



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN SISTEMAS FERROVIARIOS

ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DINÁMICA DE GENERACIÓN DE UNA MALLA DE TRÁFICO

Autor: Jaime Porro Granados

Director: Eduardo Pilo de la Fuente

Madrid

Julio, 2016

FICHA TÉCNICA

Autor: Porro Granados, Jaime

Director del Trabajo: Pilo de la Fuente, Eduardo

Programa cursado: Máster Universitario en Ingeniería Industrial y Master Universitario en Sistemas Ferroviarios

Curso: 2º

Título del Trabajo Fin de Máster:

Análisis de la capacidad dinámica de generación de una malla de tráfico.

Resumen:

En primer lugar, se desarrolla un simulador de conducción ferroviaria que sea capaz de cuantificar la potencia total consumida por el tren y diferenciar entre si es consumida o regenerada. Para el desarrollo del simulador se crea un caso ejemplo sencillo que permita detectar los posibles errores que haya de forma fácil. El simulador permite calcular las variables de estado del tren a lo largo del trayecto, siendo estas la velocidad, aceleración, tiempo y fuerza de tracción. El simulador es de paso discreto, siendo un proceso iterativo. Parte de los datos de entrada: datos de vía y datos del tren.

Una vez cargados los datos de partida, se calcula la curva de frenado límite del tren. Tras esto, se calcula la conducción del tren dependiendo del modo de conducción (tracción, frenado, deriva) en cada punto del trayecto. Por último, se calcula potencia total, así como la regenerada.

En segundo lugar, se analiza un trayecto real, en este caso la línea de alta velocidad Madrid-Calatayud, para verificar que el simulador funciona correctamente en una línea real. Se analiza los resultados que se obtienen con la simulación.

Aunque fuera del alcance de este proyecto, el simulador desarrollado permitiría cuantificar la potencia consumida en una línea, lo que podría utilizarse para el diseño de la electrificación. Otra utilidad que tiene el simulador sería el diseño de marchas del tren con conducciones diferentes y el estudio de cómo afectan al tiempo de viaje y a los perfiles de potencia.

Autor: Jaime Porro Granados

Firma:



Director: Eduardo Pilo de la Fuente

Firma:



MEMORIA

ÍNDICE

MEMORIA.....	3
Capítulo 1 Descripción.....	6
1. Introducción	7
1.1. Sistema eléctrico de potencia	7
1.1.1. Control tensión-potencia reactiva.....	8
1.1.2. Control frecuencia-potencia activa.....	9
1.1.3. Servicios de ajustes del sistema.....	10
1.2. Objeto del proyecto	11
2. Resumen.....	12
Capítulo 2 Memoria Trabajo Fin de Máster	14
1. Objetivos	15
2. Tareas	15
3. Planificación.....	15
4. Simulador de conducción.....	16
4.1. Datos de entrada.....	16
4.1.1. Datos de vía.....	16
4.1.2. Datos del tren.....	17
4.2. Metodología	18
4.2.1. Dinámica.....	18
4.2.2. Cinemática.....	20
4.3. Datos caso ejemplo.....	21
4.4. Curva de frenado.....	24
4.5. Modos de conducción.....	25
4.5.1. Tracción.....	26
4.5.2. Frenado	28
4.5.3. Deriva.....	29
4.6. Resultados	30
4.6.1. Potencia y energía	32
5. Estudio línea Madrid-Calatayud	35
5.1. Datos del caso	35
5.2. Curva de frenado	37
5.3. Conducción	37
5.3.1. Análisis de potencia y energía.....	40
6. Conclusiones.....	42

7. Aportaciones	43
Bibliografía	44

Capítulo 1

Descripción

1. Introducción

Los sistemas de transporte son los principales consumidores de energía en España, llegando a alcanzar el 39% de la energía consumida. Esto provoca que el transporte sea el principal emisor de CO₂. Estos datos demuestran que el modelo de transporte no es sostenible desde el punto de vista energético y ambiental.

Actualmente se intenta aumentar el transporte mediante ferrocarriles eléctricos, intentado disminuir el uso de avión y coche. Con esto lo que se pretende disminuir el consumo de derivados del petróleo. Hay que tener en cuenta que aproximadamente el 70% de la energía eléctrica generada en España proviene de fuentes no renovables, pero con el auge de las renovables esto se verá reducido con el paso de los años.

El aumento de uso del transporte ferroviario eléctrico se intenta promover con la creación de nuevas líneas, principalmente de alta velocidad y cercanías. La demanda de electricidad por parte de las líneas ferroviarias aumentará con la creación de estas nuevas líneas.

Los sistemas de energía eléctrica tienen que ser capaz de asegurar el suministro de la energía forma segura y estable. En el siguiente apartado se explica cómo funciona el sistema eléctrico.

1.1. Sistema eléctrico de potencia

La energía eléctrica se obtiene en las centrales eléctricas a partir de fuentes de energía renovables (solar, eólica, hidráulica, etc.) o de fuentes no renovables (nuclear, carbón, etc.).

Una vez generada, la tensión se eleva en las subestaciones elevadoras, para que las pérdidas sean menores durante el transporte de la electricidad. Para una potencia fija, al subir la tensión se baja la intensidad, y como las pérdidas dependen del cuadrado de la intensidad, se consigue disminuir las pérdidas.

Tras el transporte, la tensión se vuelve a bajar, mediante varias etapas, en las subestaciones transformadoras y se distribuye a los diferentes consumidores. Dependiendo del valor de la tensión, se suele diferenciar entre red de distribución (3-30 KV) y red de reparto (25-132 KV). Si los consumidores son de baja tensión, como son las viviendas (230/400V), es necesario volver a disminuir la tensión mediante los centros de transformación.

El proceso explicado se muestra en la siguiente figura:

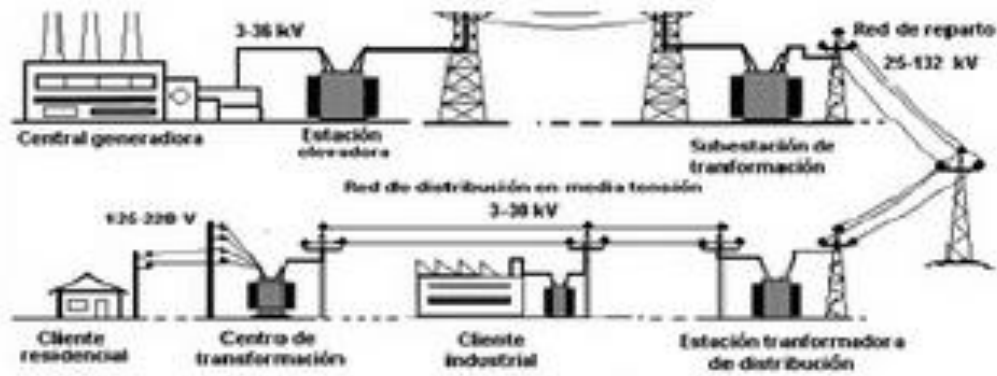


Figura 1. Red eléctrica

Los sistemas eléctricos de potencia tienen dos esquemas de control para la seguridad y estabilidad de la red: control tensión-potencia reactiva (control V-Q) y el control frecuencia-potencia activa (control f-P).

1.1.1. Control tensión-potencia reactiva

En el sistema eléctrico es necesario controlar el perfil de tensión por razones de seguridad de los diferentes equipos y para garantizar la transferencia de potencia durante el transporte.

La tensión en los diferentes nudos del sistema no debe variar mucho del valor nominal. El margen de variación que se permite en condiciones normales de funcionamiento depende del tipo de red. Las razones para mantenerlo son: optimizar el funcionamiento de los equipos, evitar tensiones bajas ya que producen sobrecalentamiento en los motores, evitar tensiones altas ya que pueden provocar problemas en el aislamiento y que un valor adecuado de tensión minimiza el flujo de reactiva por la red y las pérdidas producidas en el sistema.

El control de la tensión está vinculado principalmente al flujo de potencia reactiva. Para poder controlar la tensión se instalan equipos que generen y/o absorban potencia reactiva a lo largo del sistema. Los diferentes equipos que modifican el flujo potencia reactiva son los siguientes:

- Compensador síncrono: la reactiva depende de la intensidad de excitación. El problema que presentan es que al ser una máquina rotativa tiene un elevado coste de operación y mantenimiento.
- Batería de condensadores: en paralelo a la línea; generan potencia reactiva.
- Reactancias: en paralelo a la línea; consumen potencia reactiva
- Transformadores con tomas: este tipo de transformador siempre consume potencia reactiva, pero permiten el paso de reactiva de un lado al otro.
- Línea transporte: cuando la potencia por la línea es menor a la potencia característica, se genera potencia reactiva, mientras que si es mayor, se absorbe reactiva.

- Condensadores en serie: son los elementos más económicos por todas las prestaciones que ofrece. Reduce la reactancia de la línea, aumenta la potencia que se puede transferir, mejora la estabilidad del sistema y reduce las pérdidas.
- Equipos SVC: son equipos electrónicos que permiten variar entre el uso de batería de condensadores o reactancias según la necesidad.
- Deslaste de demanda: es la solución extrema y solo se debe usar en caso de colapso de la red por baja tensión.

En el control V-Q existen tres lazos de control. Son los siguientes:

- Control primario.
 - o Acción directa sobre los equipos de generación de reactiva en función de la tensión.
 - o Control automático o manual.
 - o Tarda en actuar entre 5-10 segundos.
- Control secundario.
 - o Señales a equipos de generación de reactiva en función de la tensión de un nudo piloto.
 - o Control automático o manual.
- Control terciario.
 - o Coordinación centralizada de los diferentes nudos pilotos del sistema.
 - o Manual con apoyo de herramientas de análisis.

1.1.2. Control frecuencia-potencia activa

La misión principal del sistema eléctrico es mantener la potencia generada igual a la demanda ($P=D$). En caso de que se produzca un cambio en la demanda se produce una variación de la velocidad en las máquinas síncronas generadoras, y en consecuencia, una variación en la frecuencia eléctrica. Para garantizar el equilibrio es necesaria una actuación muy rápida a través de sistemas de control automático. Además, como la demanda varía mucho en función de la demanda del usuario, es necesario que existan reservas de potencia para subir o bajar según se necesite.

El equipo encargado de realizar el control f-P en un sistema eléctrico es el generador síncrono. En la figura 2 se muestra un esquema de un generador síncrono.

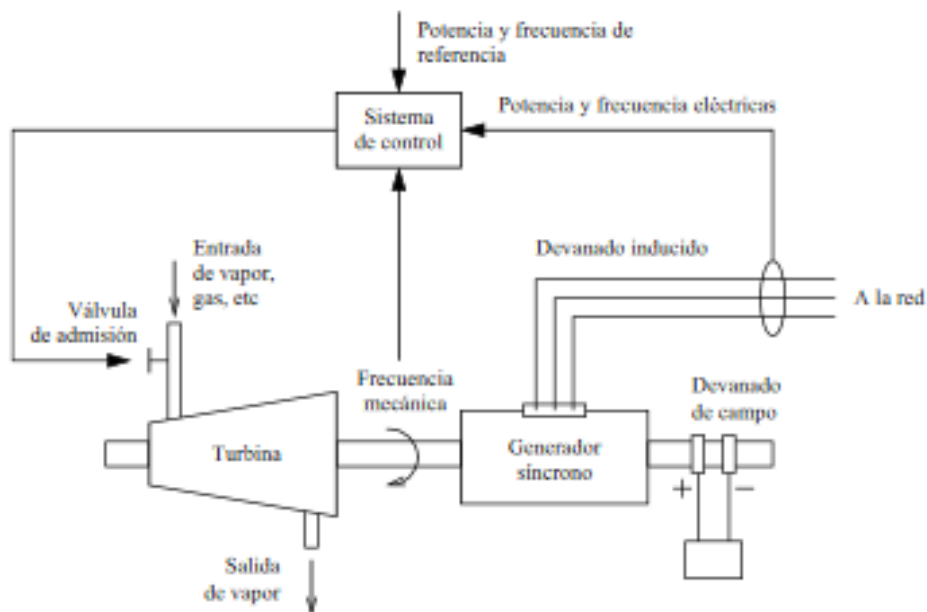


Figura 2. Esquema generador síncrono

Las variables usadas para el sistema de control son la potencia y frecuencia de referencia, que se comparan con los valores de la red. A través del sistema de control se manda la orden de aumentar o disminuir la potencia, que se regula a través de la válvula de admisión.

Los objetivos del control f-P son:

- Mantener el equilibrio entre potencia generada y demanda.
- Mantener la frecuencia de referencia en el sistema.
- Cumplir los compromisos de intercambio de energía con las zonas vecinas.
- Mantener la suficiente reserva de potencia.

Para cumplir con estos objetivos, el lazo de control tiene tres niveles. Cada uno de estos tiene una constante de tiempo diferente y se centra en distintos aspectos. Los tres niveles son: regulación primaria, regulación secundaria y regulación terciaria.

