



## Trabajo Fin de Máster

# Desarrollo de un calculador de Tiempos Mínimos de circulaciones para sistemas ERTMS<sup>1</sup> Nivel 1, 2, y 3.

**Máster en  
Sistemas  
Ferroviarios**

## CITMC

**(Calculador de Intervalos de Tiempos Mínimos de Circulación)**

**Por:** Ignacio Bazo Orcajo

**Tutores:** Dr. Antonio Fernández Cardador  
Dra. Asunción Paloma Cucala García

**Fecha:** 07de Julio de 2017

---

<sup>1</sup> Basado en el subset 026 versión 3.5.0 .

---

## ÍNDICE

---

<b>FICHA DE TRABAJO</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>8</b>
<b>3. TAREAS</b> .....	<b>9</b>
<b>4. PLANIFICACION</b> .....	<b>10</b>
<b>5. DESARROLLO</b> .....	<b>12</b>
<b>5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL</b> .....	<b>12</b>
<b>5.2 DATOS DE ENTRADA</b> .....	<b>15</b>
5.2.1 DATOS DE TREN.....	16
5.2.2 DATOS DE INFRAESTRUCTURA .....	16
5.2.3 DATOS DE EXPLOTACIÓN .....	16
5.2.4 DATOS DE SEÑALIZACIÓN .....	17
5.2.5 DATOS ERTMS .....	18
<b>5.3 RESULTADOS DEL SIMULADOR</b> .....	<b>19</b>
5.3.1 RESULTADOS DE SIMULACIÓN DINÁMICA/CINEMÁTICA.....	19
5.3.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ERTMS .....	19
5.3.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ATO.....	19
5.3.4 RESULTADOS DE CÁLCULO DE TIEMPOS MÍNIMOS.....	20
<b>5.4 CALCULADOR ERTMS</b> .....	<b>21</b>
5.4.1 CONSTRUCCIÓN DE MRSP .....	21
5.4.2 CONSTRUCCIÓN DE MRSBCP .....	22
5.4.3 CALCULO DE CURVAS DE FRENADO DINÁMICAS .....	29
<b>5.5 SIMULADOR DE CONDUCCIÓN</b> .....	<b>33</b>
5.5.1 CURVA LÍMITE DE CONDUCCIÓN ATO (CVMO).....	34
5.5.2 MODOS DE CONDUCCIÓN .....	35
5.5.3 ESTRATEGIA DE CONDUCCIÓN.....	35
5.5.4 ZONAS NEUTRAS .....	40
<b>5.6 CALCULADOR DINÁMICO Y CINEMÁTICO</b> .....	<b>41</b>
5.6.1 PASO DE INTEGRACIÓN.....	41

5.6.2	FUERZAS .....	42
5.6.3	CALCULADOR DE ENERGÍA .....	50
5.6.4	ALGORITMO DE CÁLCULO DINÁMICO Y CINEMÁTICO .....	53
<b>5.7</b>	<b>CALCULADOR DE INTERVALOS MÍNIMOS DE CIRCULACIÓN .....</b>	<b>55</b>
5.7.1	NIVEL 1 .....	56
5.7.2	NIVEL 1 + BALIZA INFILL .....	62
5.7.3	NIVEL 2 .....	67
5.7.4	NIVEL 3 .....	70
<b>6.</b>	<b>INTERFAZ CON EL USUARIO .....</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>75</b>
<b>7.1</b>	<b>DATOS DE CONFIGURACIÓN .....</b>	<b>75</b>
7.1.1	TREN .....	75
7.1.2	INFRAESTRUCTURA .....	75
7.1.3	SEÑALIZACIÓN .....	76
7.1.4	EXPLOTACIÓN .....	76
<b>7.2</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>77</b>
7.2.1	MRSP .....	77
7.2.2	CSM .....	77
7.2.3	MRSBCP .....	78
7.2.4	CVMO .....	78
7.2.5	CONDUCCIÓN Y ENERGÍA .....	79
7.2.6	TIEMPOS MÍNIMOS N1 .....	80
7.2.7	TIEMPOS MÍNIMOS N1 + INFILL .....	80
7.2.8	TIEMPO MÍNIMO N2 .....	81
7.2.9	TIEMPO MÍNIMO N3 .....	82
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES Y APORTACIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>85</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>87</b>
<b>10.1</b>	<b>DETALLE DE DATOS DE ENTRADA .....</b>	<b>87</b>
10.1.1	INFRAESTRUCTURA .....	87
10.1.2	SEÑALIZACIÓN EN VÍA .....	87
10.1.3	TREN .....	88

---

10.1.4	EXPLOTACIÓN.....	88
10.1.5	ERTMS.....	89
<b>10.2</b>	<b>DATOS DE SALIDA (RESULTADOS) .....</b>	<b>91</b>
<b>10.3</b>	<b>CALCULO DINÁMICO.....</b>	<b>93</b>
10.3.1	MASAS ROTATIVAS.....	93
10.3.2	ESFUERZOS DE TRACCIÓN Y FRENO.....	94
<b>10.4</b>	<b>PREMISAS DEL CÁLCULO DE SIMULACIÓN ERTMS .....</b>	<b>96</b>
<b>10.5</b>	<b>INSTALACIÓN DE PROGRAMA.....</b>	<b>100</b>

**FICHA DE TRABAJO**

<b>Programa</b>	
Master Universitario en Sistemas Ferroviarios	
<b>Curso</b>	2016-2017
<b>Título del trabajo</b>	
Desarrollo de un calculador de Tiempos Mínimos de circulaciones en ERTMS Nivel 1, 2, y 3	
<b>Breve descripción del TFM</b>	
<p>Desarrollar un simulador, en entorno de Matlab, que mediante los siguientes datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Datos de tren (curvas de tracción, curvas de freno, coeficientes aerodinámicos, modos de marcha, velocidad máxima, longitud, potencia de equipos auxiliares, masa, longitud del tren, etc.).</li> <li>- Datos de vía (perfil de gradientes, Radios de curvas de trazado, perfil de velocidad máxima, Zonas neutras, cantonamiento).</li> <li>- Datos de explotación (posición de estaciones, tiempos de parada, modos de Conducción etc.)</li> <li>- Datos de configuración de ERTMS (track conditions, LTV, parámetros de configuración de curvas de freno en base al Subset-026-3 versión 3.5.0, niveles ERTMS de funcionamiento).</li> <li>- Datos de configuración de señalización de vía (Posición de las señales, balizas, circuitos de vía, etc.).</li> </ul> <p>Se pueda obtener los siguientes resultados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Curva de velocidad/espacio en el recorrido.</li> <li>- Tiempos de viaje (tiempo total, tiempos parciales, velocidad media total, velocidad media entre trayectos).</li> <li>- Energías puestas en juego (energía consumida en tracción, energía regenerada, energía consumida en auxiliares).</li> <li>- Calculo de Intervalos mínimos (marcha no perturbada) en ERTMS N1, N2 (y N3).</li> </ul> <p>El programa tendrá una interfaz gráfica basada en el módulo GUI de Matlab, que permita una carga fácil de los datos de configuración, junto con una representación y manipulación óptima de los resultados.</p>	
<b>Autor</b>	
	
Ignacio Bazo Orcajo	
<b>Tutores</b>	
	
Dr. Antonio Fernández Cardador	Dra. Asunción Paloma Cucala García

*"Cuando bebas agua, recuerda la fuente"*

A mis padres por su infatigable apoyo, como padres, amigos, maestros y abuelos.

A mi Alavesa de la montaña, por todo tu su apoyo, comprensión y paciencia.

Siempre estaré en deuda contigo.

### 1. INTRODUCCION

---

La creciente importancia de los sistemas de gestión de tráfico ferroviario, especialmente el sistema ERTMS (*European Rail Traffic Management System*) en el ámbito europeo, junto con la necesidad tanto social como económica, de realizar una gestión óptima de los recursos disponibles, están impulsando el estudio en detalle de los modos de explotación ferroviarios en busca de la optimización de los mismos.

En este entorno, nace una creciente competencia entre los diferentes modos de transporte, especialmente entre la aviación y el ferrocarril de alta velocidad en distancias medias (500 km). En este entorno de creciente competencia se busca la reducción de los costes y el incremento de los servicios prestados por los ferrocarriles para aumentar su competitividad.

Partiendo de estas premisas, el presente Trabajo de Fin de Master pretende desarrollar una herramienta que pueda mostrar el impacto que tienen los diferentes niveles de señalización ERTMS (N1, N2, N3) sobre la capacidad de transporte de servicios ferroviarios (intervalo mínimo de circulación entre trenes) y el impacto de los diferentes modos de conducción sobre los consumos energéticos.

No solo se pretende que sea una herramienta que describa la situación actual de una infraestructura, sino que pueda servir para dimensionar sus puntos críticos de servicio (puntos de tiempos mínimos de circulación) y servir para la reorganización de la señalización (balizas) para alcanzar un óptimo de explotación.

## 2. OBJETIVOS

---

El presente Trabajo Final de Master persigue desarrollar una herramienta SW capaz de calcular las siguientes características de un sistema ferroviario completo (Infraestructura, sistema de señalización, material rodante), basada en el sistema de señalización ERTMS:

- Intervalos mínimos de circulación.
- Tiempos mínimos de Circulación.
- Energías puestas en juego en la explotación.

Para los 3 niveles de señalización ERTMS y además en el caso del nivel 1 debe ser capaz de diferenciar entre la existencia de únicamente señalización dotada de balizas de señal y sistemas dotados de balizas avanzadas.

Del mismo modo, se pretende que el SW sea capaz de analizar sistemas de señalización lateral basados en 3 y 4 aspectos.

Esta herramienta deberá permitir comparar los servicios que se pueden prestar (intervalos mínimos de circulación) entre los diferentes niveles ERTMS (N1, N1+infill, N2, N3).

Como último objetivo se pretende que la herramienta pueda realizar una distribución óptima de las balizas avanzadas de señal (Infill), de forma que se disminuyan los intervalos de circulación y el tiempo mínimo de circulación de una línea.

Para poder alcanzar estos objetivos se plantean como objetivo de primer orden:

- La simulación Dinámica de la marcha del tren.
- Desarrollos de al menos 2 modos de conducción.
- Implementación detallada del cálculo de las curvas de frenado de tren en base a las SRS de ERTMS.

---

### **3. TAREAS**

---

Para la consecución de los objetivos marcados en el presente TFM se ha dividido el trabajo en las siguientes tareas:

<b>A</b>	Estudio en detalle de las SRS de ERTMS. Concretamente el Subset-026-3 Baseline 3 (3.5.0)
<b>B</b>	Desarrollo de un conjunto de funciones en Matlab que permitan el cálculo de las curva de frenado de un tren, basadas en el Subset-026-3.
<b>C</b>	Desarrollo de un conjunto de funciones en Matlab que permitan el cálculo de las fuerzas que actúan en una circulación del tren.
<b>D</b>	Desarrollo de un simulador de marcha basado en 2 modos de conducción (tracción máxima y deriva).
<b>E</b>	Desarrollo de un calculador de tiempos mínimos de circulación basado en los resultados obtenidos del simulador de marcha, curvas de frenado ERTMS y características de la señalización de vía (Posición de las balizas, CV y Número de aspectos de la señalización lateral)
<b>F</b>	Desarrollo de una interfaz gráfica con el usuario de la herramienta.
<b>G</b>	Pruebas aisladas de verificación de los diferentes bloques de cálculo de la herramienta SW
<b>H</b>	Prueba de integración de los bloques de cálculo.
<b>I</b>	Realización de un Caso Ejemplo

Cada una de las tareas descrita tiene un carácter iterativo, dado que en el desarrollo de cada una de los bloques funcionales del programa se realizan pruebas de funcionamiento, cuyo resultado puede llevar a la modificación del propio bloque funcional y de elementos desarrollados anteriormente.

## 4. PLANIFICACION

El plan de trabajo para el desarrollo de la herramienta SW ha sido el siguiente:

Tareas	2016						2017					
	J	A	S	Oct	Nov	Dic	En	Fe	Mar	Abr	May	Jun
Estudio SRS												
Descripción de datos de entrada/salida												
Desarrollo de Curvas de freno ERTMS												
Pruebas Curvas												
Desarrollo de simulador de marcha												
Pruebas de simulador de marcha												
Calculador de Tiempos mínimos												
Pruebas de calculador de Tiempos mínimos												
Integración de bloques												
Pruebas de integración												
Desarrollo de Interfaz grafica												
Pruebas de interfaz												
Realización de Caso Ejemplo												



## 5. DESARROLLO

---

### 5.1 Descripción general

---

La funcionalidad del Calculador de Intervalos de Tiempos Mínimos de Circulación (CITMC) proporciona los siguientes datos:

- Tiempos mínimos de circulación
- Intervalo mínimo de circulación
- Posición óptima de las balizas avanzadas.
- Energía consumida por un tipo de tren dado

Todo esto definido para una infraestructura concreta (gradientes, curvas, ZN, túneles), un tipo de tren determinado y un sistema de señalización (niveles de ERTMS) previamente prefijados.

El CITMC está diseñado y configurado de forma que cada uno de los módulos que lo constituye realiza una función de cálculo independiente de los procesos de los otros módulos y cuya única iteración entre ellos se realiza por medio del intercambio de datos. El formato de los datos intercambiados está predeterminado y se convierte por tanto, en la interfaz de comunicación entre los módulos.

Esta configuración presenta la ventaja de separar el desarrollo de los diferentes módulos de acuerdo a funcionalidades específicas y permite una mejora independiente de cada uno de los módulos sin la necesidad de modificar o alterar el conjunto del programa.

Los módulos configurados atienden a funcionalidades concretas y con entidad de cálculo propio. Estos son:

- [1]. Adquisición de Datos [AD].
- [2]. ATP-Calculador de Curvas ERTMS [ATP].
- [3]. ATO+Dinámica de marcha [ATO+Din]
- [4]. Calculador de tiempos mínimos [CTM].
- [5]. Interfaz gráfica del usuario [IGU].

Debido a la facilidad de manejo y programación, junto con las prestaciones de cálculo, el CITMC se desarrollará en el entorno de programación de **Matlab**®. Por tanto, todo el conjunto de CITMC está desarrollado por medio de funciones.

A continuación se describen las funciones básicas de cada módulo, que más adelante se describirán en detalle:

### [1]. Adquisidor de datos (AD)

El módulo de adquisición de datos actúa como intermediario en el almacenamiento de los datos de configuración inicial de la simulación, los resultados obtenidos en el modo calculador y la interfaz gráfica.

### [2]. ATP

Este módulo se encarga de las funciones relacionadas con el cálculo de las curvas de freno de servicio y emergencia, en base a las SRS del sistema ERTMS, necesarias para el cálculo de trayectoria segura (desde un punto de vista de la señalización) de la velocidad de circulación del tren en la vía. Por tanto, realiza dos funciones principales:

- a. Cálculo de los perfiles de velocidad máxima. Compuesta por partes de velocidad constante (CSM) y partes de curvas de aplicación de freno de servicio (TSM).
- b. Cálculo de la curva de freno de servicio y emergencia, junto con el cálculo de la distancia de frenado de las mismas.

### [3]. ATO+Din

Este módulo tiene una triple funcionalidad, las cuales están íntimamente ligadas y por lo tanto se ha considerado conveniente integrarlas en un único bloque. Las tres funciones que realiza son:

- a. Calcula el perfil de velocidad máxima de explotación que debe seguir el tren en la simulación, partiendo del perfil máxima de velocidad calculado por el módulo ATP, las limitaciones de aceleración/Deceleración de confort y las estaciones de parada.
- b. El cálculo de la dinámica de movimiento del tren. El tren se modeliza el tren como un sólido rígido de una única dimensión. Se calculan los esfuerzos que realiza y a los que está sometido el tren, para obtener el conjunto de las fuerzas resultantes. A partir de la componente final de fuerza, esta se aplica sobre el tren como si fuera una masa puntual equivalente, localizada en la posición de la cabeza del tren.
- c. Control del esfuerzo de tracción y freno aplicado para poder seguir la curva de velocidad máxima calculada por el propio módulo ATO.

### [4]. ICTM

Este módulo es el encargado de calcular los intervalos mínimos de circulación, los tiempos mínimos de circulación y la posición óptima de las balizas avanzadas, en base a los datos obtenidos gracias a la simulación de la circulación del tren y las curvas de frenado de servicio ERTMS que calcula el módulo ATP.

