



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo:

Desarrollo de un sistema de decisiones para la selección de rutas óptimas de transporte de mercancías por ferrocarril en base a parámetros de consumo, operativos y medioambientales

Project title:

Development of a decision-making support system for the selection of optimal freight transport routes by rail based on consumption, operational and environmental parameters.

Autor

David Frago Aznar

Director

Emilio Larrodé Pellicer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza
2022

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DECISIONES PARA LA SELECCIÓN DE RUTAS ÓPTIMAS DE TRANSPORTE DE MERCANCIAS POR FERROCARRIL EN BASE A PARÁMETROS DE CONSUMO, OPERATIVOS Y MEDIOAMBIENTALES

AUTOR:

Frago Aznar, David

RESUMEN DEL TRABAJO

Este Trabajo de Fin de Grado surge como el interés de obtener una herramienta de cálculo capaz de obtener los parámetros principales a la hora de seleccionar y diseñar una ruta de transporte ferroviario, obteniendo las variables de consumo energético, tiempo de transporte y cantidad de emisiones a la atmósfera.

En primer lugar, se elaboran los estudios teóricos tanto de la dinámica de los trenes como de la herramienta de programación, Matlab. Se muestra el desarrollo en base al cual se ha realizado el código del programa. Una vez establecido el marco teórico, se comienza a elaborar el código en base al conocimiento previamente adquirido.

En segundo lugar, tras haber desarrollado el sistema de cálculo, se procede a su explicación. Primero se muestran las herramientas de programación que han sido empleadas y después se detalla paso por paso como es el funcionamiento del programa.

Con el programa ya operativo, se procede a la verificación del funcionamiento mediante el análisis de tres casos diferentes (dos reales y uno ficticio) y se obtienen los resultados numéricos que verifican el correcto funcionamiento.

Finalmente se procede a realizar un análisis más en detalle de estos tres casos, graficando los resultados que el programa facilita al usuario y comentando las diferencias y similitudes que se aprecian en los resultados obtenidos.

FECHA DE ENTREGA

Zaragoza, 25 de noviembre de 2022.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar este espacio para dedicar unas palabras a varias personas que me han ayudado tanto en la realización de este trabajo como a lo largo de la carrera.

Para empezar, quería dar las gracias a Emilio Larrodé. Él me ofreció la idea de este trabajo y en todo momento me ha facilitado la posibilidad de resolver dudas y preguntas, aún siendo verano. También agradecerle que me diera la oportunidad de realizar prácticas en empresa y tener así el primer contacto con el mundo laboral.

Para continuar quisiera darle las gracias a mis padres, los cuales siempre han estado ahí a lo largo de todos estos años, apoyándome y creyendo siempre en mí. Si a día de hoy he podido llegar a realizar este trabajo, es gracias a ellos.

Una mención especial para mis amigos, a los cuales he podido estar meses sin ver pero que siempre han estado ahí.

Por último y más importante, quería agradecer a mis abuelos: Adela y Enrique, que en paz descansen; y Angelita y Jesús. A ellos les debo todo. Ellos me han criado, me han dado todo lo que tenían y llegue a donde llegue el día de mañana, será gracias a ellos. No sé en cuántas vidas podré agradecerles todo lo que han hecho por mí.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 OBJETO Y ALCANCE	5
2. METODOLOGÍA	6
2.1 DESARROLLO TEÓRICO	6
2.1.1 POTENCIA DEL TREN Y LÍMITE DE ADHERENCIA.....	6
2.1.2 CONSUMO ENERGÉTICO.....	7
2.1.2.1 TÉRMINO A	8
2.1.2.2 TÉRMINO BV	8
2.1.2.3 TÉRMINO CV^2	9
2.1.3 TIEMPO EMPLEADO	10
2.1.4 EMISIONES DE CO_2	10
2.1.4.1 LOCOMOTORA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA	10
2.1.4.2 LOCOMOTORA DE TRACCIÓN DIÉSEL	11
2.2 PROGRAMACIÓN	11
2.2.1 VECTORES, BUCLES Y CONDICIONALES.....	11
2.2.2 INTRODUCCIÓN DE LA INFORMACIÓN	12
2.2.3 OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	12
3. ALGORITMO DEL PROGRAMA	14
3.1 INTRODUCCIÓN DE DATOS POR EL USUARIO	14
3.2 CÁLCULOS PREVIOS.....	15
3.3 CÁLCULOS POR TRAMOS.....	17
3.3.1 VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA POR ADHERENCIA	17
3.3.2 CONSUMO ENERGÉTICO	18
3.3.3 TIEMPO	19
3.3.4 EMISIONES DE CO_2	19
3.3.5 CÁLCULO DE VALORES TOTALES.....	19
3.4 OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	20
4. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA	21
4.1 CALDEARENAS-JACA	21
4.2 ZARAGOZA-SAGUNTO.....	26
4.3 CASO DOCENTE	30

5.	RESULTADOS ANALÍTICOS	32
5.1	ANÁLISIS CALDEARENAS-JACA.....	32
5.1.1	CASO DIÉSEL	32
5.1.2	CASO ELÉCTRICO	33
5.1.3	COMPARACIÓN CASO DIÉSEL Y CASO ELÉCTRICO.....	35
5.2	ANÁLISIS ZARAGOZA-SAGUNTO.....	35
5.2.1	CASO DIÉSEL	35
5.2.2	CASO ELÉCTRICO	37
5.2.3	COMPARACIÓN CASO ELÉCTRICO Y CASO DIÉSEL.....	38
5.2.4	VARIACIÓN DEL CONSUMO RESPECTO DEL VIENTO	39
5.3	ANÁLISIS CASO DOCENTE	41
6.	CONCLUSIONES.....	44
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	45
8.	ANEXOS	47
8.1	CÓDIGO DEL PROGRAMA	47
8.2	MANUAL DE USUARIO	54
8.3	DESCRIPCIÓN DEL TRAYECTO CALDEARENAS-JACA.....	59
8.4	VAGÓN TIPO TOLVA TIPO: TT5.....	61
8.5	LOCOMOTORA DIÉSEL 333,3	62
8.6	LOCOMOTORA ELÉCTRICA 253	63
8.7	LOCOMOTORA ELÉCTRICA 269,75.....	64
8.8	DESCRIPCIÓN DEL TRAYECTO ZARAGOZA-SAGUNTO.....	65
8.9	VAGÓN TIPO PLATAFORMA TIPO MA5	69

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO Y ALCANCE

El objeto del siguiente Trabajo de Fin de Grado, es el desarrollo de un sistema de cálculo para la selección de rutas óptimas de transporte de mercancías (o pasajeros) por ferrocarril, en base a los parámetros de consumo, operativos y medioambientales. Estos parámetros incluirán el consumo energético, el tiempo de transporte y las emisiones de CO₂ para una ruta con unas características seleccionadas.

Se utilizará como herramienta de programación Matlab y previamente al desarrollo del código, se realizará un estudio de su funcionamiento para conocer y aprovechar al máximo las prestaciones que ofrece.

Se realizará un estudio previo, sobre la dinámica del tren y que aspectos definen su avance y que resistencias limitan su movimiento. Se hará uso de hipótesis y simplificaciones debidamente justificadas para la obtención de resultados coherentes.

Realizados ambos estudios, se procederá a la parte de programación del sistema de cálculo, plasmando todo el conocimiento adquirido previamente.

Una vez se haya obtenido un programa de cálculo sólido, se procederá a su análisis y verificación del correcto funcionamiento. Para ello, se analizarán diferentes líneas ferroviarias, con sus características definidas y se procederá a la obtención de resultados tanto numéricos como analíticos.

Existirán dos tipos de resultados, unos mostrados directamente en la aplicación Matlab y otros almacenados en un fichero que puede ser abierto en Excel para el análisis del propio usuario.

Este trabajo ha sido realizado con el objetivo de que pueda ser empleado en la vida real, ya sea en docencia o en el ámbito profesional, para facilitar el cálculo de los parámetros principales que aparecen en una línea ferroviaria y con esta información, analizar distintos casos y hacer una selección óptima de las características que definan una ruta comercial o de pasajeros.

El alcance de este trabajo, llega a la obtención de resultados teóricos de cualquier tipo de línea ferroviaria, requiriendo previamente por parte del usuario, un conocimiento amplio de la situación que quiere analizar, si desea obtener los resultados con la mayor precisión posible.

El programa es un sistema de cálculo teórico, es trabajo del usuario ser crítico con los resultados que obtenga, en función de la información que le haya suministrado al programa.

2. METODOLOGÍA

En el siguiente apartado, se va a explicar la metodología que se ha seguido para elaborar el programa de cálculo. Se mostrarán los conceptos teóricos, basados principalmente en la dinámica del tren y en su consumo energético; y por otra parte se explicará la metodología empleada para la elaboración del programa, basada en la teoría descrita.

2.1 DESARROLLO TEÓRICO

Se presenta a continuación los diferentes conceptos teóricos empleados, siguiendo el orden de aplicación en el script de Matlab.

2.1.1 POTENCIA DEL TREN Y LÍMITE DE ADHERENCIA

El límite de adherencia, es el límite a partir del cual, si se superase, la locomotora perdería el agarre con las vías y comenzaría a patinar. En la Fórmula 1, se calcula el límite de adherencia, W , en CV.

$$W = \frac{100}{27} * \frac{\varphi_0 * P_{loc} * v}{(1 + 0,01 * v)}$$

Fórmula 1. Límite de adherencia.

Siendo:

- φ_0 = Coeficiente de adherencia en arranque.
- P_{loc} = Peso de la locomotora, en toneladas.
- v = Velocidad, en km/h.

Si el valor de la potencia del tren supera el límite de adherencia, se producirá patinaje.

La potencia del tren en CV, se calcula con la Fórmula 2.

$$W_T = P_{tren} * \omega * v * \frac{5}{1323}$$

Fórmula 2. Potencia instantánea del tren

Siendo:

- P_{tren} = Peso de la locomotora + peso total de la composición, en toneladas.
- ω = Resistencia al avance total, que incluye la resistencia al avance (2 daN/t) + a la rampa (i daN/t) + a la curva ($800/R$ daN/t).
- v = Velocidad media en cada tramo, en km/h.

La pendiente o rampa se calcula de manera sencilla, con la diferencia de alturas y la distancia entre los dos puntos que forman el tramo. Este valor se obtiene en milésimas que es equivalente a daN/Tm, que sería la resistencia a la inclinación del terreno.

Se considerará rampa cuando el sentido sea ascendente (+) y pendiente cuando el sentido sea descendente (-).

$$i = 1000 * \frac{h}{\sqrt{l^2 - h^2}}$$

Fórmula 3. Pendiente o rampa.

Se deberá cumplir siempre que la potencia máxima de la locomotora, es mayor o igual que la potencia necesaria para mover el tren.

$$W_{max,loc} \geq W_T$$

Fórmula 4. Límite de potencia máxima.

Y a su vez se deberá cumplir que la potencia necesaria para mover el tren, es menor que el límite de adherencia.

$$W_T \leq W$$

Fórmula 5. Potencia máxima respecto a adherencia.

De esta manera, se podrán agrupar ambas ecuaciones y se obtendrá la velocidad máxima a la que puede circular el conjunto, sin romper la adherencia. Despejando y dejando ambas ecuaciones en las mismas unidades (velocidad en km/h) se obtiene:

$$V_{m\acute{a}x} \leq \frac{132300 * \varphi_0 * P_{loc} - 135 * P_{tren} * \omega}{1,35 * P_{tren} * \omega}$$

Fórmula 6. Velocidad máxima permitida por adherencia.

2.1.2 CONSUMO ENERGÉTICO

El cálculo del consumo energético del tren, se realizará por variación de energía mecánica, ya que, si se hiciera integrando la potencia en el tiempo, haría falta conocer la potencia en cada instante y en este trabajo, se calcula la potencia con la velocidad media de cada tramo. El balance de energía quedaría de la siguiente manera:

$$E_{tren} - W_{avance} = \Delta E_p - \Delta E_c$$

Fórmula 7. Balance de energía del tren.

Donde:

- E_{tren} = Energía consumida por el tren, en J.
- W_{resis} = Resistencia al avance, en J
- ΔE_p = Variación de energía potencial [$mg \cdot (h_2 - h_1)$], en J.
- ΔE_c = Variación de energía cinética [$0.5 \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$], en J.

De resolver esta ecuación, se pueden obtener dos resultados:

1. $E_{tren} > 0$, en este caso el valor obtenido será la energía consumida por el tren.
2. $E_{tren} < 0$, en este caso el valor de la energía consumida será cero, porque es el tren el que genera energía. Esta energía será empleada en su totalidad para frenar el conjunto, si la locomotora es de tracción diésel. Pero, si la tracción fuera eléctrica, un porcentaje de esta energía se regeneraría en energía eléctrica para ser utilizada por el

mismo tren, para alimentar a sistemas auxiliares o ayudar posteriormente a la tracción; o podría ser devuelta a la red.

Conocida la variación de la energía potencial y la energía cinética, falta por conocer el factor de resistencia al avance, que puede escribirse así:

$$W_{avance} = A + B * v + C * v^2$$

Fórmula 8. Resistencia al avance para trenes.

Se observa que la resistencia al avance, tiene la forma de un polinomio de segundo grado y cada coeficiente hace referencia a:

- **A:** Incluye la resistencia a la rodadura de rueda sobre rail y la resistencia de las manguetas del eje en la caja de grasa que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa por eje y directamente proporcional a la masa total.
- **Bv:** Resistencia por pérdidas debidas a las histéresis mecánicas, amortiguamiento de oscilaciones verticales y laterales, rozamientos de pestañas con rail debido al movimiento de lazo (aspectos relacionados con la calidad de la vía y el guiado óptimo de los vehículos.
- **Cv²:** Incluye efectos de la resistencia aerodinámica.

A continuación, se obtienen las expresiones que permiten obtener estos coeficientes.

2.1.2.1 Término A

Denominada resistencia mecánica, se puede considerar como la suma de la resistencia a la rodadura más la resistencia de los rozamientos internos. Los valores de estas resistencias están comprendidos entre 0,5-0,9 daN/t, para la resistencia a la rodadura y entre 1,3-1,4 daN/t para la resistencia de los rozamientos internos.

El valor recogido de la resistencia mecánica, en la mayoría de las fórmulas empleadas por las administraciones ferroviarias para composiciones remolcadas, tanto de viajeros como de mercancías, es de 2 daN/t.

Dentro de este término independiente, también se incluirá la resistencia a la curva que, para el ancho de vía considerado en este trabajo de 1.668 mm, el valor será 800/R (daN/t), siendo R el radio de la curva en metros.

2.1.2.2 Término Bv

Este término englobaba al resto de resistencias que no están relacionadas ni con la resistencia mecánica, ni con la resistencia aerodinámica, incluyendo también la resistencia debida a la entrada de aire en el tren.

Este término es directamente proporcional al caudal de aire que entra al tren y a la densidad del aire. Este valor es mínimo para trenes de mercancías, por lo que tiende a despreciarse y se evita su cálculo, ya que habría que conocer en todo momento tanto la densidad del aire, variante con la temperatura y presión ambiente; y el flujo másico de aire que entra al tren. Para el caso de trenes de pasajeros, este valor es más influyente, por lo que se muestra una serie de valores que las administraciones ferroviarias suelen emplear en los estudios dinámicos.

TIPO DE TREN	MASA (t)	COEFICIENTE B (daN/t)
Locomotora tipo BB	80	0,8
Locomotora tipo CC	120	1,2
2 Loc + 6 Coches	400	3,90

Tabla 1. Coeficiente B, para distintas configuraciones. Fuente: Dinámica del tren [3].

2.1.2.3 Término C_v^2

Por último, el término que recoge la resistencia aerodinámica dependerá de diferentes variables, agrupándose en la siguiente expresión:

$$T_f * \frac{1}{2} * C_x * S * \rho * \frac{1}{3,6 * 10} * (v_{tren} + v_{viento} * \cos(\alpha))^2$$

Fórmula 9. Resistencia aerodinámica.

Estas variables son:

- T_f = Factor que hace aumentar la resistencia aerodinámica del tren a su paso por un túnel. Este valor a, 100 km/h, oscila entre 1,2 y 1,6.
- C_x = Coeficiente de penetración (adimensional), propio de cada vehículo.
- S = Superficie frontal del tren, en m^2 .
- ρ = Densidad del aire, en kg/m^3 .
- V_{tren} = Velocidad del tren, en km/h.
- V_{viento} = Velocidad del viento, en km/h.
- α = Ángulo de dirección del viento, considerando 0° , como viento de cara, hasta 180° , como viento de cola.

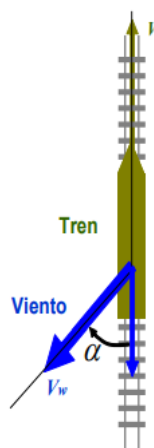


Fig 1. Dirección del viento respecto a la dirección de avance. Fuente: Dinámica de los trenes de alta velocidad [4].

La resistencia al avance vendrá dada por la suma de estos tres términos y solo quedará convertir las unidades al Sistema Internacional, en este caso Julios:

$$W_{avance} = (A + B * v + C * v^2) * 10 * D$$

Fórmula 10. Trabajo de la resistencia al avance, en Julios.

Multiplicándose por diez para convertir los daN a N (se considera la equivalencia 1 kP≈1 daN) y multiplicado por la distancia, en metros, para obtener el trabajo de la resistencia y así poder incluirlo en la fórmula del balance de energía mecánica. Se obtiene finalmente la ecuación del balance de energía mecánica para el movimiento de un tren:

$$E_{tren} = W_{avance} + m * g * (h_2 - h_1) + \frac{1}{2} * m * (v_2^2 - v_1^2)$$

Fórmula 11. Balance de energía mecánica final.

Con el fin de tener el valor del consumo energético en unidades más prácticas y reconocibles, se convierte la energía de Julios a kWh, dividiendo la energía (consumida, regenerada y de freno) entre $3,6 * 10^6$.

2.1.3 TIEMPO EMPLEADO

Para el cálculo del tiempo de trayecto, se van a despreciar los efectos de las aceleraciones, producidas a la entrada y/o salida de cada tramo, considerando una velocidad constante por tramo, ya que estas aceleraciones (o deceleraciones) ocurren en un instante de tiempo muy pequeño.

$$Tiempo (horas) = \frac{Distancia (km)}{Velocidad (\frac{km}{h})}$$

Fórmula 12. Tiempo empleado por tramo.

2.1.4 EMISIONES DE CO₂

Las emisiones de CO₂, estarán directamente relacionadas con el consumo energético del tren y se dividirán en dos secciones, sea la locomotora de tracción diésel o tracción eléctrica.

2.1.4.1 Locomotora de tracción eléctrica

Se va a considerar que el consumo del tren es únicamente la energía que se emplea para producir su movimiento (sin tener en cuenta la energía empleada en el transporte de electricidad) y que las emisiones producidas son únicamente debidas a la producción de esta energía eléctrica.

Para obtener las emisiones de este tipo de tracción, se empleará el *mix eléctrico*, que es el valor que expresa las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de electricidad que se consume, siendo un indicador de las fuentes energéticas que utiliza el país para producir electricidad. Cuanto menor es el *mix*, mayor es la contribución de fuentes energéticas bajas en carbono.

Según la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), que informa sobre el origen de la energía eléctrica consumida y su impacto medioambiental, estableció el 20 de abril de 2022 el valor del *mix* de la red eléctrica española en 0,259 kg de CO₂ eq/kWh [5]. De este

modo, las emisiones de dióxido de carbono para trenes de tracción eléctrica, se obtendrán de esta forma:

$$Emisión\ CO_2(kg) = mix\left(\frac{kg\ CO_2}{kWh}\right) * Energía\ consumida\ (kWh)$$

Fórmula 13. Emisiones de CO₂ para tracción eléctrica.

2.1.4.2 Locomotora de tracción diésel

Como ocurría en el apartado anterior, se va a considerar únicamente la energía consumida para mover el tren y para las emisiones, sólo se considerará la emisión de dióxido de carbono producido en la combustión del motor de la locomotora, despreciando emisiones debidas a la extracción del combustible fósil, emisiones debidas al transporte, etc.

De esta manera se tendrán en cuenta los siguientes parámetros para obtener un valor de kg de CO₂:

- Poder calorífico: Poder calorífico inferior (PCI), de valor 11,78 kWh/kg.
- Factor de emisión: 2,79 kg CO₂/l de gasoil.
- Densidad del gasoil: 900 kg/m³.

La fuente de estos datos se encuentra en la bibliografía [6].

Así, las emisiones de dióxido de carbono para locomotoras de tracción diésel, vendrá determinado por:

$$CO_2(kg) = E_{cons.}(kWh) * \frac{1}{PCI\left(\frac{kWh}{kg}\right)} * \frac{1}{Dens.\left(\frac{kg}{m^3}\right)} * \frac{1.000\ l}{1\ m^3} * Fact_{em.}\left(\frac{kg\ CO_2}{l\ gasoil}\right)$$

Fórmula 14. Emisión de CO₂ para tracción diésel.

En este apartado, se muestra también como obtener el consumo de diésel, ya que se emplea el poder calorífico y la densidad de éste. El consumo de combustible se calcula como:

$$Consumo\ diésel\ (l) = E_{tren}(kWh) * \frac{1}{PCI_{diésel}\left(\frac{kWh}{kg}\right)} * \frac{1}{Densidad_{diésel}\left(\frac{kg}{m^3}\right)} * 1000$$

Fórmula 15. Consumo de diésel.

2.2 PROGRAMACIÓN

Una vez desarrollados los conceptos teóricos, se procede a implementarlos en el programa, que ha sido desarrollado en la aplicación Matlab, versión R2020a, a través de un *script*. En este apartado se van a explicar las principales funciones empleadas y su funcionamiento.

2.2.1 VECTORES, BUCLES Y CONDICIONALES

La forma de almacenar la información, ya sea introducida por parte del usuario o calculada por el programa, es en forma de vectores (*arrays*), asignando a cada variable, su valor con respecto al tramo (i), al que pertenece. De esta manera será sencillo asignar los valores conocidos y

obtener los resultados de los cálculos de forma iterativa, empleando bucles tipo *for i = x : y → end*. Que repite de forma iterativa el algoritmo que contenga entre medio del bucle. Se repite de un valor inicial $i=x$, hasta un valor final y . Otro tipo de bucle empleado ha sido el tipo *while → end*, en el que se ejecuta un algoritmo de forma iterativa, hasta que la variable o expresión que se ha fijado al inicio del bucle, no cumple con las condiciones requeridas.

Para asignar condiciones, se hace uso del *if → end* y si se da el caso de que se tenga que ejecutar un algoritmo cuando la condición del *if* sea falsa, se hará uso de *else*.

2.2.2 INTRODUCCIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información conocida por el usuario, puede almacenarse en el programa, en forma de variables, de dos maneras diferentes.

1. De valor en valor, introducido a mano por el usuario, con la función *input*, la cual muestra por pantalla un texto descriptivo para conocer la variable que pregunta el programa. Esta función se empleará cuando sea necesario almacenar variables individuales (no contenidas en vectores), como pueden ser los datos de la locomotora seleccionada o los puntos en los que se ha dividido el trayecto estudiado.
2. De forma automática, para introducir al programa una gran cantidad de datos, que en este caso serán las variables que contenga cada tramo, como por ejemplo la altura de cada punto, la distancia entre un punto y el siguiente, el radio de la curva de cada tramo, etc. Se realizará con las siguientes funciones:
 - *uigetfile*: Despliega una ventana emergente para la selección del fichero de datos de la ruta. Este lo almacena en una variable denominada “nombre” y la dirección de su directorio en una variable denominada “dirección”, de esta forma se puede leer cualquier fichero, aunque no pertenezca al directorio de trabajo de Matlab.
 - *readtable*: Lee y almacena en una tabla de Matlab, el fichero seleccionado anteriormente (puede ser .csv o fichero de texto).
 - *table2array*: Como se ha comentado anteriormente, todas las variables por tramos, quedan almacenadas en vectores. Esta función convierte la tabla creada anteriormente, en un vector de vectores o matriz.