1.1.3. Servicios de ajustes del sistema

Existen tres servicios de ajuste del sistema: solución de restricciones técnicas, servicios complementarios y gestión de desvíos.

1.1.3.1. Solución de restricciones técnicas

El objetivo de este servicio de ajuste es resolver las restricciones técnicas del sistema, limitando y modificando los programas de producción de las unidades de generación y de consumo de bombeo que resuelven las restricciones técnicas que tienen el menor coste para el sistema. También se encarga del reequilibrio de generación y demanda para compensar las modificaciones realizadas.

1.1.3.2. *Servicios complementarios*

Los servicios complementarios necesitan que haya un Operador del Sistema y producen un aumento en el precio de la electricidad. Los servicios complementarios son:

- Reserva de potencia adicional a subir: tiene carácter potestativo y se gestiona mediante mecanismos de mercados. Su objetivo es proporcionar al sistema eléctrico de la suficiente reserva de potencia a subir, teniendo en cuenta la previsión de demanda.
- Regulación secundaria: servicio con carácter potestativo que tiene por objeto mantener el equilibrio de generación y consumo, y corregir las desviaciones de la frecuencia del sistema. El tiempo de actuación va desde los 20 segundos hasta los 15 minutos. Este mecanismo es retribuido mediante mecanismos de mercado.
- Regulación terciaria: también posee carácter potestativo y oferta obligatoria gestionada y retribuido mediante mecanismos de mercado. Su objetivo es resolver los desvíos entre generación y consumo y restituir la reserva de regulación secundaria. Se define como la variación máxima de potencia que puede efectuar una unidad de producción en un tiempo máximo de 15 minutos, y que puede ser mantenida como mínimo 2 horas.

1.1.3.3. *Gestión de desvíos*

Es un servicio de potestativo gestionado y retribuido mediante mecanismos de mercado. Tiene por objetivo resolver los desvíos entre generación y demanda que se identifican después del cierre de cada sesión del mercado intradiario y hasta el inicio del horizonte de efectividad de la siguiente sesión. Al ser un servicio potestativo es necesario que sea controlado por un Operador del Sistema.

1.2. **Objeto del proyecto**

Como se ha visto, el sistema eléctrico necesita sistemas de control para mantener la seguridad y estabilidad del sistema. Estos sistemas de control se basan en la potencia, por lo que el consumo de potencia de un sistema ferroviario afecta.

El objetivo principal del proyecto en su totalidad (Trabajo Fin de Máster y Ampliación) es realizar un análisis para ver si en cualquier instante el sistema ferroviario es capaz de reducir su potencia consumida, en caso de que el sistema eléctrico lo necesite. El sistema ferroviario ofrece un servicio complementario.

El análisis se basa en una malla de tráfico con circulaciones de los trenes a mínimo tiempo de marcha. A partir de la malla, se conoce la potencia total consumida en cada instante por el conjunto de los trenes, además del tiempo de circulación. Para estudiar si es posible disminuir la potencia en todo instante, se varía el modo de conducción de uno o varios trenes de tal manera que consuman menos potencia, pero siempre respetando el tiempo máximo de trayecto. Según la norma UIC 451-1, al tren circulando a tiempo mínimo se le permite un margen de tiempo por

posibles retrasos que pueda sufrir el tren. El margen de tiempo se aplica a tramos entre estaciones con parada.

En definitiva, lo que se persigue es maximizar el mínimo entre la diferencia de potencia de la malla de referencia y la malla cambiando los modos de conducción.

2. Resumen

El objetivo del proyecto, como ya se ha dicho, es el análisis para ver si es posible reducir el consumo de potencia total de una malla en cada instante, a cambio de aumentar el tiempo de trayecto, pero siempre respetando el límite fijado por la UIC 451-1.

Para alcanzar el objetivo es necesario la realización de diferentes tareas que se resumen a continuación. Se va a diferenciar entre Trabajo Fin de Máster y Ampliación.

Trabajo Fin de Máster

En primer lugar, se desarrolla un simulador de conducción ferroviaria que sea capaz de cuantificar la potencia total consumida por el tren y diferenciar entre si es consumida o regenerada. Para el desarrollo del simulador se crea un caso ejemplo sencillo que permita detectar los posibles errores que haya de forma fácil.

El simulador es de paso discreto, donde se usa como paso el espacio recorrido, siendo un proceso iterativo. El simulador parte de los datos de entrada: datos de vía y datos del tren. A continuación calcula la curva de frenado límite del tren. Tras esto, calcula la conducción del tren dependiendo el modo de conducción (tracción, frenado, deriva), la potencia consumida y la energía.

En segundo lugar, se analiza un trayecto real, en este caso la línea de alta velocidad Madrid-Calatayud, para verificar que el simulador funciona correctamente.

Ampliación de Trabajo Fin de Máster

Una vez que se ha verificado el simulador y se ha resuelto el trayecto de la línea Madrid-Calatayud, se procede a calcular la malla de este. Para obtener la malla de ida solo hay que usar los datos de la simulación y desplazarlos en el tiempo, según sea el instante de tiempo de salida del siguiente tren. Para la malla completa, es necesario resolver la conducción en sentido inverso y realizar la malla de vuelta. Una vez se tienen las dos, se juntan.

La siguiente tarea a realizar es la realización de un generador casos con los que el tren disminuiría su consumo de potencia a cambio de aumentar el tiempo de trayecto. Los casos que han generado son:

- Limitar la velocidad la velocidad en algunas partes del trayecto. Con esto se consigue que si el tren iba a una velocidad mayor, se ve obligado a frenar, regenerando potencia, por lo que deja de consumir y esa potencia puede ser absorbida por otro o devuelta a la red. En caso de estar el tren acelerando, si se baja la velocidad que debe alcanzar el tren, este disminuye la cantidad de potencia consumida durante la aceleración.
- Deriva. Si al tren se le fuerza a ir en deriva durante una zona, el consumo de potencia sería nulo, ya que en deriva el tren no absorbe potencia de la red.
- Frenado más suave. Al realizar frenados más suaves, el tren está regenerando potencia durante más tiempo. Esto es útil para zonas de la malla en las que otro tren este traccionando, ya que se consigue que la potencia la obtenga del tren que está frenando en vez de obtenerla de la red.

Una vez que se tienen los casos, se busca el óptimo de las conducciones de la malla. Para ello, se busca maximizar el mínimo de la diferencia de potencia de la malla de referencia y la malla cambiando los modos de conducción. Al final lo que se busca es que esta diferencia sea positiva en todo instante, lo que significa que el consumo de potencia es menor.

Capítulo 2

Memoria Trabajo Fin de Máster

1. Objetivos

El Trabajo de Fin de Máster tiene dos objetivos principales. Son los siguientes:

- Desarrollar un simulador de conducción ferroviaria que sea capaz de medir la potencia que es capaz de regenerar un tren durante su recorrido.
- Estudiar una conducción real de la línea de Alta Velocidad Madrid-Calatayud mediante el simulador de conducción previamente desarrollado.

2. Tareas

Las tareas que se han ido realizando durante el proyecto para lograr los objetivos previamente definidos son las siguientes:

- Creación de un caso ejemplo con datos de vía sencillos para facilitar el desarrollo del simulador de conducción.
- El desarrollo del simulador se ha hecho en dos partes: en primer lugar se obtiene la curva de frenado límite, y en segundo lugar se realiza la conducción a lo largo del trayecto seleccionando el modo de conducción (tracción, frenado o deriva).
- Una vez finalizado el simulador de conducción, se realiza el estudio de la línea Madrid-Calatayud.

3. Planificación

La planificación que se ha llevado a cabo a lo largo del proyecto es la que se muestra en la siguiente tabla:

	Marzo		Abril		Mayo		Junio	
	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
Desarrollo del simulador de un tren	■							
Desarrollo de generador de conducciones		■	■					
Estudio de conducciones de un tren en Madrid-Calatayud			■	■				
Desarrollo de simulador de mallas					■	■		
Estudio de malla en Mad-Bcn						■	■	
Memoria							■	■

Los objetivos que aparecen en amarillos son lo que corresponden al Trabajo Fin de Máster. Los otros pertenecen a la Ampliación del Trabajo Fin de Máster.

4. Simulador de conducción

El simulador de conducción tiene como objetivo simular el trayecto de un tren en el tiempo mínimo de desplazamiento (MTD), pero respetando siempre los diferentes límites que haya, tanto del tren como de la vía.

Una vez realizada la simulación, se pueden cuantificar las diferentes variables de estado que afectan a la circulación, como la velocidad, potencia, aceleración, etc.

El simulador se puede dividir en tres fases: datos de entrada, curva de frenado y conducción, tal y como se muestra en la figura 3.

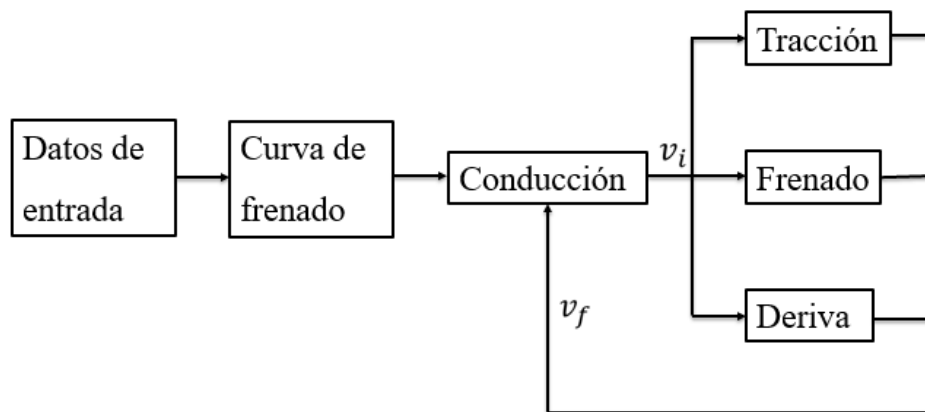


Figura 3. Proceso de simulación

La simulación se realiza de manera discreta, siendo un proceso iterativo en el que en cada paso se recalculan las diferentes variables de estado.

En los siguientes apartados se va a ir explicando cada una de las etapas del proceso de simulación, además de la metodología de resolución para la curva de frenado y los diferentes modos de conducción.

4.1. Datos de entrada

Los datos de entrada son aquellos de los que parte el simulador para los diferentes cálculos a lo largo del trayecto. Hay dos conjuntos de datos de entrada de los que parte el simulador: datos de vía y datos del tren. Además de esto, es necesario conocer el paso de simulación.

4.1.1. Datos de vía

Los datos de vía son aquellos por los que va caracterizado el trayecto. Son los siguientes:

- Longitud de vía: es la longitud total del trayecto que debe recorrer el tren. Va desde la estación de origen hasta la de fin de trayecto.

- Estaciones: son las diferentes estaciones intermedias que hay en el trayecto, y donde el tren debe estacionar. Se define a través del punto kilométrico en el que se encuentra la estación.
- Perfil: el perfil de la vía es necesario conocerlo para saber los valores de las diferentes pendientes o rampas que hay a lo largo del trayecto, ya que están producen una fuerza que afecta a la conducción del tren. Viene definido por el punto kilométrico en el que comienza la pendiente o rampa, y por su valor de esta.
- Curvas: es un dato imprescindible a la hora de simular la conducción del tren, ya que en estas se crea un esfuerzo que se opone al movimiento del tren. Vienen definidas por el punto kilométrico y el radio de curvatura.
- Límites de velocidad: son los límites de velocidad que por ningún motivo el tren puede superar. Es necesario conocer la velocidad máxima en todos los puntos del recorrido. Vienen definidas por el punto kilométrico y por la velocidad.
- Límites de velocidad temporales: son aquellos límites de velocidad que están puestos de manera provisional. A diferencia de los otros límites de velocidad, este viene definido por el punto kilométrico inicial y final de la limitación, y por el valor de velocidad que no se puede superar.
- Túneles: es necesario conocer donde hay túneles, ya que afectan a la componente cuadrática de la resistencia al avance. Vienen definidos por el punto kilométrico inicial donde y por un factor que se debe tener en cuenta en la resistencia al avance.
- Zonas neutras: son aquellas zonas donde el tren no puede absorber electricidad a través de la catenaria, por lo que la fuerza de tracción es nula. Vienen definidas por el punto kilométrico inicial y final.
- Tiempo parada: es el tiempo que debe estar el tren estacionado en las estaciones intermedias en las que pare.

4.1.2. Datos del tren

Estos datos son los que caracterizan al tren y son diferentes para cada modelo. Los datos del tren usados son los siguientes:

- Masa: es la masa del tren en su totalidad. Es necesaria conocerla para las fuerzas que se originan debido al peso del tren.
- Longitud del tren: es la longitud total de la composición. Para este simulador no se tiene en cuenta, ya que se trata al tren como una masa puntual.
- Resistencia al avance: la resistencia al avance depende de la velocidad que lleva el tren y de tres parámetros (a, b, c). Estos tres parámetros vienen definidos por el tren y son constantes a lo largo del trayecto.