[5]. Interfaz grafica

La interfaz gráfica tiene las funciones de facilitar la entrada de datos y la representación y almacenamiento de los resultados de la simulación.

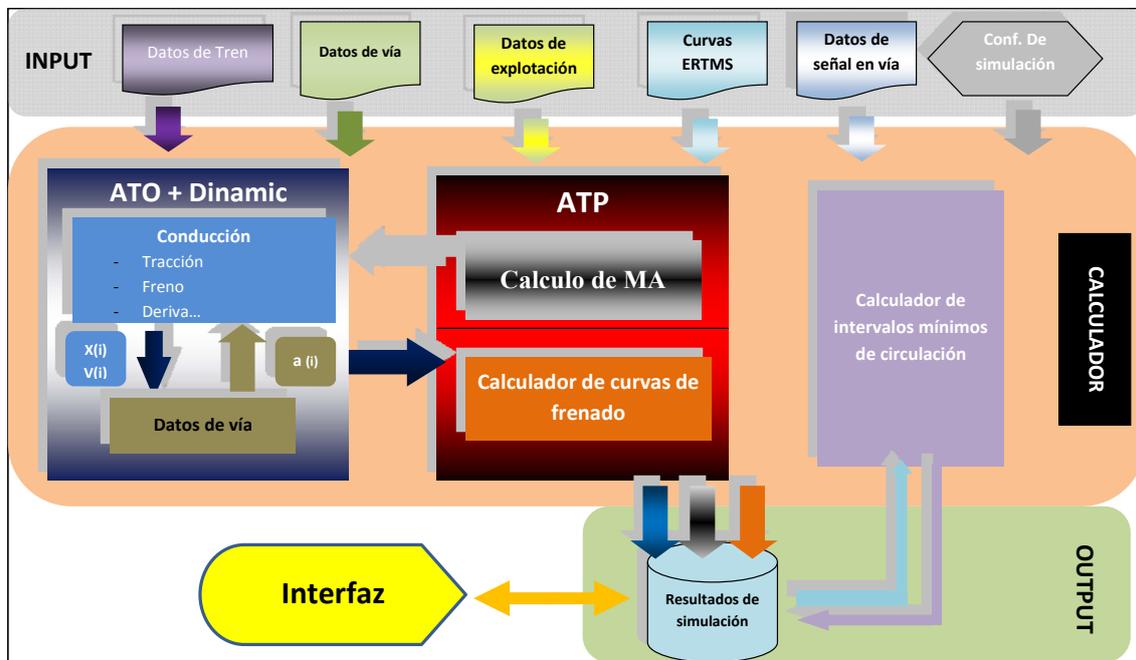


Ilustración 1

## 5.2 Datos de entrada

Los datos de entrada necesarios para realizar, tanto la simulación del recorrido del tren como el cálculo de los tiempos mínimos de circulación, se agrupan en 6 categorías, en función del tipo de información que recogen. Estos son:

- **DI** - Datos de infraestructura
- **DT** - Datos de Tren
- **DS** - Datos de configuración del sistema de Señalización en vía.
- **DEr** - Datos de configuración del sistema ERTMS el equipo embarcado.
- **DEx** - Datos de explotación (Infraestructura y Conducción).
- **DCs** - Configuración de simulación.

La utilización de cada uno de los grupos de datos se realiza tanto de forma conjunta, un mismo bloque de cálculo utiliza diferentes categorías de datos, como de forma aislada (un bloque de cálculo únicamente utiliza un grupo de datos).

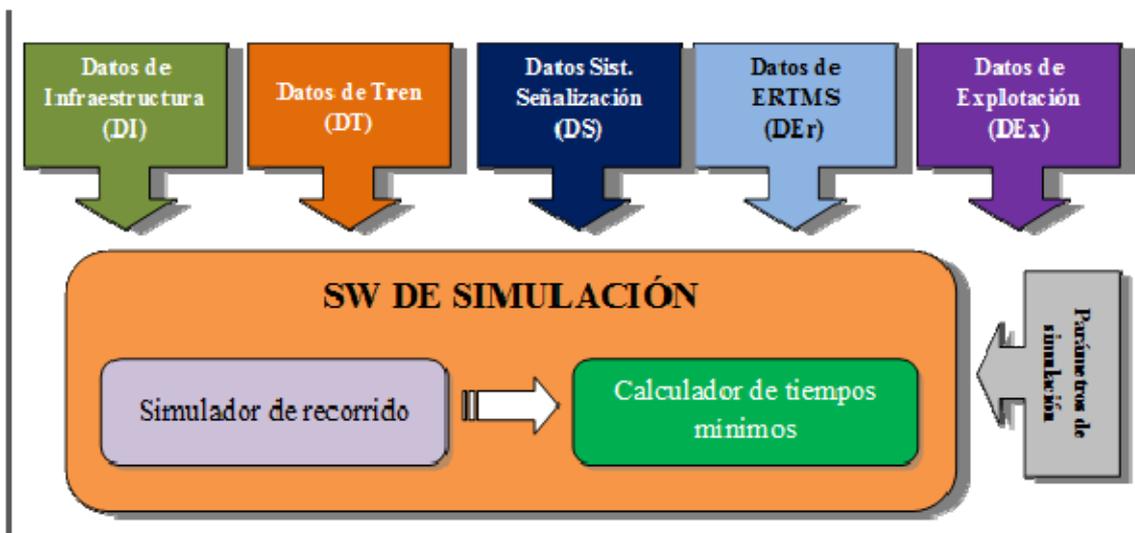


Ilustración 2

El ingreso de todos los datos de configuración se realiza mediante archivos con formato \*.xls. Cada grupo de datos está incorporado en un único archivo. La estructura de estos archivos se describe en detalle en el anexo dedicado a los datos de entrada (Capítulo 10.1).

A continuación se desglosa cada uno de los grupos de datos necesarios para la simulación de los tiempos mínimos.

### 5.2.1 Datos de Tren

El grupo de datos de tren contiene la información que describe las prestaciones del tren, su configuración física y los parámetros dinámicos (propios) para realizar una simulación simplificada de los esfuerzos que soporta.

- Curva de esfuerzo de tracción (kN/(km/h))
- Curva de esfuerzo de frenado del freno eléctrico (kN/(km/h)).
- Velocidad mínima de aplicación del freno eléctrico
- Longitud del tren
- Masa del tren (tara)
- Masa de carga del tren.
- Velocidad Máxima del tren.
- Factor de masas rotativas.
- Coeficientes aerodinámicos (A, B y C).
- Potencia de auxiliares instalada.
- Factor de rendimiento de la cadena de tracción.

### 5.2.2 Datos de Infraestructura

Los datos de la infraestructura recogen toda la información relativa a la configuración de vía (radios de curvas, gradientes, etc.), electrificación y límites máximos de velocidad por infraestructura, que pueden tener influencia en los cálculo dinámico/cinemática de la circulación del tren y curvas de frenado ERTMS.

Estos son:

- Límites máximos de velocidad de infraestructura.
- Gradientes de vía.
- Radios de curvas.
- Perfil de túneles.
- Zonas neutras.
- Distancia de apertura del disyuntor antes de las zonas neutras.
- Ancho de Vía.

### 5.2.3 Datos de Explotación

Este grupo de datos recoge la información que describe la forma en la cual se realiza la explotación de infraestructura, esto es:

- Estaciones de parada.
- Posiciones del punto de parada en las estaciones..

- Posición de no rebase en la estación (Danger Point ).
- Tiempos de parada en estación.
- Limitaciones temporales de velocidad (TSR).
- Sentido de recorrido de la línea.
- Configuración de conducción
  - Aceleración máxima permitida en tracción (confort).
  - Deceleración máxima permitida en frenada (confort).
  - Velocidad máxima de explotación en la línea<sup>2</sup>.
  - Tipo de conducción (tracción máxima o con deriva)<sup>3</sup>.
  - Modo de conducción (Manual o ATO)<sup>4</sup>

### 5.2.4 Datos de Señalización

Este grupo de datos contiene la información de la distribución de los equipos de señalización y control de la circulación, tales como CV, señales, balizas, etc... atendiendo al nivel ERTMS en el cual se realiza la explotación y la simulación. Estos son:

- Descripción de los circuitos de vía.
- Posición de las señales.
- Posición de las balizas de señal.
- Posición de las balizas avanzada (Infill).
- Tiempo retardo en la gestión del posicionamiento del tren por el enclavamiento para cada nivel ERTMS de explotación.
  - Niveles 1 y 2: tiempo de retardo en la gestión de la liberación del circuito de vía.
  - Nivel 3: tiempo de gestión de las comunicaciones.
- Nivel ERTMS (1, 1+Infill, 2, 3).
- Margen de seguridad entre trenes.
  - Distancia para el nivel 2.
  - Distancia para el nivel 3.
- Número de aspecto de la señalización.
  - Tres aspectos (Verde, Amarillo, Rojo).
  - Cuatro aspectos (Verde, Verde intermitente, Amarillo, Rojo).

---

<sup>2</sup> Esta velocidad hace referencia a una posible limitación por explotación y no por seguridad. En sucesivos capítulos se explica cómo se implementa este dato de entrada.

<sup>3</sup> El tipo de conducción se describe en el capítulo dedicado al ATO.

<sup>4</sup> El modo de conducción se describe en el capítulo dedicado al ATO y principalmente se tiene en consideración la curva límite de frenado ERTMS que se sigue en la conducción, esto es, la curva de Indicación o la curva permitida.

### 5.2.5 Datos ERTMS

Los datos de configuración del Sistema ERTMS embarcado comprenden todos los datos y parámetros necesarios para la simulación y construcción de la curva de freno de servicio y emergencia en base a las SRS 3.5.0. Estos son intrínsecos a la configuración del sistema de señalización. Estos datos son independientes del nivel en el cual se realice la explotación (Nivel 1, 1 + infill, 2 o 3).

Hay que destacar que muchos de los datos definidos son semejantes a los definidos en los datos de tren. No obstante, para dar una mayor flexibilidad y una mayor aproximación a la realidad, estos datos pueden tener valores diferentes para la simulación dinámica del tren (datos de tren), y para el cálculo de la curva de frenado (datos de ERTMS).

Para realizar esta distinción entre datos destinados al cálculo de la simulación dinámica y los destinados al cálculo de la curva de frenado ERTMS. Los datos destinados a la curva de seguridad se le añaden el “apellido” ERTMS.

Todos los parámetros de configuración recogidos a continuación corresponden a los impuestos en el subset-026 de la versión 3.5.0 de las SRS.

Los datos de configuración se han dividido en 3 grupos:

- Datos de configuración general  
Corresponden a los datos de configuración del equipos embarcado ERTMS que aplican tanto a trenes configurados como “datos de tren” (trenes Gamma) o por el “modelo de conversión” (trenes Lamda).
- Datos de configuración trenes Gamma  
Estos datos corresponden al conjunto de datos específicos para el caso de que el equipo este configurado mediante los parámetros de tren obtenidos a través de TCSM.
- Datos de configuración trenes Lamda  
Estos datos corresponden al conjunto de datos específicos para el caso de que el equipo este configurado mediante los parámetros introducidos por el maquinista.

La descripción detallada de cada uno de los datos se realiza en el anexo 10.1, correspondiente a los datos de entrada del sistema.

### 5.3 Resultados del simulador

---

Los datos obtenidos de la simulación del recorrido del tren y de los cálculos de tiempos mínimos pueden ser almacenados en un archivo de extensión '\*.xls'.

El detalle de cómo se presenta la información se encuentra recogido en el anexo 10.1.

Los resultados obtenidos de la simulación se agrupan en los siguientes tipos de resultados.

#### 5.3.1 Resultados de simulación dinámica/cinemática

Estos son los resultados contienen los datos de energía, velocidad y fuerzas obtenidos de la simulación de la circulación del tren.

- Posición del tren (Pk).
- Velocidad (km/h).
- Tiempo absoluto en cada posición (s).
- Aceleración del tren ( $m/s^2$ ).
- Aceleración aplicada al tren ( $m/s^2$ ).
- Posición del manipulador (tracción, freno, deriva)
- Tipo de actuación del sistema de tracción/freno (eléctrica o neumática).
- Esfuerzo de tracción aplicado (kN).
- Esfuerzo de frenado aplicado (kN).
- Energía total consumida de tracción (KJ).
- Energía total regenerada en freno (KJ).
- Energía consumida por auxiliares (KJ).
- Energía Neta consumida (KJ).

#### 5.3.2 Resultados de la simulación ERTMS

Es posible almacenar los perfiles de velocidad máximos calculados por el simulador del sistema ATP.

- Perfil de velocidad CSM.
- Perfil de velocidad MRSP.
- Perfil de velocidad MRSBCP (MA).

#### 5.3.3 Resultados de la simulación ATO

Corresponde al perfil de velocidad máxima obtenido a partir del perfil de velocidad máximo MRSBCP, aplicándole la limitación de desaceleración de frenado de explotación o confort.

### 5.3.4 Resultados de cálculo de tiempos mínimos

Los resultados obtenidos de los cálculos de los intervalos mínimos de circulación se agrupan en función del nivel ERTMS en el cual se simula que se está realizando la explotación ferroviaria. Por tanto los resultados obtenidos para cada nivel de señalización y Número de aspectos de señal configurados en el simulador son los siguientes:

- Nivel 1
  - Posiciones de los intervalos mínimos del recorrido (Pk).
  - Intervalos mínimos (s).
  - Nuevas posiciones de los intervalos mínimos con balizas avanzadas (Pk).
  - Nuevos intervalos mínimos con la colocación de balizas avanzadas (s).
  - Posición de los intervalos mínimos en cada baliza (Pk).
  - Tiempos mínimos (s).
  - Posición de las nuevas balizas avanzadas (Pk).
  - Nuevos tiempos mínimos en cada baliza avanzada(s).
  - Mejora del tiempo mínimo obtenido para cada nueva baliza avanzada(s).
- Nivel 1 + Infill
  - Posiciones de los intervalos mínimos del recorrido (Pk).
  - Intervalos mínimos (s).
  - Nuevas posiciones de los intervalos mínimos con balizas avanzadas (Pk).
  - Nuevos intervalos mínimos con la colocación de balizas avanzadas (s).
  - Posición de los intervalos mínimos en cada baliza (Pk).
  - Tiempos mínimos (s).
  - Nueva Posición de las nuevas balizas avanzadas (Pk).
  - Nuevos tiempos mínimos en cada baliza avanzada(s).
  - Mejora del tiempo mínimo obtenido para cada nueva baliza avanzada(s).
- Nivel 2
  - Posición de los intervalos mínimos del recorrido (Pk).
  - Intervalo mínimo asociado a cada circuito de vía (s).
  - Tiempo mínimo de circulación.
- Nivel 3
  - Posición de los intervalos mínimos del recorrido (Pk).
  - Intervalo mínimo asociado a cada Pk en el que se calculó (s).
  - Tiempo mínimo de circulación.

Por tanto, las principales prestaciones del calculador son:

- Capacidad de calcular los intervalo mínimo de circulación según el nivel ERTMS de explotación y el número de aspectos de la señalización lateral (N1 y N1 + Infill).
- Calcular la posición óptima de las balizas avanzadas (Infill).

---

### 5.4 Calculador ERTMS

---

El módulo calculador ERTMS es el encargado de realizar la función análoga a un sistema ATP, en concreto, simula (de forma muy limitada) las funcionalidades del sistema ATP embarcado basado en el subset 026 versión 3.5.0 de las SRS del sistema ERTMS.

Las 3 funciones principales que realiza son las siguientes:

1. Cálculo del perfil estático de la curva de máxima velocidad del tren (MRSBCP<sup>5</sup>) en el recorrido. Corresponde al cálculo del MA entre estaciones.
2. Cálculo de las curvas de frenado dinámicas *inversa* necesarias para el cálculo de los tiempos mínimos en los niveles 1 (1 + Infill) y 2.
3. Cálculo de las curvas de frenado dinámicas *directas*, necesarias para el cálculo de los tiempos mínimos de circulación en el nivel 3.

Los términos de curva *inversa* y *directa*, no son propios de la especificación SRS y es una adaptación necesaria para el cálculo de los tiempos mínimos. Estas curvas son explicadas más adelante.

