolva	120	1,5

Tabla 21: Energía consumida Canfranc-Zaragoza

8.3 Resultados

Como se ha podido observar en los resultados obtenidos podemos determinar que las alternativas de explotación que se han propuesto tienen un consumo energético menor en todos los escenarios analizados.

Esta diferencia de consumo energético se acentúa principalmente en el tramo de Zaragoza-Canfranc dado que a lo largo de este tramo es donde más esfuerzo va a necesitar para superar los elevados gradientes de velocidad y numerosas curvas que conforman el trazado.

Como se puede determinar para realizar el mismo servicio que realiza un tren de mercancías con 14 tolvas pero mediante el envío de 14 tolvas independientes el gasto energético sería de:

$$14 * 24 * 10,41 = 3497 \text{ kWh}$$

Esto supone un ahorro de energía del 64 % siendo este parámetro muy significativo en nuestro análisis.

En cambio a en el tramo Canfranc-Zaragoza la diferencia de consumo energético por tonelada transportada es menor dado que la mayor parte del recorrido es de gradiente descendente. Realizando el mismo cálculo de antes que consiste en enviar 14 tolvas independientes con un peso del conjunto de 80 toneladas por tolva se obtiene el siguiente consumo energético:

$$14 * 80 * 1.5 = 1680 \text{ kWh}$$

Lo que supone en este caso un ahorro en consumo energético del 60 %.

9. Conclusiones y futura continuación del trabajo

Una vez se realizado el estudio se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

El sistema alternativo de explotación que se ha propuesto en contraposición al servicio de mercancías que se presta habitualmente tiene unos resultados muy alentadores dado que como se ha visto permite incrementar el flujo de transporte dentro de la línea hasta las 934.440 toneladas al año sin repercutir en el tránsito de los trenes de viajeros durante toda la franja horaria de explotación.

En cuanto a la comparación del consumo energético también podemos determinar que el consumo es inferior pudiéndose reducir el mismo en un 60 y 40 % para los tramos de ida como de vuelta respectivamente. A pesar de que en el trayecto de vuelta la diferencia es menor la explotación por vagones autopropulsados sigue siendo la mejor en cuanto a consumo energético.

Cabe destacar que la apertura de nuevos apartaderos se podría evitar dado que como hemos visto a lo largo del estudio la mejor opción sería lanzar los distintos vagones autopropulsados en conjuntos de dos o más vagones independientes.

Finalmente se puede concluir que la implementación de este sistema no repercute en elevados costes y proporciona un notable incremento en el flujo de transporte de la línea colocándolo como un sistema a tomar en cuenta de cara a futuras proyectos en la línea Zaragoza-Canfranc.

De cara a una futura continuación del trabajo se podría dedicar al diseño del motor que propulsaría los vagones con el fin de llegar a conseguir un modelo de simulación lo más exacto posible al que se implementaría en la realidad.

Por otro lado otro aspecto de estudio consistiría en diseñar todo el sistema de control de los vagones autopropulsado y los componentes que dispondría para dotar a este sistema de la mayor seguridad y precisión posibles.

10. Fuentes de información

- [1] http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/doc/Cap3_Descripcion_Red_V3.pdf
- [2] https://www.vialibre-ffe.com/pdf/11626_pdf_02.pdf
- [3] https://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/OrganosConsultivos/ConsejoEconomicoSocialAragon/Documentos/docs2/Areas/Publicaciones/EstudiosJornadas/2009/CANFRANC_ES_P.pdf
- [4] <http://www.renfe.com/viajeros/index.html>
- [5] <http://www.renfe.com/empresa/alquilerdematerial/MaterialMercancias/Vagones/docs/CatalogoVagones2015.pdf>