- Consumos auxiliares: es el consumo de potencia de eléctrica por parte de los equipos auxiliares de a bordo.
- Aceleración máxima: es la aceleración máxima que no debe superar el tren, tanto en tracción como en frenado.
- Rendimiento: es el rendimiento que existe al transformar la energía eléctrica en mecánica o la mecánica en eléctrica en caso de frenado regenerativo.
- Curvas de tracción y frenado eléctrico: el esfuerzo máximo de tracción y frenado vienen definido por estas curvas que dependen de la velocidad.
- Coefficiente de masas de inercia: este coeficiente se tiene en cuenta debido a las masas rodantes del tren.
- Factor de potencia: a través de la simulación se obtiene la potencia activa consumida por el tren. El factor de potencia es necesario para conocer la potencia aparente que se obtiene de la red.

4.2. Metodología

En primer lugar, hay que conocer las diferentes simplificaciones que se han realizado para la simulación:

- El tren se trata como una masa puntual, por lo que no se ve afectado por la longitud de este.
- No existen curvas de transición (parábolas) para los cambios de perfil de la vía.
- Los cambios de recta a curva se producen bruscamente, es decir, no se tienen en cuenta las curvas de transición (clotoide).
- Se permite al tren hacer cambios bruscos de aceleración.

Estas simplificaciones afectarían a la seguridad y al confort en una conducción real, pero para una simulación como esta, se pueden hacer ya que no generan grandes cambios a las variables de estado.

En segundo lugar, se debe conocer que la simulación se realiza por paso discreto. De un punto de cálculo al siguiente se pasa a través del paso de simulación. El paso es de espacio y se puede ajustar. Con los datos de cálculo obtenidos en un punto, se puede pasar al siguiente, produciéndose así un proceso iterativo.

4.2.1. Dinámica

Es bien conocido que para el cambio de velocidad en un cuerpo se necesita la presencia de la aceleración. Para que aparezca la aceleración es necesario que existe una fuerza neta diferente a cero, consiguiendo así que se produzca el cambio de velocidad. La ecuación que rige esto es la Segunda Ley de Newton:

$$\sum F = m \cdot a$$

En el caso de los ferrocarriles, esta ecuación queda:

$$F_t - F_p - F_c - F_r = m \cdot (1 + k) \cdot a \quad (1)$$

Dónde:

- F_t es la fuerza de tracción que realiza el tren, ya sea positiva o negativa según este traccione o frene [N].
- F_p es la componente del peso en el plano de movimiento del tren [N].
- F_c es la resistencia al avance que se produce debido a las curvas [N].
- F_r es la resistencia al avance producida por efecto del aire y de los rozamientos internos del tren [N].
- m es la masa del tren [Kg].
- k es el factor de inercia debido a las masas rodantes del tren [-].
- a es la aceleración del tren [m/s^2].

La fuerza de tracción máxima depende de la velocidad. Cada tren posee una curva tracción-velocidad a partir de la cual se obtiene la fuerza de tracción. Un ejemplo de este tipo de curva se muestra en la figura 4.

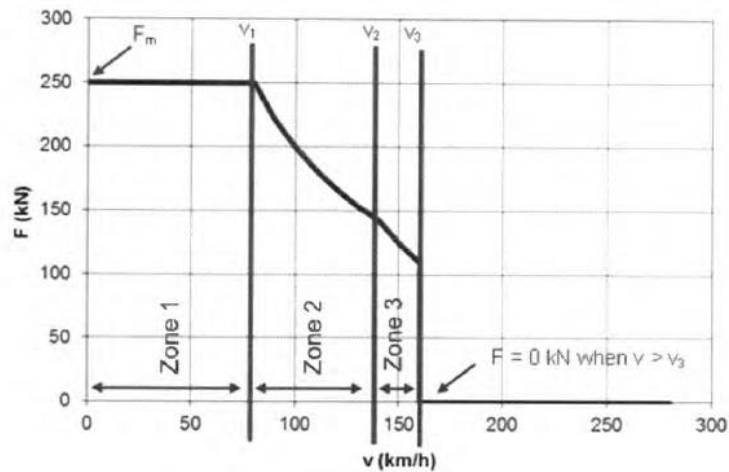


Figura 4. Ejemplo curva F-v

En el caso de los datos del tren usado, no se conocen las ecuaciones que rigen la curva tracción-velocidad del tren utilizado. Lo que se conoce son puntos de esta curva, por lo que en los casos en los que la velocidad que lleva el tren no corresponde con ninguno de los puntos, la fuerza de tracción se obtiene interpolando.

Como se ha visto en la ecuación (1), existen tres fuerzas que se oponen al movimiento del tren (la del peso puede favorecerlo en caso de estar en pendiente). Estas tres fuerzas dependen de diferentes parámetros como se muestra a continuación:

- Fuerza debido al perfil de vía (F_p):

$$F_p = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

Donde:

- o m es la masa del tren [Kg].
- o g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).
- o α es el ángulo que forma el plano de la vía con el plano horizontal. Es positivo en rampas y negativo en pendientes.

- La fuerza debido a las curvas (F_c) se aproxima por la siguiente ecuación empírica:

$$F_c = m \cdot \frac{D}{1000 \cdot r} \quad (3)$$

Donde:

- o m es la masa del tren [Kg]
- o D es una constante empírica que toma valores entre 500 y 1200 [m²/s²]. En el caso de la simulación se considera un valor de 1000.
- o r es el radio de la curva [m].

- La fuerza de resistencia al avance (F_r):

$$F_r = a + b \cdot v + k \cdot c \cdot v^2 \quad (4)$$

Donde:

- o a, b y c son coeficientes que dependen del aerodinamismo del tren.
- o k modela el efecto por el paso de túneles [-].
- o v es la velocidad que lleva el tren [m/s].

4.2.2. Cinemática

El movimiento del tren a lo largo del trayecto es el de un cuerpo uniformemente acelerado, por lo que la resolución de la cinemática es mediante las ecuaciones tradicionales de este tipo de movimiento.

Las dos ecuaciones que se utilizan son las siguientes:

$$V_f^2 - V_i^2 = 2 \cdot a \cdot s \quad (5)$$

$$V_f = V_o + a \cdot t \quad (6)$$

Donde:

- V_f es la velocidad final del paso de simulación [m/s].
- V_i es la velocidad inicial del paso de simulación [m/s].
- a es la aceleración del tren [m/s²].
- t es el tiempo que tarda el tren en recorrer el paso simulado [s].
- s es el paso de simulación [m].

A partir de estas ecuaciones junto con la ecuación (1) se consigue resolver el movimiento del tren durante el paso de simulación. El proceso a la hora de resolver el movimiento varía dependiendo del punto en el que se encuentre el tren, de la velocidad a la que circule y del modo de conducción del tren. Todo esto se desarrolla en el apartado de conducción.

4.3. Datos caso ejemplo

El paso de simulación usado es de 100 metros. A continuación se muestran los datos de vía y el tren usado para el caso ejemplo.

Datos de vía

- Tiempo estacionamiento en parada: 300s
- Longitud: 80 Km
- Velocidad máxima:

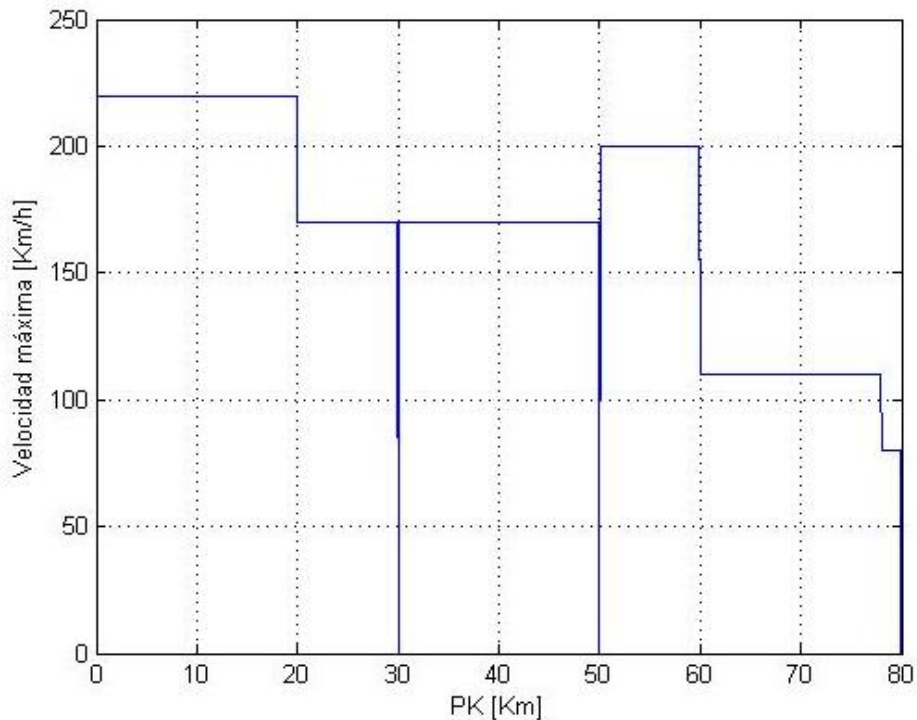


Figura 5. Perfil velocidad máxima

- Perfil:

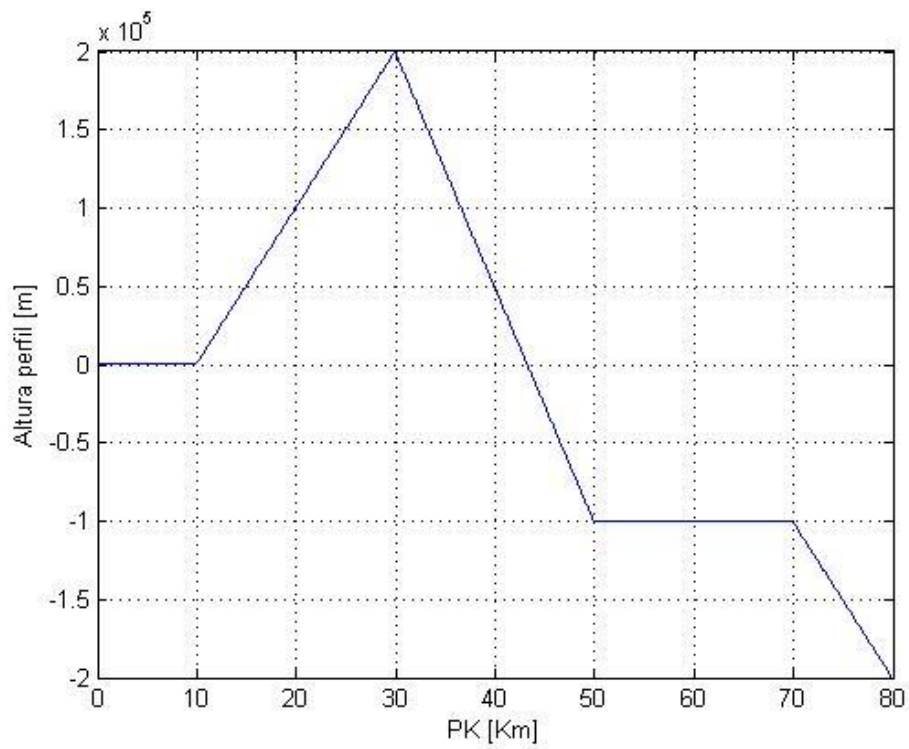


Figura 6. Cambio de perfil

- Radio de curvatura:

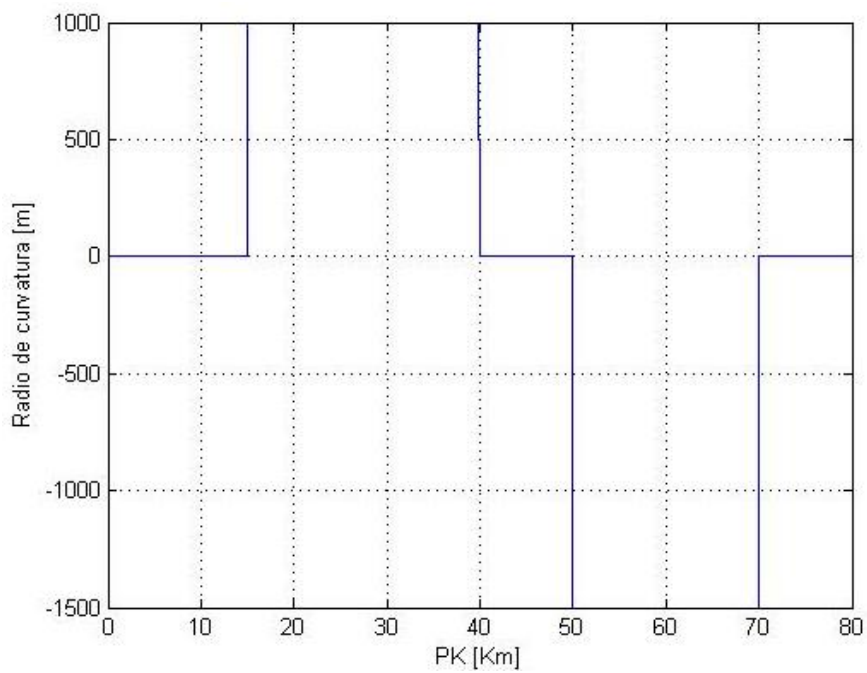


Figura 7. Radio de curvatura

- Estaciones intermedias:

PK [Km]
30
50

- Zona neutra:

PK inicial [Km]	PK final [Km]
10	10,5
35	35,5

Datos del tren

- Masa: 500000 Kg
- Coeficientes de resistencia al avance: $a=2700$; $b=118.8$; $c=7.5168$
- Rendimiento: 90%
- Consumo servicio auxiliares: 1000 KW
- Factor de potencia: 0.95
- Aceleración máxima: 0.7
- Curva tracción y frenado:

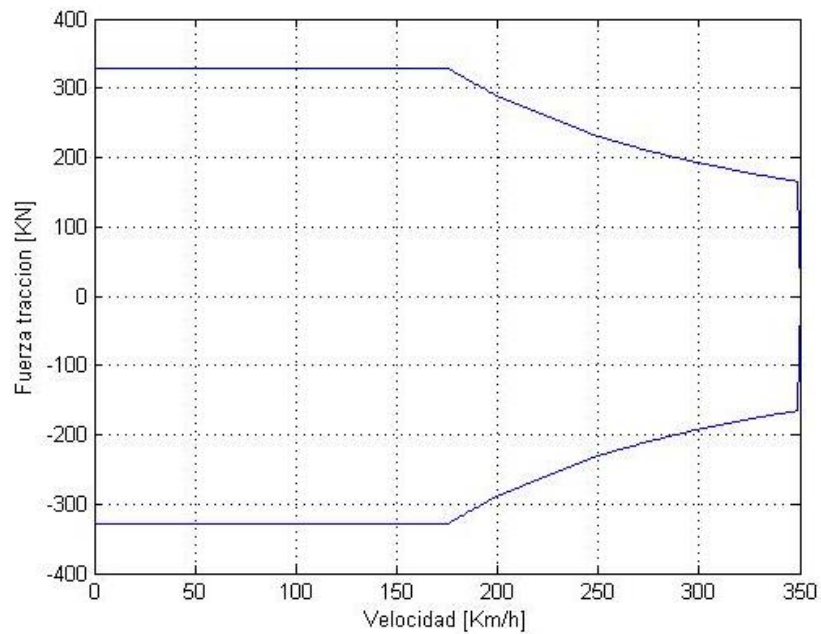


Figura 8. Curvas de tracción y frenado máximo

- Factor inercia masas rodantes: 0.1

4.4. Curva de frenado

Antes de explicar el proceso de cálculo de la curva de frenado hay que saber que el freno que utiliza el tren es freno eléctrico regenerativo siempre que se consiga el frenado deseado.

El tipo de frenado que se utiliza en la simulación difiere de lo común. Lo habitual es frenar a aceleración constante, pero en este simulador el frenado es a potencia constante hasta alcanzar una velocidad umbral donde ya se procede al frenado con aceleración constante. Con este método se consigue cuantificar la potencia de una manera más sencilla, lo cual será muy útil para los objetivos de la Ampliación del Trabajo Fin de Máster.

Para la curva de tracción de frenado que se tiene del tren de la simulación, se obtiene que el frenado a potencia constante es de 16MW y la velocidad umbral a la que se empezará a frenar con aceleración constante es 176 Km/h, tal y como se muestra en la figura 9.

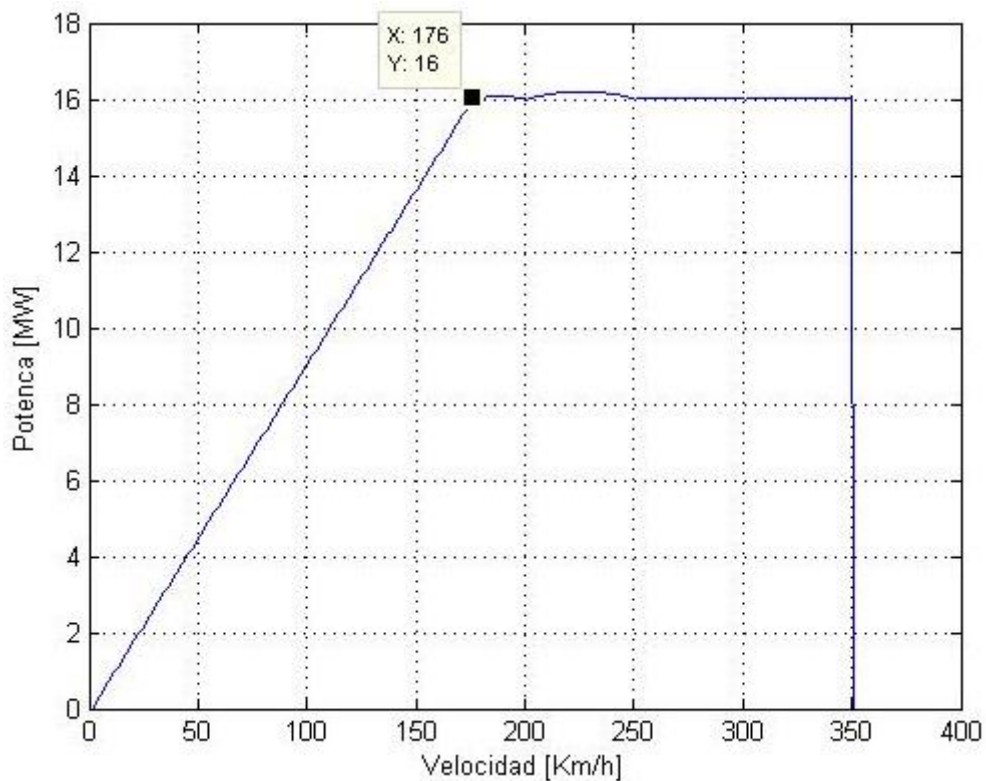


Figura 9. Potencia de frenado constante

Una vez conocidos los diferentes datos de entradas, el simulador procede a calcular la curva de frenado límite.

Para obtener esta curva, el simulador recorre el trayecto en sentido opuesto a la marcha y detecta las zonas donde existe un cambio de velocidad máxima, pero sólo la tiene en cuenta si la velocidad máxima aumenta. Si esto ocurre, significa una reducción en sentido de la marcha, por lo que será una zona en la que el tren tendrá que frenar.

Una vez que se encuentra en un punto donde existe el cambio de límite de velocidad, se simula la marcha como si el tren estuviese en modo tracción, pero como si fuese en sentido inverso al que circularía el tren. El proceso de cálculo del movimiento del tren es a través de las ecuaciones de dinámica y cinemática explicadas en los apartados anteriores, que se desarrolla en el apartado de frenado (4.5.2). Hay que tener en cuenta que hay que cambiar el signo de la fuerza debida al perfil de la vía.

El resultado de la curva de frenado se muestra en la siguiente figura. Los datos con los que se ha simulado son los del caso ejemplo.

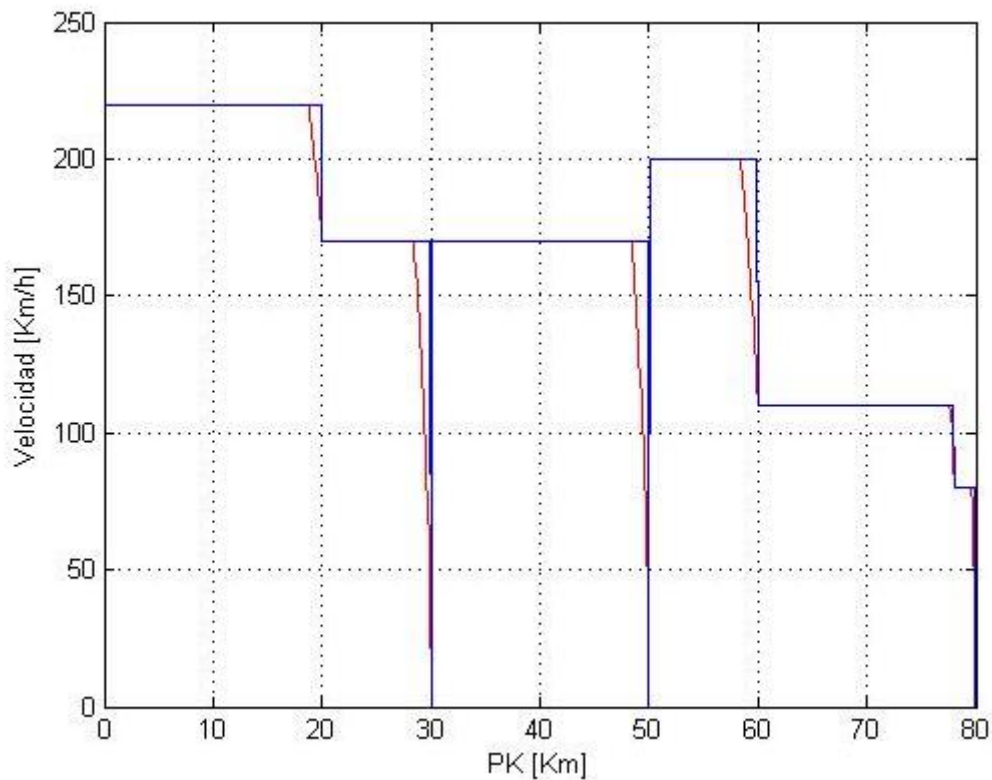


Figura 10. Curva de frenado caso ejemplo

En la figura se aprecia lo explicado anteriormente, para el cálculo de la curva de frenado solo se tienen en cuenta los cambios de velocidad que provocan que el tren tenga que frenar. Esto se produce cuando hay cambios de velocidad máxima y en los puntos con estaciones (kilómetro 30 y 50).

4.5. Modos de conducción

El proceso de simulación depende del tipo de conducción que use el tren en el paso de simulación en el que se encuentre. Existe tres tipos de conducciones: tracción, frenado o deriva. El objetivo de la simulación de conducción es obtener los valores de fuerza de tracción, velocidad, tiempo y aceleración en cada paso.

Sin necesidad de seleccionar el modo de conducción, el simulador conoce tres datos de los que parte y con los que es capaz de resolver el movimiento:

- Punto kilométrico en el que se encuentra el tren. Con esto es capaz de saber el valor de pendiente y el radio de la curva en caso de haber. Además sabe en la zona en la que se encuentra (túnel, zona neutra, etc.).
- Velocidad inicial en el paso de simulación. Este dato siempre es conocido, ya sea porque el tren se encuentra parado ($v=0$) o porque se calculó en el paso de simulación anterior.
- Espacio a recorrer. El espacio que recorre el tren es conocido, ya que es el paso de simulación.

Antes de seleccionar el modo de conducción, el simulador calcula la fuerza ocasionada por las curvas, la provocada por el perfil de la vía y la fuerza de resistencia al avance, ya que conoce los datos necesarios. Estos valores se obtienen a través de las ecuaciones (2), (3) y (4).

A continuación el simulador elige el modo de conducción a seguir según las siguientes condiciones:

- Deriva: además de los datos de entrada de vía y tren explicados en el apartado correspondiente, al simulador se le da el dato de kilómetro inicial y final en el que se quiera que conduzca a deriva.
- Frenado: como la curva de máximo frenado ha sido calculada previamente, si la velocidad inicial del paso de simulación supera a la de la curva de frenado en el paso siguiente, el simulador sabe que el tren debe frenar.
- Tracción: se selecciona este modo de conducción cuando el tren no está en zona de deriva ni necesita frenar.

En los siguientes tres apartados se va a explicar el método de resolución de la simulación del tren según el modo de conducción.

4.5.1. Tracción

La simulación resuelve el trayecto del tren siempre en el menor tiempo posible de viaje, por lo que la fuerza de tracción que da el tren siempre es la máxima posible, respetando siempre los límites.

La resolución del paso de simulación se realiza conociendo la fuerza de tracción disponible y mediante las ecuaciones (1), (5) y (6). El orden a la hora de calcular las variables de estado varía según la zona en la que se encuentre el tren, por lo que es necesario diferenciar tres casos:

- Zona neutra: en este caso, además de los datos ya conocidos, se sabe que la fuerza de tracción va a ser nula, por lo que el proceso de cálculo es:
 - o Fuerza de tracción: $F_t = 0$

- Aceleración: $a = \frac{\Sigma F}{m \cdot (1+k)}$
- Velocidad final: $V_f = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot s}$
- Tiempo: $t = \frac{V_f - V_0}{a}$

También puede ocurrir que debido a la pendiente, el tren aumente su velocidad en la zona neutra. Si esto ocurre y se supera la velocidad máxima, se fija la velocidad final a la máxima y se genera una fuerza de frenado no regenerativa.