Previamente a la realización de estas funciones, se realiza un pre-cálculo de los parámetros que son necesarios para la construcción de las diferentes curvas de frenado del sistema ERTMS.

Dependiendo de la procedencia de los datos de configuración (Modelo de Datos de tren o Modelo de conversión) se obtienen los parámetros que definirán las curvas de freno. Estos parámetros:

- Función de deceleración de Freno de Emergencia.
- Función de deceleración de Freno de Servicio.
- Tiempos de retardo de aplicación de freno.
- Tiempos de retardo de corte de tracción.
- Diferenciales de velocidad de EBI, SBI, Warn, Driver.

#### 5.4.1 Construcción de MRSP

El perfil MRSP (Most Restrictive Speed Profile), como su nombre indica es el perfil de velocidad más restrictivo de la línea y se construye a partir de los siguientes datos:

- a. Velocidad máxima del tren.
- b. Perfil estático de velocidad de la línea (SSP).
- c. Limitaciones Temporales de velocidad (TSR).
- d. Longitud del tren.

---

<sup>5</sup> Most restrictive static brake curve profile.

e. Dirección de recorrido de la línea

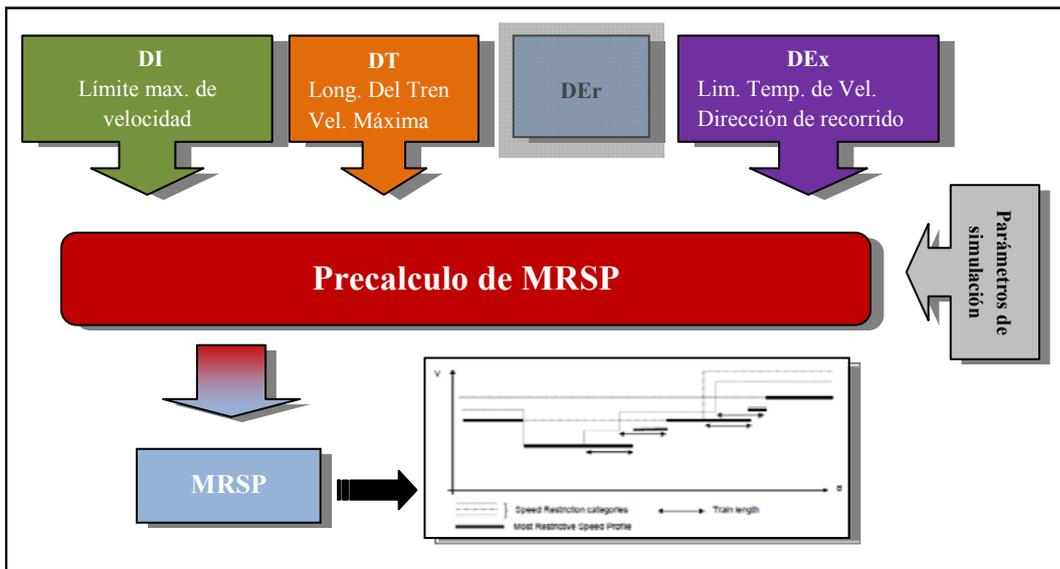
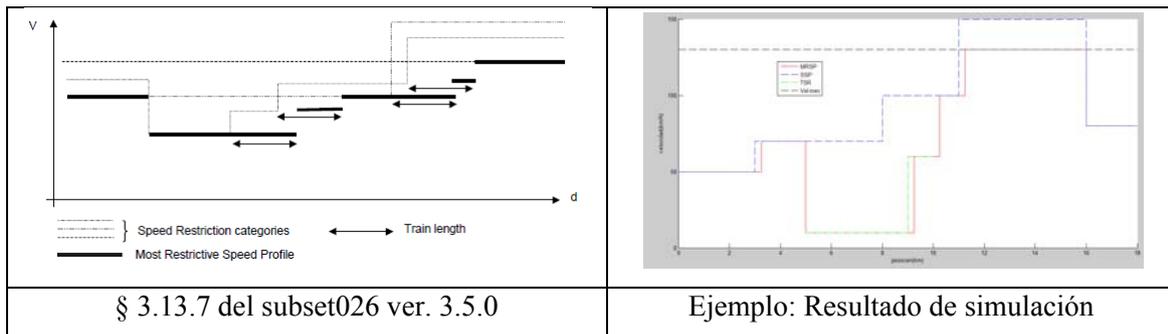


Ilustración 3

El cálculo se realiza en base a los requisitos impuestos en el §3.13.7 del subset026 ver. 3.5.0



5.4.2 Construcción de MRSBCP

La curva MRSBCP<sup>6</sup> es una curva estática y es pre-calculada independientemente de la velocidad que tenga en ese instante el tren. Está constituida por las diferentes curvas de velocidad que limitan el movimiento del tren en velocidad, dentro del MA (Movement Authority). La construcción de las curvas MRSBCP se basa en los siguientes parámetros:

- Características del MA (§3.8 del subset026 ver. 3.5.0)
- Supervisión de la posición y velocidad (§3.13 del subset026 ver. 3.5.0)

Los parámetros que tiene más relevancia son: EoA<sup>7</sup>, DP<sup>8</sup>, MRSP, Gradientes, Parámetros de configuración ERTMS (Anexo 11.1).

<sup>6</sup> MRSBCP: Most restrictive static brake curve profile

<sup>7</sup> EoA: End of Authority

<sup>8</sup> DP: Danger Point.

Este perfil de velocidad es calculado para cada trayecto entre 2 estaciones con paradas configuradas en los datos de explotación. La ilustración 3 muestra el resultado del cálculo de un perfil MRSBCP, entre el inicio del recorrido (Pk 0) y la estación de llegada (Pk 16).

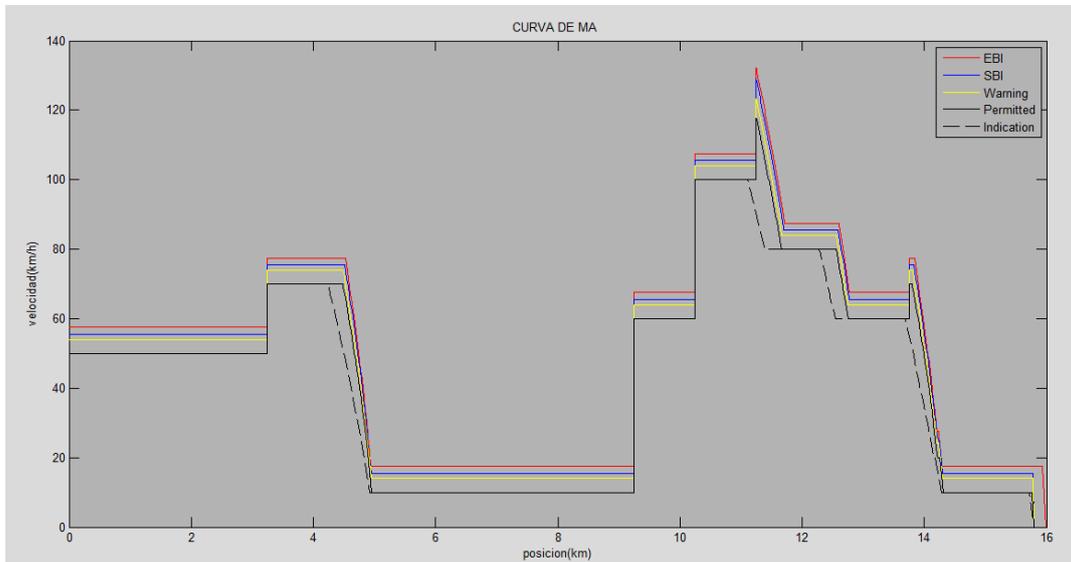


Ilustración 4

Este perfil de velocidad contiene los perfiles límites de velocidad de Indicación, Permitida, Aviso (Warning), aplicación de freno servicio (SBI) y aplicación de freno de Emergencia (EBI).

La curva MRSBCP está constituida por dos perfiles de velocidad que son: Ceiling Speed Monitoring (CSM) y el Target Speed Monitoring (TSM)

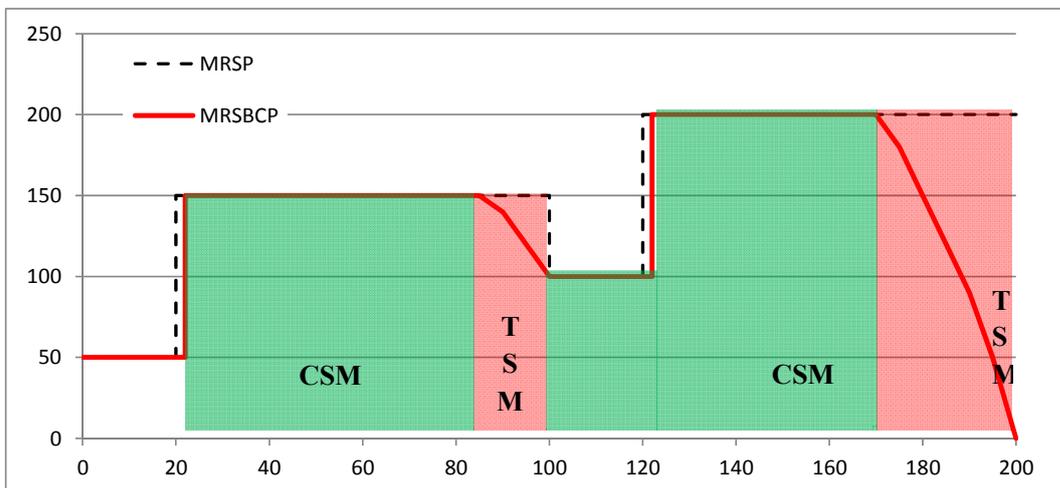
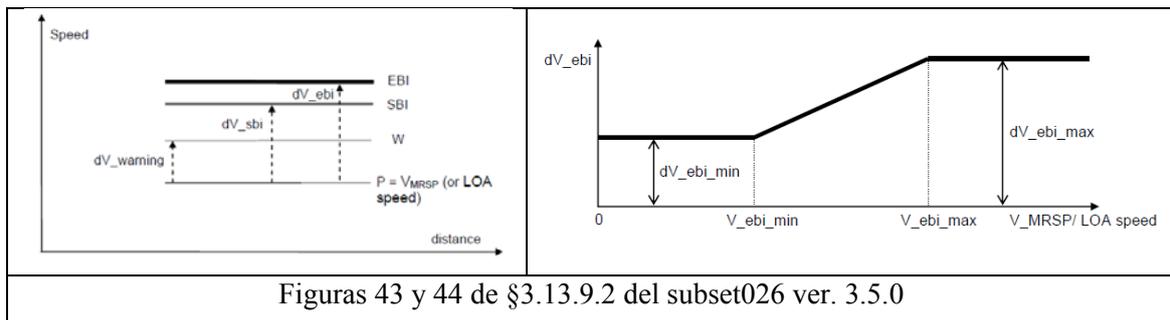


Ilustración 5

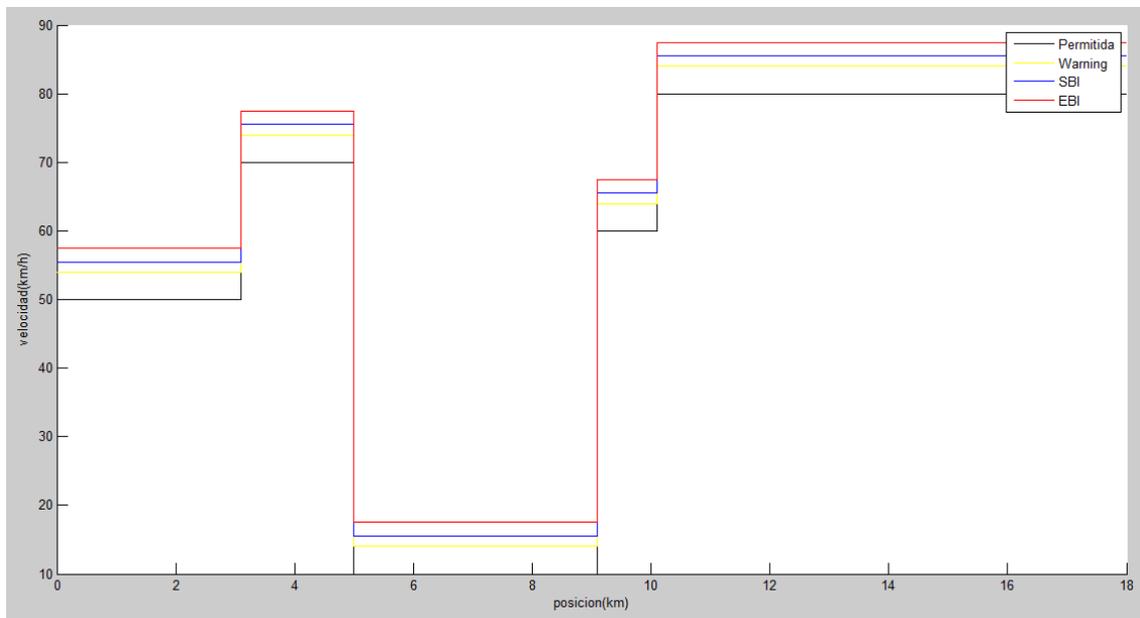
**5.4.2.1 Perfil CSM**

El perfil CSM corresponde a la supervisión del límite de velocidad, por parte de equipo ATP, cuando la velocidad límite es constante. Este perfil se construye partiendo del perfil MRSP y los parámetros de configuración de los límites de velocidad de intervención definidos para cada perfil de velocidades ‘Permitted’, ‘Warning’, ‘Service brake intervention’ y ‘Emergency brake intervention’.

El modelo de cálculo aplicado es el definido en §3.13.9.2 del subset026 ver. 3.5.0 y los parámetros utilizados son:  $V_{x\_min}$ ,  $V_{x\_max}$ ,  $dV_{x\_min}$  y  $dV_{x\_max}$ . Siendo ‘x’ la referencia a los diferentes perfiles de velocidad máxima: ‘warning’, ‘sbi’ y ‘ebi’



El resultado del simulador para el cálculo de un trayecto es el siguiente:

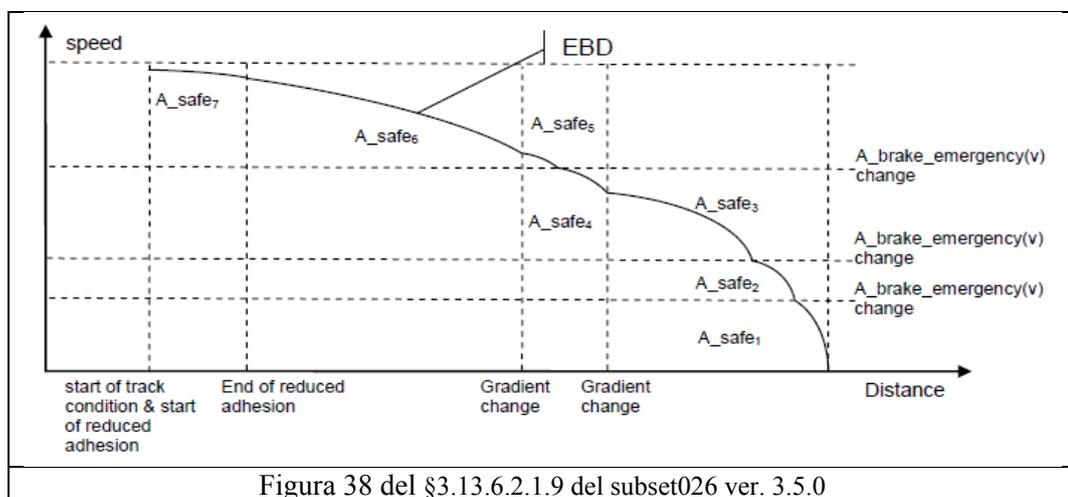


**Ilustración 6**

5.4.2.2 Perfil TSM

El perfil TSM corresponde a la supervisión del límite de velocidad, por parte de equipo ATP, cuando existe una velocidad objetivo inferior a la velocidad CSM. En este perfil, se calculan las curvas de frenado que unen los dos niveles de velocidad CSM. Siendo el primero de velocidad mayor que el segundo (ver ilustración 6).