Una vez puesto la información en forma de vector, se emplea un bucle *for* para asignar a cada variable su valor correspondiente en cada uno de los tramos del trayecto.

2.2.3 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Para la obtención de resultados, se procede de dos maneras:

- Mediante la visualización en la pantalla de comandos de Matlab.
- Almacenamiento de los resultados en un fichero *.x/sx*.

La primera forma de visualización, mostrará los resultados generales que se le piden al programa, que serían:

- Consumo de energía total. Aquí se incluyen también los datos totales de energía de regeneración y energía empleada en el freno.
- Consumo de diésel total, en caso de que la locomotora sea de tracción diésel.
- Tiempo de transporte.

- Emisiones de CO₂ totales, del trayecto.

Estos resultados mostrarán de forma directa, la información más importante requerida por el usuario, a la hora de tomar decisiones sobre la elección de una ruta, una locomotora o cantidad de mercancía a transportar.

La función para mostrar los resultados y cualquier información que el programa tenga que dar al usuario, es *disp*, que imprime en la ventana de comandos el texto que se quiere dar a conocer al usuario.

Por otra parte, para los resultados propios de cada tramo, que se almacenan en vectores como se ha comentado anteriormente, debido a que sería muy molesto mostrarlos en la ventana de comandos, éstos se almacenan en un fichero *.xlsx*, por si el usuario quisiera obtener información más específica respecto a cada tramo.

Para el almacenamiento de estas variables en el fichero, primero se procederá a transformar los vectores fila, en vectores columna mediante la función *transpose*, que devuelve la transpuesta del vector que se introduzca. Una vez estén en formato columna, se emplea la función *table* para crear una tabla. Finalmente, para copiar los datos en el fichero, se escribirá la función *writetable*, con el nombre que les ha asignado el programa a las tablas obtenidas, siendo en este caso: “RESULTADOS.xlsx”, que se dividirá en dos hojas siendo una de datos (altura, distancia, velocidad) y en la otra hoja, las variables calculadas (pendiente, velocidad máxima, energía consumida, emisiones...).

Se resumen así, las funciones principales que ofrece Matlab y que han sido empleadas en la elaboración de este programa de cálculo. Se han omitido las funciones básicas de cálculo (sumar, restar, multiplicar, dividir...), ya que estas son comunes en todas las herramientas de programación.

En los anexos se incluirán tanto el código desarrollado en Matlab **(8.1)**, como un breve manual de usuario para la correcta ejecución del programa **(8.2)**.

3. ALGORITMO DEL PROGRAMA

En este apartado, se entra en detalle en la elaboración del programa, justificando el empleo del desarrollo teórico, visto en la sección anterior, los cálculos realizados para la obtención de los resultados y finalmente la extracción de resultados del programa.

El programa se puede dividir en cuatro bloques principales:

- Introducción de los datos por parte del usuario.
- Cálculos previos.
- Cálculos por tramos.
- Obtención de resultados.

3.1 INTRODUCCIÓN DE DATOS POR EL USUARIO

El programa comienza preguntado al usuario sobre el peso de la carga que se va a transportar, esto incluye tanto el peso de los vagones de carga como la propia carga, en toneladas. Lo siguiente que pregunta es el número de puntos en los que se ha dividido la ruta. Esto marcará el límite de las iteraciones que realizará el programa en los cálculos. Por último, en cuanto a introducción de datos se refiere, se abre una ventana emergente para que el usuario elija el fichero de datos que quiere analizar. El fichero de datos tendrá que tener el siguiente encabezado para el funcionamiento correcto del programa.

Punto	Altura (m)	Distancia (km)	Coef. adherencia	Radio (m)	Densidad del aire (kg/m ³)	Factor túnel	Velocidad viento (km/h)	Dirección viento (grados)	Velocidad máxima (km/h)
-------	---------------	-------------------	---------------------	--------------	--	-----------------	-------------------------------	---------------------------------	-------------------------------

Tabla 2. Encabezado obligatorio de la tabla de datos del usuario. Fuente: Elaboración propia.

La lectura del fichero de datos, se realiza con las funciones que se han explicado en la sección anterior, siendo muy importante que el número de puntos de la ruta, introducido por el usuario en el segundo paso, coincida con el número de puntos que se han marcado en el fichero de datos, ya que de ser diferente causaría los siguientes problemas:

- Si el número de puntos introducido por el usuario, fuera menor que el número de puntos que tiene el fichero, el programa no daría error, simplemente recogería los datos del punto hasta el que se le ha indicado, dejando sin analizar el resto.
- Si el número de puntos introducido por el usuario, fuera mayor que el número de puntos que tiene el fichero, el programa daría un error de dimensiones, indicando que el tamaño del vector que se le ha indicado (número de puntos) es mayor a la dimensión de la hoja de datos que está leyendo, cancelando así la ejecución del programa.

Si ambos valores coinciden, el programa comenzará a leer punto por punto del fichero, todas las variables y almacenándolas en su posición correspondiente. La forma de almacenar punto por punto es mediante un bucle *for*, en el que va asignando a cada variable, la lectura que va recogiendo del fichero de datos.

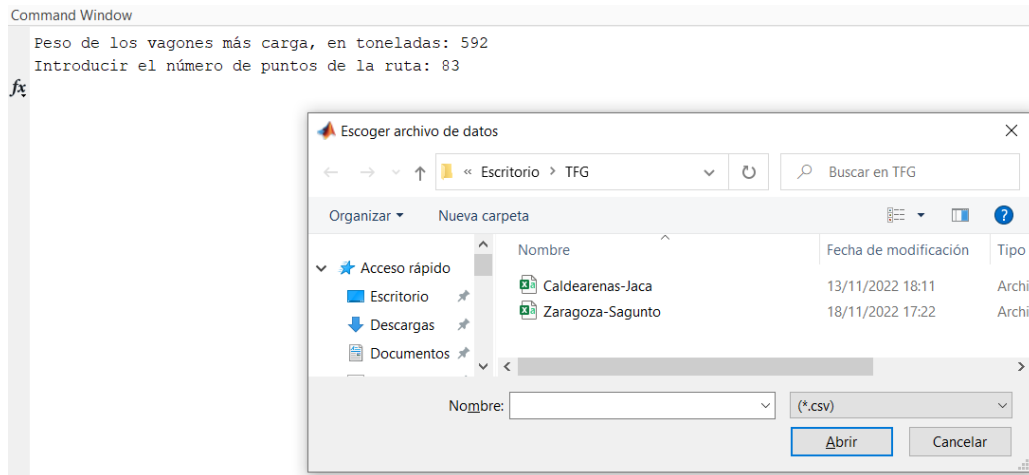


Fig 2. Primeros datos introducidos por usuario y ventana emergente de selección datos.

Una vez el programa termina de leer y almacenar toda la información, comienzan a realizarse los primeros cálculos previos.

3.2 CÁLCULOS PREVIOS

Previamente a realizar los cálculos principales de consumo energético, tiempo empleado y emisiones, el programa realiza una serie de cálculos para obtener cierta información necesaria para los cálculos finales. En este bloque del *script*, se intercalarán tanto cálculos previos, como solicitud de información al usuario por parte del programa. Esta información requerida puede ser por ejemplo las características de la locomotora (potencia máxima, peso, sección frontal...).

El bloque comienza al finalizar la lectura de todos los datos previos, realizando el cálculo de la pendiente, en milésimas, de cada tramo con la Fórmula 3. Este valor se tomará como la resistencia a la rampa o pendiente (daN/t), dependiendo de su signo, que se incluirá en la fórmula del cálculo de la potencia del tren (Fórmula 2). Calculada la pendiente, ahora se obtiene la resistencia total, sumando los términos de resistencia al avance, resistencia a la rampa y resistencia a la curva.

Para que el usuario pueda hacer una primera selección del material tractor, tendrá que conocer el pico de potencia necesario para mover el tren en un punto más desfavorable, a la velocidad mínima a la que estaría dispuesto hacer circular el tren. El programa localiza este tramo y hace fijar esta velocidad límite al usuario. Con esta velocidad y la información almacenada anteriormente, el programa hace un primer cálculo de potencia mínima necesaria, con la Fórmula 2, considerando únicamente el peso de la mercancía, ya que a priori se desconoce el de la locomotora. Una vez calculada esta potencia, se muestra el valor en kW y en CV.

Con esta información, el usuario es capaz de elegir una locomotora acorde con las características de la ruta. A continuación, el programa requerirá del usuario, los valores de la potencia y el peso de la locomotora respectivamente y así continuar con la comprobación de que el conjunto, locomotora + carga, cumple con la potencia límite necesaria. Se vuelve a hacer el cálculo de la Fórmula 2, esta vez considerando el peso del conjunto total. A partir de aquí pueden ocurrir dos situaciones:

1. Si la potencia obtenida, considerando el conjunto entero, es inferior a la potencia máxima de la locomotora, el programa considerará que esta es la locomotora empleada para realizar todo el trayecto.
2. Si la potencia obtenida es inferior a la potencia máxima de la locomotora, el programa mostrará la potencia necesaria para mover todo el conjunto a velocidad mínima y pedirá al usuario, que introduzca una nueva locomotora o añada otra igual para aumentar la potencia y cumplir así con el requisito mínimo para poder circular. Se preguntará tanto la potencia del nuevo conjunto tractor como su peso y se repetirá en bucle hasta que cumpla con la especificación de la Fórmula 4.

```

Command Window
El tramo más desfavorable es el 11 - 12.
Velocidad mínima a la que permitiría circular el tren en el tramo 11 - 12, en km/h: 60
La potencia necesaria para mover el tren a 60 km/h, en el tramo más desfavorable es de:
2036.8882 kW.
2771.2764 CV.
Potencia máxima de la locomotora seleccionada, en kW: 2237
Peso de la locomotora seleccionada, en toneladas: 120
La potencia necesaria para mover todo el conjunto, en el tramo más desfavorable a 60 km/h, es:
2449.7709 kW.
3333.0217 CV.
Introducir potencia máxima de la nueva locomotora, en kW: 4474
Introducir peso de la nueva locomotora, en toneladas: 240
La potencia necesaria para mover el nuevo conjunto, en el tramo más desfavorable, a 60 km/h, es:
2862.6537 kW.
3894.7669 CV.
    
```

Fig 3. Introducción velocidad límite tramo más desfavorable y situación 2.

Una vez asignada la locomotora empleada, se preguntará si la tracción es eléctrica o diésel. Esta información se empleará para calcular las emisiones de CO₂, dependiendo de un tipo de tracción u otro.

A continuación, se preguntan por los valores geométricos del tren, su coeficiente de penetración (C_x) y su sección frontal. Esta información será empleada para el cálculo del coeficiente aerodinámico del tren, como se ha visto en el desarrollo teórico.

Por último, en este bloque, se preguntará al usuario si desea tener en cuenta la resistencia debido a la entrada de aire en el tren. Este valor es más influyente en trenes de pasajeros que en trenes de mercancía (objeto principal de estudio en este trabajo), pero como el programa puede hacer los cálculos para las dos situaciones (previamente se pregunta el tipo de carga del tren: pasajeros o mercancía), si la respuesta a la pregunta anterior es “sí”, se mostrará en la ventana de comandos la información incluida en la Tabla 1, respecto a los posibles valores que puede tomar el coeficiente B, para que el usuario elija entre uno de ellos o también podría introducir el coeficiente para su tipo de configuración, si lo conociera.

```

Command Window
¿La locomotora seleccionada es eléctrica o diésel? (Escribir 'elec' o 'dies'): 'dies'
Coeficiente de penetración del tren: 1.415
Sección frontal del tren, en m^2: 13.61012
¿El transporte es de mercancía o de pasajeros? (Escribir 'mercancia' o 'pasajeros'): 'pasajeros'
¿Se van a considerar los efectos de la resistencia debida a la entrada de aire? (Escribir 'si' o 'no'): 'si'
Introducir el valor del término B, que multiplica a la velocidad del tren (daN/km/h). Algunos valores pueden ser:
Locomotora tipo BB, B = 0.8
Locomotora tipo CC, B = 1.2
2 locomotoras + 6 coches, B = 3.9
Introducir valor de B: 1.2
    
```

Fig 4. Introducción de datos de la locomotora seleccionada y transporte de pasajeros, considerando la resistencia por entrada de aire al tren.

3.3 CÁLCULOS POR TRAMOS

Este es el bloque principal del *script*, donde se llevan a cabo los cálculos de los parámetros más importantes, que ayudarán al usuario a la selección de una ruta óptima.

3.3.1 VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA POR ADHERENCIA

El primer cálculo se encargará de fijar la velocidad máxima en cada tramo, la cual el tren no podrá superar de ninguna manera para no romper el límite de adherencia. Del fichero de datos introducido al principio, se lee la velocidad máxima de circulación por tramo. Para que los resultados sean óptimos, se considerará que el tren circula a esta velocidad, siempre que la adherencia lo permita. Por otra parte, en el caso de estudio de trenes de mercancías, la velocidad máxima está fijada a 100 km/h, por lo que en el caso de haber establecido como “mercancía” el tipo de carga, si la velocidad máxima de la vía es superior, se fijará en 100 km/h.

Para la obtención de la velocidad máxima permitida por adherencia, el programa se fijará únicamente en los tramos en los que la resistencia global al avance, ω , sea mayor que cero, ya que en el caso de que sea negativa, se deberá a que la resistencia a la pendiente (sentido descendente) es mayor en valor absoluto a la aportación de la resistencia al avance más la resistencia a la curva. Si se calcula el valor con este resultado, se obtendría una potencia de valor negativo cuyo significado es que no se necesita potencia para mover el tren en ese tramo, por lo que se fijará en cero. Para estos casos, la velocidad máxima de adherencia y la velocidad máxima de la vía será la misma, ya que no se superará el límite de adherencia al ser la potencia del tren cero.

En el caso en el que la resistencia global al avance sea positiva, se calcula la velocidad máxima permitida por adherencia con la Fórmula 6. Con este valor calculado, se pueden dar dos situaciones, una en el que la velocidad de circulación sea inferior a la permitida por adherencia y otra en el que sea mayor:

1. Velocidad de circulación inferior a la velocidad máxima de adherencia: En este caso la velocidad de circulación será la máxima permitida por la vía, ya que no se romperá la adherencia.
2. Velocidad de circulación superior a la velocidad máxima de adherencia: En esta situación, si se mantuviera la misma velocidad, se rompería la adherencia y el tren deslizaría por las vías. Para evitarlo, se muestra un mensaje por pantalla, advirtiendo de esta situación al usuario, comparando una velocidad con la otra para hacerle saber cuánto es la diferencia. Tras mostrar esta información, se le pregunta si desea continuar, pero con la velocidad máxima permitida por adherencia. El elegir circular a esta velocidad, sería útil en el caso de que no existiera mucha diferencia entre ambas velocidades y resultara más rentable disminuir un poco la velocidad óptima, que realizar cambios de locomotora o disminución de carga. Si la respuesta a la pregunta es ‘no’, existen dos posibilidades para volver a cumplir el límite de adherencia, con la velocidad de circulación deseada. Una solución sería disminuir el peso de la carga para ese trayecto y otra sería aumentar el número de locomotoras o utilizar una de mayor peso que la empleada inicialmente. Para ello el programa volverá a preguntar por los datos de peso de carga y peso de la o las locomotoras y el tipo de tracción, eléctrica o diésel. Fijada la locomotora, se volverá a preguntar por sus características geométricas (coeficiente de penetración y sección frontal). El programa plantea a la vez las dos opciones para cumplir con la velocidad máxima, pero en el caso de que únicamente se quiera utilizar una, el usuario deberá escribir el

mismo valor que al inicio, en la variable que quiera mantener e introducir uno nuevo en la que quiera cambiar. Tras esto el programa volverá a calcular la velocidad máxima permitida por adherencia y si esta sigue siendo menor que la de circulación, se repetirá la secuencia en bucle hasta que el usuario responda “sí” a la pregunta de continuar a esa velocidad o se cumpla con el límite de velocidad establecido.

```

Command Window
La velocidad de circulación en el tramo 6 - 7, es superior a la permitida por el límite de adherencia.
70 km/h > 49.4442 km/h.
¿Desea continuar a 49.4442 km/h? (Escribir 'si' o 'no'): 'no'
Es necesario disminuir el peso de la carga o cambiar el sistema de tracción (cambiar o añadir locomotora).
Peso de los nuevos vagones más carga, en toneladas: 592
Introducir potencia máxima de la nueva locomotora, en kW: 6200
Introducir peso de la nueva locomotora, en toneladas: 176
¿La locomotora empleada en este tramo es eléctrica o diésel? (Escribir 'elec' o 'dies'): 'elec'
Coeficiente de penetración del nuevo tren: 1.415
Sección frontal del nuevo tren, en m^2: 13.31676
    
```

Fig 5. Caso en el que la velocidad de circulación supera la velocidad máxima por adherencia.

3.3.2 CONSUMO ENERGÉTICO

La segunda parte de este bloque ya es el cálculo de las variables principales en cada tramo. El programa comienza calculando los tres coeficientes de resistencia (A, B, C). Estas resistencias se han visto en el desarrollo teórico y por comentar algo trivial, al programa se le indica que, si el radio de la curva es cero, considerar la resistencia de avance a la curva como cero, ya que, en el caso de no hacerlo así, quedaría como $800/0$, dando un error en la ejecución del *script*. Conocidos los tres términos de resistencia, se calcula el trabajo de resistencia al avance mediante la Fórmula 10 y a continuación con la Fórmula 11, se obtiene la energía consumida por el tren, en Julios, en cada tramo.

Existe la posibilidad de que la energía calculada resulte negativa. Esto significa que el valor de la variación de la energía potencial y cinética, compensa al valor de la resistencia al avance e indicando que, en ese tramo, no es necesario aporte de energía, ya que es el tren el que la produce. Esta energía podrá ser empleada en el frenado del conjunto o en regeneración de energía eléctrica que podrá ser devuelta a la red o empleada en el uso interno del tren (iluminación, calefacción...). Para ello se le preguntará al usuario, el porcentaje de regeneración del tren, en el tramo en el que se ha obtenido un valor “negativo” de energía consumida. De esta manera, se fijará un valor de cero para la energía consumida y la energía generada se dividirá en energía empleada en el frenado más la energía regenerada. Cabe destacar que la regeneración se considerará únicamente en los trayectos en los que la locomotora sea de tracción eléctrica, ya que es el motor eléctrico el que en los tramos de frenado puede comportarse como generador y transformar esta energía en electricidad.

Los casos en que la energía consumida pueda ser inferior a cero, serán:

- Reducción de velocidad: Debida al freno del tren ya sea porque tiene que subir una rampa a menor velocidad o que tenga que frenar porque está en una pendiente y debido a la energía potencial éste se acelere. También puede ser que el tren frene en una recta para llegar a una parada y detenerse.
- Disminución de la cota de altura: Si el tren pasa de una cota inferior a la anterior, la energía potencial resultará negativa Esto podrá darse en el cambio de recta a pendiente o en el cambio de rampa a pendiente.

Finalmente, todos los valores de energía, obtenidos en Julios, se convertirán a kWh para facilitar la comprensión al usuario.

Command Window	
Porcentaje de regeneración en el tramo 2 - 3:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 42 - 43:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 52 - 53:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 62 - 63:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 63 - 64:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 64 - 65:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 65 - 66:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 67 - 68:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 68 - 69:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 69 - 70:	20
Porcentaje de regeneración en el tramo 71 - 72:	20

Fig 6. Tramos en los que se produce regeneración. Caso Caldearenas-Jaca, tracción eléctrica.

3.3.3 TIEMPO

Como se ha visto en la teoría, el cálculo del tiempo empleado en cada tramo se considerará a velocidad constante, debido a los mínimos tiempos de aceleración del tren. El programa emplea la Fórmula 12 y obtiene el resultado en horas.

3.3.4 EMISIONES DE CO₂

Con los datos de emisiones expuestos en el desarrollo teórico, se calculan las emisiones teniendo en cuenta el tipo de tracción del tren. Esta operación debe hacerse una vez conocido el consumo energético ya que las emisiones de CO₂ son dependientes del consumo.

Para una locomotora de tracción eléctrica se empleará la Fórmula 13 y para una de tracción diésel, se empleará la Fórmula 14. Ambos resultados, se obtendrá en kg CO₂.

Dentro de este apartado, también se calcula el consumo de diésel, ya que va ligado con los datos empleados en esta sección, que son el poder calorífico y la densidad del diésel. Se obtiene el consumo de gasoil aplicando la Fórmula 15.

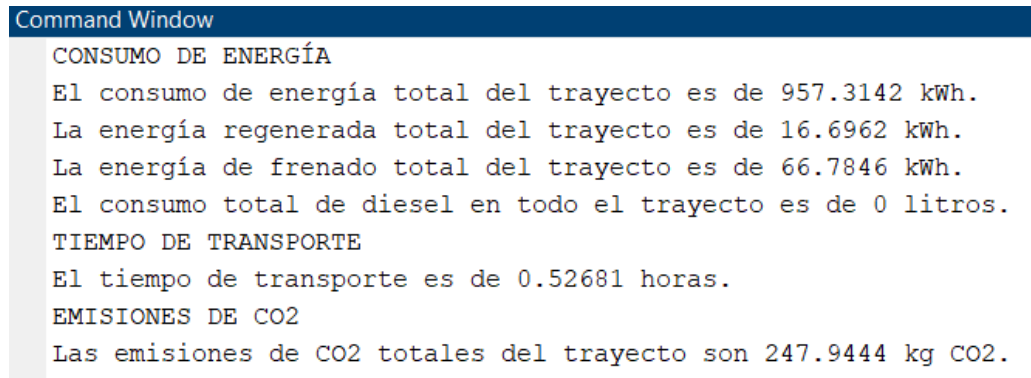
3.3.5 CÁLCULO DE VALORES TOTALES

Para finalizar esta sección, se hace el cálculo total de las variables, realizando un sumatorio por tramos de cada variable. Los resultados obtenidos en esta sección, serán los que se mostrarán en el mismo programa Matlab, en la ventana de comandos.

3.4 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Por último, este bloque está dedicado a la obtención de resultados, ya sea mostrados en la misma aplicación o guardados en un fichero para su posterior análisis.

La forma de obtenerlos es como se ha explicado en el apartado de programación y de esta manera el programa concluiría con su ejecución.



```

Command Window
CONSUMO DE ENERGÍA
El consumo de energía total del trayecto es de 957.3142 kWh.
La energía regenerada total del trayecto es de 16.6962 kWh.
La energía de frenado total del trayecto es de 66.7846 kWh.
El consumo total de diesel en todo el trayecto es de 0 litros.
TIEMPO DE TRANSPORTE
El tiempo de transporte es de 0.52681 horas.
EMISIONES DE CO2
Las emisiones de CO2 totales del trayecto son 247.9444 kg CO2.
    
```

Fig 7. Resultados principales obtenidos directamente en Matlab

4. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Para validar el correcto funcionamiento del programa, se van a analizar tres rutas diferentes, variando distintos parámetros para ver cómo cambian las variables de consumo, tiempo y emisiones. Los tres casos a estudiar son:

- Ruta Caldearenas-Jaca.
- Ruta Zaragoza-Sagunto.
- Caso docente correspondiente a la práctica 2 de la asignatura Ferrocarriles y otros Vehículos Guiados, del Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales, de la Universidad de Zaragoza.