- Tren circulando a velocidad máxima: en caso de que el tren ya circule a la velocidad máxima permitida y no aumente el límite en el siguiente paso de simulación, el objetivo de la tracción es mantener la velocidad constante ($a=0$). El proceso de cálculo es:
 - Aceleración: $a = 0$
 - Velocidad final: $V_f = V_i$
 - Fuerza tracción: $F_t = F_c + F_p + F_r$
 - Tiempo: $t = \frac{s}{V_f}$
- En caso de no encontrarse en zona neutra ni llevar la velocidad máxima del final del paso, el proceso de cálculo es el siguiente:
 - Fuerza de tracción: $F_t(V)$ se obtiene la máxima tracción disponible para la velocidad a la que se encuentra el tren.
 - Aceleración: $a = \frac{\Sigma F}{m \cdot (1+k)}$
 - Velocidad final: $V_f = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot s}$
 - Tiempo: $t = \frac{V_f - V_0}{a}$

Dentro de este cálculo hay que tener en cuenta dos límites:

- Aceleración máxima del tren: en caso de que se supere la aceleración máxima del tren, el método de resolución varía y es de la siguiente manera:
 - Aceleración: $a = a_{max}$
 - Fuerza tracción: $F_t = m \cdot (1 + k) \cdot a + F_c + F_p + F_r$
 - Velocidad final: $V_f = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot s}$
 - Tiempo: $t = \frac{V_f - V_0}{a}$
- Velocidad máxima: en caso de superar la velocidad máxima permitida durante el paso de simulación, la velocidad final del tren se fija con el valor del límite de velocidad. La resolución varía:

- Velocidad final: $V_f = V_{max}$
- Aceleración: $a = \frac{V_f^2 - V_i^2}{2 \cdot s}$
- Tiempo: $t = \frac{V_f - V_o}{a}$
- Fuerza tracción: $F_t = m \cdot (1 + k) \cdot a + F_c + F_p + F_r$

4.5.2. Frenado

La conducción de frenado se basa en la curva de frenado calculada anteriormente. En caso de que la velocidad al principio del paso sea mayor a la velocidad de la curva de frenado al final del paso, el simulador entra en el modo de frenado.

Como ya se explicó en el apartado de curva de frenado, el frenado se produce a potencia constante hasta una velocidad umbral (figura 9), a partir de la cual se frena a aceleración constante. El proceso de cálculo de la curva de frenado es equivalente al de tracción, ya que se calcula como si el tren circulara en sentido inverso. La diferencia está en usar potencia constante y en que hay que cambiar el signo de la fuerza debida al perfil.

En el proceso de cálculo solo se tiene en cuenta las zonas donde hay un cambio de velocidad en la que el tren debería frenar (figura 10), por lo que no hay que tener en cuenta la posibilidad de superar la velocidad máxima, pero sí hay que tener en cuenta si se encuentra en zona neutra, ya que aunque pueda frenar, la potencia no se puede devolver a la red.

El proceso de cálculo de la curva de frenado es el siguiente:

- Zona neutra: en este caso, además de los datos ya conocidos, se sabe que la fuerza de tracción va a ser nula, por lo que el proceso de cálculo es:
 - Fuerza de tracción: $F_t = 0$
 - Aceleración: $a = \frac{\Sigma F}{m \cdot (1+k)}$
 - Velocidad final: $V_f = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot s}$
- No zona neutra: es muy parecido al proceso de tracción, ya que como se ha dicho la curva de frenado se calcula traccionando en sentido opuesto a la marcha. El proceso de cálculo es:
 - Si $V_o \geq V_{umbral} \rightarrow F_t = \frac{P}{v} \rightarrow a = \frac{\Sigma F}{m \cdot (1+k)} \rightarrow V_f = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot s}$
 - Si $V_o < V_{umbral} \rightarrow a_{fren} = a_{max} \rightarrow F_t = m \cdot (1 + k) \cdot a + F_c + F_p + F_r \rightarrow$
 $\rightarrow V_f = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot s}$

Una vez explicado el proceso de cálculo de la curva de frenado, el cálculo del modo de conducción frenado es muy sencillo, ya que lo único que hace es copiar los datos obtenidos en la curva de frenado, teniendo en cuenta que hay que cambiarle el signo a la aceleración y a la fuerza de tracción.

4.5.3. Deriva

La conducción de deriva se caracteriza porque la fuerza de tracción es nula ($F_t=0$). Por tanto, en la zona de deriva el tren no consume energía eléctrica.

Como ya se ha dicho, la conducción en deriva viene dada por los datos de entrada, donde se fija el PK inicial y final de este modo de conducción. El simulador sabe en cada paso de simulación en qué PK se encuentra el tren, por lo que es capaz de decidir si el modo de conducción es deriva o no.

Como la característica de deriva es que la fuerza de tracción es nula, la resolución del movimiento del tren es igual a la de una zona neutra. El proceso de cálculo que se sigue en deriva se muestra a continuación:

- Fuerza de tracción: $F_t = 0$
- Aceleración: $a = \frac{\Sigma F}{m \cdot (1+k)}$
- Velocidad final: $V_f = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot s}$
- Tiempo: $t = \frac{V_f - V_0}{a}$

Al igual que en las zonas neutras, también puede ocurrir que debido a la pendiente, el tren aumente su velocidad durante la deriva. Si esto ocurre y se supera la velocidad máxima, se fija la velocidad final a la máxima y se genera una fuerza de frenado no regenerativa.

Un ejemplo de deriva se muestra en la siguiente figura:

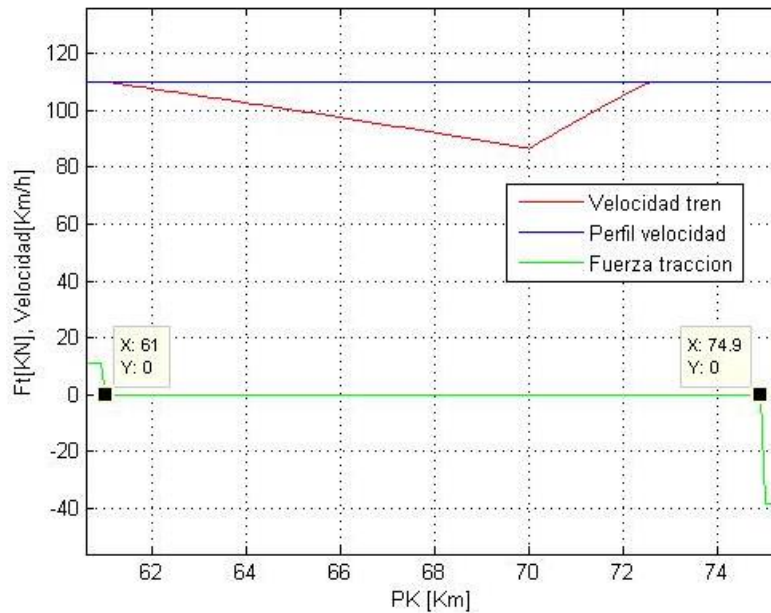


Figura 11. Deriva caso ejemplo

En la figura se observa como del PK 61 al 74.9 la fuerza de tracción es nula, esto se debe a que existe deriva desde el PK 61 al 75 en los datos de entrada. Se observa como la velocidad cae hasta el PK 70 y luego vuelve a subir. Esto ocurre porque existe una curva que llega hasta el kilómetro 70, por lo que es una fuerza que se opone al movimiento, y a partir de ahí empieza una pendiente que favorece el movimiento, por lo que el tren se acelera.

4.6. Resultados

A partir del simulador de conducción se pueden obtener los resultados de cualquier variable que afecte en la conducción del tren. Hasta ahora se ha hablado de fuerza tracción, velocidad, aceleración y tiempo, pero además de estos valores también se puede obtener la potencia y energía consumida por el tren a lo largo del recorrido, por lo que se puede conocer cuanta potencia deberá suministrar la red al tren, siempre que se desprecien que se producen a lo largo de la catenaria.

En primer lugar se va a mostrar como varía la velocidad y la fuerza de tracción en función del punto kilométrico, así como el perfil de velocidad máxima.

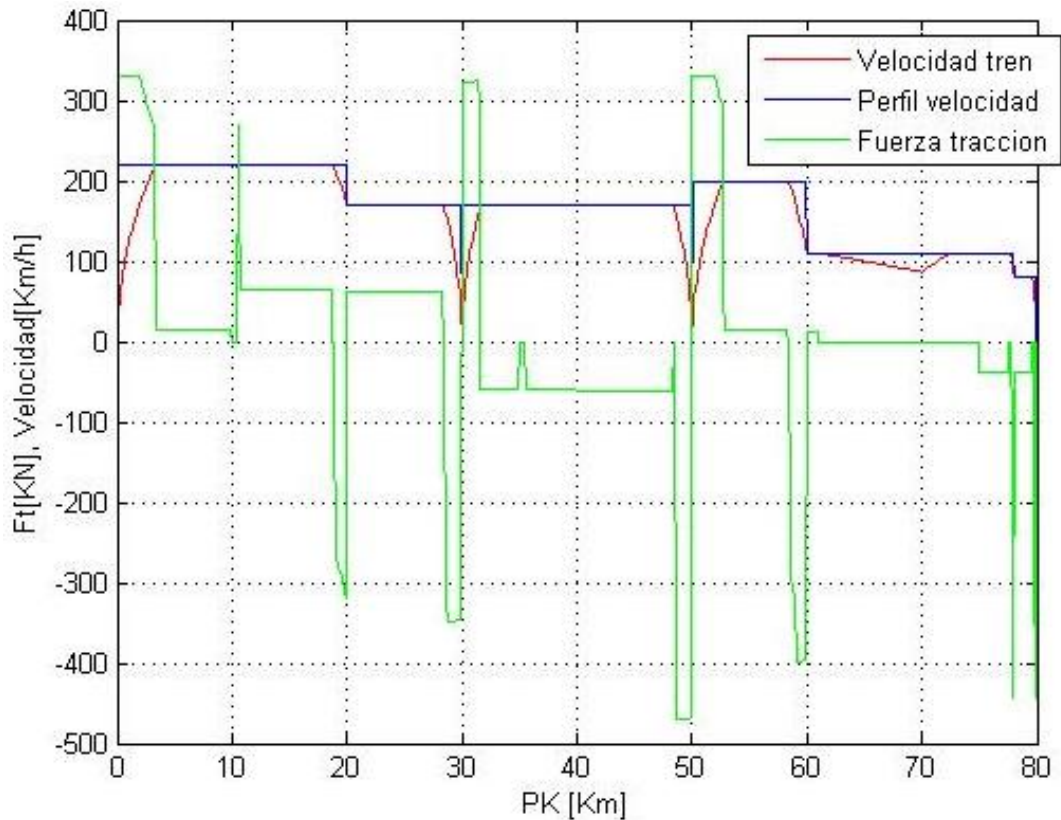


Figura 12. Ft, Velocidad en función del PK

En primer lugar cabe destacar que la velocidad del tren siempre cumple con el límite de velocidad. En segundo lugar, destacar que tanto las zonas de aceleración y frenado tienen sentido, ya que se producen cuando hay un cambio a mayor velocidad máxima y a menor velocidad permitida o parada, respectivamente.

En relación a la fuerza de tracción también se observa que la curva tiene lógica, ya que las fuerzas de tracción más altas se producen cuando el tren aumenta la velocidad, y las fuerzas negativas se producen cuando el tren está frenando. También se observa que cuando la velocidad es constante, la fuerza de tracción es bastante pequeña en comparación a la que se produce para aumentar la velocidad. Hay que destacar que a partir del PK 10 y del 35 aparece una fuerza de tracción, motivada porque es una zona neutra, por lo que el tren no puede dar fuerza de tracción.