Para el cálculo de las curvas de desaceleración (SBD y EBD) se tiene en cuenta el gradiente más desfavorable que está ocupando el tren en ese instante, junto con el esfuerzo máximo de frenado que puede aplicar ser aplicado. Generándose una curva de frenado, compuesta por sucesivos arcos de curva limitados por el gradiente y deceleración de frenado.



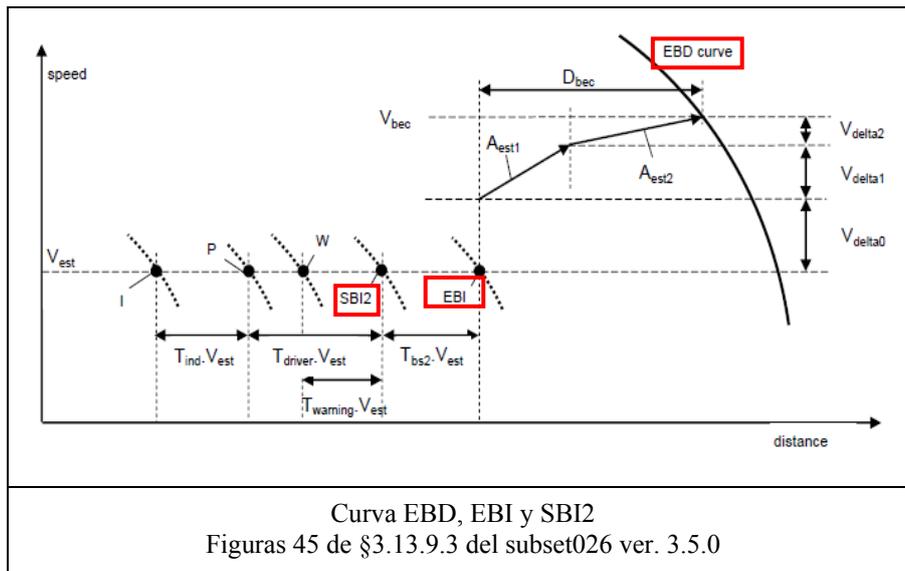
Las curvas calculadas para el perfil TSM son de dos tipos. La curva cuya velocidad objetivo es cero (EoA/DP) correspondiente al final del MA y las curvas cuya velocidad objetivo es distinta de cero (LoA/velocidad MRSP), correspondientes a las curvas de límite de velocidad que unen los diferentes niveles de velocidad del perfil CSM.

▪ Curva EoA/DP

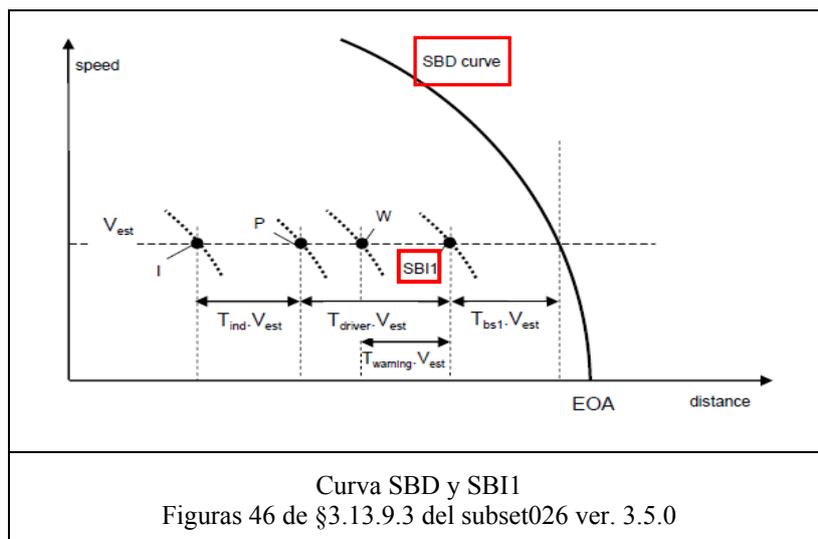
Corresponde al cálculo de la curva de frenado de parada del tren. Esta se define para los puntos EoA (punto de parada en la estación) y el DP (Posición de señal de salida de la estación). El procedimiento de cálculo de la curva de frenado se realiza en base a lo especificado en el §3.13.9.3 del subset026 ver. 3.5.0 (principalmente).

La curva de TSM de EoA (TSM\_EoA) se compone de 3 curvas principales:

- La curva de ‘Aplicación de Freno de Emergencia’ (EBI) e ‘Intervención de Freno de Servicio 2’ (SBI2), construidas a partir de la curva de ‘Desaceleración de Freno de Emergencia’ (EBD).



- La curva de 'Intervención de Freno de Servicio 1' (SBI1), construida a partir de la curva de 'Desaceleración de freno de Servicio' (SBD)



- Las curvas de 'Intervención de freno de servicio' (SBI), warning, permitted e indication. La curva SBI se construidas como a curva más restrictiva entre las curva mínima entre SBI1 y SBI2.

$$SBI_{EOA} = \min (SBI1, SBI2)$$

En la ilustración 6 se muestra el resultado del cálculo de la SBI y EBI por medio del calculador.

Las curvas ‘warning’, ‘permitted’ e ‘indication’ se obtienen a partir de la SBI en base a las siguientes ecuaciones:

- $Warn(i) = SBI(i) - (T_{warning} * V_{SBI}(i))$
- $Permitted(i) = SBI(i) - (T_{driver} * V_{SBI}(i))$
- $Indication(i) = Permitted(i) - (T_{ind} * V_{SBI}(i))$
- $Indication(i) = SBI(i) - (T_{driver} + T_{ind}) * V_{SBI}(i)$

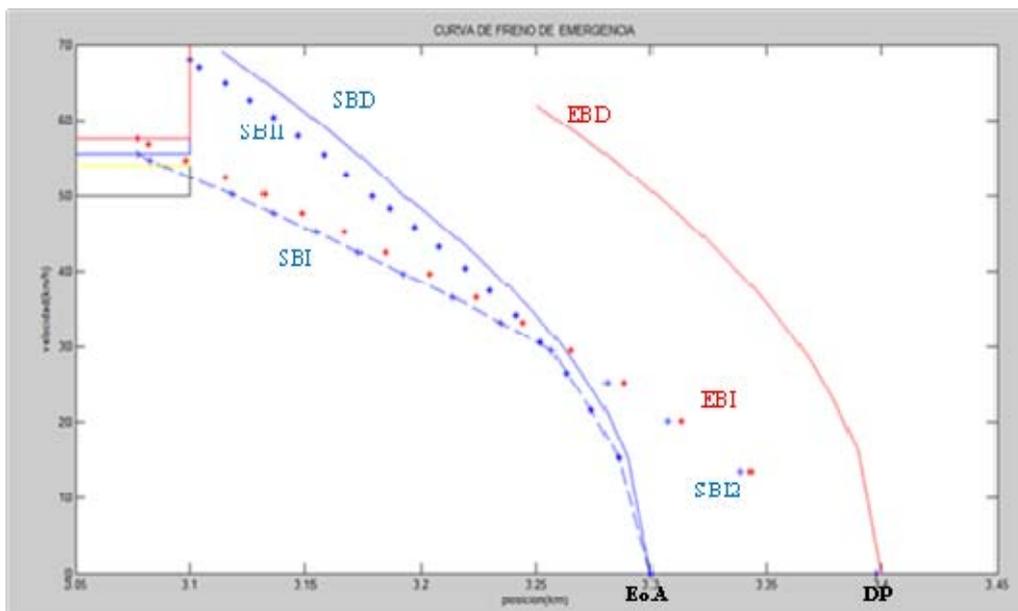


Ilustración 7

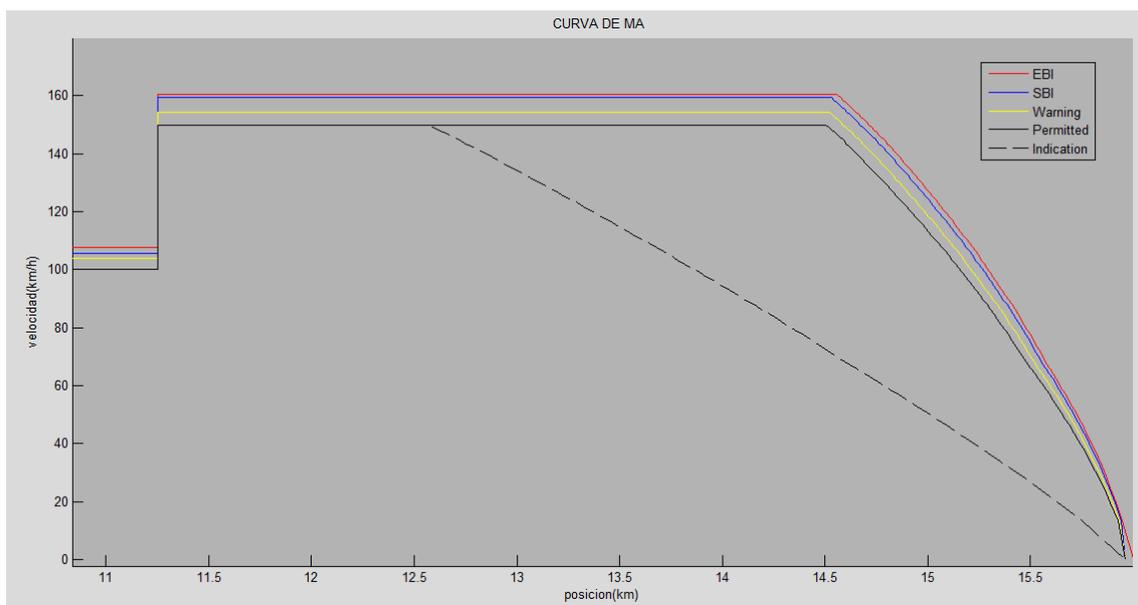
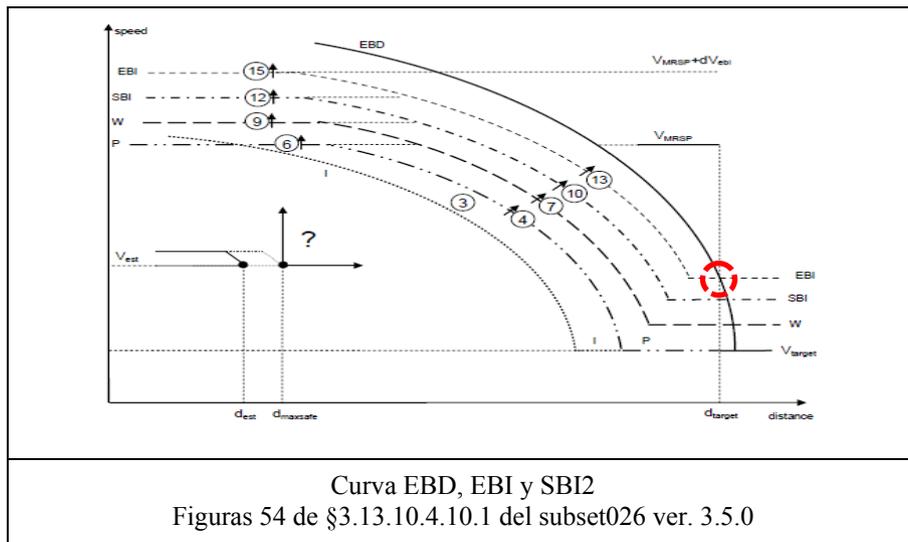


Ilustración 8

▪ Curva LoA/velocidad MRSP

Corresponde al cálculo de la curva de frenado cuyo velocidad objetivo es distinta de cero. Estas curvas unen los diferentes niveles de velocidad máxima que se encuentran definidos en el perfil de velocidad CSM. Por tanto, las velocidades objetivo son las velocidades Permitted, Warning, SBI y EBI del siguiente escaló del perfil CSM. La principal característica del cálculo de estas curvas es que la curva EBD del perfil TSM debe pasar por la posición de inicio del siguiente perfil EBI de CSM. El procedimiento de cálculo de la curva de frenado se realiza en base a lo especificado en el §3.13.9.3 y §3.13.10.4 del subset026 ver. 3.5.0 (principalmente).



El resultado del simulador es el que se muestra en la ilustración siguiente y se pueden apreciar las dos curvas TSM que unen dos perfiles de CSM, con velocidades objetivo de 200 km/h y 100 km/h.

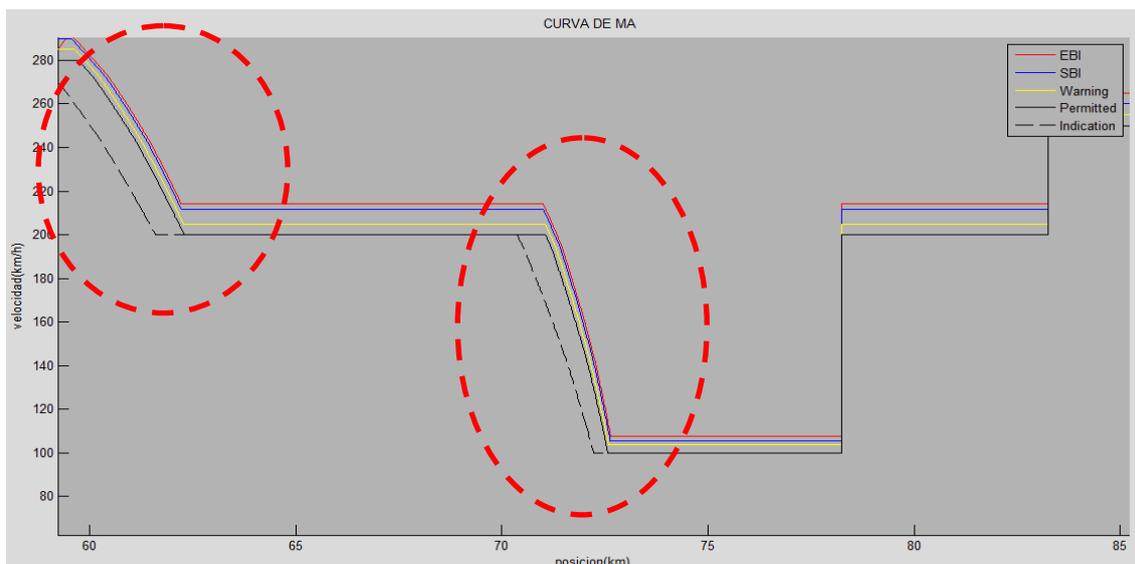


Ilustración 9

### 5.4.3 Cálculo de curvas de frenado dinámicas

Por curvas dinámicas de frenado, se hace referencia a las curvas de frenado que son calculadas por el sistema ATP en cada instante en función de los parámetros de configuración del equipo ERTMS, los parámetros de la infraestructura (gradientes), el límite de autoridad de movimiento (EoA), la posición del tren y la velocidad del tren en ese instante. Teniendo en cuenta el error tanto de posición, como de velocidad asociado la precisión de la odometría.

Para tener en cuenta la precisión de la odometría se tiene en cuenta la posición de la última baliza leída por el tren (última baliza por la cual ha pasado la cabeza del tren en la simulación) y el máximo error odométrico permitido según §5.3.1.1 y §5.3.1.2 del subset041 ver. 3.1.0.