Todos los cálculos de esta sección se van a realizar considerando una densidad de aire constante para todos los tramos de $1,225 \text{ kg/m}^3$ y un coeficiente de adherencia en arranque, fijo también, de 0,24. La densidad del aire es dependiente de la presión y temperatura del ambiente, pero se va a considerar constante para todos los cálculos, al igual que el coeficiente de adherencia, que puede variar en función de las condiciones de las vías (que estén húmedas, mojadas, con nieve, hielo...).

El valor del coeficiente de penetración, es un valor complicado de obtener, conociéndose mayormente valores de automóviles. Para este trabajo, se va a considerar un valor de $C_x = 1,415$ correspondiente a un tren Talgo TGV [4], ya que es el valor más acorde con este trabajo. Para el cálculo de la sección frontal, se considerará un modelo simple, tomando un rectángulo de base el ancho de caja y de alto la anchura máxima de la locomotora.

Debido a que no se dispone de información sobre cuánta energía se podría regenerar en los tramos que sea posible, se va a considerar de un 20% respecto de la total, para los que cumplan con el requisito de regeneración.

En esta sección se van a mostrar los resultados que muestra Matlab en la pantalla de comandos (los resultados principales). Más adelante se analizarán los datos con mayor detalle en la sección

5. RESULTADOS

4.1 CALDEARENAS-JACA

La primera ruta a analizar es el tramo Caldearenas-Jaca que pertenece a la línea Huesca-Canfranc. Es un trayecto de 37,6 kilómetros de longitud y de él se conocen todas las características: cota de altura, radio de curvas, velocidades máximas...). Esta ruta va del PK 72+346 al PK 109+990. Los datos completos de este trayecto, se encuentran en el ANEXO 8.3

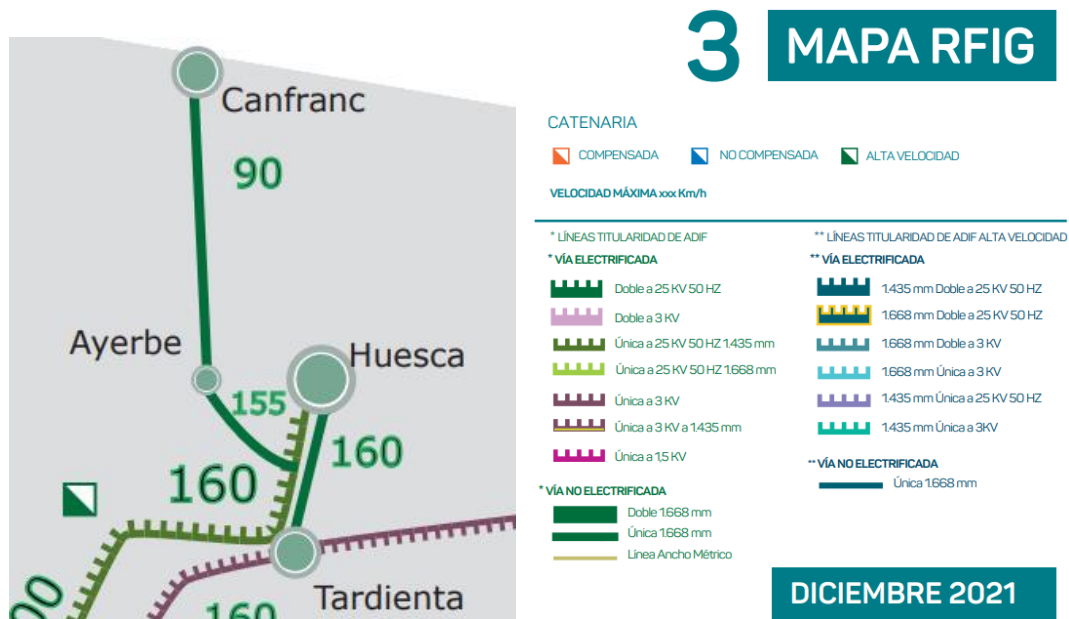


Fig 8. Mapa 3, Velocidades máximas, tipo de electrificación y catenaria. Línea Canfranc-Huesca. Fuente: [7].

La mercancía que se va a transportar, serán cereales ya que es la carga principal que transporta esta línea [8]. Para este suministro, se emplearán vagones de Renfe del tipo Tolva, en concreto la categoría TT5 para cereales, Sólidos y Líquidos. La Serie Internacional es Tagpp [9]. Para que el cálculo sea lo más realista posible, se va a considerar que el viaje se realiza dos veces al día, transportando 400 toneladas en cada uno, lo que daría un total de 7,14 vagones, que convirtiéndolo a números enteros se obtendría la cifra de 8 vagones, cargados con 50 toneladas cada uno. El peso total de la carga, considerando la propia carga más los vagones será de 592 toneladas. Con esta información, se comienza a ejecutar el programa desarrollado.

El programa obtiene como tramo más desfavorable el 11-12 y se fija la velocidad mínima a la que podría circular el tren, en 60 km/h. La potencia mínima que debería tener el tren en un principio, sería de: 2.036,8882 kW o 2.771,2764 CV. Se escoge la locomotora Diésel 333.3 del catálogo de material de Renfe [10] con una sección frontal considerada de 13,61012 m². Al introducir los datos de la locomotora en el programa, éste muestra como no cumple con los requisitos de potencia mínima, requiriendo de 2449,7709 kW. Como en el parque de locomotoras de Renfe, no hay una locomotora de tracción diésel con mayor potencia que esta, se toma la decisión de emplear doble tracción, así los datos de ambas locomotoras quedan reflejados en la Tabla 4.

Introduciendo las características de la doble locomotora, de forma manual, el programa proporciona los resultados de la Tabla 5.

Internacional	81710662001-3 a 400-7(*) / 81715660112-9 a 693-8(#)
Carga Media Máxima (t)	56,0
Tara Media (t)	24,0
Freno	Aire Comprimido
Velocidad (km/h)	100
Long. entre Topes (m)	14,16
Altura máxima (m)	4,28 (#) / 4,25 (*)
Empate (m)	8,87
Volumen Útil (m³)	75,0

Tabla 3. Características Generales Tolva tipo: TT5. Fuente: [9].

Constructores	VOSSLOH
Ancho de vía (mm)	1.668
Potencia (kW/CV)	4.474 /6.086
Masa/tara (t)	240
Ancho de caja (mm)	3.160
Altura máxima (mm)	4.307
Tipo de locomotora	Co - Co

Tabla 4. Características Generales Locomotora Diésel 333.3, DOBLE. Fuente: [10].

Estos serían los resultados obtenidos para un caso de doble tracción diésel (Tabla 5). Pero, ¿qué pasaría si en el día de mañana se electrificara esta línea y se sustituyera la tracción diésel por tracción eléctrica? Se procede a ejecutar el programa de la misma manera, con la misma mercancía, pero realizando la sustitución de locomotoras. En este caso la locomotora empleada será la Locomotora Eléctrica 253 (Tabla 6).

Peso locomotora (toneladas)	240
Peso mercancía (toneladas)	592
Peso total (toneladas)	832
Energía consumida (kWh)	1.027,3616
Energía frenado (kWh)	91,4656
Energía regeneración (kWh)	0
Consumo diésel (litros)	96,9026
Tiempo empleado (horas)	0,52681
Emisiones CO₂ (kg)	270, 3583

Tabla 5. Resumen caso diésel Caldearenas-Jaca. Fuente: Elaboración propia.

Constructor	BOMBARDIER TRASNPORATION
Ancho de vía (mm)	1.668
Potencia (kW/CV)	5.400 / 7.337
Masa/tara (t)	87
Ancho de caja (mm)	2.997
Altura máxima (mm)	4.270
Tipo de locomotora	Bo - Bo

Tabla 6. Características Generales Locomotora Eléctrica 253, SIMPLE. Fuente:[11].

La potencia mínima del tren como se ha visto en el cálculo anterior, es de 2.036,8882 kW, por lo que, en este caso, con una sola locomotora eléctrica sería suficiente para la tracción. La sección frontal en este caso es de 12,79719 m². Lo que se observa con esta locomotora es que debido a su “bajo” peso, no es capaz de cumplir con la velocidad de circulación deseada, superando el límite de velocidad máxima permitida por adherencia. Esto sucede en los tramos:

- 6-7. Velocidad máxima = 49,442 km/h. Velocidad de circulación deseada = 70 km/h.
- 9-10. Velocidad máxima = 49,7502 km/h. Velocidad de circulación deseada = 70 km/h.
- 10-11. Velocidad máxima = 52,937 km/h. Velocidad de circulación deseada = 65 km/h.

- 11-12. Velocidad máxima = 45,979 km/h. Velocidad de circulación deseada = 65 km/h.
- 29-30. Velocidad máxima = 47,473 km/h. Velocidad de circulación deseada = 70 km/h.

Ahora se plantean dos situaciones, o dejar carga atrás sin transportar para disminuir el peso de la mercancía, o cambiar a una locomotora más pesada en esos tramos. La solución final adoptada es el cambio de locomotora para todo el trayecto, debido a que es un trayecto muy corto y el continuo cambio de locomotora supondría un elevado coste y tiempo de operación. La nueva locomotora eléctrica será 269.75.

Constructor	MEC: CAF-MACOSA-MITSUBISHI; ELECTR: WESTINGHOUSE; FRENO: WABCO-DIMETAL
Ancho de vía (mm)	1.668
Potencia (kW/CV)	6.200 / 8.424
Masa/tara (t)	176
Ancho de caja (mm)	3.126
Altura máxima (mm)	4.260
Tipo de locomotora	Bo - Bo

Tabla 7. Características Generales Locomotora Eléctrica 269.75, SIMPLE. Fuente: [12].

Se vuelve a ejecutar el programa con estos datos, siendo en este caso la sección frontal de 13,31676 m². De esta manera se puede circular a la velocidad deseada en todo el trayecto y se obtienen los siguientes resultados:

Peso locomotora (toneladas)	176
Peso mercancía (toneladas)	592
Peso total (toneladas)	768
Energía consumida (kWh)	957,3142
Energía frenado (kWh)	66,7846
Energía regeneración (kWh)	16,6962
Consumo diésel (litros)	0
Tiempo empleado (horas)	0,52681
Emisiones CO ₂ (kg)	247,9444

Tabla 8. Resumen caso eléctrico Caldearenas-Jaca. Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se puede hacer la comparación entre ambos tipos de tracción para una misma mercancía y un mismo recorrido, pudiéndose analizar:

- La energía consumida es ligeramente inferior en el caso de tracción eléctrica, aproximadamente 70 kWh de diferencia.
- La energía de frenado en el caso diésel será superior, como es obvio, debido a que no produce regeneración eléctrica.
- El tiempo empleado es el mismo para ambos casos, ya que solo se tiene en cuenta la velocidad y la distancia y como ambas situaciones han transcurrido por el mismo trayecto y a la misma velocidad, se obtiene algo más de media hora de circulación.
- Por parte de las emisiones, la tracción eléctrica no produce emisiones directas de CO₂, como si ocurre en el caso del diésel. Pero debido a las emisiones por generación de electricidad, estos valores son muy similares, pero aun con todo, las emisiones con tracción diésel superan en 22,87 kg de CO₂ a las emisiones de tracción eléctrica.

4.2 ZARAGOZA-SAGUNTO

En este apartado, se ha estudiado la ruta de mercancías Zaragoza-Sagunto, obteniendo los datos geométricos del trayecto en el Trabajo de Fin de Grado elaborado por Sergio Yus Olmeda, titulado: “Análisis y simulación de la capacidad de transporte por ferrocarril de la línea Zaragoza-Sagunto. Se han extraído las distancias de un punto a otro, las pendientes o rampas de cada tramo, el radio de la curva de cada tramo (si lo hubiera) y el límite de velocidad máxima de cada vía. De esta manera, se ha elaborado la tabla de datos que se introduce al programa de Matlab, mostrada en el Anexo 8.8 (se han tomado 176 puntos).



Fig 9. Velocidades máximas, tipo de electrificación y catenaria. Línea Zaragoza-Sagunto. Fuente: [7].

Esta línea es de mayor longitud que la analizada en el caso anterior (322 km. aproximadamente). Como se ve en la Fig 9, es una línea no electrificada, salvo el tramo de salida de Zaragoza Plaza. De esta manera se realiza el primer cálculo con una locomotora diésel que, dependiendo de la potencia requerida a priori, se elegirá un modelo u otro de tractora. Al igual que en el caso

anterior, para analizar un caso realista, se va a considerar el transporte de automóviles como mercancía, ya que es la carga que más se repite en este trayecto, que permite establecer la conexión Cantábrico-Mediterráneo.

Los vagones seleccionados serán plataformas porta automóviles de dos pisos, de la Serie Internacional Laaes y tipo MA5, cuyas características principales se muestran en la siguiente tabla:

Internacional	22714352086-3 a 110-1/26714352001-8 a 109-9/26714370000-8/4174352055-5 a 065-4/45714352039-5 a 094-0
Carga Máxima (t)	21,5 / 22 (#)
Tara Media (t)	27,7
Freno	Aire Comprimido
Velocidad (km/h)	100
Long. entre Topes (m)	27
Altura máxima (m)	3,61
Empate (m)	8,62

Fig 10. Características Generales Plataforma tipo: MA5. Fuente: [13].

Se establece la mercancía en 18 vagones porta automóviles, cargados parcialmente con 17 toneladas cada uno haciendo un total de carga (vagones + mercancía) de 804 toneladas. Con los datos geométricos del trayecto y el peso de la mercancía, se ejecuta el *script*.

El tramo más desfavorable es el 95-96. Se establece la misma velocidad límite que en el apartado anterior (60 km/h) y se obtiene una potencia mínima necesaria de 3.305,87 kW, por lo que con una sola locomotora de la Serie Diésel 333.3 no será suficiente. Se realiza el trayecto con doble locomotora, alcanzando una potencia máxima de 4.474 kW, que ya cumple con el límite de potencia. La sección frontal será igual que en el primer cálculo del apartado anterior, igual a 13,61012 m².

Como se ha comentado anteriormente, la tracción diésel no produce regeneración así que la energía producida en los tramos de consumo cero, será empleada en el frenado del tren.

Los resultados para el caso de tracción diésel en la línea Zaragoza-Sagunto se muestran en la Tabla 9.

Peso locomotora (toneladas)	240
Peso mercancía (toneladas)	804
Peso total (toneladas)	1044
Energía consumida (kWh)	6.779,4608
Energía frenado (kWh)	2.610,3547
Energía regeneración (kWh)	0
Consumo diésel (litros)	639,4511
Tiempo empleado (horas)	3,4436
Emisiones CO₂ (kg)	1.784,0686

Tabla 9. Resumen caso diésel Zaragoza-Sagunto. Fuente: Elaboración propia.

Se procede como en el caso anterior a analizar el supuesto en el que se electrificara la línea y se pudiera realizar el trayecto con una locomotora eléctrica.

Observando el resultado anterior de potencia necesaria se selecciona la locomotora eléctrica 253 y como ocurría en el caso eléctrico de Caldearenas-Jaca, en muchos tramos la velocidad de circulación, no cumple con la velocidad máxima permitida por adherencia, tomando la decisión en este caso de disminuir la mercancía a la mitad, considerando un total de carga de 402 toneladas y observar así distintas opciones del programa.

Se observa que, aun habiendo reducido la carga, hay varios tramos en los que la velocidad de circulación, sigue siendo mayor a la velocidad máxima permitida por adherencia. Los tramos en cuestión son los siguientes.

- 25-26. Velocidad máxima = 99,28 km/h. Velocidad de circulación deseada = 100 km/h.
- 26-27. Velocidad máxima = 99,25 km/. Velocidad de circulación deseada = 100 km/h.
- 29-30. Velocidad máxima = 78,33 km/h. Velocidad de circulación deseada = 100 km/h.
- 30-31. Velocidad máxima = 99,27 km/h. Velocidad de circulación deseada = 100 km/h.
- 95-96. Velocidad máxima = 69,616 km/h. Velocidad de circulación deseada = 75 km/h.
- 121-122. Velocidad máxima = 93,11 km/h. Velocidad de circulación deseada = 100 km/h.
- 163-164. Velocidad máxima = 91,1 km/h. Velocidad de circulación deseada = 95 km/h.

Como se observa, la velocidad máxima permitida, no difiere mucho de la de circulación, salvo en el tramo 29-30. De todos modos, se decide continuar a estas velocidades para no realizar cambios de locomotora ni reducciones de carga, durante el trayecto. Los resultados obtenidos para este caso se encuentran en la siguiente tabla:

Peso locomotora (toneladas)	87
Peso mercancía (toneladas)	402
Peso total (toneladas)	489
Energía consumida (kWh)	4.035,6538
Energía frenado (kWh)	671,8104
Energía regeneración (kWh)	167,9526
Consumo diésel (litros)	0
Tiempo empleado (horas)	3,4491
Emisiones CO₂ (kg)	1.045,2343

Tabla 10. Resumen caso eléctrico Zaragoza-Sagunto. Fuente: Elaboración propia.

Realizados los casos con dos tipos de tracción diferente y considerando la reducción de carga en uno de ellos, se procede a comparar resultados:

- Debido a que con tracción diésel se ha transportado el doble de mercancía que, con tracción eléctrica, para que la comparación sea realista, los resultados de tracción eléctrica se multiplicarán por dos para considerar que ese tren hace dos viajes idénticos, para igualar, en cuanto a mercancía transportada, al de tracción diésel.
- El tren diésel consume alrededor de 6,78 MWh, por otra parte, dos viajes con carga reducida del tren eléctrico equivalen a un consumo de 8,07 MWh. La diferencia entre realizar dos viajes con tracción eléctrica y menor carga; y un viaje con tracción diésel y toda la carga, es de 1,29 MWh aproximadamente.
- Hay que tener en cuenta que el tren eléctrico produce regeneración, que considerando un 20% general, se obtendría una regeneración eléctrica total de 335,9052 kWh, para los dos viajes. Este valor no es muy significativo respecto al del consumo porque es mucho menor, pero si se consiguieran porcentajes de regeneración mayores, podría ser un valor a tener en cuenta para la elección de un tipo de tracción u otra.
- El consumo de diésel sería de 639,4511 litros, equivalente a 198,65 litros cada 100 km.
- En cuanto al tiempo empleado, supone casi lo mismo un solo viaje con tracción diésel que con tracción eléctrica, por lo tanto, en este aspecto no habría comparación entre uno y otro ya que la tracción eléctrica tardaría el doble, por realizar dos viajes.
- Finalmente, respecto a las emisiones de CO₂, se observa como la tracción diésel a plena carga, emite 738,83 kg de CO₂ más, que un viaje de tracción eléctrica a media carga. Pero si se realizaran dos viajes con tren eléctrico, este produciría 306,4 kg de CO₂ más, debido a la producción extra de electricidad.

4.3 CASO DOCENTE

Para este último caso, se elige la práctica 2 de la asignatura Ferrocarriles y Otros Vehículos Guiados, en el que se analizan tres trayectos diferentes: un trazado mixto intermedio, un trazado llano y un trazado de montaña. Los datos de estos trayectos son los siguientes:

TRAMO	TRAYECTO 1			TRAYECTO 2			TRAYECTO 3		
	Longitud (km)	Radio curva (m)	Rampa (mm/m)	Longitud (km)	Radio curva (m)	Rampa (mm/m)	Longitud (km)	Radio curva (m)	Rampa (mm/m)
1	20	0	0	20	0	0	20	0	0
2	3	300	0	10	1000	0	5	1000	5
3	10	0	5	20	3000	0	10	2000	10
4	10	1500	7	30	5000	0	10	0	5
5	20	0	7	20	0	0	20	5000	5
6	10	2000	7	10	2000	3	10	2000	10
7	20	3000	3	20	5000	3	30	5000	10
8	20	0	0	20	0	0	20	2000	15
9	10	3000	5	10	3000	0	10	0	17
10	30	0	5	30	0	0	20	2000	15
11	20	5000	5	20	5000	5	20	0	10
12	30	0	0	20	0	0	30	0	0
13	30	5000	3	30	5000	0	30	5000	0
14	20	0	7	20	5000	5	20	0	0
15	20	0	7	10	0	5	20	2000	7
16	20	5000	7	10	5000	0	30	5000	10
17	10	3000	7	10	0	0	10	3000	15
18	10	0	7	10	0	5	5	3000	7
19	7	5000	0	10	5000	0	10	5000	0
20	30	0	0	20	0	0	20	0	0

Tabla 11. Características trayectos caso docente. Fuente: Elaboración propia.

Como no se conocen suficientes datos de la locomotora, se va a escoger una de las empleadas anteriormente. La locomotora seleccionada será la eléctrica 269.75. La carga será un conjunto que varía entre vagones cargados, vagones vacíos y vagones cargados, con un peso total de 1.500 toneladas. Por otra parte, también se desconoce la velocidad máxima de cada tramo así que se fijará una velocidad máxima de 100 km/h y en el caso de que no cumpla con el límite de adherencia, se circulará a la velocidad máxima de adherencia, aunque esta sea inferior a los límites fijados anteriormente. Con esto se observarán las diferencias de velocidades máximas dependiendo del trazado. Se parte de una cota de altura inicial de 0 metros.

El objetivo de este caso es ver como varía el consumo energético, dependiendo del tipo de trayecto por el que se circula, sin tratar de optimizar ninguna de las tres variables estudiadas en este trabajo.

Se procede a ejecutar el programa y se obtienen los siguientes resultados:

	TRAYECTO 1	TRAYECTO 2	TRAYECTO 3
Energía consumida (kWh)	12.862,9195	8.533,9561	16.747,5484
Energía frenado (kWh)	0	0	0
Energía regenerada (kWh)	0	0	0
Tiempo (horas)	3,5	3,5	4,421
Emisiones CO₂ (kg)	3.331,4962	2.210,2946	4.337,615

Tabla 12. Resumen resultados caso docente. Fuente: Elaboración propia.

Como cabe esperar, el tramo montañoso (trayecto tres) es el que mayor energía consume, seguido del tramo mixto (trayecto 1) y por último el tramo llano (trayecto 2). Debido a que, en el caso de montaña, se superaba la velocidad máxima de adherencia en muchos tramos, se ha tenido que reducir la velocidad en ellos. Esto explica el aumento de tiempo respecto a los otros dos trayectos. Estos dos trayectos se realizan en el mismo tiempo debido a que han podido circular a la velocidad máxima (100 km/h) en todos los tramos y la longitud de los tres trayectos es común, 350 km.

Hay que puntualizar que estos trayectos son ficticios y su empleo es únicamente docente para ver con claridad como varía el comportamiento de un tren ante distintos relieves.

5. RESULTADOS ANALÍTICOS

Una vez se ha confirmado el correcto funcionamiento del programa, observando los resultados generales que se muestran en la pantalla de comandos de Matlab, se procede a obtener los resultados de una forma analítica, para observar la evolución de distintas variables a lo largo de todo el trayecto. Este análisis se lleva a cabo con los resultados que el programa imprime en una hoja de cálculo y a partir de los cuales se obtendrán las conclusiones de este trabajo.

5.1 ANÁLISIS CALDEARENAS-JACA

Para este trayecto, se han realizado dos cálculos: uno con una locomotora de tracción diésel y otro con una locomotora de tracción eléctrica. Se procede a mostrar los resultados de cada uno de los tramos, para después ponerlos en común y observar las diferencias y similitudes.