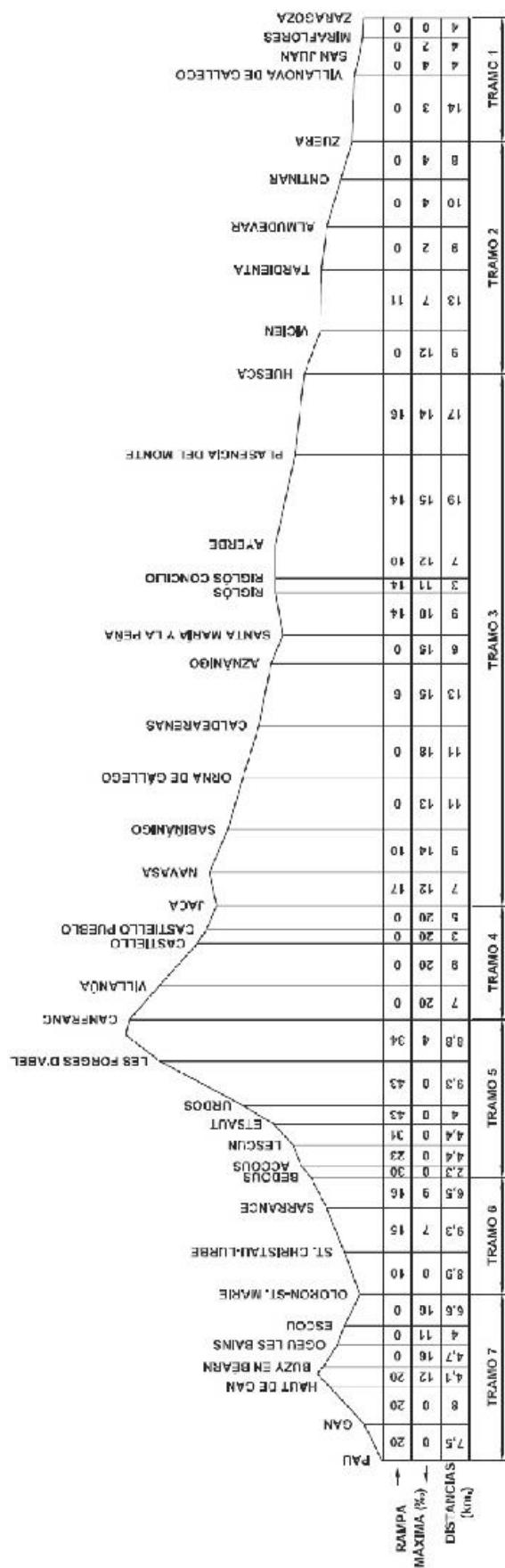
Anexos

Anexo I

KILÓMETRO Sentido PAR	DENOMINACIÓN	TIPO	Longitud (m)	CARACTERÍSTICAS LÍNEA						
				VELOCIDAD TREN TIPO N Vmáx (Km/h)	RAMPA MÁXIMA (milésimas) sentido impar	sentido par	VÍA	ELECTRIF.	ASFA	TREN TIERRA
52+900	TARDIENTA	L-200					U	SI	SI	SI
53+140	TARDIENTA	L-200 Ag5 → L-L070 Ag 11								
52+900	TARDIENTA	L-070		40	12	8				
0+000	TARDIENTA	L-070 Ag 11			60					
0+944					160					
15+600										
15+700	BIFURCACIÓN CANFRANC	L-070 Ag 2B → L-204								
18+000	BIFURCACIÓN HOYA DE HUESCA				100					
18+100	Km 18+050									
21+000	HUESCA-CAMBIADOR DE ANCHO				160					
21+300										
21+700	HUESCA				40					
18+000	BIFURCACIÓN HOYA DE HUESCA	L-070 Ag 4B → L-212								
0+000	BIFURCACIÓN HOYA DE HUESCA	L-212 Ag 4B → L-204								
1+700	HOYA DE HUESCA	L-204 Ag Km 2+300			115		U	SI	SI	SI
0+000	BIFURCACIÓN CANFRANC	L-204								
2+300	HOYA DE HUESCA Ag Km 2+300	L-204 Ag Km 2+300 → L-212			155					
3+500	HOYA DE HUESCA									
4+300	Km 0+800				120					
0+800										
7+100/7+400		Curva (700 m)								
8+175		P.N.			95					
9+300										
9+505/9+826		Curva (700 m)								
10+700	C.R.				100					
11+000										
13+400					120					
14+500					105					
15+6	PLASENCIA DEL MONTE									
23+864		P.N.								
34+642		P.N.								
35+000	AYERBE				60					
38+178/38+235		Túnel								
40+515/40+775		Curva (300m)			57					
41+7	RIGLOS-CONCILIO				50					
43+190/43+360		Túnel			60					
45+000	RIGLOS									
45+788/45+932		Túnel			144					
46+716/47+253		Túnel			537					
49+696/50+012		Túnel			316					
50+185/50+498		Túnel			313					
50+490/50+630		Curva (300m)			50					
53+161 (eje)		T.Metálico			65					
53+400	SANTA M ^a Y LA PEÑA									
55+249/56+634		Curva (400m)			70					
56+460 (eje)		T.Metálico			60					
56+953/57+374		Túnel			65					
59+400	ANZÁNIGO									
62+300					70					
62+350/64+110		Curva (300)			65					
66+135/66+502		Túnel			60					
66+572/66+586		Túnel			367					
71+779 (eje)		T.Metálico			14					
72+500	CALDEARENAS-AQUILUE				65					
73+425 (eje)		T.Metálico			32					
73+173/73+351		Curva (300)			70					
75+789/76+334		Curva (300)			70					
79+410/80+120		Curva (300)			65					
80+609		P.N.								
82+014		P.N.								
83+356		P....								
83+500	ORNA DE GÁLLEG									
89+028 (eje)		T.Metálico			70					
91+384/91+603		Curva (300)			65					
92+318/92+482	La Salve	Túnel			70					
92+345/92+985		Curva (300)			164					
94+300	SABIÑÁNIGO									
97+060 (eje)		T.Metálico			65					
98+120/98+768		Curva (300)			85					
103+9	NAVASA (APD)				70					
					85					