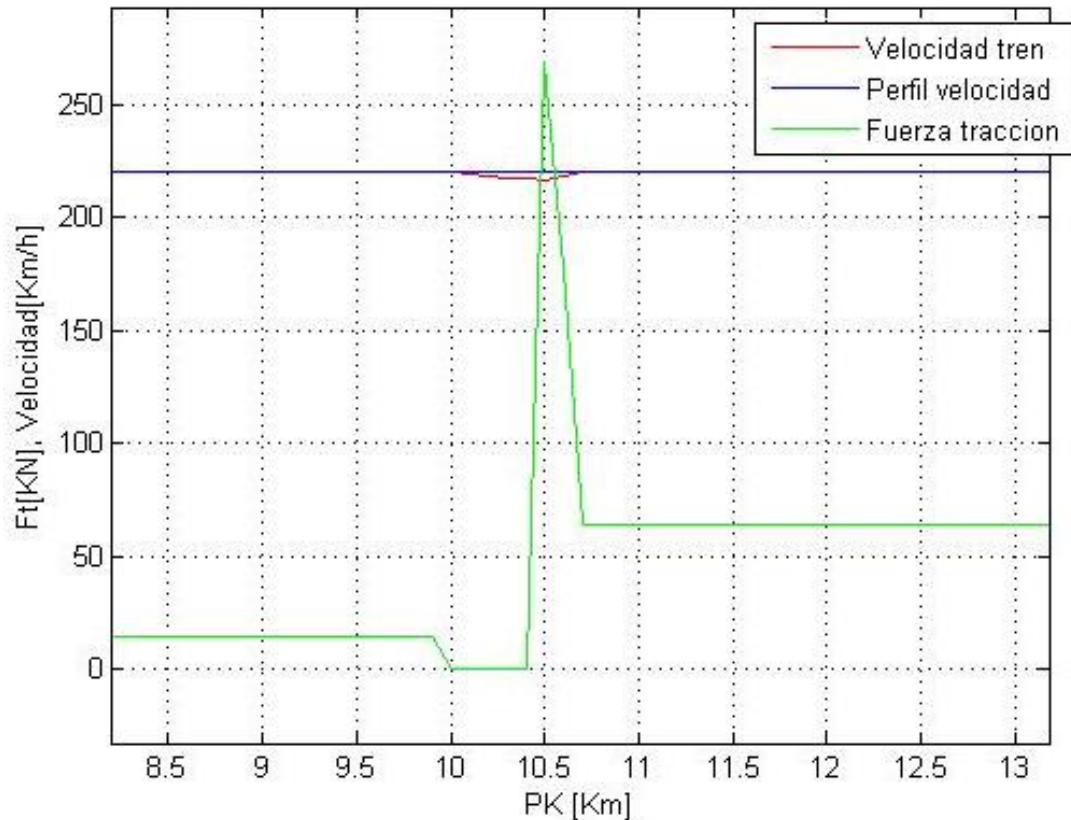


Figura 13. Zoom de zona neutra

En la figura 13 se muestra un zoom de la zona neutra, donde se observa que la tracción durante esa zona es nula.

4.6.1. Potencia y energía

Como ya se ha dicho, a partir de la simulación se pueden obtener los valores de potencia y energía a lo largo del tiempo. Estos valores son los que realmente interesan ya que representan el consumo energético del tren, y por consiguiente permiten saber cuánto gasto económico produce la circulación del tren, ya que la energía eléctrica se compra a las compañías eléctricas.

En primer lugar se muestra el cálculo de la potencia eléctrica total consumida por el tren en cada paso de simulación:

$$P = \frac{F_t \cdot V}{\eta} + P_{aux} \quad (7)$$

Donde:

- P es la potencia eléctrica total consumida [W].
- F_t es la fuerza de tracción [N].
- V es la velocidad del tren [m/s].
- η es el rendimiento de transformar la energía eléctrica en mecánica.
- P_{aux} es la potencia consumida por los servicios auxiliares [W].

A partir de esta expresión se obtiene la potencia consumida a lo largo del trayecto, tal y como se muestra en la figura 14.

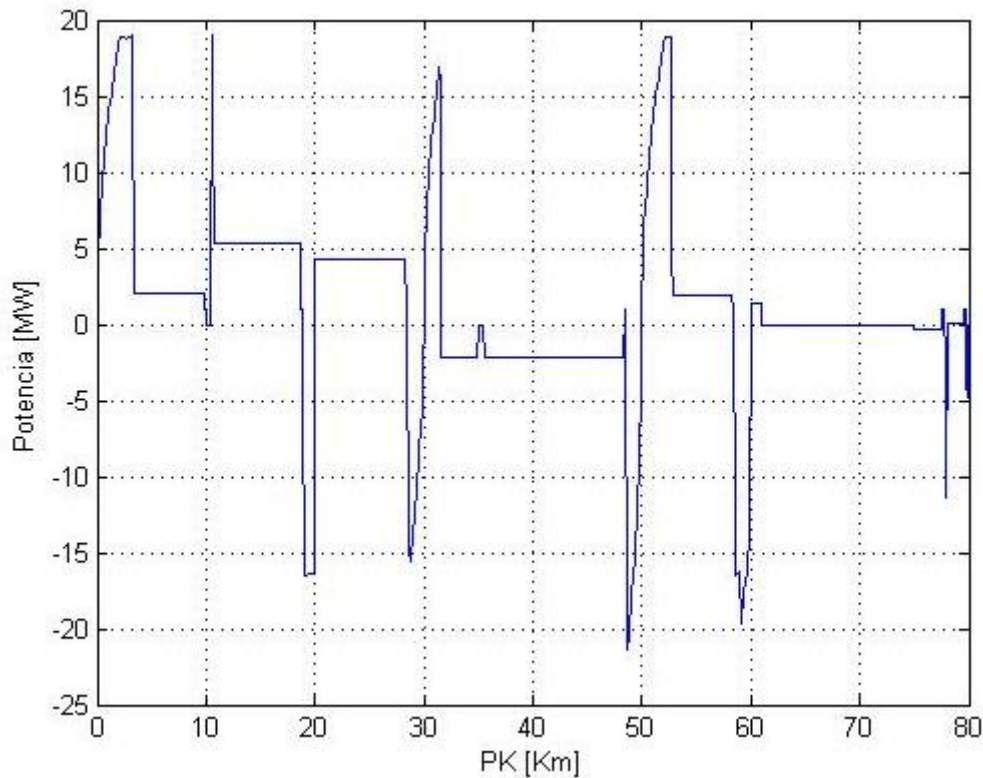


Figura 14. Potencia eléctrica total consumida

- Se observa que solo hay una zona frenado con potencia constante (previo al PK 20), este se debe a que es el único frenado donde el tren lleva una velocidad lo suficientemente alta para frenar a potencia constante.
- Se observa que hay zonas donde el consumo de potencia es cero, aunque los equipos auxiliares consumen 1MW. Esto se debe a que son zonas neutras o deriva, es decir, zonas en las que el tren no absorbe potencia de la red, por lo que los equipos auxiliares se alimentan de otra manera.
- Los valores máximos y mínimos de potencia están dentro de los márgenes típicos de un tren de alta velocidad con estas características.

Además de la potencia total consumida por el tren, también se puede cuantificar la potencia regenerada por el tren a lo largo del trayecto. La potencia regenerada se muestra en la siguiente figura:

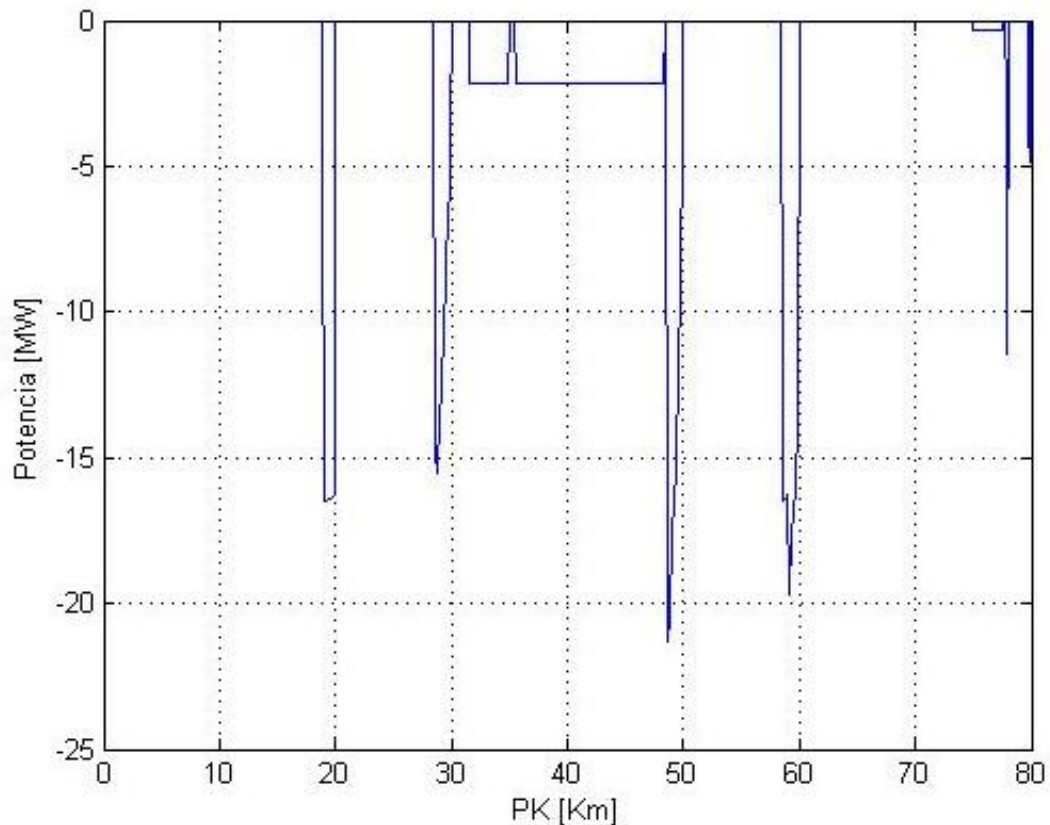


Figura 15. Potencia regenerada

Esta gráfica no aporta gran información en comparación a la de potencia total, pero la obtención de estos valores es el objetivo fundamental de la creación de este simulador. La utilidad de esta gráfica es para la futura Ampliación

Una vez conocida la potencia consumida por el tren a lo largo del trayecto, se puede calcular la energía consumida en cada paso de simulación. La ecuación para el cálculo de la energía es la siguiente:

$$E = \sum P \cdot t \quad (8)$$

Donde:

- E es la energía consumida.
- P potencia eléctrica consumida [W].
- t es el tiempo de paso [s].

La energía total consumida durante el trayecto es de 469.92 KWh.

Una vez estudiados todos los resultados que se obtienen a partir del simulador, se puede concluir que el simulador funciona correctamente. Además, proporciona toda la información relevante sobre la conducción de un tren, por lo que cumple con su finalidad.

En el siguiente apartado se estudiará una línea real como es la línea de Alta Velocidad Madrid-Calatayud.

5. Estudio línea Madrid-Calatayud

En este apartado se procede a estudiar la línea Madrid-Calatayud utilizando el simulador de conducción desarrollado.

A lo largo del trayecto solo hay una parada en una estación intermedia, que se encuentra en PK 43.6 y se encuentra en la localidad de Guadalajara. Se considera un tiempo de parada de 5 minutos en las estaciones con parada.

El proceso de simulación ya es conocido, por lo que se irán mostrando las diferentes gráficas que se obtienen a los largo de la simulación.

5.1. Datos del caso

El paso de simulación es de 100 metros, al igual que en el caso ejemplo. El tren utilizado es el mismo que en el caso ejemplo, por lo que no se vuelven a repetir los datos (apartado 4.3).

Datos vía

- Tiempo estacionamiento en parada: 300s
- Longitud: 220 Km.
- Velocidad máxima:

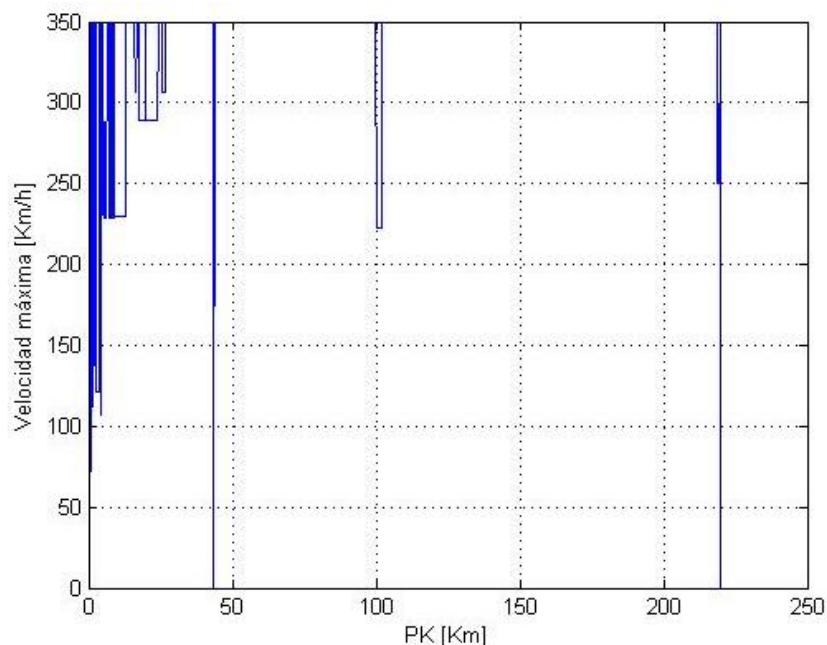


Figura 16. Velocidad máxima permitida

- Perfil:

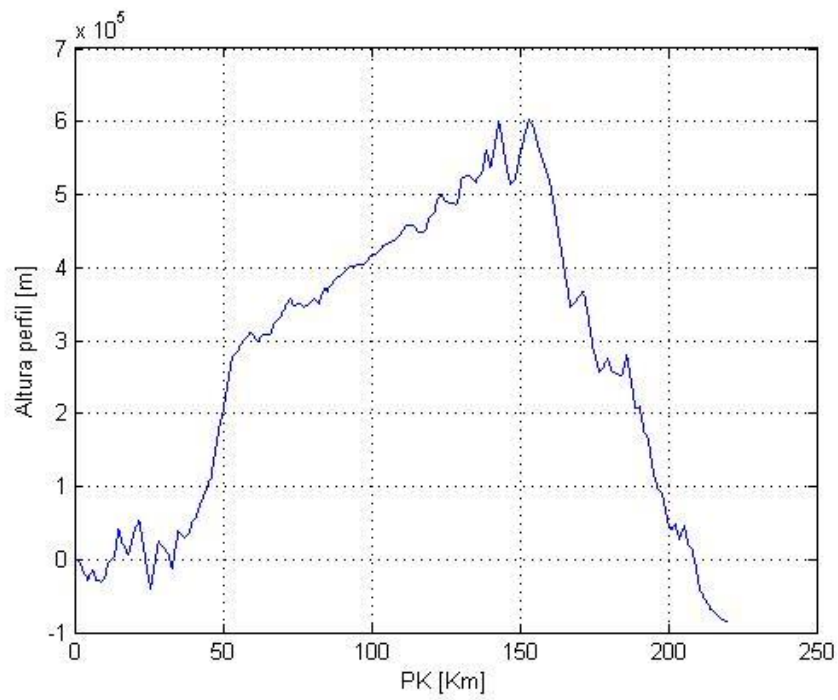


Figura 17. Cambio de perfil

- Radios de curvatura

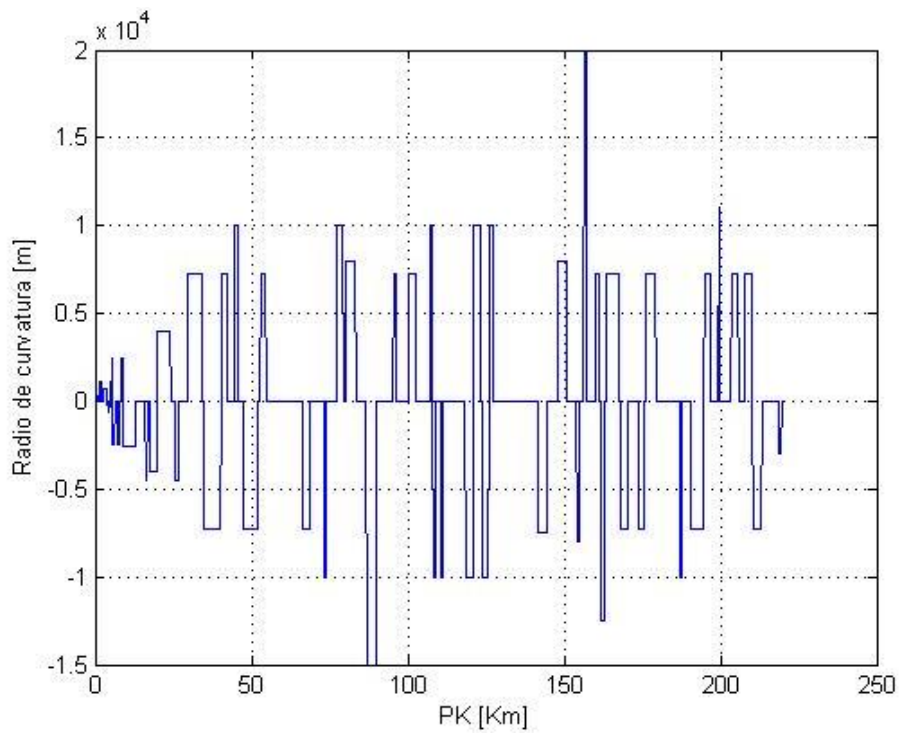


Figura 18. Variación del cambio de curvatura

- Estaciones intermedias

PK [Km]
43,6

- Zona neutra

PK inicial [Km]	PK final [Km]
25	25,5
50	50,5
100	100,5
150	150,5

5.2. Curva de frenado

En primer lugar se muestra la curva de frenado límite para este trayecto.

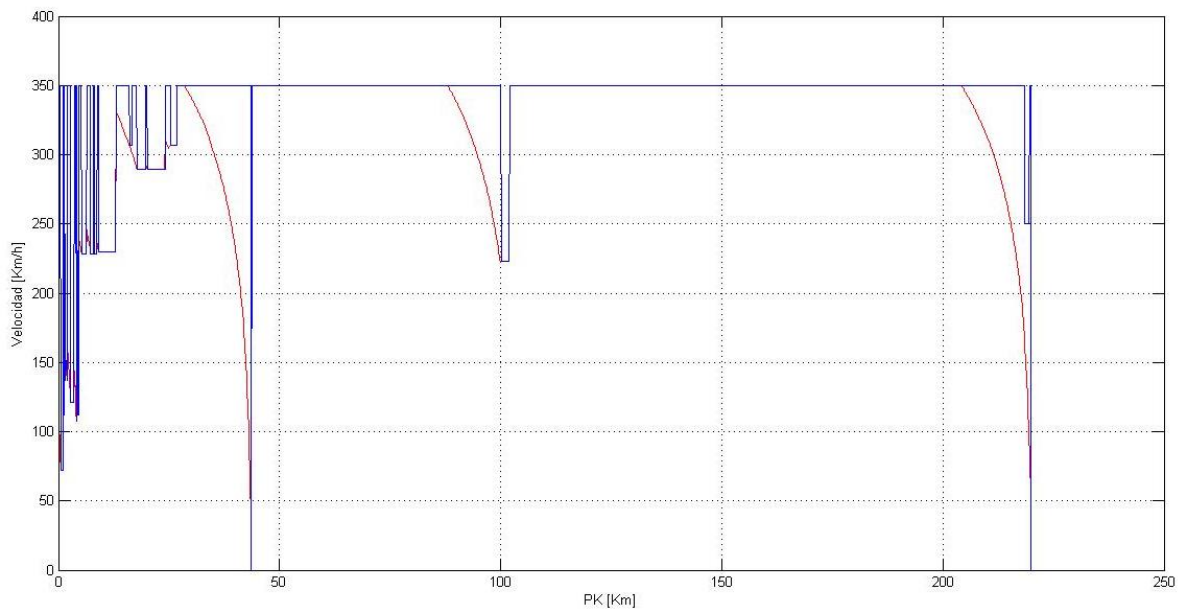


Figura 19. Curva frenado línea Mad-Cat

Llama la atención que al inicio de la línea se producen muchas variaciones de la velocidad máxima permitida, por lo que hay varias curvas de frenado diferentes en poco espacio. Esto provocará que el tren vaya acelerando y frenando. Esto se muestra con más detalle en la figura 19.

5.3. Conducción

En este apartado se estudiarán las diferentes gráficas que se obtienen de la conducción del tren.

En primer lugar se muestra la velocidad en función del PK.

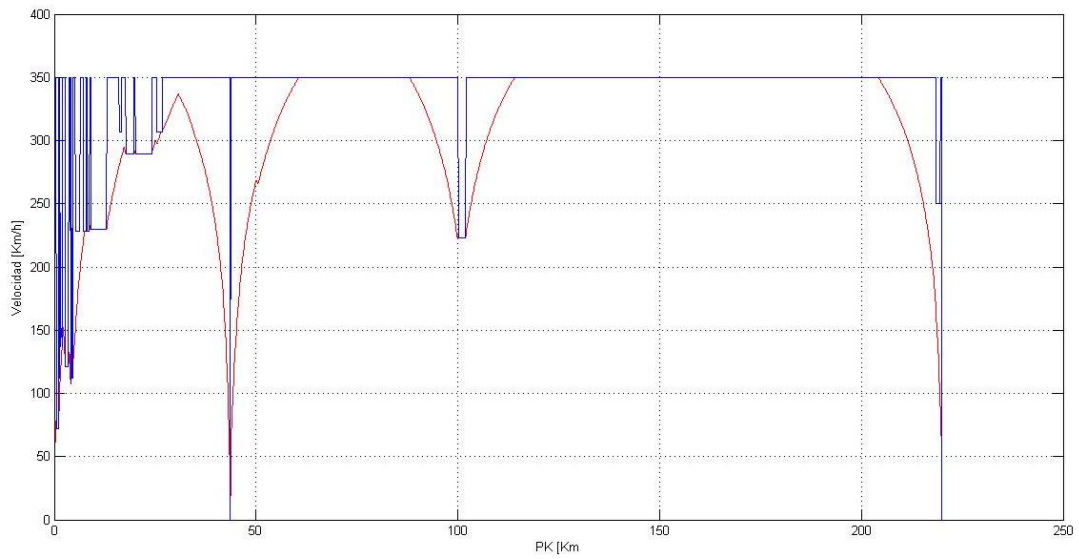


Figura 20. Perfil de velocidad

Como se podía prever en el tramo inicial existen muchos cambios entre tracción y frenado en muy poco espacio. Esto se muestra con más detalle en la figura 21.

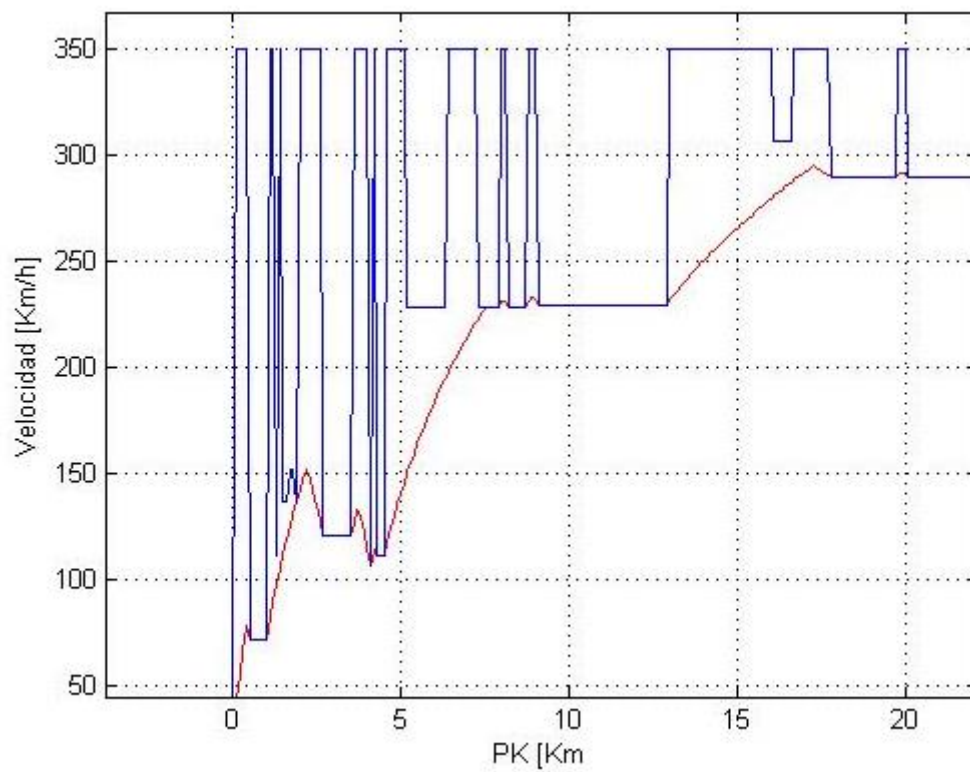


Figura 21. Detalle perfil velocidad

A continuación se muestra como varía la fuerza de tracción a lo largo del recorrido.

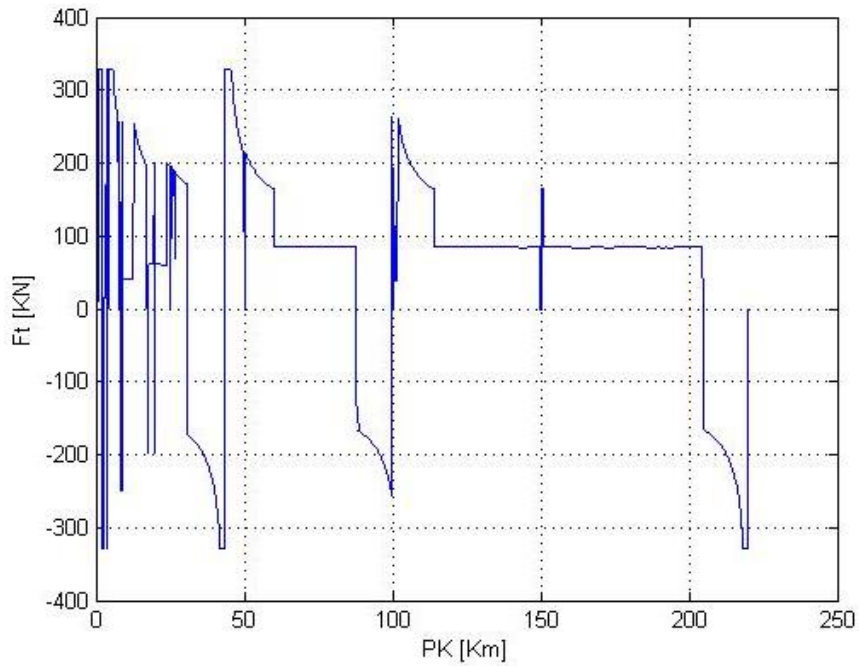


Figura 22. Fuerza de tracción

Como era de esperarse con tanto cambio de conducción en el tramo inicial, la fuerza de tracción varía muchísimo. En ningún momento se supera la máxima fuerza de tracción ni de frenado, por lo que la fuerza está dentro de los límites.