Por lo tanto la precisión en posición y velocidad para el inicio del cálculo de la curva de frenado dinámico son las siguientes:

- Precisión en posición (§5.3.1.1)

La precisión en la posición de la cabeza del tren en el punto en el cual se simula el inicio o fin de la curva de frenado (según sea curva inversa o directa), es de 5m más 5% de la distancia de la cabeza del tren a la última baliza leída)

$$error_{posicion} = 5m + (0.05 * D_{Last\_Balice})$$

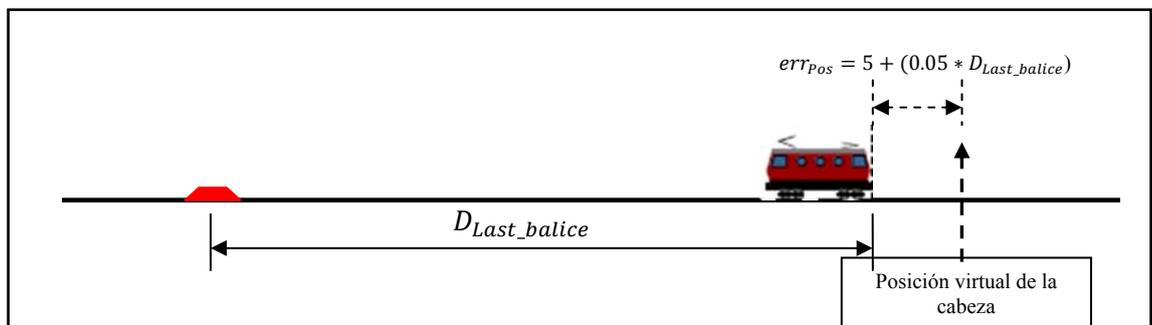


Ilustración 10

- Precisión en velocidad (§5.3.1.2)

La precisión en velocidad del tren se calcula como el error máximo permitido en el subset 041, aplicando el perfil de límite error descrito en él, esto es:

*“±2km/h para velocidades inferiores a 30km/h, incremento lineal hasta ±12km/h hasta 500km/h”*

En el cálculo de la velocidad del tren en el instante de calcular la curva de frenado se aplica un error de velocidad correspondiente a la siguiente ecuación:

$$\left\{ \begin{array}{l} V < 30 \frac{km}{h} \rightarrow V_{est} = V + 2 \text{ km/h} \\ 30 \frac{km}{h} \leq V < 500 \frac{km}{h} \rightarrow V_{est} = V + (m_{err} * (V - 30) + 2) \\ m_{err} = \frac{12 - 2}{500 - 30} \\ V \geq 500 \frac{km}{h} \rightarrow V_{est} = V + 12 \text{ km/h} \end{array} \right.$$

### 5.4.3.1 Curva inversa

Este tipo de curva es equivalente al cálculo de la curva de frenado de TSM con velocidad objetivo 0, a la cual se ha hecho referencia en el apartado de “perfil TSM”.

Esta curva de freno de emergencia se calcula partiendo de los puntos de EoA y DP, junto con los parámetros de configuración del tren (Datos ERTMS) y gradientes de vía, hasta encontrar los puntos de corte la curva Indication o Permitted (según el modo de conducción manual o ATO), con curva de simulación de movimiento de tren en el trayecto.

En el caso del nivel 1 de ERTMS, el cálculo de estas curvas permite obtener la distancia a la cual el tren debe iniciar el frenado, para no superar la posición de la baliza de señal (punto EoA), ni la señal (punto DP). De forma, que permite el cálculo de los tiempos mínimos de circulación y el posicionamiento de las balizas infill.

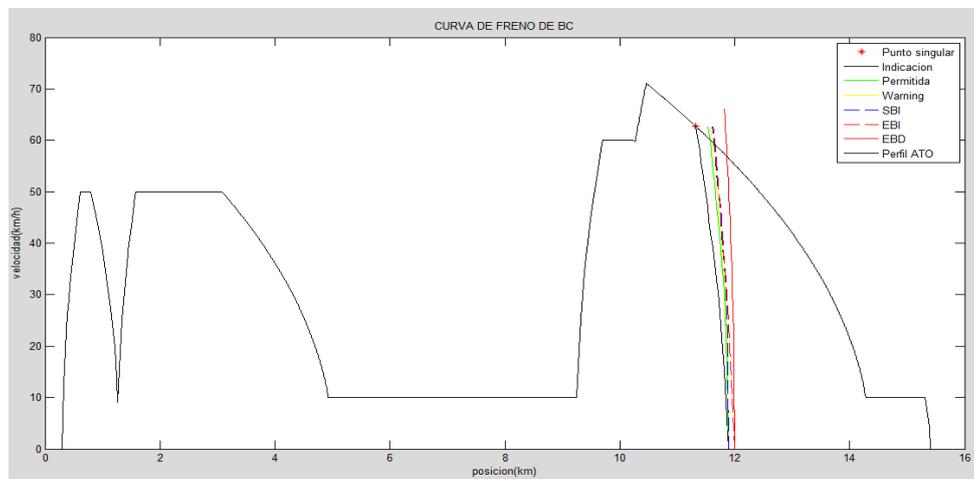


Ilustración 11

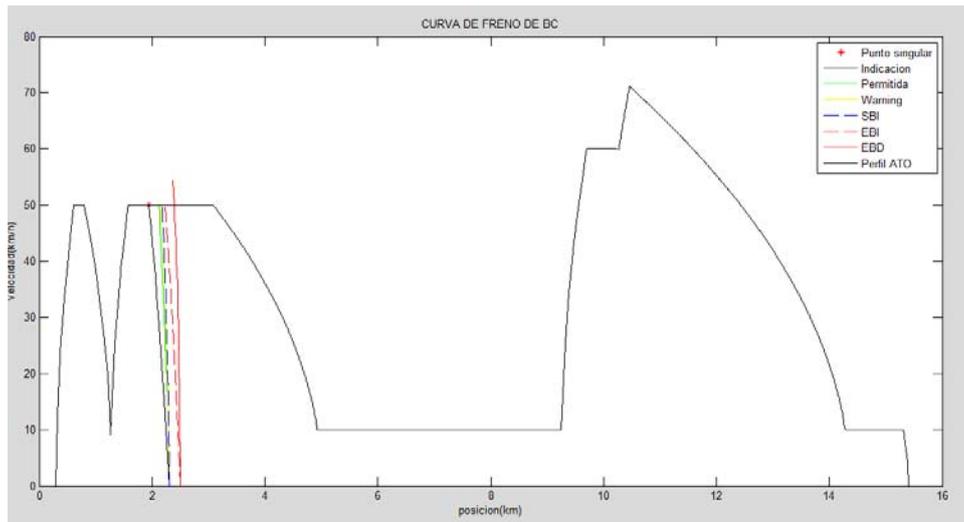


Ilustración 12

#### 5.4.3.2 Curva directa

Este tipo de curva hace referencia a la curva de freno de servicio calculada partiendo de la posición y velocidad actual del tren, error odométrico, parámetros de configuración del tren (Datos ERTMS) y gradientes de vía, según marca la especificación de ERTMS.

Corresponde a la curva de frenado que calcula instantáneamente el equipo ATP para supervisar los límites de velocidad y posición en base a la curva de MA (MRSBCP) pre calculada.

Con el cálculo de esta curva se obtiene la distancia de frenado aplicando el *freno de servicio* y el perfil de velocidad máxima en cada instante. Esta información es utilizada para el **cálculo del tiempo mínimo de circulación en nivel 2 y 3** de ERTMS.

En el caso del Nivel 2 de ERTMS, el cálculo de esta curva permite obtener la distancia que necesita el tren para parar en el inicio de cada circuito de vía y por tanto, cuantos CV necesita tener libres por delante, de forma que la circulación se asegura.

En el caso del Nivel 3 de ERTMS, el cálculo de esta curva permite obtener la distancia que necesita el tren en cada instante de cálculo por tanto, cuanta distancia por delante del tren necesita libre de forma que la circulación se asegura.

Los procedimientos de cálculo en detalle de los tiempos mínimos de circulación se exponen en el capítulo “Cálculo de tiempos mínimos de circulación”.

La ilustración 9 nuestra de forma gráfica, el procedimiento de cálculo de las curvas de perfil de velocidad asociadas a la curva de freno de servicio de forma ‘directa’.

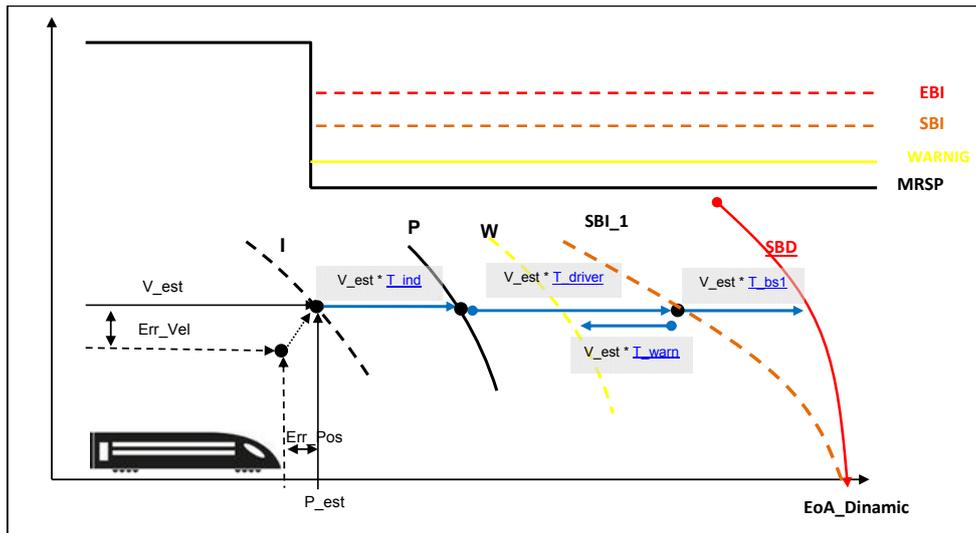


Ilustración 13

La siguiente ilustración muestra el resultado del cálculo de la curva de frenado de servicio a una velocidad de 210 km/h, el Pk 3 de la simulación. Se obtiene una distancia de frenado de servicio de aproximadamente 2,7 km.

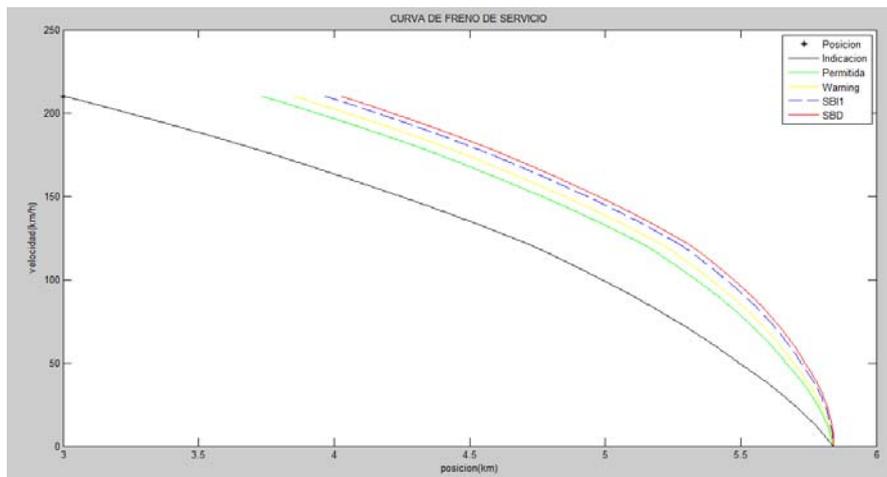


Ilustración 14

## 5.5 Simulador de conducción

En este capítulo se describe el algoritmo que gobierna el modo de conducción del tren en la simulación de circulación, junto con los cálculos dinámicos y cinemáticos realizados para obtener la velocidad y posición del tren en cada instante.

Este algoritmo calcula el valor del esfuerzo de tracción y freno que va a ser aplicado en función de:

- Modo y Estrategia de conducción seleccionada (ATO).
- Las fuerzas de resistencia que existente en cada instante.
- Las condiciones de infraestructura (zonas neutras).
- Limitaciones de velocidad y aceleración.

Por tanto, los datos básicos de entrada son:

- Posición del tren.
- Velocidad actual.
- Aceleración actual.
- Aceleración de resistencia al avance.
- Curva MRSBCP.
- Prestaciones de Tracción.
- Prestaciones de Freno.
- Límite de aceleración máxima por explotación ( $a_{ex}$ ).
- Límite de deceleración máxima por explotación ( $d_{ex}$ ).
- Posición de ZN.
- Distancia de apertura del Disyuntor.
- Velocidad máxima de circulación en modo ATO.
- Modo de conducción
- Estrategia de conducción

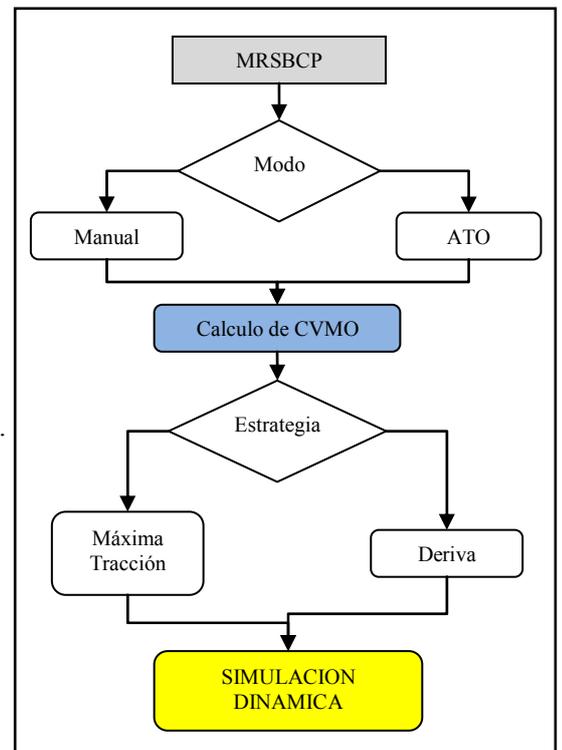


Ilustración 15

Flujo básico de eventos de la simulación

### 5.5.1 Curva límite de conducción ATO (CVMO)

El simulador permite definir como parámetros de explotación ferroviarios las siguientes características:

- Aceleración máxima de tracción.

Se puede definir una aceleración máxima de confort ( $m/s^2$ ) a la cual el tren realiza la simulación de circulación. Esta aceleración siempre es menor o igual a la aceleración máxima que permite las prestaciones de tracción configuradas en los “datos de tren”.

$$a_{tren} = \min (a_{ATO}, a(v_i)|_{Tracc})$$

- Deceleración máxima de frenado.

Es posible definir una deceleración máxima de confort ( $m/s^2$ ) que se aplica a cada momento de aplicación de freno. La aplicación de esta deceleración implica el recálculo de todas las curvas de frenado límite calculadas por el simulador ATP.

La curva de frenado resultante será la más restrictiva entre la curva MRSBCP y la curva de frenado con deceleración de confort.

- Velocidad máxima

Es posible limitar la velocidad máxima de todo el recorrido por razones de explotación. Esta velocidad máxima es independiente de las velocidades máximas del tren (limitación por prestaciones de tracción) y la velocidad máxima obtenida en el cálculo de la CSM.

En la siguiente figura se puede observar el efecto de la limitación de la deceleración máxima de frenado por confort y la limitación de velocidad por cuestiones de explotación.

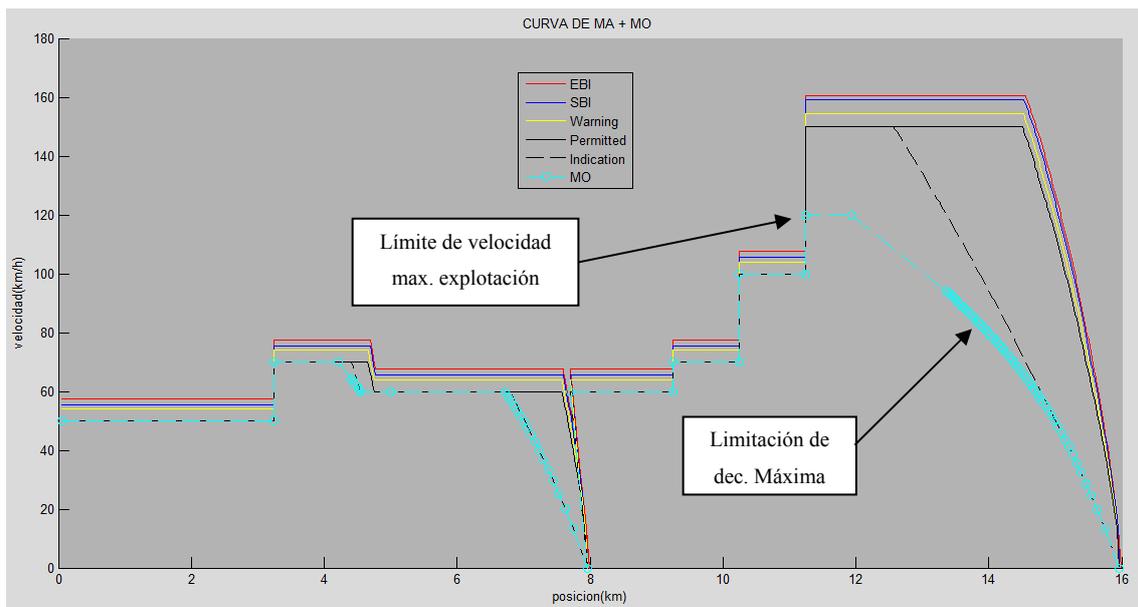


Ilustración 16

### 5.5.2 Modos de conducción

El simulador implementa la posibilidad de simular 2 modos de conducción. Estos modos se basan en la curva límite de velocidad ERTMS pre-calculada en la MRSBCP (curva de MA) que el simulador de conducción toma como referencia.