103+9	NAVASA (APD)			85					
105+439 (eje)		T.Metálico	16	70					
109+800									
110+2	JACA			60					
0,000	JACA								
0+840/0+956		Curva (200m)	60						
1+983/2+066		Túnel	83						
3+238/3+354		Túnel	116						
3+723 /3+851		Curva (200m)	60						
4+240/4+347		Túnel	107						
4+817/4+872		Túnel	55						
5+108/5+563		Curva (200 m)	60						
5+240 (eje)		T.Metálico	30						
5+800	CASTIELLO-PUEBLO (APD)								
5+983 (eje)		T.Metálico	78						
6+123 (eje)		T.Metálico	14						
6+310 (eje)		T.Metálico	14						
7+964/8+393		Túnel	429						
8+700	CASTIELLO								
9+810 (eje)		T.Metálico	42						
10+913/11+780		Túnel	867						
12+034/12+270		Túnel	236						
13+269/13+644		Túnel	375						
16+251/16+502		Túnel	251						
16+682 (eje)		T.Metálico	42						
16+793/17+186		Túnel	393						
17+400	VILLANÚA								
17+631/17+745		Túnel	114						
17+936/18+002		Túnel	66						
18+152/18+283		Túnel	131						
18+349/18+462		Túnel	113						
19+053/19+231		Túnel	178						
19+595/20+093		Túnel	498						
20+155 (eje)		T.Metálico	60						
20+471/21+392		Túnel	921						
21+605 (eje)		T.Metálico	27						
22+645/23+064		Túnel	419						
23+680/23+922		Túnel	242						
24+128									
24+700	CANFRANC								





Anexo II

REGIONAL 15758					
Numero de tren	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Zaragoza-Delicias	6:24	X		0,00	0,00
Tardienta	7:11	7:10		46,00	1,00
Huesca	X	7:27		63,00	0,00
REGIONAL 15640					
Numero de tren	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Zaragoza-Delicias	8:40	X		0,00	0,00
Villanueva de Gallego	9:04	9:03		23,00	1,00
Tardienta	9:32	9:31		51,00	1,00
Huesca	9:53	9:48		68,00	5,00
Ayerbe	10:36	10:35		115,00	1,00
Riglos	10:48	10:47		127,00	1,00
Santa María y La Peña	10:58	10:57		137,00	1,00
Anzánigo	11:05	11:04		144,00	1,00
Caldereas	11:22	11:21		161,00	1,00
Sabiñánigo	11:43	11:42		182,00	1,00
Jaca	11:59	11:58		198,00	1,00
Castillejo-Pueblo	12:06	12:05		205,00	1,00
Villanúa	12:21	12:20		220,00	1,00
Canfranc	X	12:32		232,00	0
REGIONAL 15750					
Numero de tren	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Zaragoza-Delicias	14:28	X		0,00	0,00
Tardienta	15:11	15:10		42,00	1,00
Huesca	X	15:26		58,00	1,00
REGIONAL 15642					
Numero de tren	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Zaragoza-Delicias	15:41	X		0,00	0,00
Villanueva de Gallego	16:05	16:04		23,00	1,00
Tardienta	16:29	16:28		47,00	1,00
Huesca	16:52	16:45		64,00	7,00
Ayerbe	17:38	17:35		114,00	3,00
Sabiñánigo	18:42	18:41		180,00	1,00
Jaca	19:03	19:02		201,00	1,00
Canfranc	X	19:37		236,00	0,00
REGIONAL 15756					
Numero de tren	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Zaragoza-Delicias	19:02	X		0,00	0,00
Villanueva de Gallego	19:24	19:23		21,00	1,00
Tardienta	19:49	19:48		46,00	1,00
Huesca	X	20:04		62,00	0,00
AVE 03393					
Numero de tren	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Zaragoza-Delicias	20:33	X		0,00	0,00
Tardienta	21:03	21:02		29,00	1,00
Huesca	X	21:18		45,00	0,00
REGIONAL 15759					
Numero de tren	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Zaragoza-Delicias	21:40	X		0,00	0,00
Tardienta	22:27	22:26		46,00	1,00
Huesca	X	22:42		62,00	0,00



Numero de tren	REGIONAL 15751				
Estaciones	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Huesca	6:40	X		0,00	0,00
Tardienta	6:56	6:55		15,00	1,00
Villanueva de Gallego	7:22	7:21		41,00	1,00
Zaragoza-Delicias	X	7:44		64,00	0,00
Numero de tren	Regional 15754				
Estaciones	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Huesca	7:35	X		0,00	0,00
Tardienta	7:51	7:50		15,00	1,00
Villanueva de Gallego	8:15	8:14		39,00	1,00
Zaragoza-Delicias	X	8:35		60,00	0,00
Numero de tren	AVE 03272				
Estaciones	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Huesca	8:15	X		0,00	0,00
Tardienta	8:27	8:26		11,00	1,00
Villanueva de Gallego	X	8:55		40,00	0,00
Numero de tren	REGIONAL 15645				
Estaciones	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Canfranc	6:00	X		0,00	0,00
Jaca	6:35	6:34		34,00	1,00
Sabiñánigo	6:50	6:49		49,00	1,00
Ayerbe	7:57	7:56		116,00	1,00
Huesca	8:45	8:40		160,00	5,00
Tardienta	8:59	8:58		178,00	1,00
Villanueva de Gallego	9:24	9:23		203,00	1,00
Zaragoza	X	9:45		225,00	0,00
Numero de tren	Regional 15753				
Estaciones	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Huesca	15:58	X		0,00	0,00
Tardienta	16:15	16:14		16,00	1,00
Villanueva de Gallego	16:45	16:44		46,00	1,00
Zaragoza-Delicias	X	17:08		70,00	0,00
Numero de tren	Regional 15660				
Estaciones	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Huesca	18:27	X		0,00	0,00
Tardienta	18:42	18:41		14,00	1,00
Zaragoza-Delicias	X	19:43		76,00	0,00
Numero de tren	REGIONAL 15641				
Estaciones	Salida	Llegada	Distancia	Minutos trayecto	Minutos parada
Canfranc	17:53	X		0,00	0,00
Villanúa	18:04	18:03		10,00	1,00
Castillejo-Pueblo	18:19	18:18		25,00	1,00
Jaca	18:28	18:27		34,00	5,00
Sabiñánigo	18:43	18:42		53,00	1,00
Caldereas	19:04	19:03		74,00	1,00
Anzanigo	19:21	19:20		91,00	1,00
Santa María y la Peña	19:27	19:26		97,00	1,00
Riglos	19:39	19:38		109,00	1,00
Ayerbe	19:53	19:52		123,00	1,00
Huesca	20:41	20:36		167,00	1,00
Tardienta	20:55	20:54		181,00	1,00
Villanueva de Gallego	21:19	21:18		205,00	1,00
Zaragoza-Delicias	X	21:40		227,00	0