5.1.1 CASO DIÉSEL

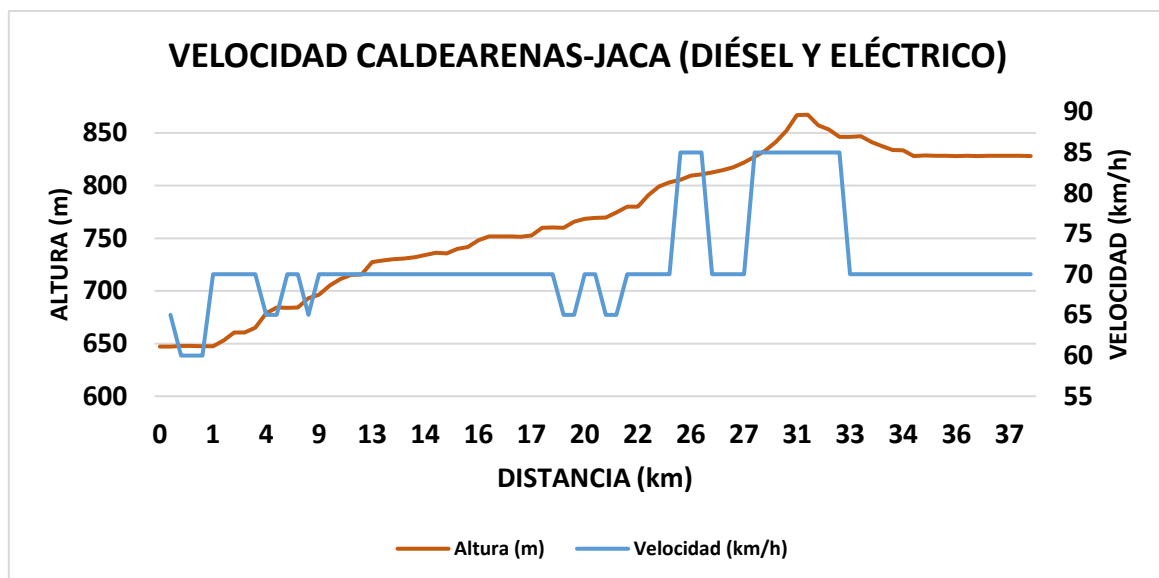


Fig 11. Variación de la velocidad durante el trayecto Caldearenas-Jaca (caso diésel y eléctrico). Fuente: Elaboración propia.

En la Fig 11 se observa la variación de la velocidad conforme avanza el tren. Esta velocidad es la que marca Adif como velocidad máxima en cada tramo y como se ha visto en la sección anterior, el conjunto puede ir a esta velocidad porque en ningún momento se supera el límite de adherencia. Se podría decir que este caso optimiza el tiempo de recorrido, al circular siempre a la máxima velocidad posible.

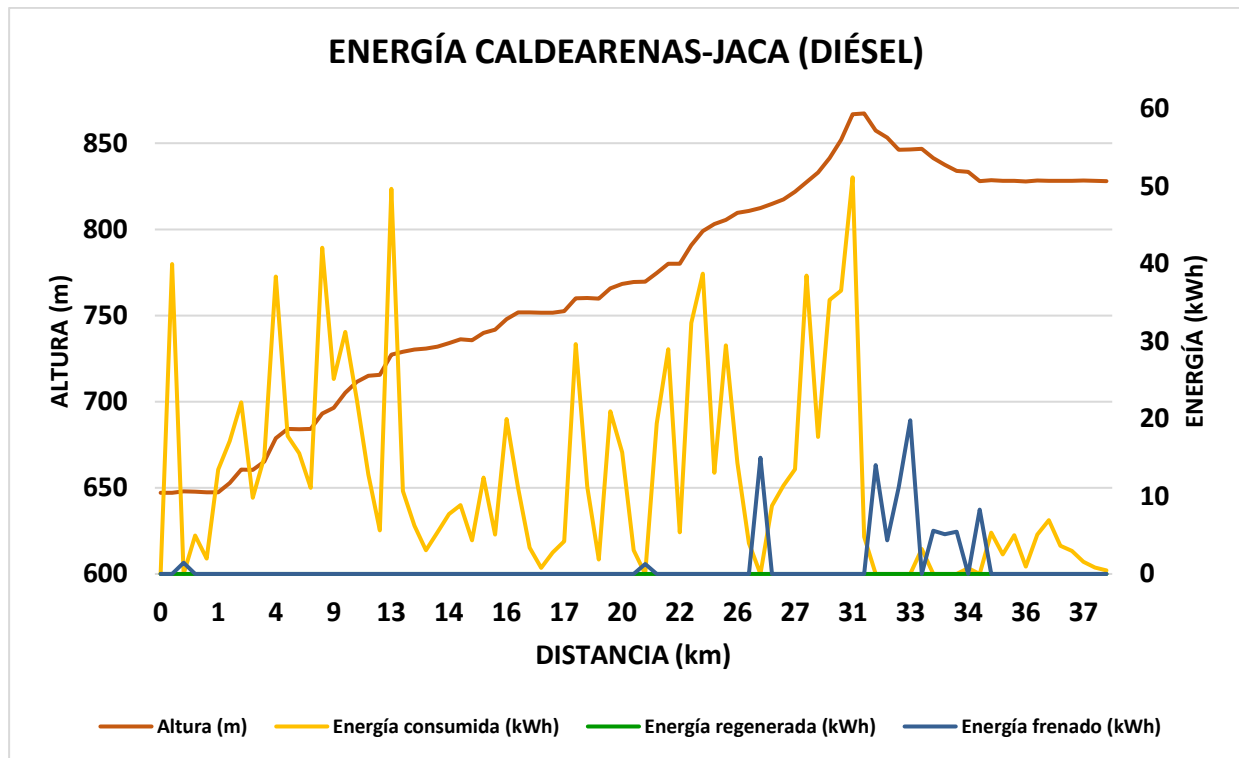


Fig 12. Variación de energía consumida, regenerada y de frenado durante el trayecto Caldearenas-Jaca (caso diésel). Fuente: Elaboración propia.

En la Fig 12, se ha mostrado la variación de las diferentes energías que aparecen en cada tramo. Como es lógico, la energía producida por regeneración es cero en todo el trayecto, como se ha explicado en las secciones anteriores. Se observan picos de energía consumida, que rondan el valor de los 50 kWh y estos se encuentran en los tramos en los que la pendiente es más inclinada, kilómetros 13 y 31 de la ruta. Cabe destacar como en entre los kilómetros 1-13 y 22-31, se producen los mayores consumos energéticos debido a la pendiente de estos tramos, mientras que, en los tramos de rampa o descenso, como es el caso de los kilómetros 31-34, aparece la energía de frenado, porque es el momento en el que el tren deja de consumir energía para producirla y emplearla en frenar el conjunto. Para concluir con este apartado, se observa como en el tramo final, que es llano, se consume la menor cantidad de energía, ya que el único consumo se empleará en vencer la resistencia al avance, porque no existe ni cambio de velocidad, ni cambio de altura prácticamente.

5.1.2 CASO ELÉCTRICO

Para este caso, no se muestra la tabla de velocidad de circulación ya que es la misma que la mostrada en el apartado anterior (Fig 11), porque al igual que el tren con locomotora diésel, el conjunto con locomotora eléctrica también circula a la máxima velocidad posible marcada por Adif.

Por otra parte, sí se muestra la gráfica de las distintas energías del trayecto, que como se puede observar, es prácticamente la misma, en cuanto a energía consumida, siendo ésta ligeramente inferior debido a que la locomotora eléctrica tiene menor peso que las dos locomotoras diésel empleadas en el apartado anterior.

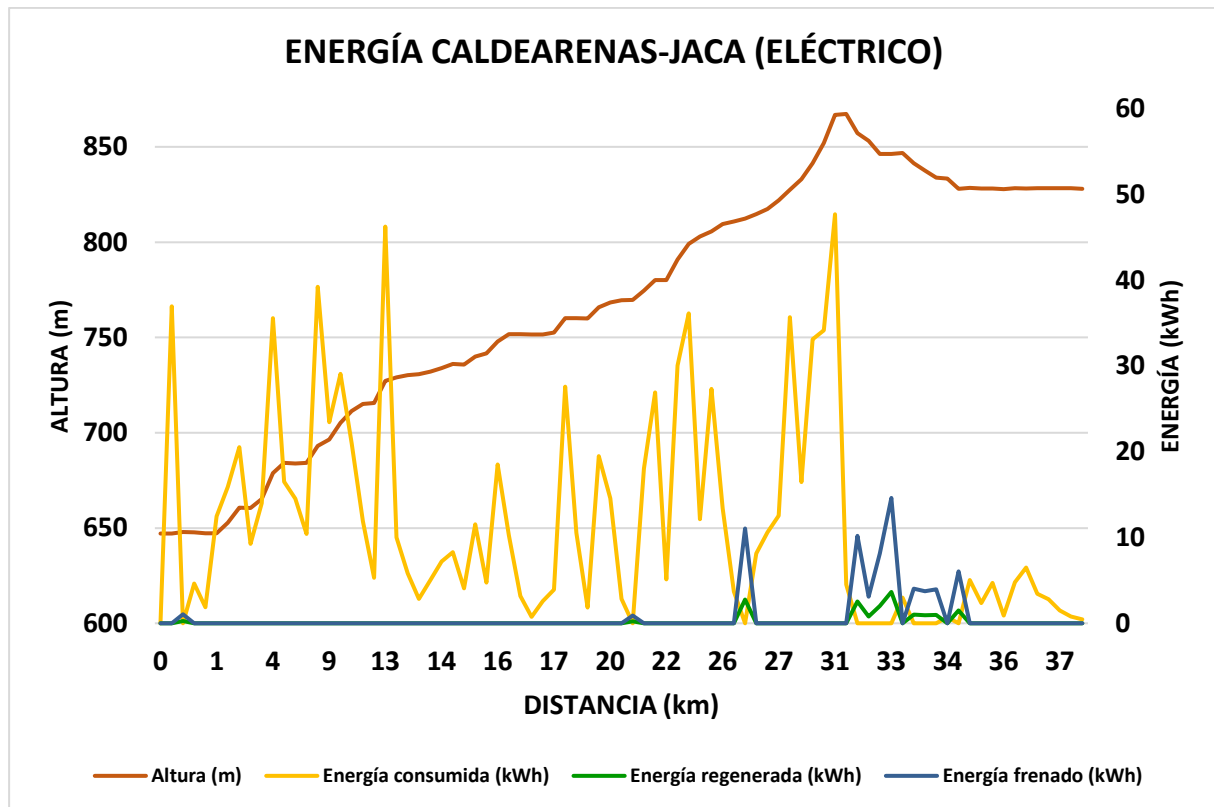


Fig 13. Variación de energía consumida, regenerada y de frenado durante el trayecto Caldearenas-Jaca (caso eléctrico). Fuente: Elaboración propia.

La energía pico consumida en este caso, no llegará a los 50 kWh, en los mismos tramos que antes y como única diferencia respecto al caso anterior, en los tramos en los que no se consume energía, aparecen pequeños valores de energía de regeneración que no llegan a alcanzar los 5 kWh.

5.1.3 COMPARACIÓN CASO DIÉSEL Y CASO ELÉCTRICO

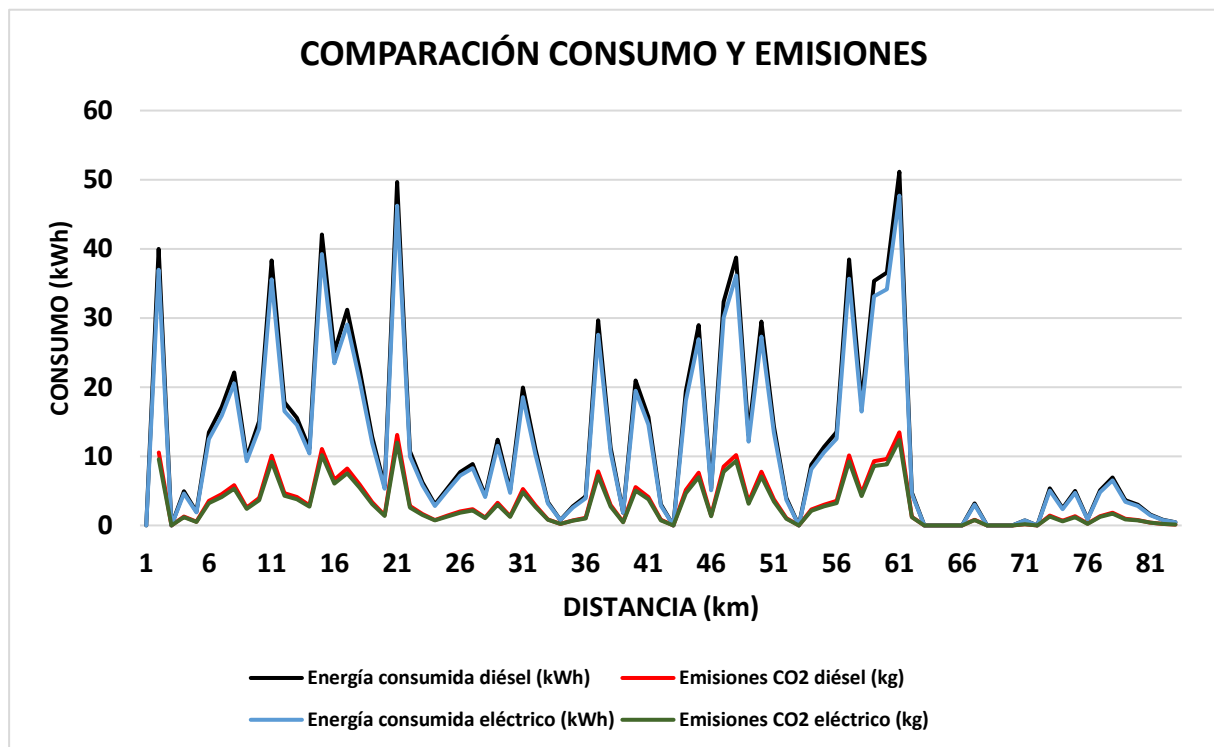


Fig 14. Comparación consumos y emisiones para los dos tipos de tracción. Fuente: Elaboración propia.

Para concluir con el caso de la línea Caldearenas-Jaca, se ponen en común tanto los consumos como las emisiones de ambos tipos de tracción. Se observa como los consumos son prácticamente iguales, al igual que las emisiones, siendo ambas variables ligeramente mayores para tracción diésel. Se puede apreciar como la forma de las curvas energía consumida y emisiones es la misma, porque se ha considerado una relación directa entre el consumo y la emisión de CO₂, dependiendo de los parámetros explicados en el desarrollo teórico.

5.2 ANÁLISIS ZARAGOZA-SAGUNTO

Se analiza a continuación y de manera similar el caso de la línea Zaragoza-Sagunto. Como se ha visto en la sección anterior, para el caso de tracción eléctrica se transporta menos carga que para la tracción diésel, por lo tanto, para este recorrido, se observará como cambian las variables, transportándose más o menos carga.

5.2.1 CASO DIÉSEL

De la misma forma que para el caso anterior, se muestra la evolución de la velocidad del tren frente al perfil de la ruta. Este conjunto puede circular a la velocidad máxima permitida por la vía optimizando de esta manera el tiempo de llegada. Se observa en la Fig 15, como circula en gran parte del trayecto a 100 km/h, que es el límite máximo para trenes de mercancías.

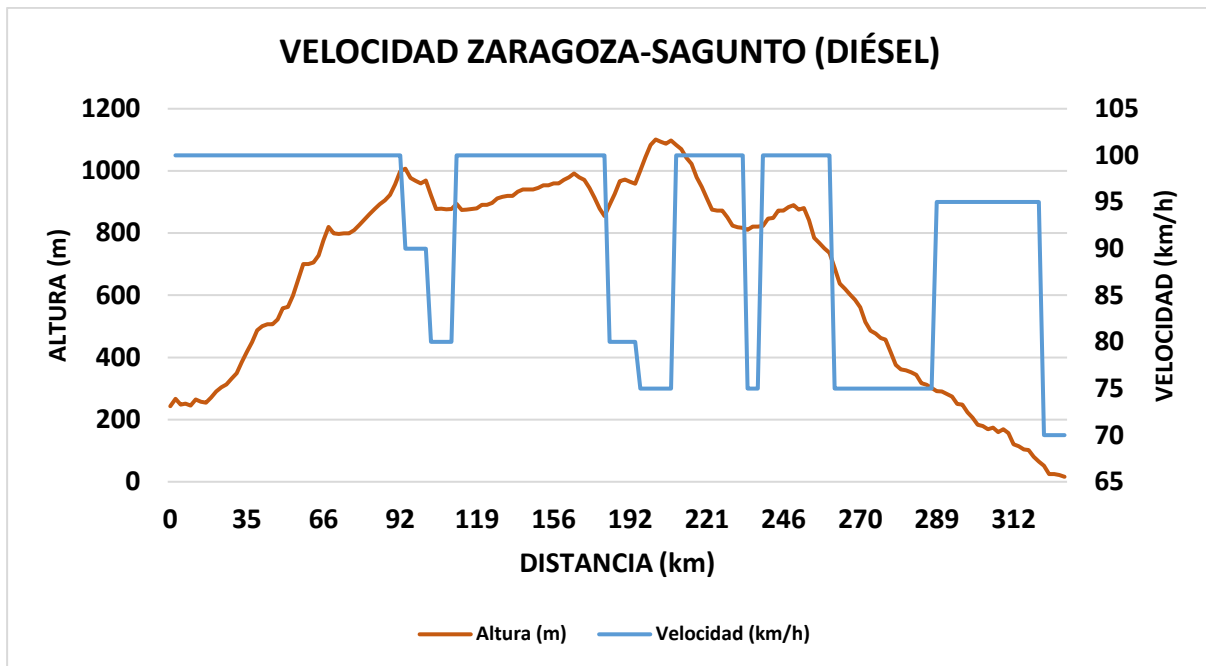


Fig 15. Variación de la velocidad durante el trayecto Sagunto-Zaragoza (caso diésel).
Fuente: Elaboración propia.

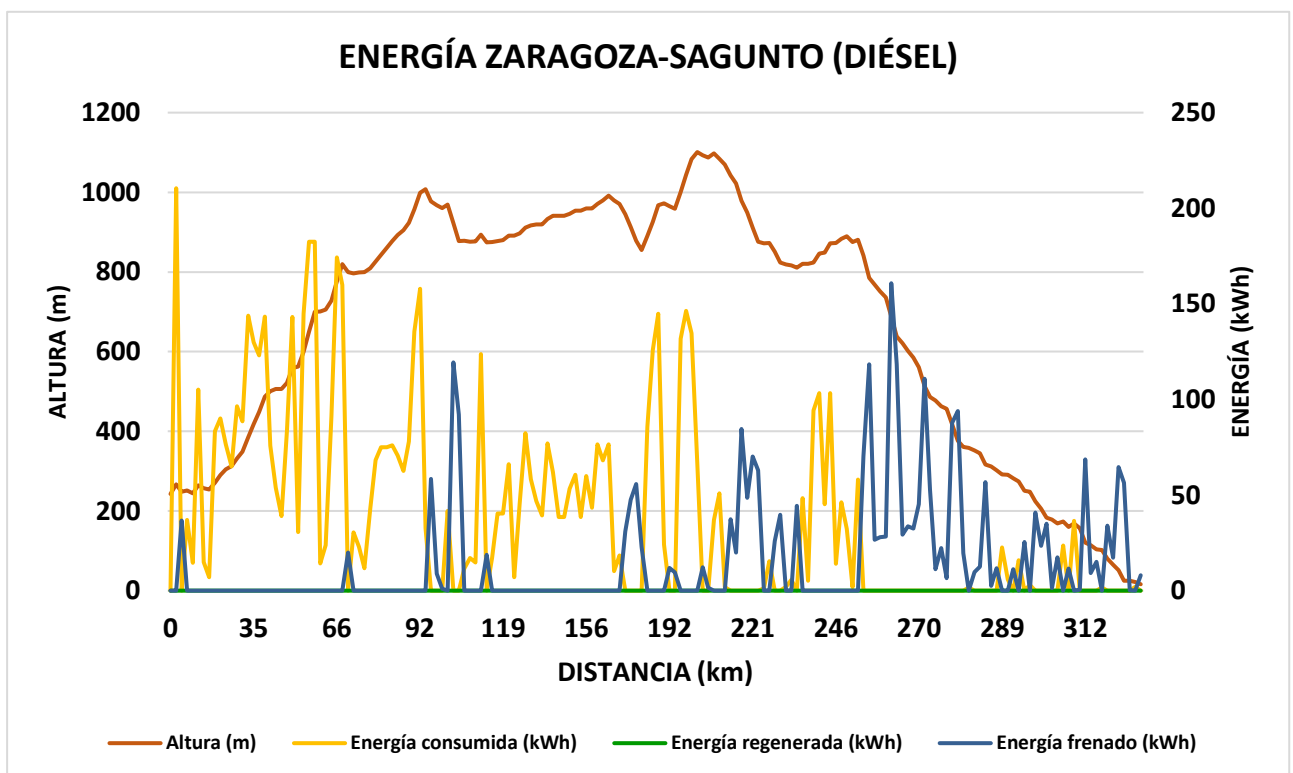


Fig 16. Variación de energía consumida, regenerada y de frenado durante el trayecto Zaragoza-Sagunto (caso diésel). Fuente: Elaboración propia.

Este trayecto es más largo que el de la línea anterior y tiene más cambios de rampa y pendiente en los que se aprecia mejor el aumento y descenso de consumo, respectivamente. Se observa como el consumo es positivo en los tramos de rampa y como aparece la energía empleada en el freno en los tramos de pendiente.

Para esta línea, aparecen consumos pico mucho mayores que en la anterior, llegando a valores de entre 150 y 200 kWh en los primeros 75 kilómetros. La energía generada también será mayor que para el trayecto Caldearenas-Jaca y al ser el caso diésel, se disipará toda en el freno.

5.2.2 CASO ELÉCTRICO

En este caso, es interesante observar la variación de velocidad ya que no va a coincidir con el caso diésel como sucedía en la línea anterior. Esto es debido a que la locomotora eléctrica empleada tiene un peso mucho menor que la anterior y aunque se ha reducido la carga del conjunto, no es suficiente para que se dé la rotura del límite de adherencia a la velocidad máxima permitida, en algún punto de la vía.