Según se seleccione el modo de conducción “manual” o “ATO” el simulador genera la curva límite de velocidad “Indication” o “Permitted”, respectivamente, y a partir de una de estas dos curvas se construye la curva CVMO.

#### 5.5.2.1 Manual

El modo de conducción manual intenta simular la conducción que realizaría **un maquinista**, por tanto la curva de seguridad que se toma como referencia es la curva “**Indication**”.

Partiendo de la curva de indicación se construye la curva CVMO, siendo esta última la que utiliza el simulador como curva de velocidad de referencia durante la simulación de la conducción.

Dado que la curva “Indication” es una curva que presenta un adelanto con respecto a la curva “Permitted”, la conducción en este modo dará tiempos de recorrido mayores.

#### 5.5.2.2 Automático – ATO

El modo de conducción ATO intenta simular la conducción que realizaría **un ATO**, por tanto la curva de seguridad que se toma como referencia es la curva “**Permitted**”.

Partiendo de la curva permitted se construye la curva CVMO, siendo esta última la que utiliza el simulador como curva de velocidad de referencia durante la simulación de la conducción.

Dado que la curva “Permitted” es una curva que presenta un retardo con respecto a la curva “Indication”, la conducción en este modo dará tiempos de recorrido menores.

### 5.5.3 Estrategia de conducción

De la misma forma que se han desarrollado dos modos de conducción, se han desarrollado dos tipos de estrategia de conducción: Tracción máxima y Deriva.

Estas dos estrategias de conducción afectan principalmente a la energía consumida en tracción y al tiempo empleado en el recorrido del trayecto, siendo independiente del modo de conducción.

De esta forma se aportan 2 variables en la definición de la simulación de la conducción (Modo, Estrategia), permitiendo una mayor flexibilidad en la simulación y aportando mucha mayor información en la misma.

**5.5.3.1 Conducción de Tracción Máxima**

La estrategia de conducción en Tracción Máxima consiste en la aplicación del mayor esfuerzo de tracción disponible en el momento que es necesario traccionar para alcanzar la velocidad de referencia marcada por la curva CVMO. La aceleración de tracción solo estará limitada, por las prestaciones de tracción del tren y la aceleración máxima definida en los datos de explotación (si esta aceleración existiera).

Por tanto, las condiciones del algoritmo son las siguientes:

- C\_CtM.1** Se tiene como límite máximo de circulación la velocidad menor entre la velocidad permitida por la curva MRSBCP(i) en cada instante y la velocidad máxima de explotación (V\_ATO).

$$V_{\max}(i) = \text{Min} \{ \text{MRSBCP}(i), V_{\text{ATO}} \}$$

- C\_CtM.2** Se aplicará el esfuerzo de tracción máxima disponible en cada momento, limitado únicamente a la aceleración de operación ( $a_{\text{ex}}$ ) hasta alcanzar la velocidad máxima definida por la curva MRSBCP.

Si  $V_{\text{tren}}(i) < \text{MRSBCP}(i)$   
 Mientras:  $A_{\text{result}} = A_{\text{traccion}}(V_{\text{tren}}) - A_{\text{Resist\_tren}}(V_{\text{tren}}, i) > 0$   
 $A_{\text{tracción\_aplicada}} = \text{Min} \{ A_{\text{traccion\_tren}}(V_{\text{tren}}, i), a_{\text{ex}} \}$   
 Cuando:  $A_{\text{result}} = A_{\text{traccion}}(V_{\text{tren}}) - A_{\text{Resist\_tren}}(V_{\text{tren}}, i) \leq 0$   
 $A_{\text{tracción\_aplicada}} = A_{\text{traccion\_tren}}(V_{\text{tren}}, i)$

- C\_CtM.3** Se aplica el esfuerzo de freno máximo en cada momento, limitado únicamente por la deceleración de confort ( $d_{\text{ex}}$ ). En el momento de alcanzar la velocidad máxima de la zona de perfil MRSBCP definida como freno (CVMO).

Si  $P_{\text{tren}} = \text{TSM}$   
 $D_{\text{freno\_aplicada}} = \text{Min} \{ D_{\text{freno\_tren}}(V_{\text{tren}}, i), d_{\text{ex}} \}$

- C\_CtM.4** Cuando se alcance la velocidad máxima de MRSBCP el esfuerzo de tracción o freno será el máximo posible (dentro de las limitaciones de  $a_{\text{ex}}$  y  $d_{\text{ex}}$ ) para poder mantener la velocidad máxima del perfil MRSBCP.

Si  $V_{\text{tren}}(i) = \text{CSM}$   
 Mientras:  $A_{\text{Resist\_tren}}(V_{\text{tren}}, i) > 0$   
 $A_{\text{traccion\_aplicada}} = \text{Min} \{ A_{\text{Resist\_tren}}(V_{\text{tren}}, i), A_{\text{traccion\_tren}}(V_{\text{tren}}, i) \}$   
 Mientras:  $A_{\text{Resist\_tren}}(V_{\text{tren}}, i) < 0$   
 $D_{\text{freno\_aplicada}} = \text{Min} \{ A_{\text{Resist\_tren}}(V_{\text{tren}}, i), D_{\text{freno\_tren}}(V_{\text{tren}}, i) \}$

Para poder llevar a cabo este tipo de conducción se debe generar previamente un nuevo perfil de velocidad de seguimiento de frenado, basado en el perfil MRSBCP y la condición C\_CtM.2.

Este nuevo Perfil de velocidad de seguimiento mantiene la misma velocidad del perfil MRSBCP en la zona de velocidad constante (CSM), pero se modifica la parte del perfil de velocidad de aplicación de freno (TSM) en base a condición C\_CtM.2.

La sección de CSM se ve recortada en el punto de intersección de la nueva curva de frenado generada por la condición C\_CtM.2, que se construye desde el pie de la curva de TSM.

Esta nueva curva de ATO se denomina Curva de Velocidad Máxima de Operación (CVMO).

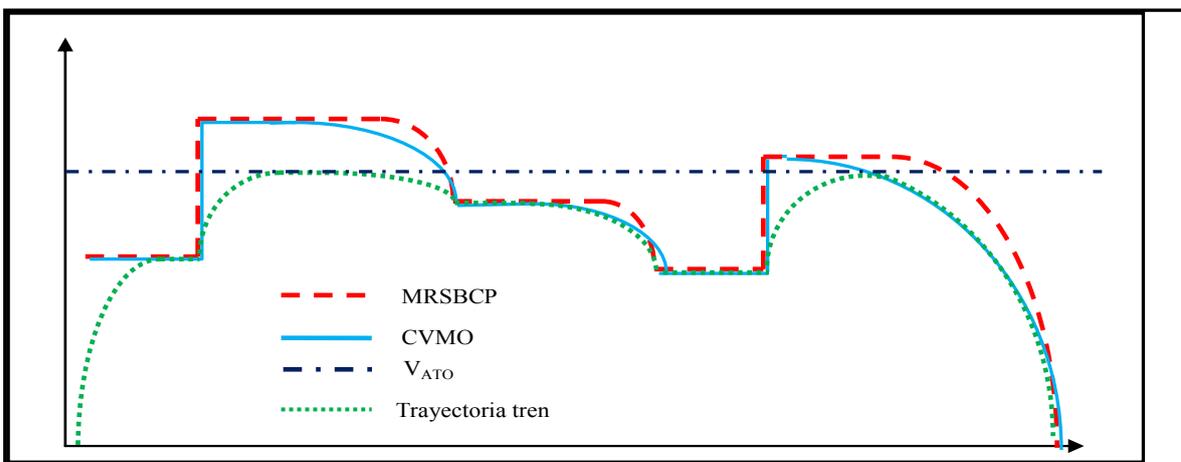


Ilustración 17

La siguiente ilustración representa el resultado de la simulación de conducción en Modo Manual, con una desaceleración de confort  $0.6 \text{ m/s}^2$  y estrategia de conducción “Tracción Máxima”

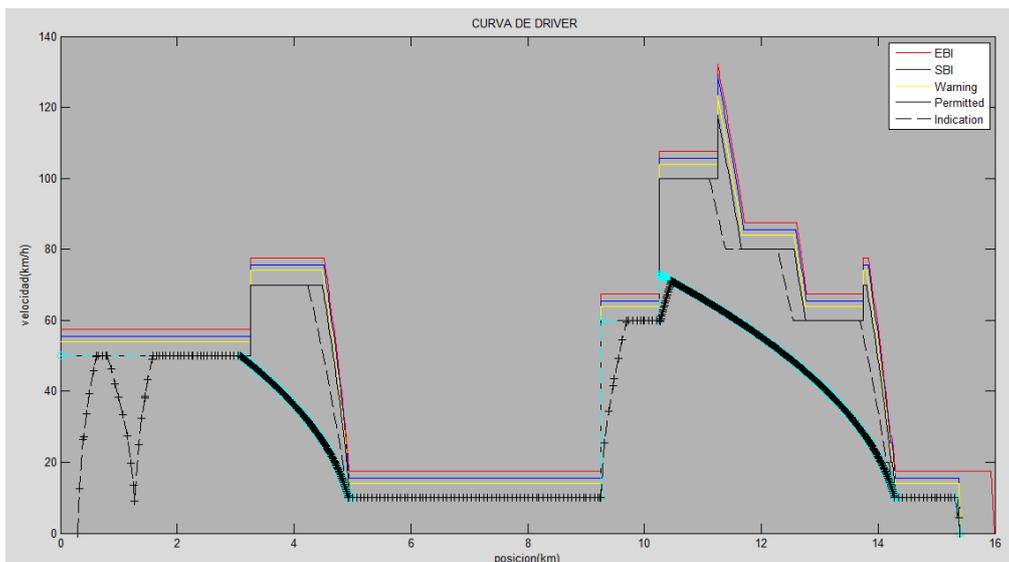


Ilustración 18

**5.5.3.2 Conducción con Deriva**

La estrategia de conducción en deriva consiste en la ausencia de aplicación de esfuerzo de tracción una vez alcanzada la velocidad objetivo, hasta que la velocidad del tren disminuya un  $\Delta v$  por debajo de la velocidad de referencia en cada posición. Momento en el cual se volverá aplicar tracción máxima hasta alcanzar la velocidad de referencia.

Mediante este modo de conducción se produce un ahorro en la energía consumida por tracción, dado que se limita la aplicación de tracción a intervalos y no de forma continuada.

Las condiciones del algoritmo son las siguientes:

**C\_CcD.1.** Se tiene como límite máximo de circulación la velocidad menor entre la velocidad permitida por la curva MRSBCP(i) en cada instante y la velocidad máxima de explotación (V\_ATO).

$$V_{\max}(i) = \text{Min}\{MRSBCP(i), V_{ATO}\}$$

**C\_CcD.2.** Se aplicará el esfuerzo de tracción máximo disponible en cada momento, limitado únicamente aceleración de operación ( $a_{ex}$ ) hasta alcanzar la velocidad máxima definida por la curva MRSBCP.

```

Si V_tren(i) = CSM
  Mientras: A_Resist_tren(V_tren,i) > 0
    A_traccion_aplicada = Min{A_Resist_tren(V_tren,i), A_traccion_tren(V_tren_i)}
  Mientras: A_Resist_tren(V_tren,i) < 0
    D_freno_aplicada = Min{A_Resist_tren(V_tren,i), D_freno_tren(V_tren_i)}
  
```

**C\_CcD.3.** Se aplica el esfuerzo de freno máximo en cada momento, limitado únicamente limitada por la ( $d_{ex}$ ), en el momento de alcanzar la velocidad máxima en la zona de perfil MRSBCP definida como freno (CVMO).

```

Si P_tren = TSM
  D_freno_aplicada = Min{ D_traccion_tren(V_tren_i), dex}
  
```

**C\_CcD.4.** Cuando se alcance la velocidad máxima de MRSBCP en zona CSM se entra en deriva dándose la siguiente condiciones:

- a. Si la aceleración de resistencia es positiva o nula (frena al tren), el tren entra en deriva hasta que la velocidad del tren sea inferior a la velocidad del perfil MRSBCP

en ese punto, menos una velocidad diferencial definida ( $dV_{ATO}$ ). Momento en el cual se acelerara con tracción máxima en base la condición C\_CcD.2

Esta condición solo es válida mientras el tren este en la zona de CSM, en el momento que entre en la zona de TSM se aplica la condición C\_CcD.1 y C\_CcD.3

Si ( $V_{tren(i)} = CSM$ ) y ( $A_{resist} \leq 0$ ) :

$$A_{traccion\_aplicada} = 0$$

Mientras: ( $V_{tran} > CSM(i) - dV_{ATO}$ ) y ( $P_{tren} = CSM$ ).

- b. Si la aceleración de resistencia es negativa (acelera al tren), el tren aplicara el esfuerzo de freno necesario hasta igualar la fuerza aceleradora, sin limitación de  $d_{ex}$ .

Si ( $V_{tren(i)} = CSM$ ) y ( $A_{resist} < 0$ ) :

$$D_{freno\_aplicada} = Abs(A_{resist})$$

Mientras:  $P_{tren} = CSM$

Esta condición solo es válida mientras el tren este en la zona de CSM, en el momento que entre en la zona de TSM se aplica la condición C\_CcD.3.

Para poder llevar a cabo este tipo de conducción se debe generar previamente un nuevo perfil de velocidad de seguimiento de frenado, basado en el perfil MRSBCP y la condición C\_CcD.2.

Esta nuevo Perfil de velocidad de seguimiento mantiene la misma velocidad del perfil MRSBCP en la zona de velocidad constante (CSM), pero se modifica la parte del perfil de velocidad de aplicación de freno (TSM) en base a condición C\_CcD.3.

La sección de CSM se ve recortada en el punto de intersección de la nueva curva de frenado generada por la condición C\_CcD.3, que se construye desde el pie de la curva de TSM.

Esta nueva curva de ATO se denomina Curva de Velocidad Máxima de Operación (CVMO).

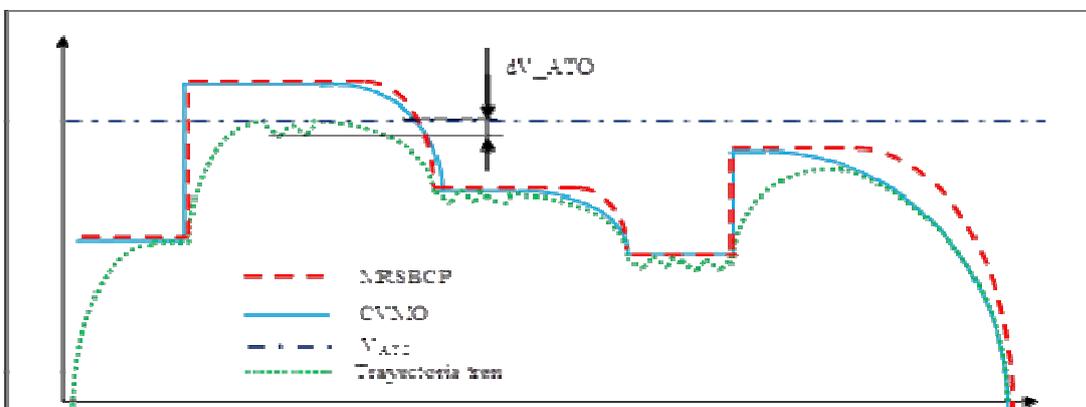


Ilustración 19

### 5.5.4 Zonas neutras

El simulador es capaz de tratar la existencia de zonas neutras. Para tal fin se definen los siguientes datos que caracterizan la Zona neutra y su tratamiento:

- Posición de la Zona neutra.
- Longitud de la Zona neutra.
- Distancia de la ZN a la cual se debe realizar la apertura del disyuntor ( $d_{\text{apertura}}$ ).