Puede llamar la atención el salto de fuerza de tracción que se produce en el kilómetro 150. Esto se produce porque el tren entra en una zona neutra en la que se frena, por lo que durante la zona neutra la tracción es nula, pero cuando sale tracciona para volver a la velocidad anterior.

También son llamativas las pequeñas variaciones que se producen entre el kilómetro 120 y 200, aproximadamente. Estas variaciones son ocasionadas por los cambios que se producen en el perfil (pendientes/rampas) y en el alzado (curvas) durante el trayecto. La tracción debe compensar las pequeñas modificaciones de la fuerza debido al peso y la fuerza debida a las curvas.

En la siguiente figura se muestra cómo varía la posición del tren en función del tiempo.

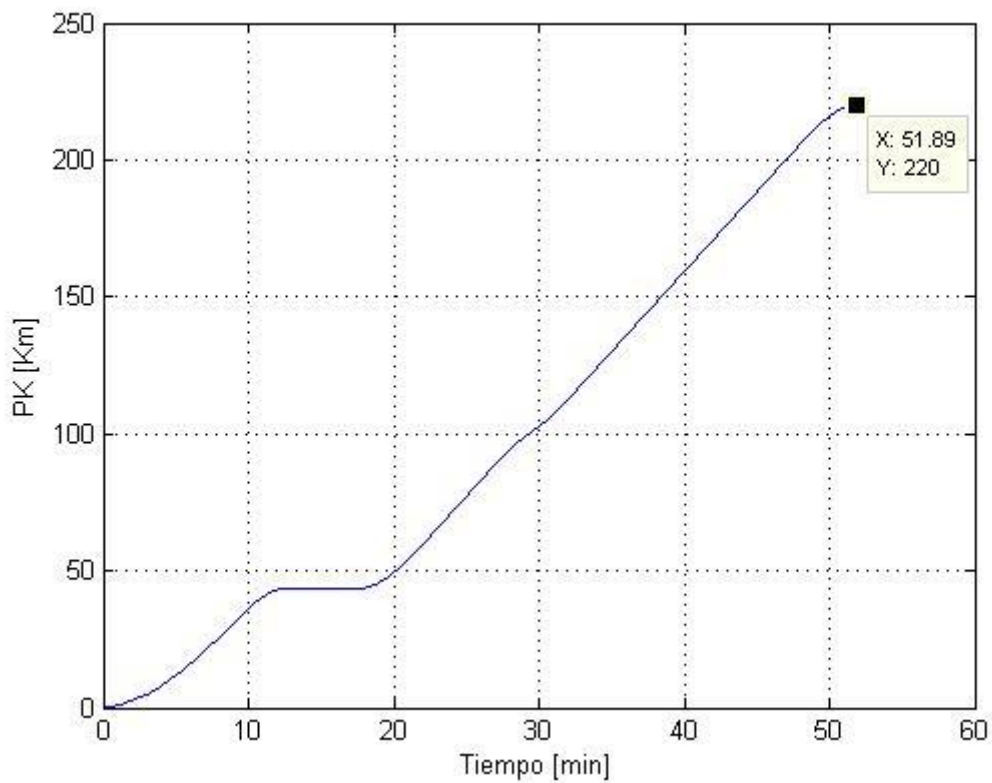


Figura 23. Posición del tren en función del tiempo

El tiempo de parada en la estación de Guadalajara son 5 minutos, tal y como se aprecia en la zona horizontal de la curva. El trayecto completo desde Madrid hasta Calatayud dura 51.89 minutos. Este tiempo es el tiempo mínimo de desplazamiento del tren. A partir de este tiempo se puede calcular el tiempo comercial del tren y generar la malla.

5.3.1. Análisis de potencia y energía

En este apartado se va a analizar la potencia y energía consumida a lo largo de la línea Madrid-Calatayud. En primer lugar se muestra la gráfica de potencia en función del espacio (figura 24) y la gráfica de potencia en función del tiempo (figura 25).

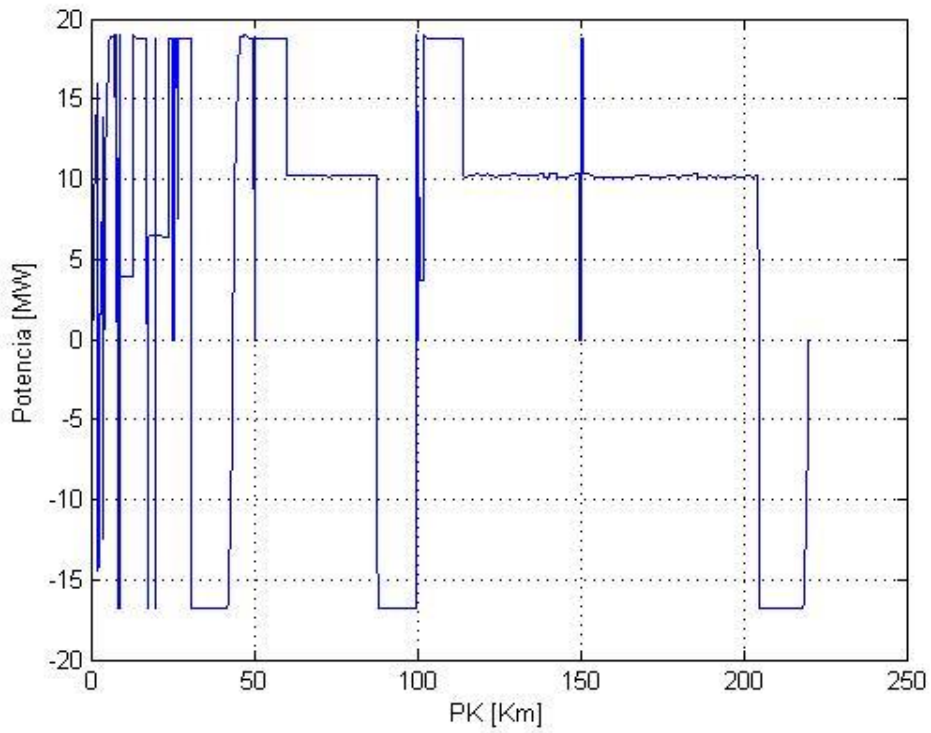


Figura 24. Potencia consumida en función del PK

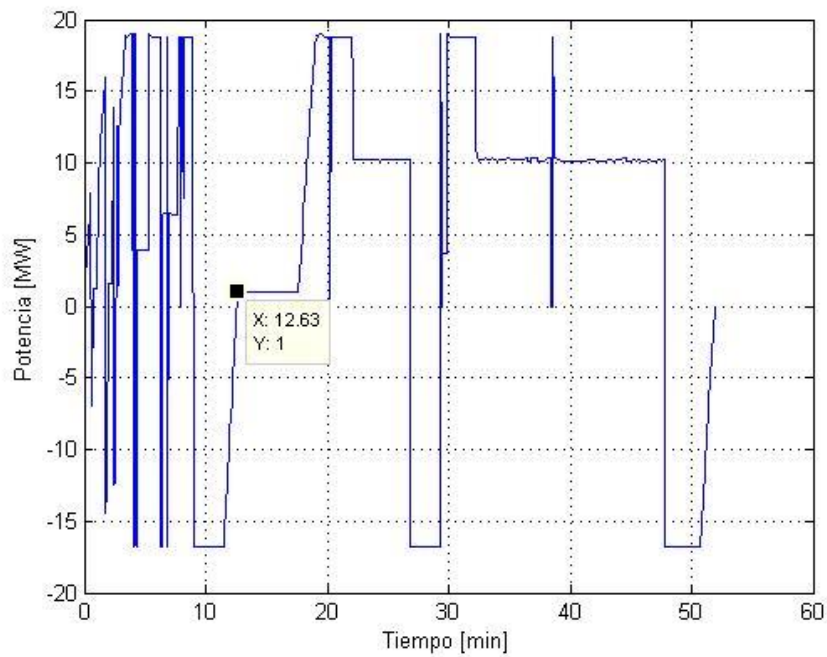


Figura 25. Potencia consumida en función del tiempo

En ambas gráficas se puede ver como el frenado a alta velocidades se realiza a potencia constante. Por lo que se cumple con lo explicado en el apartado de curva de frenado (4.4), ya que esto no era apreciable con el caso ejemplo.

En la figura 25 se puede apreciar como durante la parada en la estación de Guadalajara, se sigue consumiendo potencia para los servicios auxiliares. Esto ocurre porque aunque el tren se encuentre parado, el pantógrafo sigue subido por lo que el tren sigue absorbiendo potencia de la red.

Los valores máximos de potencia tanto de tracción como de frenado cumplen con los valores típicos de un tren de alta velocidad.

La energía total consumida a lo largo del trayecto es 4.14 MWh.

6. Conclusiones

Las conclusiones que se extraen del simulador de conducción con el caso ejemplo son las siguientes:

- En todo momento el simulador respeta los diferentes límites que hay durante el trayecto de un tren: velocidad máxima, fuerza de tracción máxima, aceleración máxima, etc.
- Es capaz de simular los tres tipos de conducción de las que dispone un tren: tracción, frenado y deriva.
- Puede diferenciar la zona en la que se encuentra el tren en cada momento, como por ejemplo las zonas neutras.
- Además de resolver el movimiento del tren, es capaz de proporcionar los valores de potencia y energía.
- Tiene en cuenta las posibles paradas intermedias que haya durante del trayecto, así como el tiempo que el tren está estacionado.
- Es capaz de diferenciar entre la potencia y energía total, consumida o regenerada.
- En definitiva, es capaz de simular cualquier trayecto del tren, conociendo los datos de la vía y las características del tren.

Además de estas conclusiones, a través del estudio del caso real de la línea Madrid-Calatayud se extraen otras:

- La curva de frenado tiene en cuenta el frenado a potencia constante para velocidades mayores a la velocidad umbral.
- Se confirma que es capaz de simular un caso complejo como es una línea real, donde hay muchos cambios de pendientes, curvas, etc.
- Se confirma que la simulación se realiza a tiempo mínimo, ya que el trayecto dura ≈ 52 minutos, y según el horario de Renfe un AVE de Madrid a Calatayud con parada en Guadalajara tarda 1h 1min. Teniendo en cuenta que según Renfe el tren está parado en Guadalajara durante 6 minutos y en la simulación está 5 minutos, la diferencia de tiempos

es de 8 minutos. Esta diferencia es debida a que la conducción real es mucho más suave y a que se deja un margen de tiempo para posibles retrasos.

7. Aportaciones

La aportación principal que proporciona este proyecto es la herramienta de simulación, que es capaz de resolver la circulación a tiempo mínimo de un tren, a partir de los datos de la vía y las características del propio tren.

Es capaz de obtener los valores de potencia y energía consumida lo que aporta gran información para conocer la energía eléctrica que será necesaria comprar durante el trayecto.

Se puede utilizar también para estudiar diferentes tipos de conducción y como afectan a la potencia consumida por el tren, variando el frenado, introduciendo derivas, etc. En definitiva diferentes estudios de potencia para un mismo trayecto.

Además de esto, el simulador se puede usar para el cálculo de la electrificación, ya que conociendo la potencia que va a consumir el tren, se puede obtener la potencia a través de la catenaria y con esto dimensionar los diferentes elementos.

Bibliografía

- García Álvarez, A.: *“Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad”*. Monografías ElecRail.
- García Álvarez, A.; Martín Cañizares, M. P: *“Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo y contraste de modelos y simuladores parametrizables”*. Monografías ElecRail.
- Pilo de la Fuente, E.: *“Diseño óptimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad”*. Tesis de Doctorado.
- Sáiz Chicharro, Á.: *“Apuntes asignatura Control de los Sistemas de energía eléctrica”*. Universidad Pontificia Comillas-ICAI.
- Red Eléctrica de España: *“Servicio de ajuste del sistema”*.
<http://www.ree.es/es/actividades/operacion-del-sistema-electrico#>