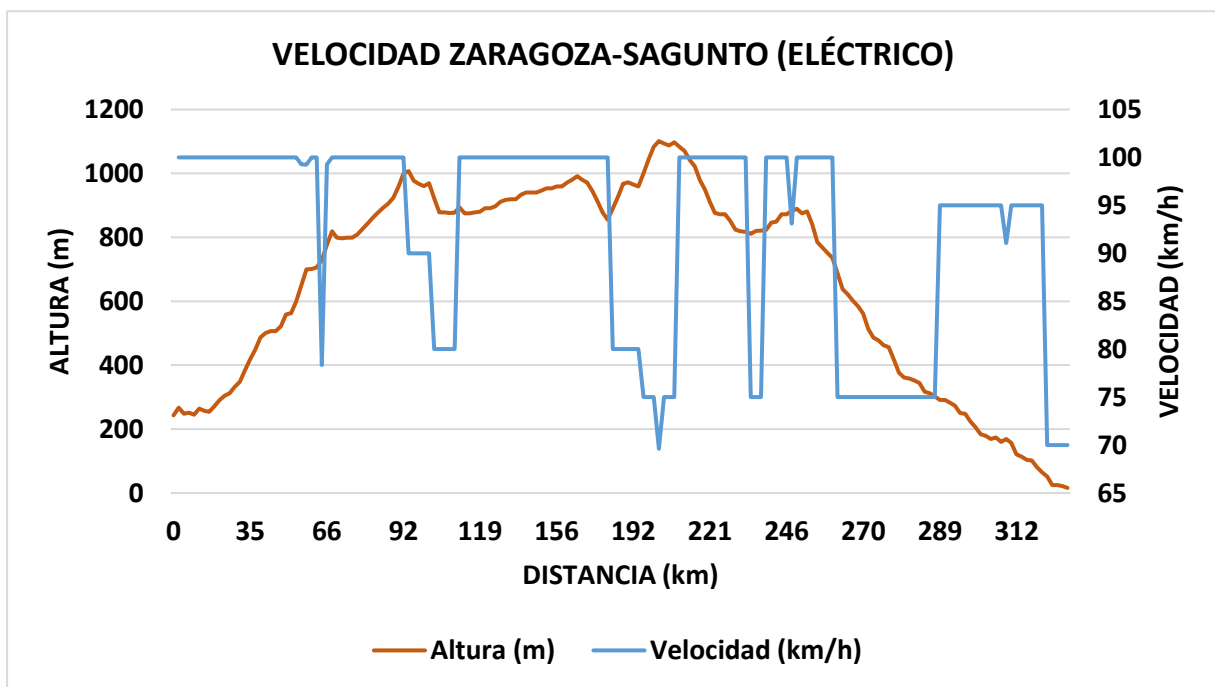


Fig 17. Variación de la velocidad durante el trayecto Sagunto-Zaragoza (caso eléctrico).
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, en varios puntos de la línea, se ha disminuido la velocidad por debajo de la línea máxima permitida en la vía. Esta velocidad se ha visto en la sección anterior, con los resultados numéricos y en este gráfico se observa cómo se reduce la velocidad en los tramos de mayor pendiente, porque son estos en los que se rompería la adherencia.

En cuanto al consumo de energía, este va a decrecer significativamente ya que se están transportando 400 toneladas menos.

Como era de esperar, la energía consumida en cada tramo es mucho menor que si fuera más cargado, del orden de casi 100 kWh. Esta diferencia se apreciará mejor en el gráfico del siguiente apartado cuando se analicen ambos consumos juntos.

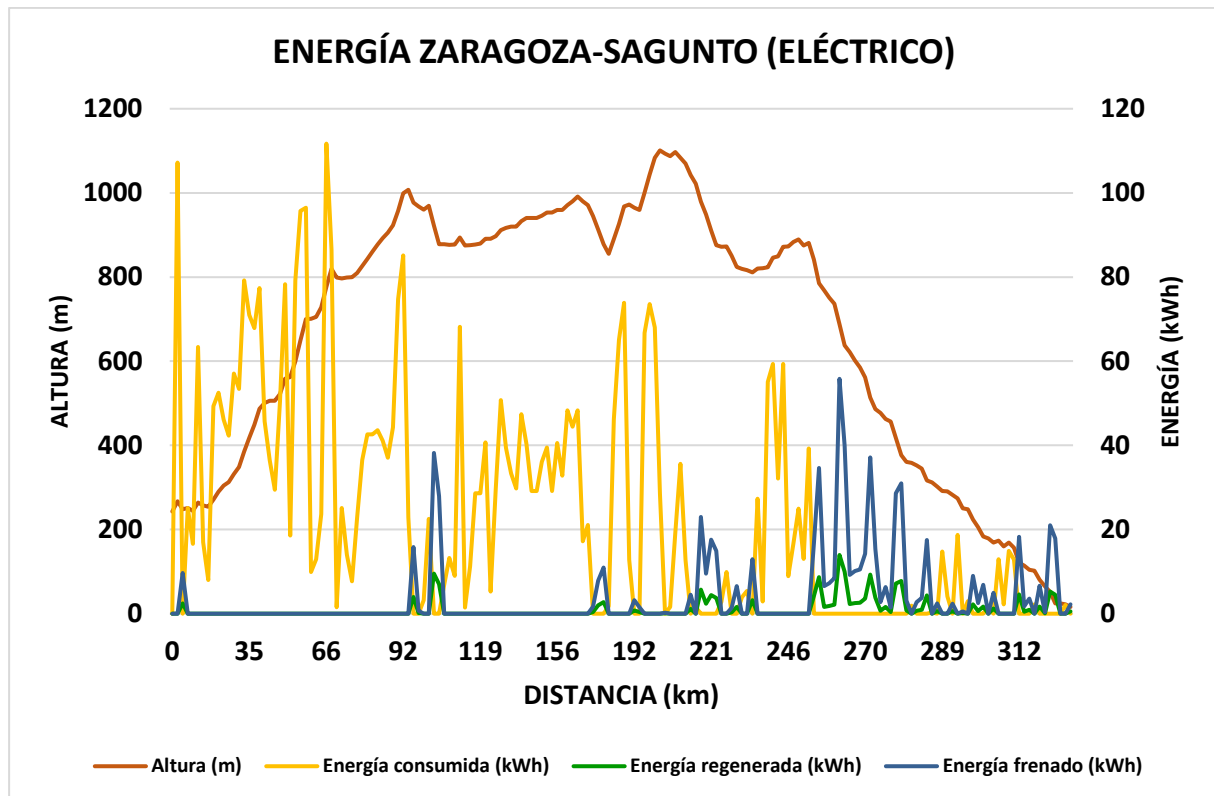


Fig 18. Variación de energía consumida, regenerada y de frenado durante el trayecto Zaragoza-Sagunto (caso eléctrico). Fuente: Elaboración propia.

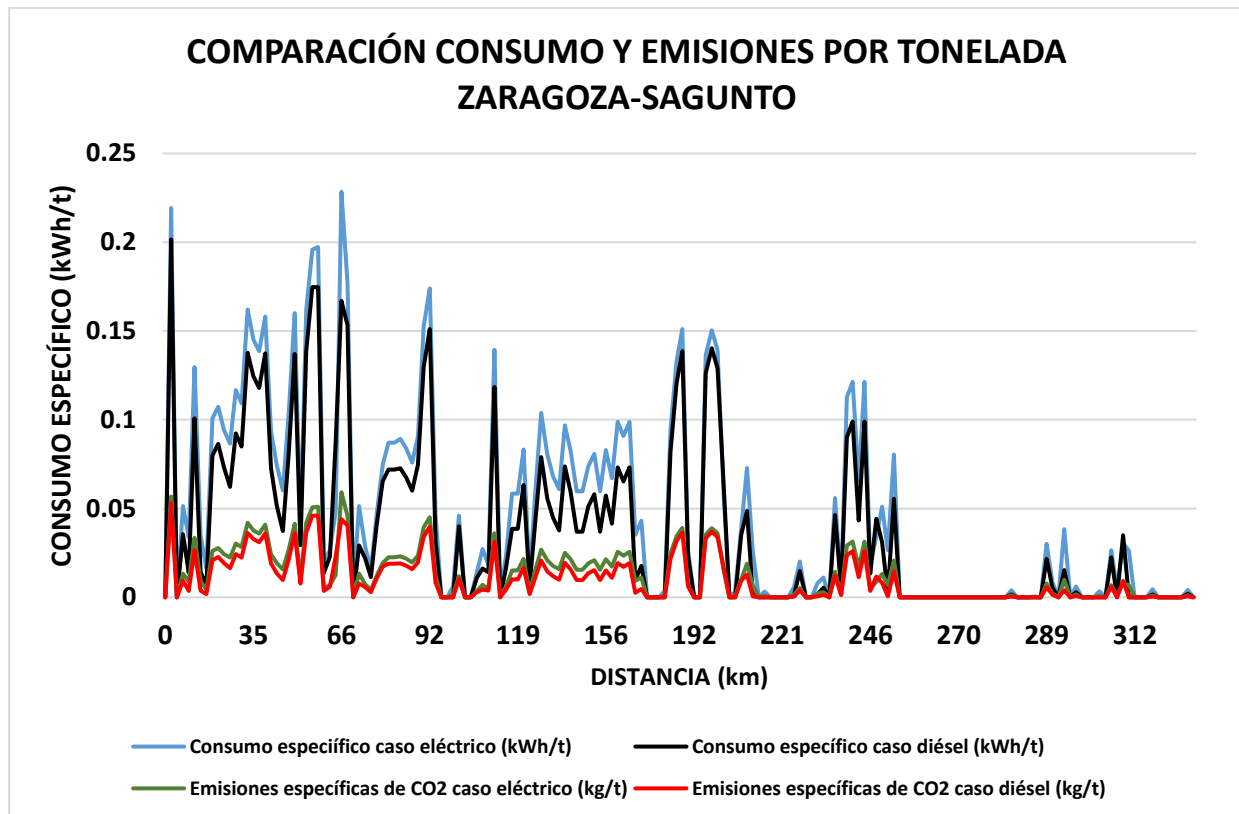
5.2.3 COMPARACIÓN CASO ELÉCTRICO Y CASO DIÉSEL

Para realizar la comparación entre los dos casos de la línea Zaragoza-Sagunto, no se podrá realizar la misma gráfica que para el estudio de la línea Caldearenas-Jaca ya que, en este caso, se ha transportado menos carga para la tracción eléctrica y poner en conjunto la evolución de los dos consumos, sería una comparativa errónea.

Para hacer una comparación válida para estos dos casos, habrá que estudiar el consumo energético específico, que es el consumo de cada tren dividido por su peso total (kWh/t). Lo mismo habrá que realizar con las emisiones para poder comparar los resultados.

Se obtiene la Fig 19, en la que se observa un consumo específico mayor en el caso de tracción eléctrica que en el caso de tracción diésel. Lo que significan estos resultados es que, para mover una tonelada de carga, el tren requerirá de menos energía con la doble tracción diésel.

En el caso de las emisiones, van acorde con el consumo energético y se observa en la gráfica, como el transporte de una tonelada de mercancía con tracción eléctrica, emite más CO₂ que para la doble tracción diésel, en las condiciones que se han tomado para esta línea, Zaragoza-Sagunto.



*Fig 19. Comparación consumos y emisiones por tonelada para los dos tipos de tracción.
Fuente: Elaboración propia.*

5.2.4 VARIACIÓN DEL CONSUMO RESPECTO DEL VIENTO

Un análisis que no se había visto aun, es el de la variación del consumo energético con la existencia de viento durante el trayecto. Se van a presentar tres situaciones:

- Sin existencia de viento durante todo el trayecto (casos anteriores).
- Viento constante y misma dirección que avance del tren (viento de cola).
- Viento constante y dirección opuesta al avance del tren (viento de cara).

El parámetro del viento y su dirección, va incluido en el cálculo de la resistencia aerodinámica, yendo relacionado con la velocidad del tren, la velocidad del viento y su dirección, como se ha comentado en el desarrollo teórico.

Se va a considerar una velocidad de viento constante de 35 km/h (velocidad moderada-alta) y lo que variará será su dirección dependiendo del caso de estudio. El caso de estudio será el caso de tracción diésel para esta línea (Zaragoza-Sagunto), con la locomotora y mercancía empleada anteriormente.

Se agrupan a continuación los resultados para los tres tipos de casos analizados:

	SIN VIENTO	35 KM/H (COLA)	35 KM/H (CARA)
ENERGÍA CONSUMIDA (KWH)	6.779,46	5.761,03	8.326,69
ENERGÍA FRENADO (KWH)	2.610,36	3.173,1438	1.858,545
CONSUMO DIÉSEL (LITROS)	639,45	543,39	785,39
TIEMPO EMPLEADO (HORAS)	3,44	3,44	3,44
EMISIONES CO₂ (KG)	1.784,07	1.516,06	2.191,33

Tabla 13. Variación de resultados con la existencia de viento. Caso Zaragoza-Sagunto (diésel). Fuente: Elaboración propia.

En los resultados principales, se observa como el consumo energético aumenta considerablemente con la existencia de viento en contra y se reduce con el viento a favor. Esto es lógico ya que como se observa en el desarrollo teórico, el viento de “cara” equivaldría a un aumento de la resistencia al avance, aumentando la velocidad incluida en el término de resistencia aerodinámica. Por otra parte, el viento de “cola”, supondría un descenso de esta resistencia ya que esta velocidad ayuda al avance del tren, disminuyéndose así el término aerodinámico.

Analizando los tres casos juntos y a lo largo del trayecto, se obtiene la Fig 20:

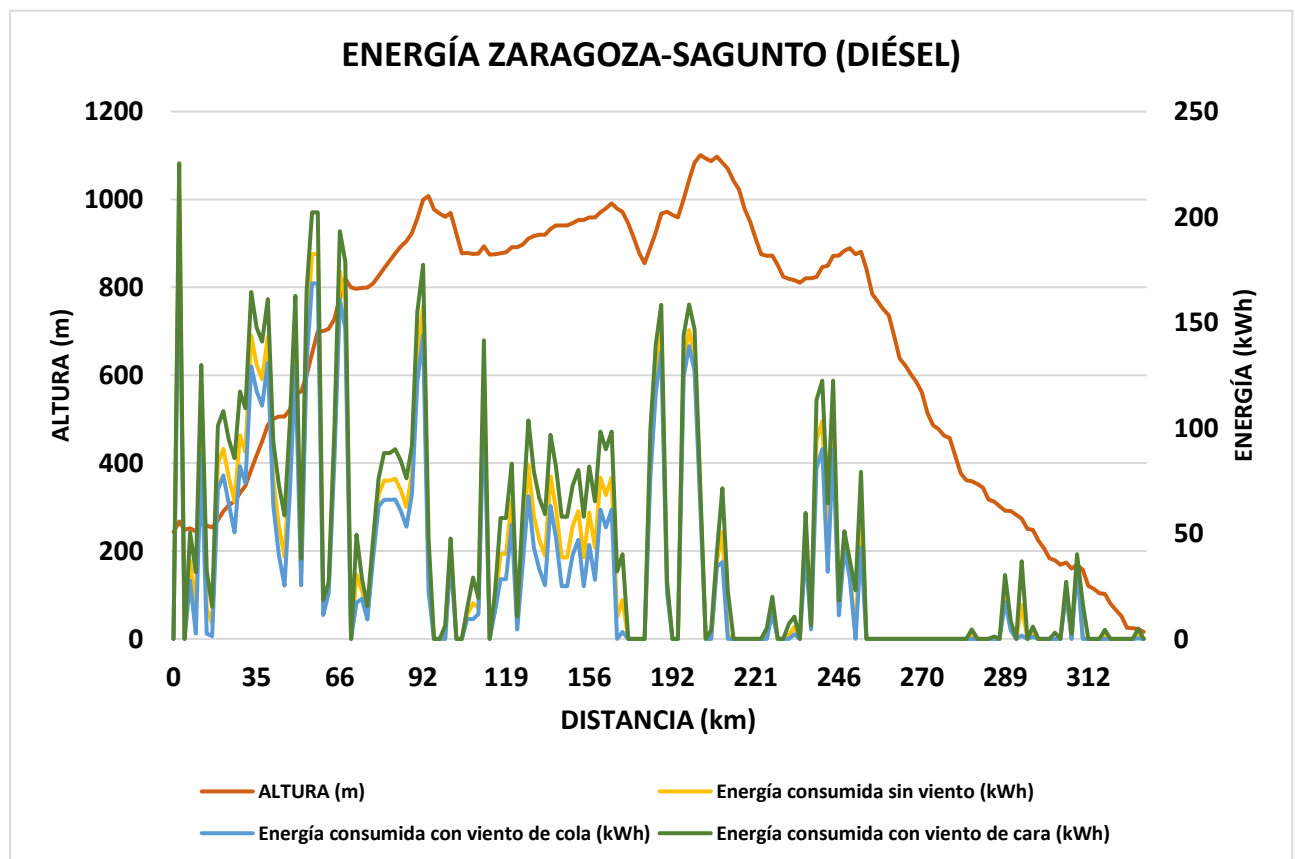


Fig 20. Variación del consumo de energía en función de la velocidad del viento. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica se observa el consumo de energía en cada caso, coincidiendo con lo comentado anteriormente, el consumo de energía si no se considera la acción del viento, se encuentra entre los consumos del caso de viento de cara y viento de cola. Las variables de consumo tienen la misma evolución a lo largo de todo el trayecto y lo único que cambiará será su magnitud, dependiendo del caso analizado.

5.3 ANÁLISIS CASO DOCENTE

Para este último análisis, se estudian tres casos completamente ficticios que se emplean para uso académico. El objetivo es ver la diferente evolución del consumo energético, en tramos de diferente relieve. También se analizará como varía el tiempo de transporte en función de un trayecto u otro. Los tres recorridos tienen la misma longitud y se fija una velocidad máxima constante de 100 km/h. A priori el tiempo de viaje deberá ser el mismo para los tres casos, pero si en alguno se da la situación que se rompe con el límite de adherencia, el tren se verá obligado a reducir la velocidad y a circular a la máxima permitida por adherencia.

Como se ve en los resultados de la sección anterior, en el trayecto montañoso existe un aumento de tiempo de circulación de casi una hora, con respecto a los otros dos, esto querrá decir que en algún tramo se habrá tenido que reducir la velocidad para que el tren no pierda adherencia.

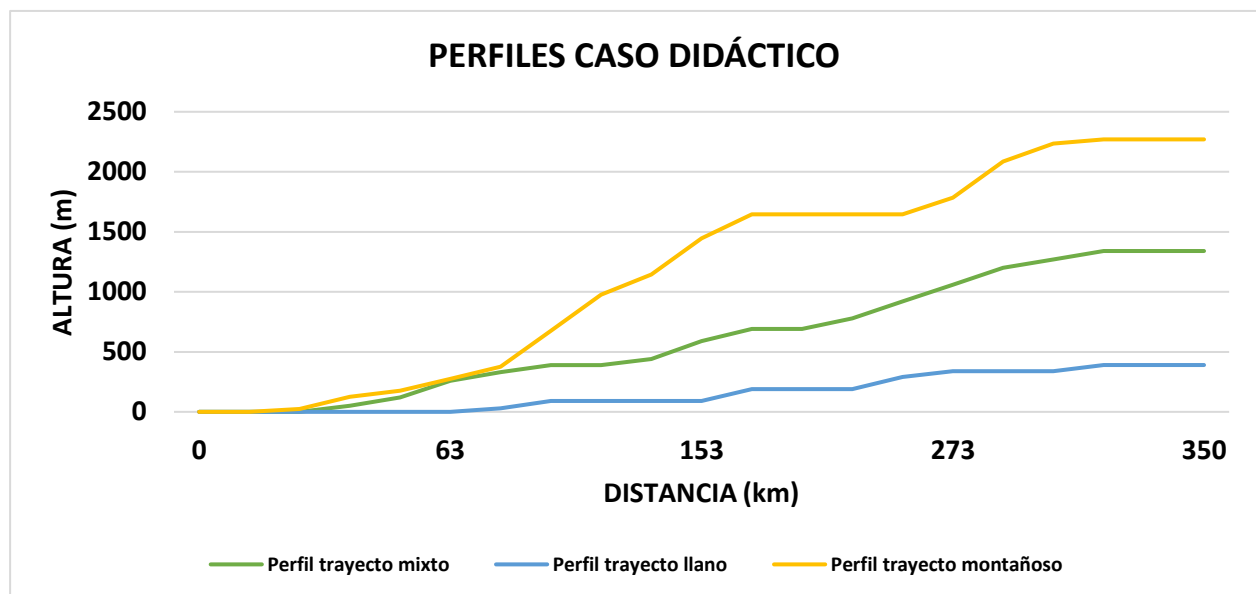


Fig 21. Perfil del trayecto mixto, llano y montañoso. Fuente: Elaboración propia.

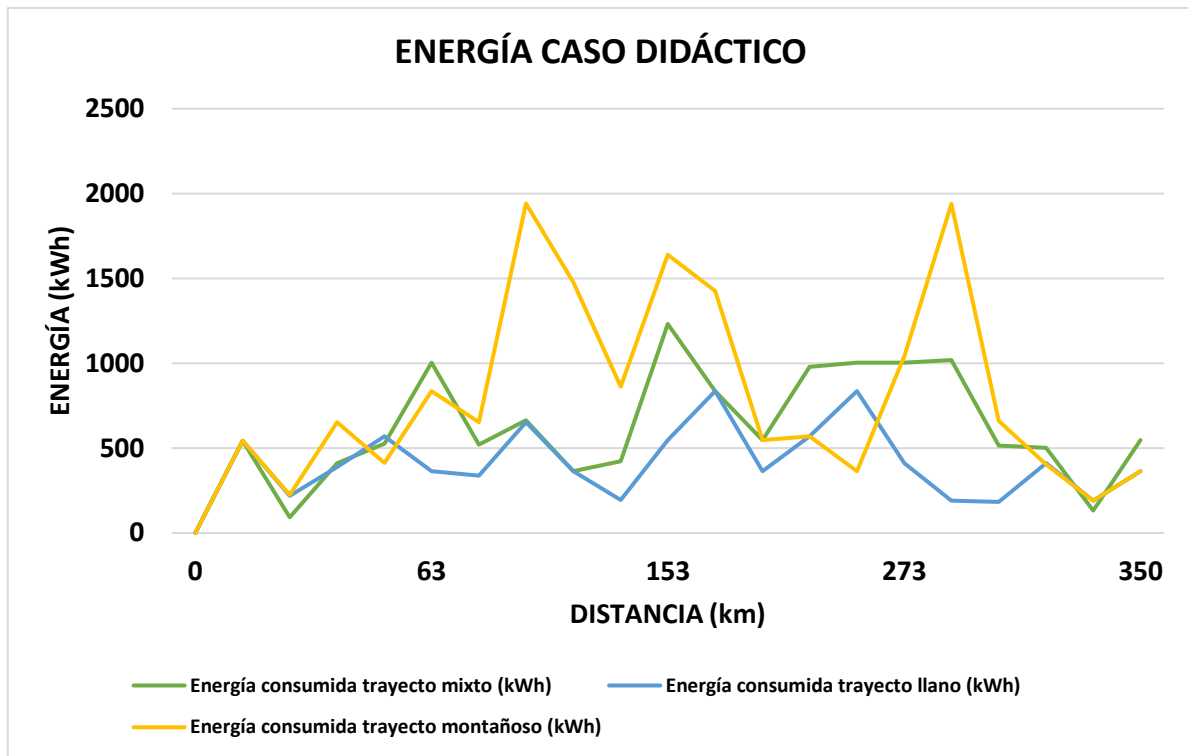


Fig 22. Evolución consumo energético en el trayecto mixto, llano y montañoso. Fuente: Elaboración propia.

Observando ambos gráficos juntos, se confirma que a medida que la pendiente es mayor, en consumo de energía aumenta. De esta manera el tramo montañoso tiene picos de consumo de casi 2.000 kWh, mientras que los máximos del tramo llano se encuentran en 800 kWh.