El simulador de conducción trata la ZN de forma a la distancia ' $d_{\text{apertura}}$ ' el simulador deja de aplicar tracción y únicamente simula la aplicación de freno, si la velocidad del tren supera la velocidad límite fijada por la curva CVMO.

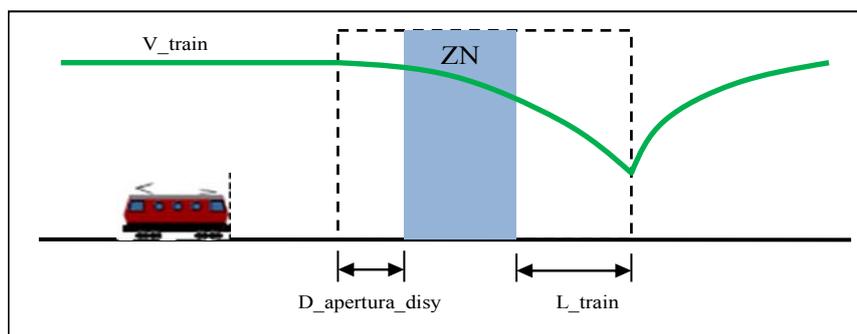


Ilustración 20

Superado el final de ZN más la longitud del tren, el simulador vuelve a intentar seguir la curva de velocidad de referencia CVMO.

En la ilustración siguiente se observa el efecto de pérdida de velocidad en una simulación en la cual el tren entra en una ZN, en la cual la pendiente es muy acusada (20‰) para realizar el efecto de pérdida de velocidad. Se observa, como a la salida de la zona de influencia de la zona (final de ZN + Longitud del tren), el tren recupera velocidad intentando alcanzar la velocidad e referencia, fijada por la curva CVMO (color magenta).

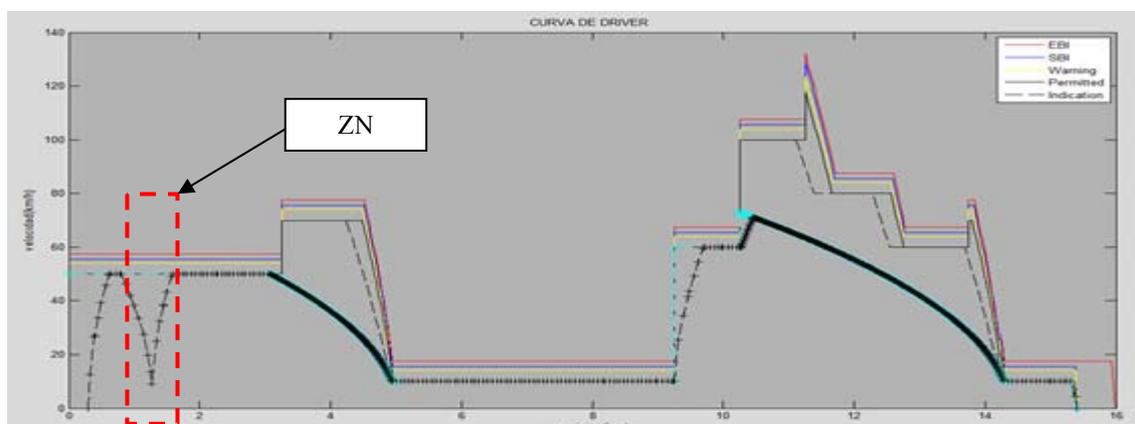


Ilustración 21

### 5.6 Calculador Dinámico y Cinemático

El calculador Dinámico/Cinemático realiza el cálculo de las fuerzas<sup>9</sup> que se ejercen sobre el tren. Mediante el cálculo de la resultante de las fuerzas se obtiene la posición, velocidad y aceleración del tren en cada ciclo de cálculo.

También se obtiene otros resultados derivados del cálculo de los esfuerzos y velocidades, como es la energía consumida y los tiempos de los recorridos.

El cálculo de las fuerzas se realiza sobre toda la longitud del tren (Gradientes, Curva, resistencia aerodinámica). Sin embargo, la resultante de las fuerzas se aplica sobre una masa puntual de valor: masa del tren + carga y cuya posición se encuentra en la cabeza del tren.

Como resultado de la simulación dinámica se obtienen los siguientes datos:

- Posición del tren (Km)
- Velocidad del tren ( km/h)
- Tiempo absoluto en cada posición (segundos).
- Aceleración/Deceleración del tren (m/s<sup>2</sup>)
- Aceleración/Deceleración<sup>10</sup> aplicada al tren (m/s<sup>2</sup>).
- Estado del manipulador (Tracción (%), Freno (%), Deriva)
- Tipo de Actuación del sistema de tracción/freno (Eléctrica, Neumática)
- Esfuerzo de tracción( kN)
- Esfuerzo de Frenado (kN)
- Energía consumida por tracción (kJ)
- Energía regenerada por freno eléctrico (kJ)
- Energía consumida por auxiliares (kJ)
- Energía Neta acumulada de tracción y freno (kJ)

#### 5.6.1 Paso de Integración

El cálculo se realiza por medio de una **integración espacial** y no temporal. Este cálculo se realiza así ya que se considera que la precisión deseada es en la situación del tren y no en el momento temporal que se encuentra. Por tanto, el paso de integración se realiza en metros, con una **resolución máxima de 1 metro**. Este parámetro es configurable en la simulación.

El paso de integración durante la simulación será variable, dado que la premisa que se mantiene durante la simulación dinámica es que los puntos obtenidos tengan entre sí aceleración distintas.

---

<sup>9</sup> No se tienen en cuenta las componentes vectoriales paralelas a la vía. No se tienen en cuenta las fuerzas asociadas a la interacción rueda-carril, exceptuando la aproximación de la resistencia en curva.

<sup>10</sup> Fuerza de tracción aplicada, dividida entre la masa total del tren y corregida por el factor de masas rotativas.

De forma que en una representación de velocidad/espacio los puntos obtenidos tienen aceleraciones distintas y el espacio que los separa serán punto con la misma aceleración.

Esta forma de cálculo permite realizar la simulación con mayor velocidad sin pérdida alguna de resolución.

Por tanto, el paso de integración se calcula para cada iteración como la mínima distancia de los siguientes valores:

- [1].  $\Delta x$ : paso de integración mínimo pre-configurado.
- [2].  $\Delta d|_i^G$ : distancia de validez de gradientes.
- [3].  $\Delta d|_i^C$ : distancia de validez de curvas.
- [4].  $D|_i^T$ : Distancia de validez de Túnel.
- [5].  $D|_i^{ZN}$ : Distancia de validez de ZN.
- [6].  $D|_i^{EoA}$ : Distancia al EoA.
- [7].  $\Delta d|_i^{CVMO}$ : Distancia a la curva de velocidad máxima de operación.
- [8].  $D|_i^{Tr}$ : Distancia de validez del esfuerzo de tracción en función de la velocidad.
- [9].  $D|_i^{Fr}$ : Distancia de validez del esfuerzo de freno en función de la velocidad.

$$\Delta x|_i^* = \text{Min} \{ \Delta x, \Delta d|_i^G, \Delta d|_i^C, D|_i^T, D|_i^{ZN}, D|_i^{EoA}, \Delta d|_i^{CVMO}, D|_i^{Tr}, D|_i^{Fr} \}$$

Ecuación 1

### 5.6.2 Fuerzas

Las fuerzas que se tienen en cuenta son:

- Fuerzas asociadas a los Gradientes.
- Fuerzas asociadas a los Radios de curvatura.
- Fuerzas de resistencia al avance.
- Fuerzas aerodinámicas en los túneles.
- Esfuerzo de Tracción.
- Esfuerzos de Frenado.

Otras condiciones no asociadas directamente con las fuerzas que se tiene en consideración son:

- Masas inerciales (rotativas).
- Zonas neutras.
- Distancia de apertura del Disyuntor.

Las ZN son tenidas en cuenta dado que son zonas donde no existirá esfuerzo de tracción, aunque sí que podrá existir esfuerzo de freno neumático.

Por tanto, la posición y velocidad del tren se calcula a cada intervalo espacial de integración ( $\Delta x|_i^{AT0}$ ). Durante este intervalo de integración se considera que las fuerzas que actúan sobre el tren son constantes y son reevaluadas al instante siguiente.

El tren se considera una partícula puntual y sobre ella actúan la resultante de las fuerzas calculadas en cada instante.

Por tanto, la suma de fuerzas que actúan sobre el tren en el instante  $i$ , durante una distancia es  $\Delta x|_i^*$ :

$$F_T|_i^{\Delta x^*} = F_g|_i^{\Delta x^*} + F_C|_i^{\Delta x^*} + R_{av}|_i^{\Delta x^*} + F_{Tr}|_i^{\Delta x^*} + F_{Fr}|_i^{\Delta x^*}$$

**Ecuación 2**

- $F_g|_i^{\Delta x^*}$ : Fuerza debido a los gradientes, en el instante  $i$ , aplicada durante un intervalo de integración espacial  $\Delta x^*$ .
- $F_C|_i^{\Delta x^*}$ : Fuerza debido a la acción de la curva, en el instante  $i$ , aplicada durante un intervalo de integración espacial  $\Delta x^*$ .
- $R_{av}|_i^{\Delta x^*}$ : Fuerza debido a las resistencias al avance, entre ellas la resistencia aerodinámica, en el instante  $i$ , aplicada durante un intervalo de integración espacial  $\Delta x^*$ .

$$R_{av}|_i^{\Delta x^*} = T * C * V^2 + B * V + C$$

- $F_{Tr}|_i^{\Delta x^*}$ : Fuerza debido a la tracción del tren, en el instante  $i$ , aplicada durante un intervalo de integración espacial  $\Delta x^*$ .
- $F_{Fr}|_i^{\Delta x^*}$ : Fuerza debido a la acción del freno, en el instante  $i$ , aplicada durante un intervalo de integración espacial  $\Delta x^*$ .

La resultante de estas fuerzas se puede representar como la suma de las aceleraciones:

$$a_T|_i^{\Delta x^*} = a_g|_i^{\Delta x^*} + a_C|_i^{\Delta x^*} + a_{aer}|_i^{\Delta x^*} + a_{Tr}|_i^{\Delta x^*} + a_{Fr}|_i^{\Delta x^*}$$

**Ecuación 3**

Considerando que la aceleración total ( $a_T|_i^{\Delta x^*}$ ) permanece constante durante el espacio de integración  $\Delta x^*$ , se calcula la velocidad y posición en el instante  $i+1$  como:

- Velocidad en el instante  $i+1$ :

$$V_t|_{i+1} = \sqrt{V_t|_i^2 + 2 * a_T|_i^{\Delta x^*} * \Delta x^*}$$

- Posición en el instante  $i+1$ :

$$P_t|_{i+1} = P_t|_i + \Delta x^*$$

- El tiempo absoluto se calcula:

$$t|_{i+1} = t|_i + \Delta t_i$$

La variación de tiempo entre el instante  $i$  e  $i+1$  ( $\Delta t_i$ ) se calcula como la variación de la velocidad entre  $i$  e  $i+1$  a una aceleración constante ( $\overrightarrow{a_T}|_i^{\Delta x^*}$ ):

$$\Delta t_i = \frac{\Delta V_t|_i^{i+1}}{a_T|_i^{\Delta x^*}}$$

En los momentos en el cual el tren no está sometido a una aceleración (se mantiene la velocidad constante), el tiempo se calcula como la variación de la distancia a una velocidad constante:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta S_t|_i^{i+1}}{V|_i^{\Delta x^*}}$$

A continuación se describe el cálculo de las fuerzas que actúan sobre el tren y el procedimiento de cálculo en cada iteración.

### 5.6.2.1 Masa rotativa

La corrección debida a la masa rotativa del tren respecto a la masa total del tren, se realiza únicamente en los momentos de aceleración y desaceleración del tren.

El dato de porcentaje de masa rotativa respecto a la masa del tren (en tara) es un dato que está recogido en los “datos de tren”.

La aplicación de la corrección debido al efecto de las masas rotativas, se aplica sobre la aceleración/deceleración resultante de las sumas de las fuerzas que se aplican sobre el tren.

El coeficiente de corrección de las masas rotativas se define como:

$$C_{mgira} = \frac{M_T}{(1 + fg) * M_t + M_k}$$

Ecuación 4

- $M_T$ : Masa total del tren, en toneladas (masa del tren + masa de carga).
- $M_t$ : Masa del tren en vacío, en toneladas.
- $M_k$ : Masa de carga del tren, en toneladas.
- $fg$ : Porcentaje de masas rotativas.

Por tanto, la aceleración corregida sería:

$$a_T|_i^{\Delta x^*}|_{Corr} = C_{mgira} * a_T|_i^{\Delta x^*}$$

Ecuación 5

El procedimiento por el cual se utiliza este coeficiente de corrección se describe en el anexo de cálculo dinámico.

### 5.6.2.2 Fuerza de Gravedad

Para este cálculo se tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- Signo de los gradientes que afectan al tren.
- Longitud del tren.
- Masa del tren.
- Masa de Carga

La aplicación de la resultante de las fuerzas se realiza sobre una masa de carácter puntual. Sin embargo, el cálculo de la fuerza promedio de la acción de la gravedad debida a los diferentes gradientes de la vía, se calcula sobre un sólido con distribución de masa uniforme. Siendo la masa total del tren la suma de la masa propia del vehículo (Tara), más la carga que transporte.

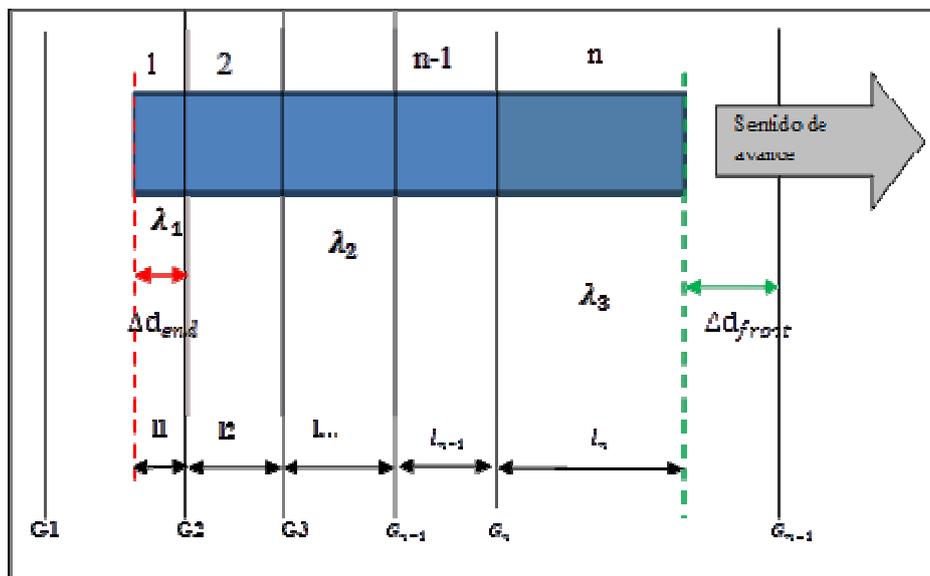


Ilustración 22

Por tanto, el cálculo de las fuerzas que aplica al tren por gravedad es el siguiente:

1. Supongamos que al tren le afectan **n** número de gradientes.
2. El gradiente ascendente en sentido de la marcha se considera con signo + y el gradiente descendente con signo -.
3. El gradiente es dado en milésimas, esto es, un gradiente de 10 milésimas es  $G_i = 10$ .
4. Definimos el factor de gradiente  $\lambda_i$  como el gradiente con signo ( $G_i$ ), que está afectando al tren en su longitud ( $l_i$ ).

$$\lambda_i = G_i * l_i$$

Ecuación 6

5. Por tanto, las fuerza gravitatorias que afectan al tren por efecto de los gradientes es:

$$F_g[N] = \sum_{i=1}^n \left[ m_i[kg] * \frac{G_i}{1000} \right] * g = \sum_{i=1}^n \left[ M_T[kg] \frac{l_i[m]}{L_T[m]} * \frac{G_i}{1000} \right] * g$$

$$F_g[N]|_i = g * \frac{M_T}{1000 * L_T} * \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Ecuación 7

6. La aceleración derivada de esta fuerza sería:

$$a_g[m/s^2]|_i = \frac{g}{1000 * L_T} * \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Ecuación 8

5.6.2.3 Fuerza en curva

Para este cálculo se tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- Radio de curvatura.
- Longitud del tren.
- Masa del tren.
- Masa de Carga

La aplicación de la resultante de las fuerzas se realiza sobre una masa de carácter puntual. Sin embargo, el cálculo de la fuerza promedio de la acción de la resistencia producida por circular en curva, se calcula sobre un sólido con distribución de masa uniforme. Siendo la masa total del tren la suma de la masa propia del vehículo (Tara), más la carga que transporte.