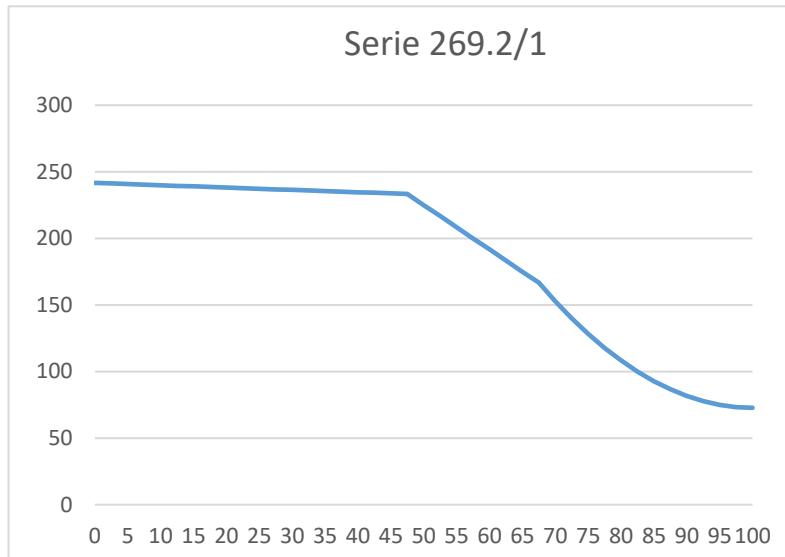
ANEXO III

Datos		
Peso adherente (ton)	22,5	ton
Coeficiente de adherencia	0,24	-
Pendiente maxima	23	%o
Pendiente minima	23	%o
Peso locomotora (ton)	90	ton

Comprobacion Potencia (CV)			
Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	i=0 %o	i=23 %o
0	0,00	0,00	0,00
5	1,39	5,00	38,33
10	2,78	10,00	76,67
15	4,17	15,00	115,00
20	5,56	20,00	153,33
25	6,94	25,00	191,67
30	8,33	30,00	230,00
35	9,72	35,00	268,33
40	11,11	40,00	306,67
45	12,50	45,00	345,00
50	13,89	50,00	383,33
55	15,28	55,00	421,67
60	16,67	60,00	460,00
65	18,06	65,00	498,33
70	19,44	70,00	536,67
75	20,83	75,00	575,00
80	22,22	80,00	613,33
85	23,61	85,00	651,67
90	25,00	90,00	690,00
95	26,39	95,00	728,33
100	27,78	100,00	766,67
105	29,17	105,00	805,00
110	30,56	110,00	843,33
115	31,94	115,00	881,67
120	33,33	120,00	920,00
125	34,72	125,00	958,33
130	36,11	130,00	996,67
135	37,50	135,00	1035,00
140	38,89	140,00	1073,33
145	40,28	145,00	1111,67
150	41,67	150,00	1150,00
155	43,06	155,00	1188,33
160	44,44	160,00	1226,67
165	45,83	165,00	1265,00
170	47,22	170,00	1303,33
175	48,61	175,00	1341,67
180	50,00	180,00	1380,00
185	51,39	185,00	1418,33
190	52,78	190,00	1456,67
195	54,17	195,00	1495,00
200	55,56	200,00	1533,33



Serie 269.2/1	
0	241,67
2,5	241,23
5	240,79
7,5	240,35
10	239,91
12,5	239,47
15	239,04
17,5	238,60
20	238,16
22,5	237,72
25	237,28
27,5	236,84
30	236,40
32,5	235,96
35	235,53
37,5	235,09
40	234,65
42,5	234,21
45	233,77
47,5	233,33
50	225,00
52,5	216,67
55	208,33
57,5	200,00
60	191,67
62,5	183,33
65	175,00
67,5	166,67
70	152,78
72,5	140,00
75	128,33
77,5	117,78
80	108,33
82,5	100,00
85	92,78
87,5	86,67
90	81,67
92,5	77,78
95	75,00
97,5	73,33
100	72,78