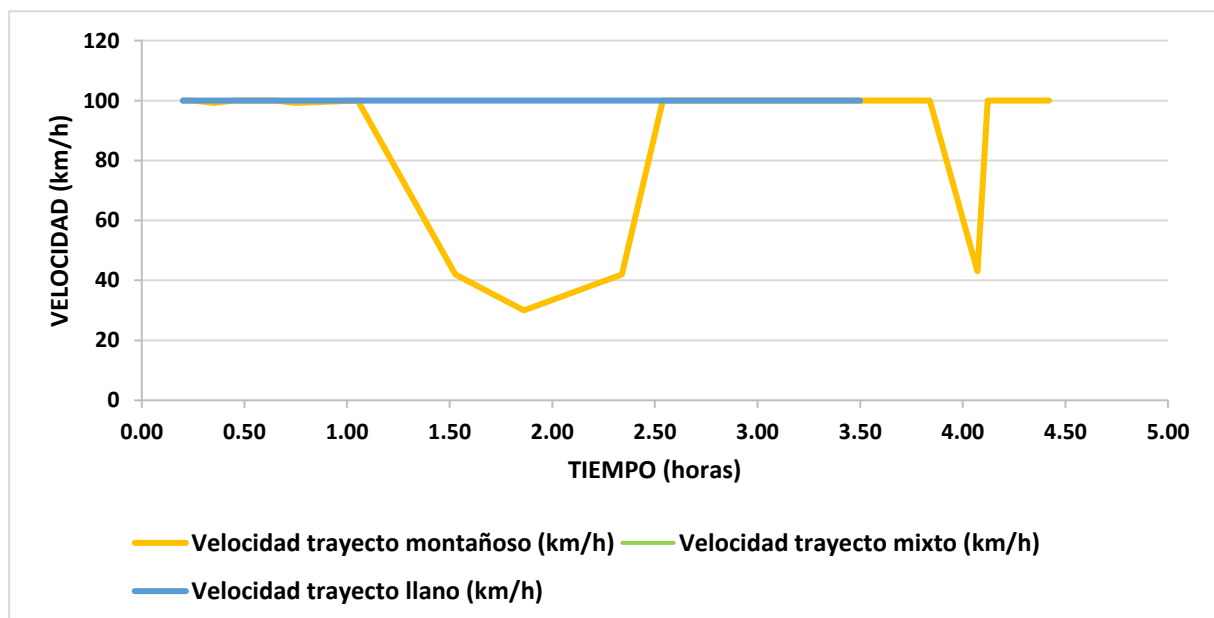


Fig 23. Comparativa de velocidades para los tres trayectos. Fuente: Elaboración propia.

Por último, para estos tres trayectos se había fijado que podían circular a la velocidad máxima en todo el trayecto. Esto se cumple claramente para el tramo llano y mixto, como se ve en la Fig 23. Ambos trayectos completan la ruta en 3,5 horas. Pero, por otra parte, el trayecto montañoso no puede circular siempre a 100 km/h, porque rompe el límite de adherencia, por lo

que habrá que reducir la velocidad para que el tren pueda seguir circulando y así no realizar cambios en su modificación. En los tramos iniciales en los que la pendiente no es muy alta, la velocidad apenas disminuye, pero como se observa al cabo de algo más de una hora, que es el momento en el que afronta la mayor pendiente, es necesario reducir en gran medida la velocidad hasta los 30 km/h. La velocidad reducida permanece hasta que supera la pendiente y se encuentra con un tramo llano al cabo de dos horas y media. Al cabo de más de tres horas y media de circulación, se vuelve a encontrar con una pendiente elevada, teniendo que volver a reducir su velocidad hasta unos 40 km/h para tiempo después, volver a recuperar la máxima permitida por la vía.

6. CONCLUSIONES

Este Trabajo de Fin de Grado, ha servido para elaborar una herramienta de cálculo de los parámetros principales que tiene la elección de una ruta ferroviaria. Este sería el gran objetivo final, pero a raíz de ello ha servido también para la adquisición de conocimientos sobre cómo es la dinámica de los trenes y que variables depende de ello; y por otra parte ha sido útil para mejorar las capacidades de programación, gracias al desarrollo del propio código.

Se ha profundizado en el comportamiento de los trenes, tanto de alta velocidad como para transporte de mercancías, observando que, para la resistencia al movimiento, los parámetros que dependen de la velocidad son mucho menores en los trenes de carga. Se ha estudiado sobre las limitaciones que tienen los trenes respecto a su velocidad, no pudiendo ir siempre a la velocidad máxima permitida, porque en algunos casos, dependiendo tanto de la carga transportada como del peso de la locomotora, se rompería el límite de adherencia y el tren patinaría por los raíles. Esto se puede compensar disminuyendo la velocidad, lo que llevaría al aumento del tiempo de transporte; disminuyendo el peso de carga, disminuyendo así la productividad de los trenes; o aumentando el peso de la locomotora (añadiendo otra igual o seleccionando una de mayor peso), lo que supondría un aumento de costes. En función al estudio que se realiza con este programa de cálculo, el usuario deberá hacer la selección de material tractor, mercancía y ruta de transporte que más le convenga a sus intereses.

Para la verificación del correcto funcionamiento del programa desarrollado, se han obtenido resultados numéricos de tres líneas de transporte diferentes. En las dos primeras líneas, que son trayectos reales (Caldearenas-Jaca y Zaragoza-Sagunto), se estudian dos posibilidades de tracción, diésel y eléctrica, a pesar de que las líneas no estén electrificadas. Con el estudio se ha llegado a la conclusión de que, para estos casos, en cuanto a consumo, tiempo y emisiones, no saldría rentable realizar una electrificación de la vía si se quiere optimizar en cuanto a esas tres variables. Esta conclusión se toma debido a que el consumo de un tren eléctrico no es mucho menor que el de un tren diésel, ocurriendo lo mismo con las emisiones. Las emisiones de un tren eléctrico, se ven reflejadas en los kg de CO₂ que cuesta producir un kWh de electricidad, mientras que las emisiones de un tren diésel, se observan directamente en el proceso de combustión del motor. Se ha visto que la electrificación no es rentable para un solo tren, pero si se analizaran la cantidad de trenes que circulan en una serie de años y se compasen las diferencias de consumo y emisiones totales, los resultados podrían llevar a diferentes conclusiones. Esto podría ser objeto de estudio para futuros proyectos, los cuales podría utilizar la herramienta desarrollada en este trabajo para sus cálculos.

Para concluir, se comentan brevemente las dificultades que se han encontrado en el desarrollo del trabajo y principalmente han sido a la hora de encontrar datos reales de la geometría de las rutas. Adif ofrece una amplia información sobre todas las líneas que tienen operativas, a través de diferentes mapas que indican la existencia de electrificación, la longitud de las líneas, los límites de velocidad... Pero la información en detalle requerida para la obtención de resultados coherentes, como puede ser el radio de las curvas o la altura de los puntos, no se ha podido encontrar de una forma sencilla. Para el caso de Caldearenas-Jaca, el profesor facilitó esta información de este pequeño tramo y para el caso de Zaragoza-Sagunto, se extrajeron los datos de un Trabajo de Fin de Grado que estudiaba en detalle el transporte de mercancías de esta línea y del cual únicamente se utilizó para conocer los datos geométricos.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Tema 4. Resistencias y esfuerzos. Ferrocarriles y otros vehículos guiados. Área de Ingeniería e Infraestructura de los transportes. Departamento de Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza
- [2] Tema 5. Adherencia. Ferrocarriles y otros vehículos guiados. Área de Ingeniería e Infraestructura de los transportes. Departamento de Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza
- [3] Módulo 2. Dinámica del tren y consumo de energía. Explotación técnica ferroviaria, Ed. 4. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Fundación CEDDET. ICEX. Instituto español de comercio exterior. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
https://transporteferrovariarioblog.files.wordpress.com/2017/01/modulo_2_etf_ed4.pdf
- [4] Dinámica de los trenes de alta velocidad. Cinemática ferroviaria. Alberto García Álvarez e Ignacio González Franco. 15ª Edición. Marzo de 2021.
<https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/2021%2003%2008%20DinamicaTrenes%20y%20Cin%20V15%20marzo%202021.pdf>
- [5] Gencat. Cambio climático. Inicio. Actúa. Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico.
https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/#:~:text=El%20mix%20de%20la%20red%20el%C3%A9ctrica%20espa%C3%B1ola%20publicado%20por%20la,259%20g%20CO2eq%20FkWh.
- [6] Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Oficina Catalana del Canvil Climàtic. Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático.
<https://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>
- [7] Adif.es. INICIO. Sobre Adif. Conoce Adif. Declaración sobre la red. Mapas de la Red Ferroviaria de Interés General. Mapa 3 RFIG.
https://www.adif.es/documents/20124/5115425/20220128_03_DR_Adif_Mapas_2022.pdf/794bbda3-98e4-3dfe-a2a5-c44d8f891070?t=1643386006483
- [8] El Periódico de Aragón. Lo último. Somport. El único tren de mercancías de Canfranc transporta maíz.
<https://www.elperiodicodearagon.com/lo-ultimo/2006/09/03/unico-tren-demercancias-canfranc-transporta-48084883.html>
- [9] Renfe.com. Grupo Renfe. Sociedades. Renfe Alquiler. Material. Vagones. MQ. TT5.
<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-alquiler/material-de-alquiler/material-vagones/tolvas-TT5>
- [10] Renfe.com. Grupo Renfe. Sociedades. Renfe Alquiler. Material. Locomotoras. Locomotora diésel 333.3
<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-alquiler/material-de-alquiler/locomotora-diesel-333-3>

- [11] Renfe.com. Grupo Renfe. Sociedades. Renfe Alquiler. Material. Locomotoras. Locomotora eléctrica 253
<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-alquiler/material-de-alquiler/locomotora-electrica-253>
- [12] Renfe.com. Grupo Renfe. Sociedades. Renfe Alquiler. Material. Locomotoras. Locomotora eléctrica 269.75
<https://www.renfe.com/content/dam/renfe/es/Grupo-Empresa/Sociedad-Renfe-alquiler/PDF-y-otros/Locomotora26975.pdf>
- [13] Renfe.com. Grupo Renfe. Sociedades. Renfe Alquiler. Material. Vagones. MA5.
<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-alquiler/material-de-alquiler/material-vagones/plataformas-MA5>

8. ANEXOS

8.1 CÓDIGO DEL PROGRAMA

```
clear all;
clc;

%Preguntar por la carga a transportar
pes_carga = input('Peso de los vagones más carga, en toneladas: ');
%Preguntar por el número de puntos
puntos = input(['Introducir el número de puntos de la ruta: ']);

%Introducir datos del trayecto por fichero
[nombre,direccion] = uigetfile({'*.csv' ; '*.txt'}, 'Escoger archivo de datos ');
tabla = readtable([direccion,nombre]);
matriz = table2array(tabla);
dist_a = 0;
for i = 1 : puntos
    alt(i) = matriz(i,2);
    dist(i) = matriz(i,3);
    fi0(i) = matriz(i,4);
    radio(i) = matriz(i,5);
    dens(i) = matriz(i,6);
    Tf(i) = matriz(i,7);
    Vviento(i) = matriz(i,8);
    alpha(i) = matriz(i,9);
    vel(i) = matriz(i,10);
    dist_a = dist_a + dist(i);
    dist_acum(i) = dist_a;
    if i == puntos
        coef(i) = 0;
    end
end

%Calcular la pendiente
for i = 1 : (puntos-1)
    h(i) = alt(i+1)-alt(i);
    pend(i) = 1000*(h(i)/(sqrt(((dist(i+1)*1000)^2)-(h(i)^2))));
end

%Calculo de resistencias para la potencia del tren daN/Tm
for i = 1 : (puntos-1)
    if radio(i+1) == 0
        coef(i) = (2 + pend(i));
    else
        coef(i) = (2 + pend(i) + (800/radio(i+1)));
    end
end

%Buscar el tramo más desfavorable (tramo con coeficiente más alto)
j = 1;
for i = 1 : (puntos-1)
    if coef(i+1)>coef(j)
        j = i+1;
    end
end
```


end

```
%Se muestra el tramo más desfavorable y se pide información de la
velocidad mínima en ese tramo y de la locomotora empleada
disp(['El tramo más desfavorable es el ' num2str(j) ' - '
num2str(j+1) '. ']);
vel_min = input(['Velocidad mínima a la que permitiría circular el
tren en el tramo ' num2str(j) ' - ' num2str(j+1) ', en km/h: ']);

%Cálculo de la potencia mínima necesaria en el tramo más
desfavorable
Wtren_min = pes_carga*coef(j)*vel_min*(5/1323); %CV
Wtren_min_kW = Wtren_min *(735/1000); %kW
disp(['La potencia necesaria para mover el tren a ' num2str(vel_min)
' km/h, en el tramo más desfavorable es de: ']);
disp([num2str(Wtren_min_kW) ' kW. ']);
disp([num2str(Wtren_min) ' CV. ']);

%Preguntar por potencia y peso de la locomotora seleccionada
pot_loc_kW = input('Potencia máxima de la locomotora seleccionada,
en kW: ');
pot_loc = pot_loc_kW*(1000/735); %CV
pes_loc = input('Peso de la locomotora seleccionada, en toneladas:
');

%Ver la nueva potencia necesaria añadiéndole el peso de la
locomotora
Wtren_min2 = (pes_carga+pes_loc)*coef(j)*vel_min*(5/1323); %CV
Wtren_min2_kW = Wtren_min2*(735/1000); %kW
if pot_loc < Wtren_min2
    disp(['La potencia necesaria para mover todo el conjunto, en el
tramo más desfavorable a ' num2str(vel_min) ' km/h, es: ']);
    disp([num2str(Wtren_min2_kW) ' kW. ']);
    disp([num2str(Wtren_min2) ' CV. ']);

    while pot_loc_kW < Wtren_min2_kW
        pot_loc_kW = input('Introducir potencia máxima de la nueva
locomotora, en kW: ');
        pot_loc = pot_loc_kW*(1000/735); %CV
        pes_loc = input('Introducir peso de la nueva locomotora, en
toneladas: ');
        Wtren_min2 = (pes_carga+pes_loc)*coef(j)*vel_min*(5/1323);
        %CV
        Wtren_min2_kW = Wtren_min2*(735/1000); %kW
        disp(['La potencia necesaria para mover el nuevo conjunto,
en el tramo más desfavorable, a ' num2str(vel_min) ' km/h, es: ']);
        disp([num2str(Wtren_min2_kW) ' kW. ']);
        disp([num2str(Wtren_min2) ' CV. ']);
    end
end

%Preguntar locomotora eléctrica o diesel, Cx y seccion frontal del
tren
elec_diesel = input(['¿La locomotora seleccionada es eléctrica o
diésel? (Escribir 'elec' o 'dies'): ']);
```

```

if elec_diesel == 'elec'
    elec = 100;
else if elec_diesel == 'dies'
    elec = 0;
end
end
Cx = input('Coeficiente de penetración del tren: ');
Sf = input('Sección frontal del tren, en m^2: ');

%Tipo de carga
tipo_carga = input(['¿El transporte es de mercancía o de pasajeros? (Escribir 'mercancia' o 'pasajeros'): ']);

%Preguntar si se tiene en cuenta la resistencia debido a entrada de aire
ent_aire = input(['¿Se van a considerar los efectos de la resistencia debida a la entrada de aire? (Escribir 'si' o 'no'): ']);
if ent_aire == 'si'
    disp('Introducir el valor del término B, que multiplica a la velocidad del tren (daN/km/h). Algunos valores pueden ser: ');
    disp('Locomotora tipo BB, B = 0.8 ');
    disp('Locomotora tipo CC, B = 1.2 ');
    disp('2 locomotoras + 6 coches, B = 3.9 ');
    b = input(['Introducir valor de B: ']);
else if ent_aire == 'no'
    b = 0;
end
end

%Cálculo de velocidad máxima posible por tramo, mediante la adherencia y preguntar por la velocidad en cada tramo
for i = 1 : (puntos-1)
    ELEC(i) = elec;
    CX(i) = Cx;
    SF(i) = Sf;
    PES_CARGA(i) = pes_carga;
    POT_LOC(i) = pot_loc;
    POT_LOC_KW(i) = pot_loc_kW;
    PES_LOC(i) = pes_loc;
    B(i) = b;

    %limitar velocidad máxima para mercancías
    if tipo_carga == 'mercancia';
        if vel(i+1) >= 100
            vel(i+1) = 100;
        end
    end

    if coef(i) > 0
        vmax(i) = (132300*fi0(i+1)*pes_loc-135*(pes_loc+pes_carga)*coef(i))/(1.35*(pes_loc+pes_carga)*coef(i));

        while vel(i+1) > vmax(i)

```

```

disp(['La velocidad de circulación en el tramo '
num2str(i) ' - ' num2str(i+1) ', es superior a la permitida por el
límite de adherencia. ']);
disp([num2str(vel(i+1)) ' km/h > ' num2str(vmax(i)) '
km/h. ' ]]);
cont2 = input(['¿Desea continuar a ' num2str(vmax(i)) '
km/h? (Escribir 'si' o 'no'): ']);
if cont2 == 'si'
    vel(i+1) = vmax(i);
else if cont2 == 'no'
    disp(['Es necesario disminuir el peso de la
carga o cambiar el sistema de tracción (cambiar o añadir
locomotora). ']);
    PES_CARGA(i) = input('Peso de los nuevos
vagones más carga, en toneladas: ');
    POT_LOC_KW(i) = input('Introducir potencia
máxima de la nueva locomotora, en kW: '); %kW
    POT_LOC(i) = POT_LOC_KW(i) * (1000/735); %CV
    PES_LOC(i) = input('Introducir peso de la nueva
locomotora, en toneladas: ');
    elec_diesel2 = input(['¿La locomotora empleada
en este tramo es eléctrica o diésel? (Escribir 'elec' o 'dies'):
']);
    if elec_diesel2 == 'elec'
        ELEC(i) = 100;
    else if elec_diesel2 == 'dies'
        ELEC(i) = 0;
    end
end
CX(i) = input('Coeficiente de penetración del
nuevo tren: ');
SF(i) = input('Sección frontal del nuevo tren,
en m^2: ');
vmax(i) = (132300*fi0(i+1)*PES_LOC(i)-
135*(PES_LOC(i)+PES_CARGA(i))*coef(i))/(1.35*(PES_LOC(i)+PES_CARGA(i)
))*coef(i));
end
end
else
    vmax(i) = vel(i+1);
end

WAD(i) =
(100/27)*((fi0(i+1)*PES_LOC(i)*vel(i+1))/(1+0.01*vel(i+1)));
WTREN(i) =
((PES_LOC(i)+PES_CARGA(i))*coef(i)*vel(i+1))*(5/1323);
if WTREN(i) < 0
    WTREN(i) = 0;
end
%Pasar potencia del tren y límite de adherencia a kW
WAD_kW(i) = WAD(i)*(735/1000);
WTREN_kW(i) = WTREN(i)*(735/1000);

end

```

```

%CÁLCULO POR TRAMOS
for i = 1 : (puntos-1)
    %Consumo energético
    Rm = 2; %daN/t (A)
    if radio(i+1) == 0 %Si radio de la curva es cero
        Rc(i) = 0;
    else
        Rc(i) = 800/radio(i+1); %daN/t (A)
    end
    Rent_aire(i) = B(i); %daN/km/h (B)
    Rada(i) = Tf(i+1)*0.5*CX(i)*SF(i)*dens(i+1)*(1/36);
    %daN/(km/h)^2 (C)

    Wavance(i) = ((Rm+Rc(i))*(PES_LOC(i)+PES_CARGA(i)) +
    Rent_aire(i)*vel(i+1) +
    Rada(i)*(vel(i+1)+Vviento(i+1)*cos(alpha(i+1)*pi/180))^2)*10*dist(i+
    1)*1000; %J
    Etren(i) = Wavance(i) +
    (PES_LOC(i)+PES_CARGA(i))*1000*9.81*(alt(i+1)-alt(i)) +
    0.5*(PES_LOC(i)+PES_CARGA(i))*1000*((vel(i+1)*(1000/3600))^2)-
    ((vel(i)*(1000/3600))^2)); %J
    Ereg(i) = 0;
    Efre(i) = 0;
    if (Etren(i) < 0) %Preguntar por regeneración
        Efre(i) = abs(Etren(i)); %J, Energía disipada en el freno
        if (ELEC(i) ~=0)
            reg = input(['Porcentaje de regeneración en el tramo '
num2str(i) ' - ' num2str(i+1) ': ']);
            Ereg(i) = abs(Etren(i)*reg/100); %J, Energía eléctrica
generada
            Efre(i) = abs(Etren(i))-Ereg(i); %J, Energía disipada en
el freno
        end
        Etren(i) = 0;
    end

    %Pasar consumo de J a kWh
    Etren_kWh(i) = Etren(i)*(1/(3600*1000)); %kWh
    Efre_kWh(i) = Efre(i)*(1/(3600*1000)); %kWh
    Ereg_kWh(i) = Ereg(i)*(1/(3600*1000)); %kWh

    %Tiempo empleado
    t(i) = dist(i+1)/vel(i+1); %horas

    %Emisiones CO2
    mix_elec = 0.259; %kgCO2/kWh
    factor_conversion = 11.78; %kWh/kg de gasoil
    factor_emision = 2.79; %kg CO2/l de gasoil
    dens_gasoil = 900; % kg/m^3 a 15 °C

```

```

        CO2(i) = Etren_kWh(i) * (mix_elec * (ELEC(i)/100) + ((1-
(ELEC(i)/100)) * (1000 * factor_emision / (factor_conversion *
dens_gasoil))));
        if elec_diesel == 'dies'
            diesel(i) =
((Etren_kWh(i)/factor_conversion)/(dens_gasoil))*1000; %l de diesel
        else
            for i = 1 : (puntos-1);
                diesel(i) = 0;
            end
        end
    end
end

%CONSUMO TOTAL, TIEMPO TOTAL, EMISIONES TOTALES
consumo = 0;
regeneracion = 0;
frenado = 0;
tiempo = 0;
emisiones = 0;
dist_total = 0;
cons_diesel = 0;

for i = 1 : (puntos-1)
    consumo = consumo + Etren_kWh(i);
    regeneracion = regeneracion + Ereg_kWh(i);
    frenado = frenado + Efre_kWh(i);
    tiempo = tiempo + t(i);
    emisiones = emisiones + CO2(i);
    cons_diesel = cons_diesel + diesel(i);
end

%Resultados en Excel
Altura = transpose(alt);
Distancia = transpose(dist);
Distancia_acumulada = transpose(dist_acum);
Pendiente = transpose(pend);
Velocidad_maxima = transpose(vmax);
Velocidad = transpose(vel);
Limite_adherencia_kW = transpose(WAD_kW);
Potencia_tren_kW = transpose(WTREN_kW);
Energia_consumida_kWh = transpose(Etren_kWh);
Energia_regenerada_kWh = transpose(Ereg_kWh);
Energia_frenado_kWh = transpose(Efre_kWh);
Tiempo = transpose(t);
Emision = transpose(CO2);
Consumo_diesel_l = transpose(diesel);

RESULTADOS_1 = table(Pendiente, Velocidad_maxima,
Limite_adherencia_kW, Potencia_tren_kW, Energia_consumida_kWh,
Energia_regenerada_kWh, Energia_frenado_kWh, Tiempo,
Emision, Consumo_diesel_l);

RESULTADOS_2 = table(Altura,
Distancia, Distancia_acumulada, Velocidad);

```

```
writetable(RESULTADOS_2,'RESULTADOS.xlsx','sheet' , 'Datos');
writetable(RESULTADOS_1,'RESULTADOS.xlsx','sheet', 'Resultados');

%Escribir resultados

disp(['CONSUMO DE ENERGÍA']);
disp(['El consumo de energía total del trayecto es de '
num2str(consumo) ' kWh.']);
disp(['La energía regenerada total del trayecto es de '
num2str(regeneracion) ' kWh.']);
disp(['La energía de frenado total del trayecto es de '
num2str(frenado) ' kWh.']);
disp(['El consumo total de diesel en todo el trayecto es de '
num2str(cons_diesel) ' litros.']);

disp(['TIEMPO DE TRANSPORTE']);
disp(['El tiempo de transporte es de ' num2str(tiempo) ' horas.']);

disp(['EMISIONES DE CO2']);
disp(['Las emisiones de CO2 totales del trayecto son '
num2str(emisiones) ' kg CO2.']);
```

8.2 MANUAL DE USUARIO

Se escribe a continuación, un breve manual orientado a los usuarios del programa, para ayudar a la correcta ejecución de éste.