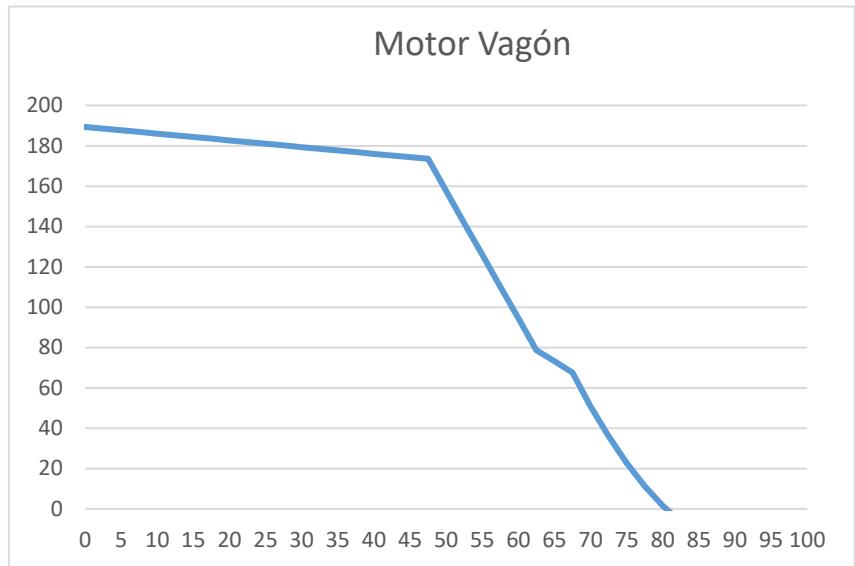


Serie 300	
0	300,00
2,5	300,00
5	300,00
7,5	300,00
10	300,00
12,5	300,00
15	300,00
17,5	300,00
20	300,00
22,5	300,00
25	300,00
27,5	300,00
30	300,00
32,5	300,00
35	300,00
37,5	300,00
40	300,00
42,5	300,00
45	300,00
47,5	300,00
50	300,00
52,5	300,00
55	300,00
57,5	300,00
60	300,00
62,5	300,00
65	288,37
67,5	277,16
70	266,36
72,5	255,98
75	246,01
77,5	236,46
80	227,32
82,5	218,59
85	210,28
87,5	202,39
90	194,91
92,5	187,84
95	181,19
97,5	174,96
100	169,14





Motor Locomotora	
0	189,33
2,5	188,50
5	187,67
7,5	186,84
10	186,01
12,5	185,17
15	184,34
17,5	183,51
20	182,68
22,5	181,85
25	181,01
27,5	180,18
30	179,35
32,5	178,52
35	177,69
37,5	176,85
40	176,02
42,5	175,19
45	174,36
47,5	173,53
50	173,72
52,5	171,91
55	170,10
57,5	169,29
60	168,48
62,5	167,67
65	166,85
67,5	166,04
70	165,22
72,5	164,40
75	163,57
77,5	162,74
80	161,91





Velocidad en función de la pendiente		
Pendiente %	Velocidad máxima (m/s)	Velocidad máxima (km/h)
0	120,37	433,33
1	90,28	325,00
2	72,22	260,00
3	60,19	216,67
4	51,59	185,71
5	45,14	162,50
6	40,12	144,44
7	36,11	130,00
8	32,83	118,18
9	30,09	108,33
10	27,78	100,00
11	25,79	92,86
12	24,07	86,67
13	22,57	81,25
14	21,24	76,47
15	20,06	72,22
16	19,01	68,42
17	18,06	65,00
18	17,20	61,90
19	16,41	59,09
20	15,70	56,52
21	15,05	54,17
22	14,44	52,00
23	13,89	50,00

Comprobación de adherencia	
Velocidad (km/h)	W/eje (CV)
0	0,00
5	95,24
10	181,82
15	260,87
20	333,33
25	400,00
30	461,54
35	518,52
40	571,43
45	620,69
50	666,67
55	709,68
60	750,00
65	787,88
70	823,53
75	857,14
80	888,89
85	918,92
90	947,37
95	974,36
100	1000,00
105	1024,39
110	1047,62
115	1069,77
120	1090,91



Anexo IV

Locomotora diésel 333.3

renfe | Alquiler



La locomotora diésel-eléctrica 333.3 opera en la red ferroviaria convencional de ancho ibérico (1.668 mm). Se encuentra equipada con un motor diesel General Motors que acciona seis motores eléctricos trifásicos, uno sobre cada eje.

La subserie 333.3 es una adaptación de la serie original 333.0, conservando su potencia y realizando mejoras tecnológicas. Destinada para la explotación de servicios de mercancías, puede ir acoplada en mando múltiple aumentando así su capacidad de arrastre.

Características generales

Constructores	VOSSLOH
Construcción	2002/2009
Velocidad máxima (Km/h)	120
Ancho de vía (mm)	1.668
Potencia (kW/CV)	2.237 / 3.043
Masa/tara (t)	120
Masa por eje (t)	20
Mando múltiple	SI
Longitud entre topes (mm)	22.330
Ancho de caja (mm)	3.160
Altura máxima (mm)	4.307
Tipo de locomotora	Co - Co
Transmisiones	Eléctrica (GM AR-11 D-14)
Motor tracción	(6) mod. GM D-77B
Freno neumático	Aire comprimido
Freno eléctrico	Reostático
Freno estacionamiento	Freno a 2 ejes
Registrador	Cesis
Señalización	Asfa Digital

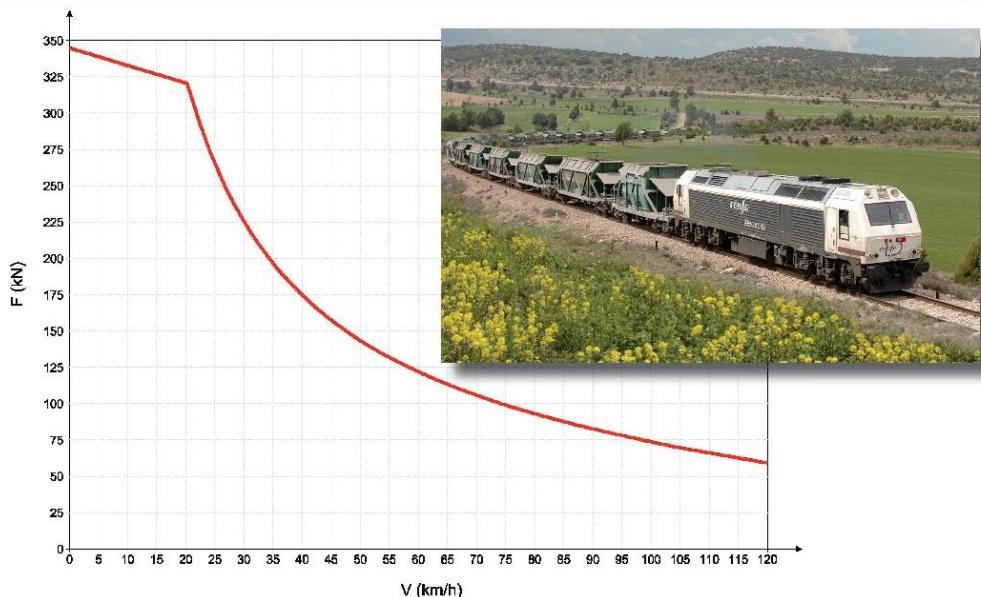
DOCUMENTO NO CONTRACTUAL



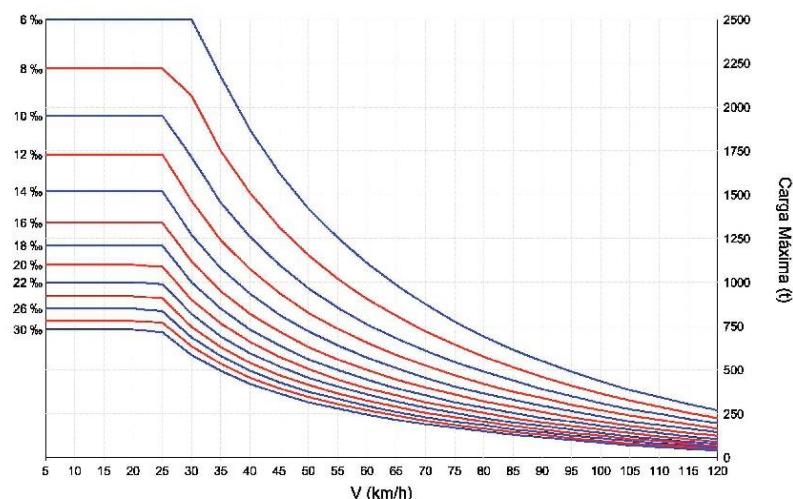
Locomotora diésel 333.3

renfe | Alquiler

Curva de tracción



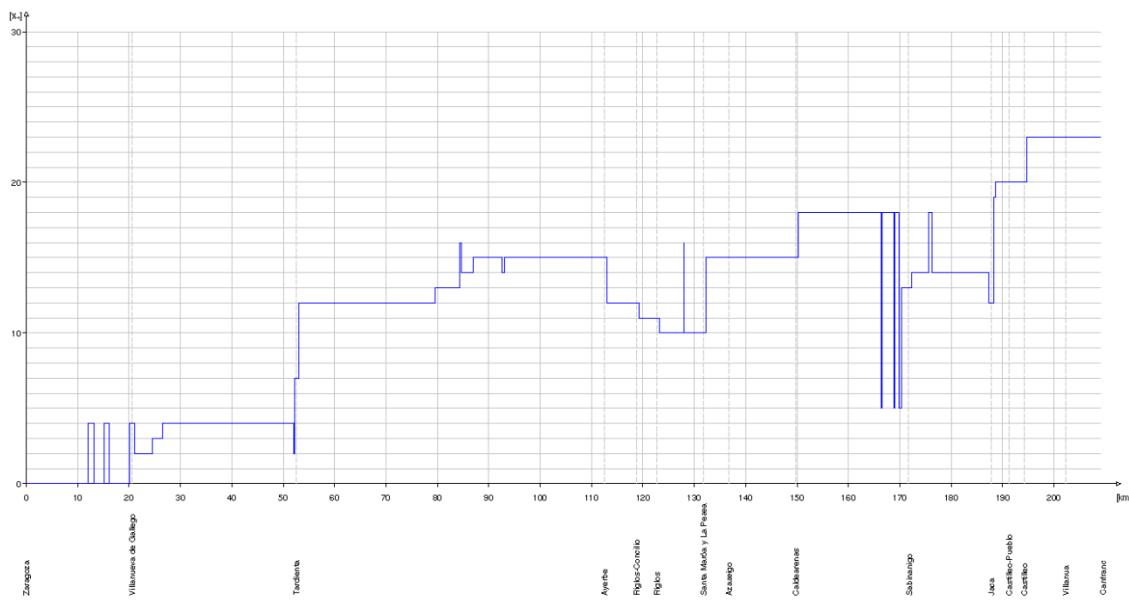
Curvas de velocidad-carga-rampa



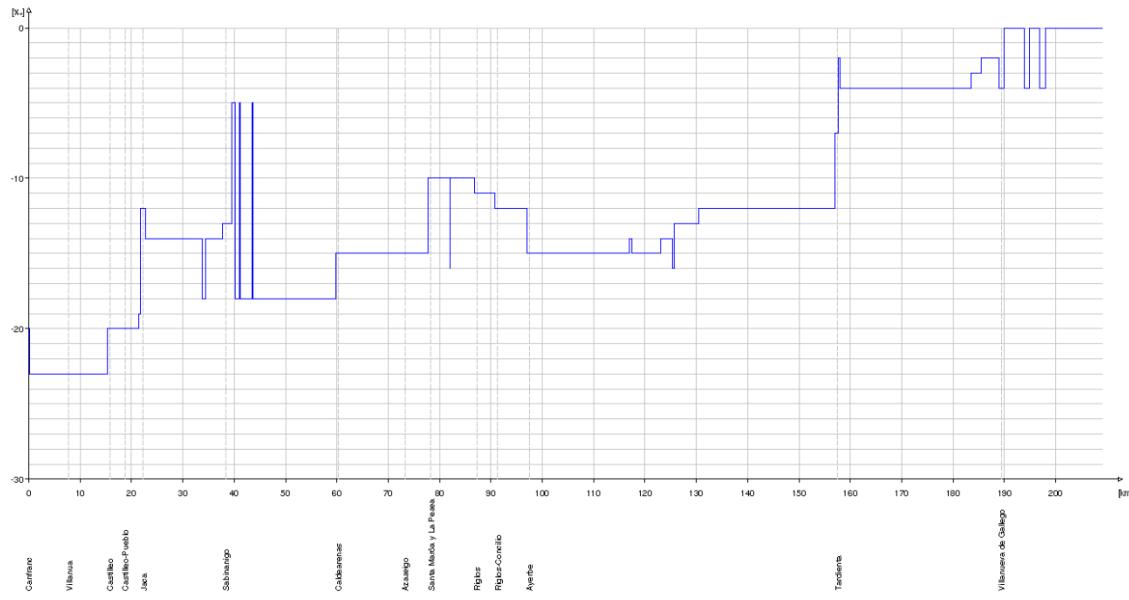