Lo primero que hace falta es tener instalado el programa Matlab, versión R2020a o posterior. Una vez abierto se seleccionará el directorio donde se va a trabajar y se abrirá el programa: *consumos_tiempos_emisiones.m*.

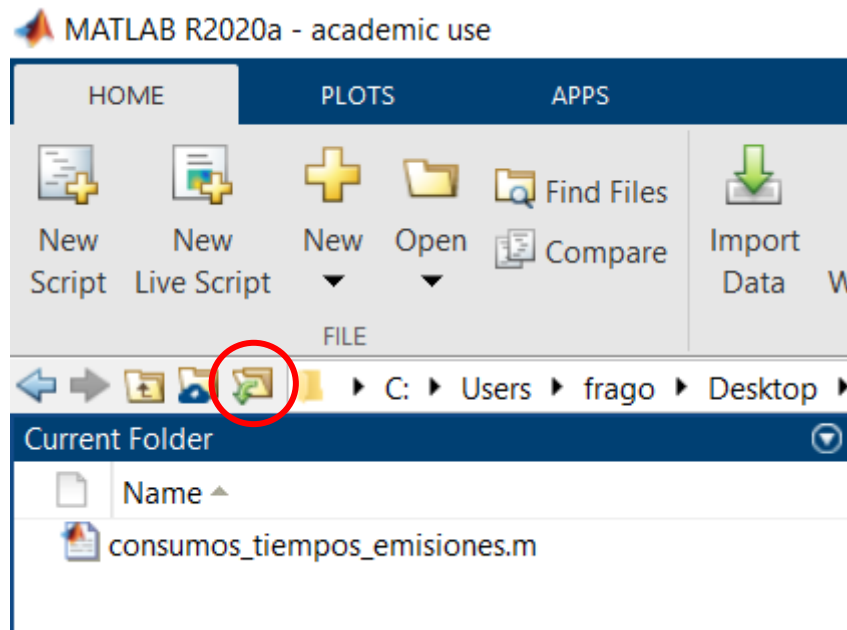


Fig 24. Browse for folder. Elegir la carpeta de trabajo, donde se encuentra el programa.

El código se abrirá en una nueva ventana de Matlab, llamada “Editor”. Es muy importante: NO MODIFICAR EL FICHERO. Para evitar escribir algo sin querer en el programa, se recomienda disminuir el tamaño de la pantalla Editor, aumentando el tamaño de la ventana de comandos, que es en la que se va a escribir y en la cual se va a obtener la información.

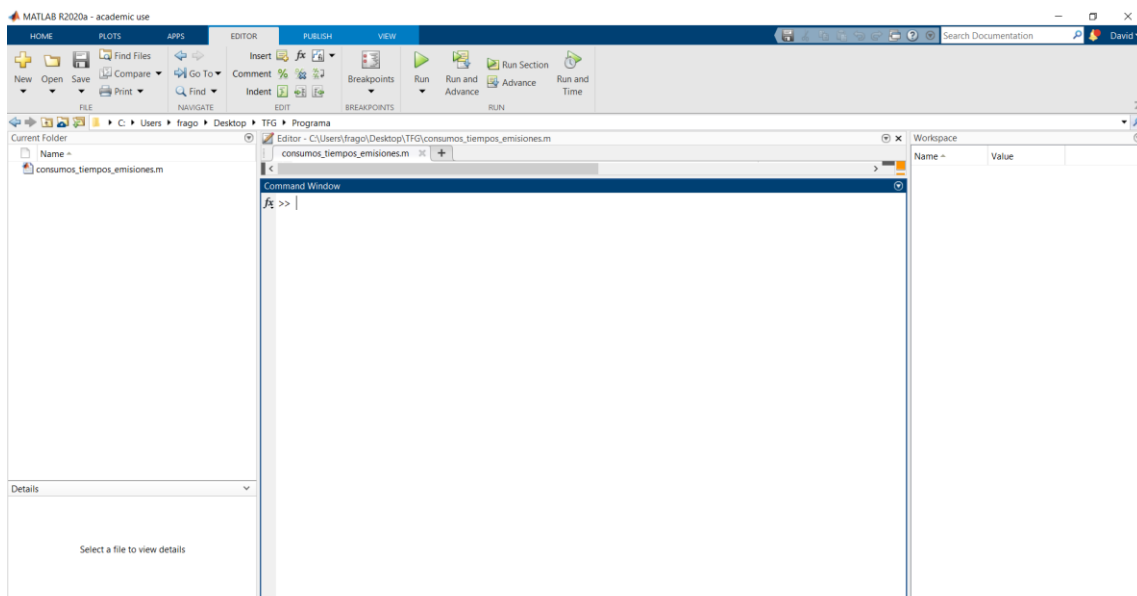


Fig 25. Layout recomendado, para evitar escribir en el código.

Una vez el programa esta listo para ejecutarse, se presiona el botón verde *Run*, situado en la parte superior central de Matlab y empieza la ejecución.

Los primeros datos que hay que introducir de forma manual serán:

1. Peso de la mercancía (considerando el peso de los vagones).
2. Número de puntos en los que se ha dividido la ruta.

Con estos dos datos introducidos en el programa, se abre una ventana emergente en la que habrá que abrir el fichero de datos de la ruta que se quiere analizar. Es MUY IMPORTANTE que el archivo de datos esté estructurado de esta manera:

PUNTOS	ALT. (m)	DIST. (km)	COEF_AD	RADIO (m)	DENS. AIR. (kg/m ³)	F. TÚNEL	VEL_V (km/h)	DIRECC_V (grados)	VEL_MAX (km/h)
1	647.1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	647.1	0.27	0.24	25000	1.23	1	0	0	65
3	647.85	0.17	0.24	293	1.23	1	0	0	60

Fig 26. Cabecera de datos y ejemplo de tres puntos.

El fichero de datos empleado, tendrá que ser obligatoriamente como el de la Fig 26, ya que cualquier cambio originará errores en el programa. MUY IMPORTANTE también que las unidades sean las mismas que las que pone en la cabecera. La separación decimal del fichero de datos, se tendrá que hacer con punto ya que, si se hiciera con comas, Matlab daría error y no podría leer el fichero. Destacar también que en la primera línea del fichero, correspondiente con el punto uno, todos los valores tendrán que ser cero, menos la altura de ese punto, ya que el resto de valores son datos por tramo, es decir el del punto en el que están respecto el anterior.

Una vez se tiene el fichero de datos de la forma requerida, el programa pide que se seleccione. MUY IMPORTANTE, el número de puntos del fichero de datos introducido, tiene que coincidir con número de puntos que se ha introducido al principio de forma manual.

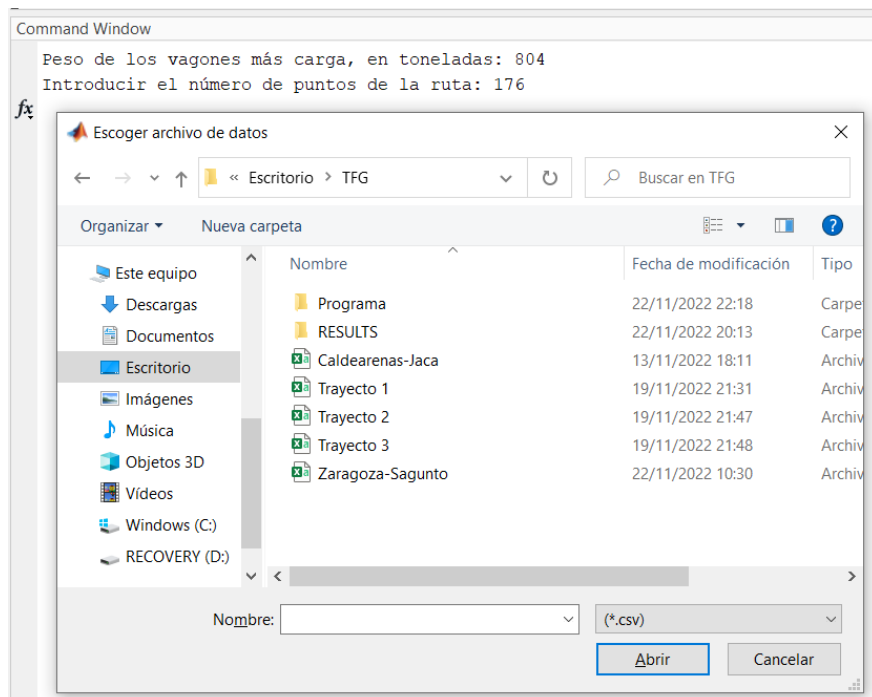
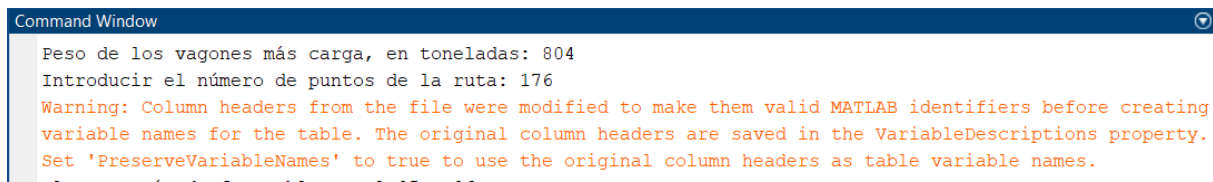


Fig 27. Solicitud de datos del programa.

El programa muestra un aviso sobre que ha cambiado el formato de la cabecera para hacerlas válidas en Matlab. Esto es una simple información y no afectará en los resultados.



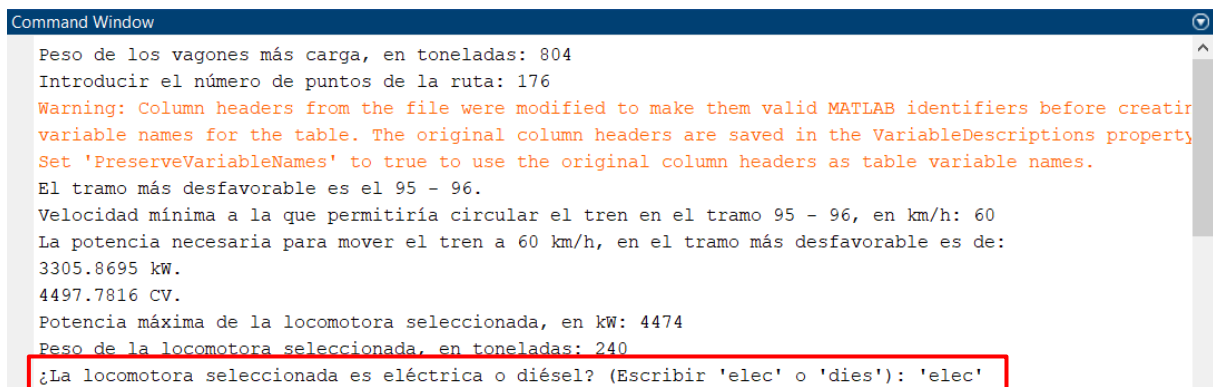
```

Command Window
Peso de los vagones más carga, en toneladas: 804
Introducir el número de puntos de la ruta: 176
Warning: Column headers from the file were modified to make them valid MATLAB identifiers before creating
variable names for the table. The original column headers are saved in the VariableDescriptions property.
Set 'PreserveVariableNames' to true to use the original column headers as table variable names.
    
```

Fig 28. Aviso de Matlab sobre cambio de la cabecera.

Lo siguiente es seguir paso a paso con la introducción de datos de forma manual que el programa va requiriendo.

El programa puede pedir información sobre datos numéricos o información escrita en forma de cadenas de caracteres. Para la introducción de números no hay que tener nada en consideración, solamente que la separación decimal se escribe con punto y no con coma. Sin embargo, para la introducción de caracteres, es necesario que se introduzca el texto de forma idéntica a como lo pone en el programa. El programa cuando requiere de información de texto, muestra las dos opciones posibles que se pueden elegir, como se ven en la Fig 29.



```

Command Window
Peso de los vagones más carga, en toneladas: 804
Introducir el número de puntos de la ruta: 176
Warning: Column headers from the file were modified to make them valid MATLAB identifiers before creatin
variable names for the table. The original column headers are saved in the VariableDescriptions property
Set 'PreserveVariableNames' to true to use the original column headers as table variable names.
El tramo más desfavorable es el 95 - 96.
Velocidad mínima a la que permitiría circular el tren en el tramo 95 - 96, en km/h: 60
La potencia necesaria para mover el tren a 60 km/h, en el tramo más desfavorable es de:
3305.8695 kW.
4497.7816 CV.
Potencia máxima de la locomotora seleccionada, en kW: 4474
Peso de la locomotora seleccionada, en toneladas: 240
¿La locomotora seleccionada es eléctrica o diésel? (Escribir 'elec' o 'dies'): 'elec'
    
```

Fig 29. Introducción de caracteres.

En este caso pregunta por el tipo de tracción de la locomotora y las dos opciones son o eléctrica o diésel. Para introducir este dato al programa, habrá que escribir tal y como pone: 'elec' o 'dies', INCLUYENDO LAS COMILLAS, MUY IMPORTANTE. Si no se escribieran las comillas, el programa daría error, ya que consideraría la palabra como una variable numérica, la cual no existe y produciría un error y la finalización de la ejecución del programa. Por esta razón conviene escribir la información tranquilamente y asegurando que está todo bien, antes de darle a la tecla intro, para continuar con la ejecución.

El programa se sigue ejecutando de forma automática, hasta que llega a un punto en el que requiere de información del usuario para poder continuar y una vez termina de leerse todo el código. Muestra los resultados principales por pantalla.

Con esta información, el usuario conoce de primera mano las variables principales de una ruta ferroviaria y podrá analizar varios trayectos con parámetros diferentes, para poder escoger la solución que más le convenga, en función a estas variables.

```

Command Window

Porcentaje de regeneración en el tramo 172 - 173: 20
Porcentaje de regeneración en el tramo 173 - 174: 20
Porcentaje de regeneración en el tramo 175 - 176: 20

CONSUMO DE ENERGÍA
El consumo de energía total del trayecto es de 6779.4608 kWh.
La energía regenerada total del trayecto es de 522.0709 kWh.
La energía de frenado total del trayecto es de 2088.2837 kWh.
El consumo total de diesel en todo el trayecto es de 0 litros.

TIEMPO DE TRANSPORTE
El tiempo de transporte es de 3.4436 horas.

EMISIONES DE CO2
Las emisiones de CO2 totales del trayecto son 1755.8804 kg CO2.
    
```

Fig 30. Resultados obtenidos en la pantalla de comandos.

El programa puede dar mucha más información que la mostrada en pantalla. Las variables principales que se han calculado en cada tramo, quedan almacenadas en un fichero que se guarda en el directorio de trabajo, con el nombre de RESULTADOS. Este fichero se compone de dos hojas: una de datos y otra de resultados.

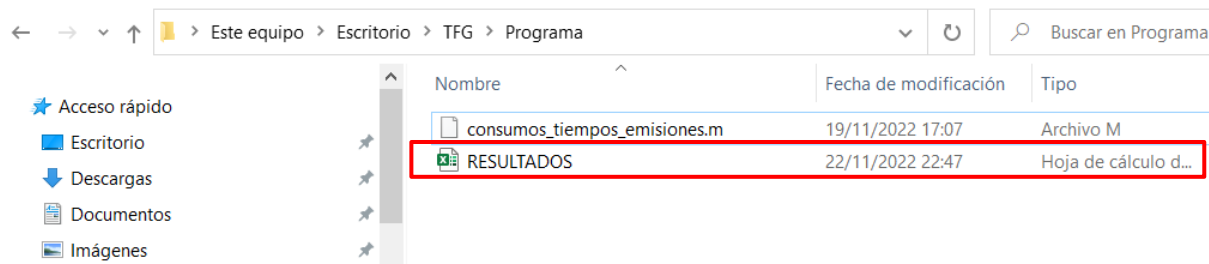


Fig 31. Fichero RESULTADOS creado al terminar la ejecución del programa.

	A	B	C	D
1	Altura	Distancia	Distancia_acumulada	Velocidad
2	0	0	0	
3	0	20	20	100
4	0	10	30	100
5	0	20	50	100
6	0	30	80	100
7	0	20	100	100
8	29.999865	10	110	100
9	89.999595	20	130	100
10	89.999595	20	150	100
11	89.999595	10	160	100
12	89.999595	30	190	100
13	189.998345	20	210	100
14	189.998345	20	230	100
15	189.998345	30	260	100
16	289.997095	20	280	100
17	339.99647	10	290	100
18	339.99647	10	300	100
19	339.99647	10	310	100
20	389.995845	10	320	100
21	389.995845	10	330	100
22	389.995845	20	350	100
23				
24				
25				
26				
27				

Fig 32. Fichero RESULTADOS. Hoja de Datos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Pendiente	Velocidad_maxima	Limite_adherencia_kW	Potencia_tren_kW	Energia_consumida_kWh	Energia_regenerada_kWh	Energia_frenado_kWh	Tiempo	Emision	Consumo_diesel_l
2					0	0	0			
3	0	1134.940334	5749.333333	931.111111	543.9438013	0	0	0.2	140.881445	0
4	5	216.6513677	5749.333333	3631.333334	223.8811246	0	0	0.05	57.9852113	0
5	10	99.18392484	5725.777777	5725.777777	653.1078905	0	0	0.10082279	169.154944	0
6	5	252.8400955	5749.333333	3258.888888	413.4373887	0	0	0.1	107.080284	0
7	5	244.9554007	5749.333333	3333.377777	835.9333873	0	0	0.2	216.506747	0
8	10	99.18392482	5725.777777	5725.777777	653.1078905	0	0	0.10082279	169.154944	0
9	10	103.1151865	5749.333333	5661.155555	1941.824727	0	0	0.3	502.932604	0
10	15	41.94716484	3398	3398	1476.773494	0	0	0.476790269	382.484335	0
11	17	29.99371967	2653.111131	2653.111131	861.9718753	0	0	0.333403129	223.250716	0
12	15	41.94716472	3397.999993	3397.999993	1640.227622	0	0	0.47679027	424.818954	0
13	10	105.8233888	5749.333333	5586.666672	1425.714158	0	0	0.2	369.259967	0
14	0	1134.940334	5749.333333	931.111111	546.4969776	0	0	0.3	141.542717	0
15	0	1043.463272	5749.333333	1005.6	568.8436443	0	0	0.3	147.330504	0
16	0	1134.940334	5749.333333	931.111111	364.3313184	0	0	0.2	94.3618115	0
17	6.99999999	162.7532628	5749.333333	4376.222219	1040.954098	0	0	0.2	269.607111	0
18	10	103.1151866	5749.333333	5661.155554	1938.905142	0	0	0.3	502.176432	0
19	15	43.04328182	3460.074067	3460.074067	660.6779755	0	0	0.232324293	171.115596	0
20	7.00000009	166.5338824	5749.333333	4314.148192	403.4700681	0	0	0.05	104.498748	0
21	0	1043.463272	5749.333333	1005.6	189.6145481	0	0	0.1	49.110168	0
22	0	1134.940334	5749.333333	931.111111	364.3313184	0	0	0.2	94.3618115	0
23										
24										
25										
26										
27										

Fig 33. Fichero RESULTADOS. Hoja de Resultados.

Estas son las variables calculadas por el programa, en cada tramo. Con esta información el usuario podrá extraer información de puntos o tramos en concreto, en vez de quedarse solo con los resultados totales. Esto puede ser de interés para conocer las zonas en las que se consuma la mayor parte de energía del trayecto y tener constancia de ellas ya que con el cálculo total, no se sabría cuáles son las zonas que más consumo demandan. Por otra parte, pero esto ya sería trabajo del usuario, puede realizar gráficas comparativas (como las que se han elaborado en este trabajo) para hacer un análisis de cómo cambian los resultados, en función de otras variables.

Con esto concluye este breve manual, resaltando lo importante que es introducir los datos correctamente. En cualquier caso, el mayor problema sería que el usuario tendría que volver a ejecutar el programa y comenzar desde el principio. Por otra parte, se recomienda tener paciencia en la introducción de datos manuales. El programa es un cálculo teórico de consumos, tiempos y emisiones, si el usuario introduce algún dato erróneo, el programa no lo corregirá y calculará en función a él. Es tarea del usuario darse cuenta de ello ya sea en la introducción de estos datos o en la visualización de los resultados.