ANEXO V

Evolución del gradiente ZGZ-CFN

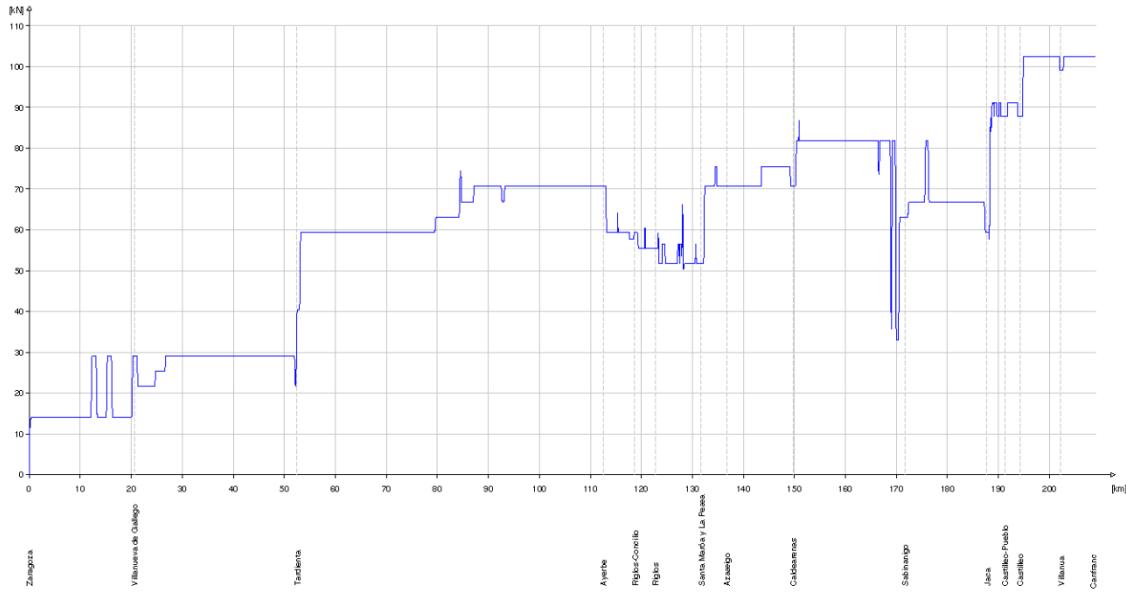


Evolución del gradiente CFN-ZGZ

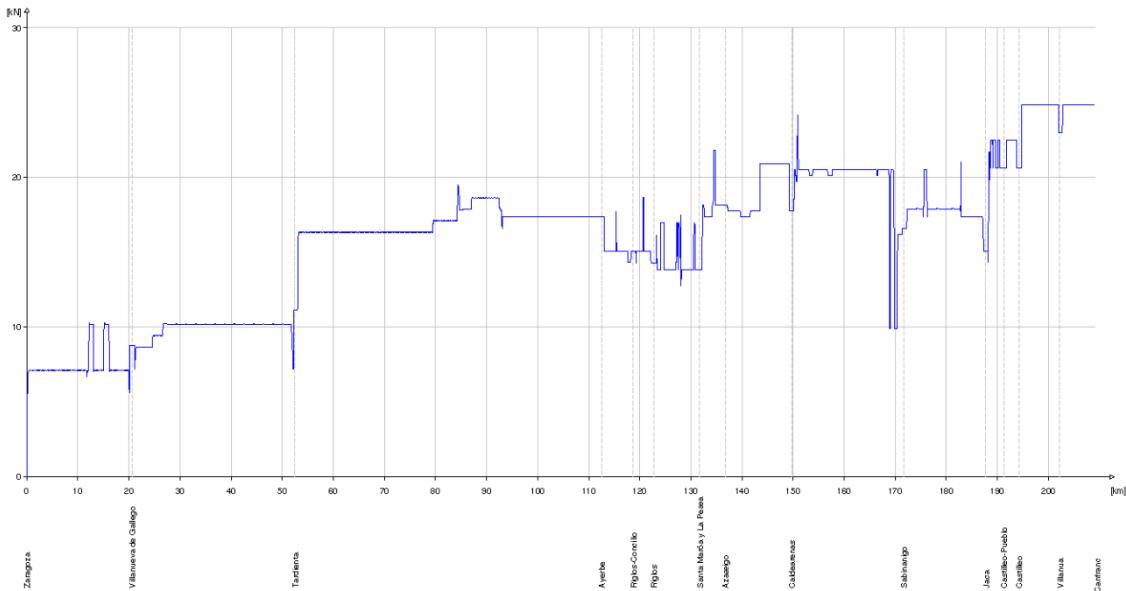




Resistencia debida al gradiente mercancías ZGZ-CFN

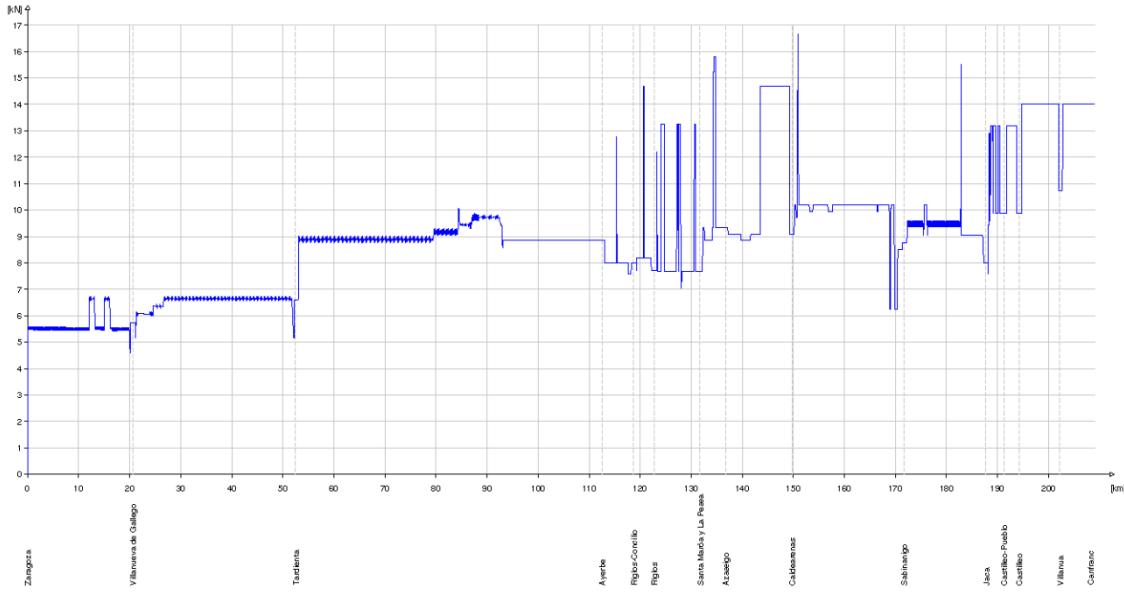


Resistencia debida al gradiente portacontenedores cargado ZGZ-CFN





Resistencia gradiente tolva ZGZ-CFN



Energía requerida por mercancías ZGZ-CFN