8.3 DESCRIPCIÓN DEL TRAYECTO CALDEARENAS-JACA

PUNTOS	ALT. (m)	DIST. (km)	COEF_AD	RADIO (m)	DENS. AIR. (kg/m ³)	F. TÚNEL	VEL_V (km/h)	DIRECC_V (grados)	VEL_MAX (km/h)
1	647,1	0	0	0	0	0	x	x	0
2	647,1	0,27	0,24	25000	1,23	1	x	x	65
3	647,85	0,17	0,24	293	1,23	1	x	x	60
4	647,71	0,37	0,24	293	1,23	1	x	x	60
5	647,29	0,2	0,24	272	1,23	1	x	x	60
6	647,31	0,2	0,24	50000	1,23	1	x	x	70
7	652,85	0,34	0,24	428	1,23	1	x	x	70
8	660,6	0,5	0,24	0	1,23	1	x	x	70
9	660,45	0,91	0,24	900	1,23	1	x	x	70
10	665,22	0,3	0,24	360	1,23	1	x	x	70
11	678,73	0,91	0,24	280	1,23	1	x	x	65
12	684,21	0,35	0,24	268	1,23	1	x	x	65
13	683,93	0,64	0,24	271,5	1,23	1	x	x	70
14	684,24	0,67	0,24	287	1,23	1	x	x	70
15	693,07	1,89	0,24	290	1,23	1	x	x	65
16	696,51	1,01	0,24	880	1,23	1	x	x	70
17	705,2	1,14	0,24	1880	1,23	1	x	x	70
18	711,41	0,77	0,24	1000	1,23	1	x	x	70
19	715,08	0,34	0,24	445	1,23	1	x	x	70
20	715,55	0,5	0,24	0	1,23	1	x	x	70
21	727,26	1,53	0,24	307	1,23	1	x	x	70
22	728,98	0,44	0,24	289,5	1,23	1	x	x	70
23	730,23	0,22	0,24	290	1,23	1	x	x	70
24	730,75	0,12	0,24	290	1,23	1	x	x	70
25	732	0,28	0,24	0	1,23	1	x	x	70
26	733,97	0,31	0,24	1350	1,23	1	x	x	70
27	736,14	0,36	0,24	990	1,23	1	x	x	70
28	735,72	0,36	0,24	331	1,23	1	x	x	70
29	739,99	0,3	0,24	0	1,23	1	x	x	70
30	741,67	0,1	0,24	490	1,23	1	x	x	70
31	747,92	0,45	0,24	490	1,23	1	x	x	70
32	751,79	0,25	0,24	0	1,23	1	x	x	70
33	751,74	0,25	0,24	380	1,23	1	x	x	70
34	751,57	0,13	0,24	0	1,23	1	x	x	70
35	751,55	0,18	0,24	285	1,23	1	x	x	70
36	752,52	0,22	0,24	0	1,23	1	x	x	70
37	760,04	0,91	0,24	390	1,23	1	x	x	70
38	760,13	0,72	0,24	298	1,23	1	x	x	70
39	759,87	0,56	0,24	280	1,23	1	x	x	65
40	765,82	0,53	0,24	327	1,23	1	x	x	65
41	768,39	0,25	0,24	293	1,23	1	x	x	70
42	769,46	0,07	0,24	0	1,23	1	x	x	70

43	769,61	0,29	0,24	275	1,23	1	x	x	65
44	774,56	0,53	0,24	265	1,23	1	x	x	65
45	780,1	0,67	0,24	287	1,23	1	x	x	70
46	780,1	0,59	0,24	0	1,23	1	x	x	70
47	790,85	0,73	0,24	1000	1,23	1	x	x	70
48	799,05	1,55	0,24	475	1,23	1	x	x	70
49	802,99	0,45	0,24	0	1,23	1	x	x	70
50	805,57	0,26	0,24	0	1,23	1	x	x	85
51	809,56	0,47	0,24	50000	1,23	1	x	x	85
52	810,77	0,11	0,24	0	1,23	1	x	x	85
53	812,39	0,13	0,24	272	1,23	1	x	x	70
54	814,72	0,22	0,24	272	1,23	1	x	x	70
55	817,38	0,34	0,24	277	1,23	1	x	x	70
56	821,85	0,37	0,24	0	1,23	1	x	x	70
57	827,5	0,44	0,24	0	1,23	1	x	x	85
58	833,07	0,45	0,24	0	1,23	1	x	x	85
59	841,38	1,35	0,24	1850	1,23	1	x	x	85
60	851,91	1,13	0,24	0	1,23	1	x	x	85
61	866,85	1,3	0,24	894,06	1,23	1	x	x	85
62	867,27	0,34	0,24	0	1,23	1	x	x	85
63	857,25	0,58	0,24	490	1,23	1	x	x	85
64	853,25	0,27	0,24	291	1,23	1	x	x	85
65	846,24	0,42	0,24	0	1,23	1	x	x	85
66	846,28	0,09	0,24	50000	1,23	1	x	x	70
67	846,8	0,15	0,24	420	1,23	1	x	x	70
68	841,33	0,45	0,24	306,73	1,23	1	x	x	70
69	837,49	0,25	0,24	350	1,23	1	x	x	70
70	833,89	0,3	0,24	0	1,23	1	x	x	70
71	833,37	0,17	0,24	885,64	1,23	1	x	x	70
72	827,98	0,36	0,24	1000	1,23	1	x	x	70
73	828,49	0,46	0,24	0	1,23	1	x	x	70
74	828,19	0,2	0,24	270	1,23	1	x	x	70
75	828,21	0,32	0,24	290	1,23	1	x	x	70
76	827,87	0,11	0,24	290	1,23	1	x	x	70
77	828,38	0,43	0,24	0	1,23	1	x	x	70
78	828,11	0,48	0,24	280	1,23	1	x	x	70
79	828,23	0,26	0,24	477,25	1,23	1	x	x	70
80	828,23	0,23	0,24	477,25	1,23	1	x	x	70
81	828,32	0,15	0,24	0	1,23	1	x	x	70
82	828,23	0,1	0,24	1492	1,23	1	x	x	70
83	828,03	0,08	0,24	800	1,23	1	x	x	70

Tabla 14. Características ruta Caldearenas-Jaca, Fuente: Elaboración propia,

8.4 VAGÓN TIPO TOLVA TIPO: TT5

Tolva

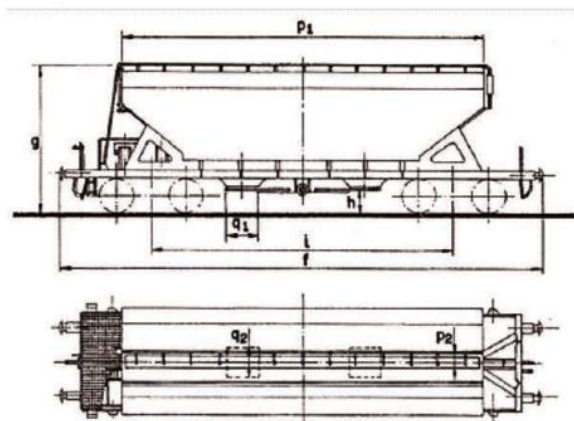
Cerrada. Para transporte de cereales / abono.

Serie Internacional: Tagpp

Tipo: TT5



Numeración	Nacional TT	571.301 a 571.700(*) 571.113 a 571.694(#)
	Internacional	81710662001-3 a 400-7(*) 81715660112-9 a 693-8(#)
Características Generales		
Carga Máxima t	56,0	
Tara Media t	24,0	
Freno	Aire Comprimido	
Velocidad Máxima km/h	100	
Long. entre Topes m (f)	14,16	
Altura Máxima m (g)	4,28(#)/4,25(*)	
Altura Boca Descarg. m (h)	0,70	
Empate m (i)	8,87	
Volumen Útil m³	75,0	
Otras Características		
Techo	Articulado	
Dimens. Boca Carga m (p)	10,18(#)/10,47(*)x0,50	
Descarga	Manual-Central	
Nº Bocas Descarga.	2	
Dimens. Boca Descarga m (q)	0,90x0,80	
Operativa Bª.Descarga	Indiv. desde lateral	
Año de Construcción	1.970-1.976	



Aplicaciones Comerciales

Transporte de cereales y abono.

Vagones Alternativos

T1 y TT8.

Observaciones

(*) Actualmente se está procediendo al cambio del N° U.I.C., para que se corresponda con las características del vagón, siendo los N U.I.C. antiguos: 8175660300-0 a 699-5.

(#): La serie de estos vagones es : Tagpps.

Bogies Y-21 Cse.

renfe
Mercancías

Fig 34. Tolva Cerrada para transporte de cereales, Fuente: [9].

8.5 LOCOMOTORA DIÉSEL 333,3

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

Fig 35. Locomotora diésel 333,3, Fuente: [10].

8.6 LOCOMOTORA ELÉCTRICA 253

Locomotora eléctrica 253

renfe | Alquiler



La locomotora eléctrica 253 constituye la tercera generación de la familia Traxx de Bombardier. Es operable en la Red Española de 3.000 voltios y ancho de 1.668 mm. Mediante sus cuatro motores desarrolla una potencia de 5.400 kW.

La locomotora 253, diseñada específicamente para el transporte de mercancías, destaca por su capacidad de arrastre y por su fiabilidad.

Características generales

Constructor	BOMBARDIER TRANSPORTATION
Construcción	2008 / 2010
Velocidad máxima (km/h)	140
Ancho de vía (mm)	1.668
Potencia (kW / CV)	5.400/7.337
Tensión nominal (V)	3.000
Masa/Tara (t)	87
Mando múltiple	SI
Longitud entre topes (mm)	18.900
Ancho de caja (mm)	2.997
Altura máxima (mm)	4.270
Tipo de bogies	Bo-Bo
Motor tracción	4 motores trifásicos asíncronos BOMBARDIER
Freno neumático	Disco
Freno eléctrico	Regenerativo y reostático
Freno estacionamiento	Muelle acumulador Knorr
Registrador	Teloc 2500
Señalización	Asfa digital

Fig 36. Locomotora eléctrica 253, Fuente: [11].

8.7 LOCOMOTORA ELÉCTRICA 269,75

Locomotora eléctrica 269.75

renfe | Alquiler



La Locomotora eléctrica 269.75 es una composición indeformable de 2 locomotoras 269.7 acopladas en mando múltiple, procedentes a su vez de la subserie 269.2.

Es operable en la Red Convencional de Ancho Ibérico (1.668 mm) en líneas electrificadas de 3.000 Volios de corriente continua.

Características generales

Constructores	MEC: CAF-MACOSA-MITSUBISHI ELECTR: WESTINGHOUSE FRENO: WABCO-DIMETAL
Construcción	1980/85
Velocidad máxima (Km/H)	120
Ancho de vía (mm)	1.668
Potencia (kW)/(CV)	6.200/8.424
Tension nominal (V)	3.000
Masa/Tara (t)	176
Mando múltiple	SI
Longitud entre topes (mm)	2 Locomotoras=34.540
Ancho de caja (mm)	3.126
Altura máxima (mm)	4.260
Tipo de bogie	Monomotor, Monoreductor Bo - Bo
Transmisiones	(4) Monoreductora
Motor tracción	(4) mod. MB - 3.200 B2/B3
Freno neumático	Aire comprimido
Freno eléctrico	Reostático
Freno estacionamiento	De husillo a los 2 ejes de un bogie
Registrador	Cesis
Señalización	Asfa Digital

DOCUMENTO NO CONTRACTUAL

Fig 37. Locomotora eléctrica 269,75, Fuente: [12].

8.8 DESCRIPCIÓN DEL TRAYECTO ZARAGOZA-SAGUNTO

PUNTOS	ALT. (m)	DIST. (km)	COEF_AD	RADIO (m)	DENS. AIR. (kg/m ³)	F. TÚNEL	VEL_V (km/h)	DIRECC_V (grados)	VEL_MAX (km/h)
1	243,00	0	0	0	0	0	*	*	0
2	267,12	2,01	0,24	0	1,225	1	*	*	100
3	247,92	1,2	0,24	0	1,225	1	*	*	100
4	251,52	1,8	0,24	0	1,225	1	*	*	100
5	244,68	2,28	0,24	0	1,225	1	*	*	100
6	264,42	3,29	0,24	0	1,225	1	*	*	100
7	257,42	2,332	0,24	0	1,225	1	*	*	140
8	254,13	1,098	0,24	0	1,225	1	*	*	140
9	270,88	2,393	0,24	0	1,225	1	*	*	140
10	290,02	2,393	0,24	0	1,225	1	*	*	140
11	304,38	2,393	0,24	0	1,225	1	*	*	140
12	312,70	2,771	0,24	0	1,225	1	*	*	135
13	332,09	2,771	0,24	0	1,225	1	*	*	135
14	348,72	2,771	0,24	0	1,225	1	*	*	135
15	384,74	2,771	0,24	0	1,225	1	*	*	135
16	417,96	2,373	0,24	0	1,225	1	*	*	200
17	448,80	2,373	0,24	0	1,225	1	*	*	200
18	486,77	2,373	0,24	0	1,225	1	*	*	200
19	501,00	2,373	0,24	0	1,225	1	*	*	200
20	506,23	2,615	0,24	0	1,225	1	*	*	165
21	506,23	2,615	0,24	0	1,225	1	*	*	165
22	521,92	2,615	0,24	0	1,225	1	*	*	165
23	558,53	2,615	0,24	0	1,225	1	*	*	165
24	562,49	0,99	0,24	500	1,225	1	*	*	165
25	599,53	2,646	0,24	0	1,225	1	*	*	140
26	649,79	2,646	0,24	0	1,225	1	*	*	140
27	700,06	2,646	0,24	0	1,225	1	*	*	140
28	700,62	0,56	0,24	300	1,225	1	*	*	140
29	705,66	0,42	0,24	300	1,225	1	*	*	140
30	728,46	1,2	0,24	325	1,225	1	*	*	140
31	776,50	2,529	0,24	0	1,225	1	*	*	100
32	819,48	2,529	0,24	0	1,225	1	*	*	100
33	799,25	2,529	0,24	0	1,225	1	*	*	100
34	796,72	2,529	0,24	0	1,225	1	*	*	100
35	798,97	0,75	0,24	320	1,225	1	*	*	100
36	799,47	0,5	0,24	400	1,225	1	*	*	100
37	809,27	0,7	0,24	400	1,225	1	*	*	100
38	826,07	1,05	0,24	500	1,225	1	*	*	100
39	843,39	1,732	0,24	0	1,225	1	*	*	180
40	860,71	1,732	0,24	0	1,225	1	*	*	180
41	877,58	1,875	0,24	0	1,225	1	*	*	200
42	892,58	1,875	0,24	0	1,225	1	*	*	200

43	905,18	1,8	0,24	0	1,225	1	*	*	200
44	923,18	1,8	0,24	0	1,225	1	*	*	200
45	957,13	2,612	0,24	0	1,225	1	*	*	200
46	998,92	2,612	0,24	0	1,225	1	*	*	200
47	1007,70	2,195	0,24	0	1,225	1	*	*	90
48	976,97	2,195	0,24	0	1,225	1	*	*	90
49	967,57	0,94	0,24	400	1,225	1	*	*	90
50	960,23	1,05	0,24	400	1,225	1	*	*	90
51	969,57	0,85	0,24	500	1,225	1	*	*	90
52	922,16	2,964	0,24	0	1,225	1	*	*	80
53	877,70	2,964	0,24	0	1,225	1	*	*	80
54	878,22	0,52	0,24	300	1,225	1	*	*	80
55	876,29	1,934	0,24	0	1,225	1	*	*	80
56	877,04	0,75	0,24	450	1,225	1	*	*	80
57	893,80	2,395	0,24	0	1,225	1	*	*	140
58	874,64	2,395	0,24	0	1,225	1	*	*	140
59	875,39	0,75	0,24	450	1,225	1	*	*	140
60	877,66	2,269	0,24	0	1,225	1	*	*	140
61	879,93	2,269	0,24	0	1,225	1	*	*	140
62	891,28	2,269	0,24	0	1,225	1	*	*	140
63	891,28	0,47	0,24	0	1,225	1	*	*	200
64	897,08	1,935	0,24	0	1,225	1	*	*	200
65	911,23	2,829	0,24	0	1,225	1	*	*	200
66	916,88	2,829	0,24	0	1,225	1	*	*	200
67	919,53	2,642	0,24	0	1,225	1	*	*	200
68	919,53	2,642	0,24	0	1,225	1	*	*	200
69	932,74	2,642	0,24	0	1,225	1	*	*	200
70	940,66	2,642	0,24	0	1,225	1	*	*	200
71	940,66	2,588	0,24	0	1,225	1	*	*	200
72	940,66	2,588	0,24	0	1,225	1	*	*	200
73	945,84	2,588	0,24	0	1,225	1	*	*	200
74	953,60	2,588	0,24	0	1,225	1	*	*	200
75	953,60	2,588	0,24	0	1,225	1	*	*	200
76	959,42	2,909	0,24	0	1,225	1	*	*	200
77	959,42	2,909	0,24	0	1,225	1	*	*	200
78	971,06	2,909	0,24	0	1,225	1	*	*	200
79	979,78	2,909	0,24	0	1,225	1	*	*	200
80	991,42	2,909	0,24	0	1,225	1	*	*	200
81	979,82	2,899	0,24	0	1,225	1	*	*	200
82	971,13	2,899	0,24	0	1,225	1	*	*	200
83	945,04	2,899	0,24	0	1,225	1	*	*	200
84	913,15	2,899	0,24	0	1,225	1	*	*	200
85	878,36	2,899	0,24	0	1,225	1	*	*	200
86	855,17	2,899	0,24	0	1,225	1	*	*	200
87	890,43	2,204	0,24	0	1,225	1	*	*	80
88	925,69	2,204	0,24	0	1,225	1	*	*	80

89	967,56	2,204	0,24	0	1,225	1	*	*	80
90	972,51	0,55	0,24	350	1,225	1	*	*	80
91	964,81	0,55	0,24	350	1,225	1	*	*	80
92	959,11	0,95	0,24	-500	1,225	1	*	*	80
93	1000,54	2,072	0,24	0	1,225	1	*	*	75
94	1044,04	2,072	0,24	0	1,225	1	*	*	75
95	1083,40	2,072	0,24	0	1,225	1	*	*	75
96	1101,00	0,88	0,24	300	1,225	1	*	*	75
97	1093,30	0,55	0,24	350	1,225	1	*	*	75
98	1087,60	0,95	0,24	500	1,225	1	*	*	75
99	1097,48	0,76	0,24	3150	1,225	1	*	*	75
100	1083,70	2,756	0,24	0	1,225	1	*	*	100
101	1069,92	2,756	0,24	0	1,225	1	*	*	100
102	1042,36	2,756	0,24	0	1,225	1	*	*	100
103	1022,15	2,527	0,24	0	1,225	1	*	*	100
104	979,19	2,527	0,24	0	1,225	1	*	*	100
105	948,87	2,527	0,24	0	1,225	1	*	*	100
106	910,97	2,527	0,24	0	1,225	1	*	*	100
107	875,60	2,527	0,24	0	1,225	1	*	*	100
108	871,89	0,53	0,24	315	1,225	1	*	*	100
109	872,50	0,615	0,24	315	1,225	1	*	*	100
110	850,71	2,422	0,24	0	1,225	1	*	*	100
111	824,06	2,422	0,24	0	1,225	1	*	*	100
112	819,17	0,7	0,24	300	1,225	1	*	*	100
113	816,57	0,65	0,24	450	1,225	1	*	*	100
114	810,79	1,924	0,24	0	1,225	1	*	*	75
115	820,41	1,924	0,24	0	1,225	1	*	*	75
116	820,81	0,2	0,24	250	1,225	1	*	*	75
117	823,36	2,55	0,24	0	1,225	1	*	*	100
118	846,31	2,55	0,24	0	1,225	1	*	*	100
119	848,86	2,55	0,24	0	1,225	1	*	*	100
120	871,81	2,55	0,24	0	1,225	1	*	*	100
121	872,36	0,55	0,24	300	1,225	1	*	*	100
122	883,41	0,65	0,24	300	1,225	1	*	*	100
123	889,44	0,67	0,24	300	1,225	1	*	*	100
124	875,34	2,819	0,24	0	1,225	1	*	*	120
125	880,98	2,819	0,24	0	1,225	1	*	*	120
126	841,52	2,819	0,24	0	1,225	1	*	*	120
127	785,15	2,819	0,24	0	1,225	1	*	*	120
128	768,15	1	0,24	340	1,225	1	*	*	120
129	751,06	0,95	0,24	340	1,225	1	*	*	120
130	736,18	0,62	0,24	300	1,225	1	*	*	120
131	688,08	2,291	0,24	0	1,225	1	*	*	75
132	637,69	2,291	0,24	0	1,225	1	*	*	75
133	621,49	0,9	0,24	300	1,225	1	*	*	75
134	602,00	1,3	0,24	400	1,225	1	*	*	75

135	585,00	0,85	0,24	295	1,225	1	*	*	75
136	561,20	1,4	0,24	450	1,225	1	*	*	75
137	513,50	2,272	0,24	0	1,225	1	*	*	75
138	486,24	2,272	0,24	0	1,225	1	*	*	75
139	477,24	0,75	0,24	280	1,225	1	*	*	75
140	462,54	1,05	0,24	300	1,225	1	*	*	75
141	456,82	0,52	0,24	300	1,225	1	*	*	75
142	417,66	2,176	0,24	0	1,225	1	*	*	75
143	376,32	2,176	0,24	0	1,225	1	*	*	75
144	361,09	2,176	0,24	0	1,225	1	*	*	75
145	358,69	0,48	0,24	340	1,225	1	*	*	75
146	352,25	0,46	0,24	300	1,225	1	*	*	75
147	344,45	0,52	0,24	310	1,225	1	*	*	75
148	316,96	1,964	0,24	0	1,225	1	*	*	75
149	312,16	0,6	0,24	300	1,225	1	*	*	75
150	302,16	1	0,24	400	1,225	1	*	*	75
151	291,47	1,069	0,24	0	1,225	1	*	*	95
152	290,75	0,36	0,24	300	1,225	1	*	*	95
153	282,35	0,6	0,24	330	1,225	1	*	*	95
154	273,63	2,908	0,24	0	1,225	1	*	*	95
155	250,36	2,908	0,24	0	1,225	1	*	*	95
156	248,36	0,4	0,24	300	1,225	1	*	*	95
157	224,05	2,026	0,24	0	1,225	1	*	*	95
158	205,82	2,026	0,24	0	1,225	1	*	*	95
159	183,54	2,026	0,24	0	1,225	1	*	*	95
160	178,78	0,595	0,24	360	1,225	1	*	*	95
161	168,88	0,495	0,24	300	1,225	1	*	*	95
162	173,83	0,495	0,24	450	1,225	1	*	*	95
163	160,09	1,963	0,24	0	1,225	1	*	*	95
164	168,84	0,515	0,24	275	1,225	1	*	*	95
165	156,86	2,397	0,24	0	1,225	1	*	*	95
166	120,91	2,397	0,24	0	1,225	1	*	*	95
167	113,89	0,54	0,24	390	1,225	1	*	*	95
168	103,99	0,66	0,24	400	1,225	1	*	*	95
169	102,19	0,36	0,24	470	1,225	1	*	*	95
170	80,58	1,964	0,24	0	1,225	1	*	*	95
171	64,87	1,964	0,24	0	1,225	1	*	*	95
172	51,52	1,908	0,24	0	1,225	1	*	*	70
173	24,81	1,908	0,24	0	1,225	1	*	*	70
174	24,68	0,016	0,24	0	1,225	1	*	*	70
175	22,06	0,525	0,24	300	1,225	1	*	*	70
176	16,06	0,5	0,24	300	1,225	1	*	*	70

Tabla 15. Características ruta Zaragoza-Sagunto. Fuente: Elaboración propia.

8.9 VAGÓN TIPO PLATAFORMA TIPO MA5

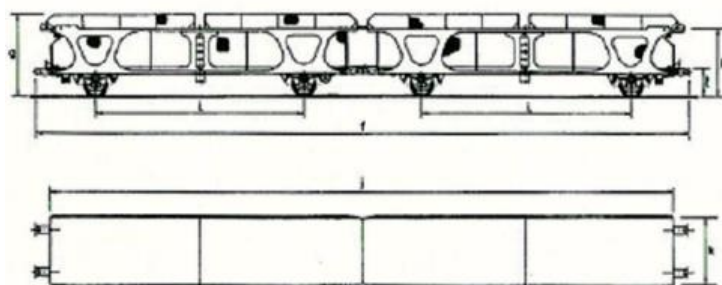
Plataforma

Porta-automóviles dos pisos

Serie Internacional: Laaes
Tipo: MA5



Numeración	Nacional MA	469.000 a 469.175 469.500
	Internacional	22714352086-3 a 110-1 26714352001-8 a 109-9 26714370000-8 4174352055-5 a 065-4 45714352039-5 a 094-0
Características Generales		
Carga Máxima t	21,5/22,0(#)	
Tara Media t	27,7	
Peso por Eje t	12,3	
Freno	Aire Comprimido	
Velocidad km/h	100	
Long. entre Topes m (f)	27,0	
Altura Máxima m (g)	3,61	
Altura Pasarelas m (l)	1,22/2,81	
Empate m (i)	8,62	
Dimensiones interiores		
Largo Piso Inf. m (j.)	25,68	
Largo Piso Sup. m (j.)	26,52	
Ancho m.(k)	2,75	
Altura Piso m.(h)	1,22	
Otras Características		
Piso	Mixto	
Piso Superior Móvil	En 20%	
Año de Construcción	1.995	



Aplicaciones Comerciales

Transporte de automóviles

Vagones Alternativos

MA, MA1, MA5, MA6 y MMA.

Observaciones

Fijación autos: mediante calces.

Protegido con malla lateral entre piso inferior-superior.

(*): Proceden de dos vagones J2.

(#): El segundo valor corresponde a 69 vagones, integrados pero dispersos dentro de la numeración reseñada, de un parque total de 177 vagones MA5, existentes en Mayo 2007.

renfe
Mercancías

Fig 38. Vagón tipo plataforma Tipo MA5. Fuente: [13].