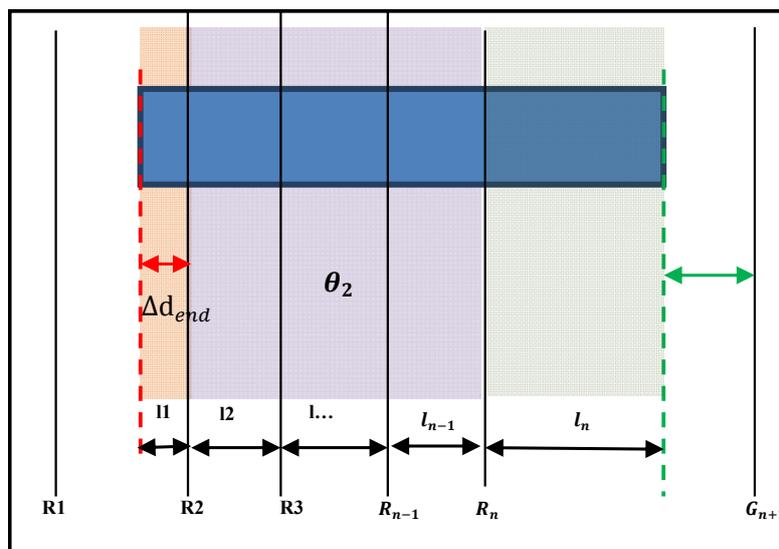


Ilustración 23

Por tanto, el cálculo de las fuerzas que aplica al tren por curva es el siguiente:

1. Supongamos que al tren le afectan las curvas.
2. El sentido de la curva (derechas o izquierdas no tiene aplicación)
3. El radio de las curvas viene dado en metros.
4. Definimos el factor de curva  $\theta_i$  que afecta al tren en la curva de radio  $R_i$ , en la longitud de tren ( $l_i$ ).

$$\theta_1 = \frac{l_1}{R_1}$$

**Ecuación 9**

5. Para definir la fuerza que afecta al tren debido a que está inscrito en una curva se toman como referencia las siguientes ecuaciones:

- Para vías de 1.668 mm

$$F_C[N] = 10 * M[t] * \frac{800}{R_i[m]}$$

- Para vías de 1.435 mm

$$F_C[N] = 10 * M[t] * \frac{600}{R_i[m]}$$

Se puede redefinir como:

$$F_C[N] = 10 * M[t] * \frac{\delta_{via}}{R_i[m]}$$

**Ecuación 10**

$\delta_{via}$ : Es el factor de ancho de vía

6. Por tanto, la fuerza en curva que afecta al conjunto del tren es:

$$F_C[N] = 10 * \frac{\delta_{via} * M_T}{L_T} * \sum_{i=1}^n \theta_i$$

**Ecuación 11**

7. La aceleración derivada de esta fuerza sería:

$$a_C[N] = 10 * \frac{\delta_{via} * M_T}{L_T} * \sum_{i=1}^n \theta_i$$

**Ecuación 12**

**5.6.2.4 Fuerzas de resistencia al avance**

Para este cálculo se tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- Coeficientes aerodinámicos del tren (A, B, C).
- Velocidad del tren (Vi).
- Coeficiente de túnel (T).

El efecto de resistencia aerodinámica al avance se define en base a la siguiente ecuación:

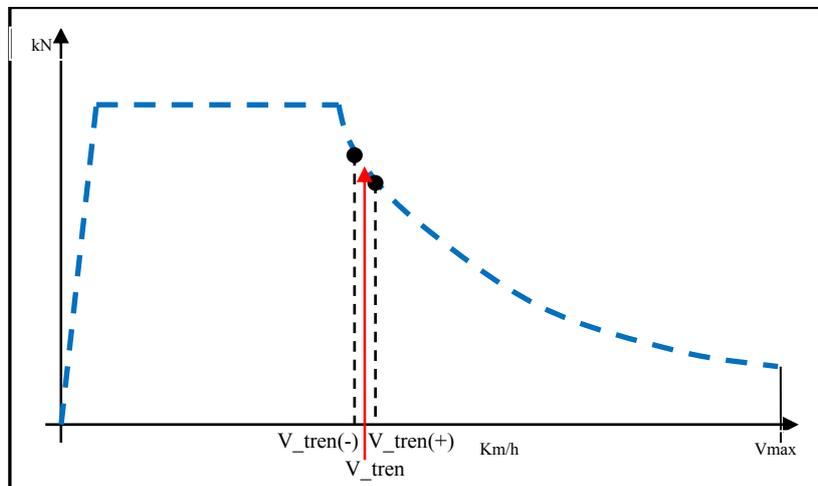
$$R_{av}[daN]|_i^{\Delta x} = (T * C[daN] * V|_i^{\Delta x}[km/h]^2) + (B[daN/(km/h)] * V|_i^{\Delta x}[km/h]) + A[daN/(km/h)^2]$$

La resistencia aerodinámica únicamente se tiene en cuenta como una fuerza que actúa oponiéndose al avance del tren.

El factor de túnel toma el valor entre 1 - 2. Valiendo 1 cuando el tren se encuentra totalmente fuera del túnel y mayor de 1 (se define este factor para cada túnel del trayecto) cuando alguna parte del tren se encuentra dentro del túnel.

**5.6.2.5 Esfuerzo de tracción y Freno**

El esfuerzo de tracción es calculado en base a la curva de prestaciones de tracción introducida al programa como datos de configuración del tren.



**Ilustración 24**

Esta curva es una curva que representa esfuerzo de tracción (kN) en función de la velocidad (km/h).

Dado que la curva está constituida por puntos, cuando la velocidad del tren se encuentra entre 2 puntos de la curva de prestaciones de tracción, el cálculo de Esfuerzo de tracción se obtiene por una interpolación cuadrática, si  $V_{tren(-)} \neq V_{tren(+)}$ . Se parte del supuesto que los puntos de esfuerzo se encuentran en la zona de la curva de tracción de Potencia constante.

En el caso del cálculo del esfuerzo de frenado se aplica siempre el esfuerzo de frenado necesario para alcanzar la velocidad objetivo. Si el esfuerzo de frenado eléctrico no fuera suficiente, el restante esfuerzo de frenado demandado se asume que es proporcionado por el sistema de frenado neumático.

Este esfuerzo de frenado neumático extra, no es contabilizado como energía regenerada. Por tanto, el esfuerzo de frenado total aplicado en cada instante sería la suma del frenado eléctrico, más el esfuerzo proveniente de la aplicación de freno mecánico (neumático) para obtener el esfuerzo de frenado total demandado, para la parada o mantenimiento de la velocidad fijada por la curva objetivo CVMO.

Esfuerzo total demandado en el instante  $i$ , durante el intervalo de espacio  $\Delta x$ :

$$F_{Fr\_T}|_i^{\Delta x^*} = F_{Fr\_E}|_i^{\Delta x^*} + F_{Fr\_N}|_i^{\Delta x^*}$$

También existe la limitación de aplicación de freno eléctrico a partir de una velocidad. De forma que por debajo de esta velocidad, se considera que el frenado es puramente neumático y no eléctrico.

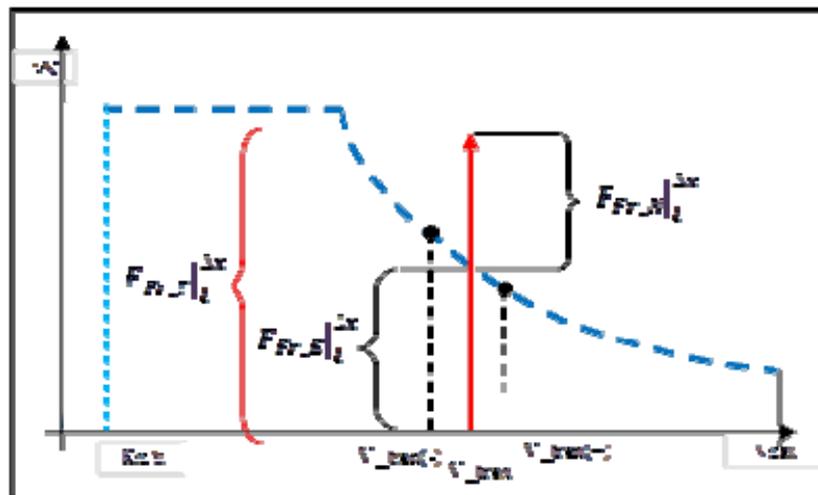


Ilustración 25

En el anexo 10.3 se desarrolla el algoritmo de cálculo implementado para calcular el esfuerzo de tracción y freno aplicado a cada velocidad del tren.

### 5.6.3 Calculador de Energía

Partiendo de las fuerzas calculadas y la distancia recorrida en cada iteración es posible realizar el cálculo de la energía tanto consumida como regenerada por el tren. Para obtener este resultado se parte de los siguientes datos:

- Esfuerzo de tracción aplicado en el instante i.
- Esfuerzo de frenado aplicado en el instante i.
- Rendimiento del equipo de tracción.
- Velocidad mínima de frenado eléctrico.
- Potencia de auxiliares instalada.

En la ilustración siguiente se puede observar el resultado de la simulación de un recorrido con 4 estaciones y conducción en modo deriva.

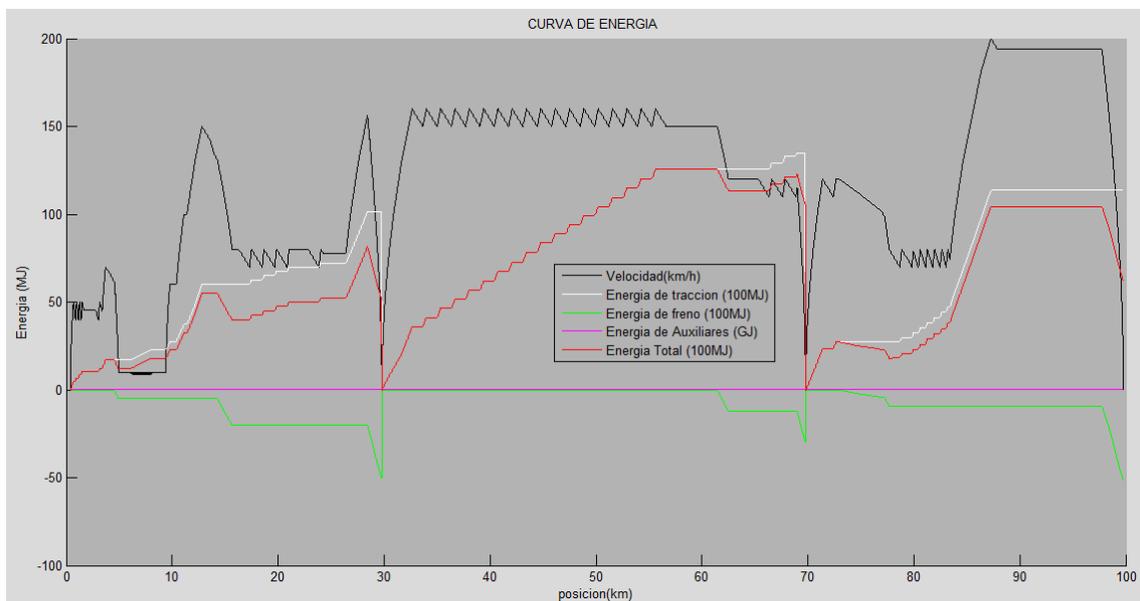


Ilustración 26

El simulador también presenta de forma independiente los resultados totales de Energía consumida en tracción, auxiliares, regenerada por freno eléctrico y el consumo neto de energía (Consumida-Regenerada).

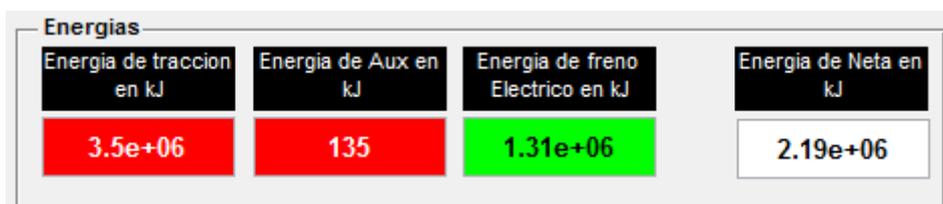


Ilustración 27

### 5.6.3.1 *Energía de tracción*

Para el cálculo de la energía consumida en tracción se parte de los datos y resultados obtenidos en tiempo de simulación. Estos datos son:

- Esfuerzo de tracción aplicado en el instante  $i$ .
- Rendimiento del equipo de tracción.
- Velocidad del tren.

Dado que partimos de la premisa que la aplicación de la fuerza de tracción es paralela al desplazamiento del tren:

$$W_{Tr}^I|_i^{\Delta x^*} = F_{Tr}|_i^{\Delta x^*} * \Delta x^*$$

Como suponemos un rendimiento del equipo de tracción ( $\eta < 1$ ) la energía consumida en tracción es:

$$W_{Fr}^R|_i^{\Delta x} = \frac{1}{\eta} * W_{Tr}^I|_i^{\Delta x^*}$$

### 5.6.3.2 *Energía de regenerada*

La energía regenerada se calcula a partir de la energía disipada en el frenado del tren, pero solo teniendo en cuenta el esfuerzo de frenado proveniente del frenado eléctrico.

Como se ha expuesto en el apartado dedicado al esfuerzo de tracción y freno, el esfuerzo de frenado puede estar constituido por un esfuerzo eléctrico y otro mecánico (neumático). Por tanto, para el cálculo de la energía regenerada únicamente se tiene en cuenta el esfuerzo de frenado proporcionado por la curva de prestaciones de freno eléctrico.

Existe también una velocidad de limitación en la aplicación del freno eléctrico, dado que por debajo de una determinada velocidad (configurada como dato de entrada), el freno eléctrico se considera que no actúa.

Los datos de partida son:

- Esfuerzo de frenado aplicado en el instante  $i$ .
- Rendimiento del equipo de tracción.
- Velocidad del tren.
- Velocidad mínima de aplicación de freno

Dado que suponemos que la aplicación de la fuerza de freno es paralela a la del desplazamiento del tren:

$$W_{Fr\_E}^I|_i^{\Delta x^*} = F_{Fr\_E}|_i^{\Delta x^*} * \Delta x^*$$

Como suponemos un rendimiento del equipo de tracción ( $\eta < 1$ ):

$$W_{Fr\_E}^R|_i^{\Delta x^*} = \eta * W_{Fr\_E}^I|_i^{\Delta x^*}$$

Teniendo en cuenta que el frenado eléctrico solo se aplica hasta una velocidad mínima introducida como dato de configuración del tren ( $V_{min\_Fr}$ ), este valor de regeneración solo se cumple en la siguiente condición:

$$\begin{aligned} \text{Si } V_{tren} \geq V_{min\_Fr} \\ W_{Fr\_E}^R|_i^{\Delta x^*} = \eta * W_{Fr}^I|_i^{\Delta x_E^*} \end{aligned}$$

Por tanto, se define una nueva distancia de integración  $\Delta x_E^*$ , correspondiente a la distancia durante la cual el freno eléctrico actúa:

$$\Delta x^* = \Delta x_E^* + \Delta x_N^*$$

La distancia de integración en el frenado, está compuesta por una distancia en la cual actúa el freno eléctrico y neumático ( $\Delta x_E^*$ ), y una distancia durante la cual solo actúa el freno neumático ( $\Delta x_N^*$ ). El desarrollo de la ecuación da:

$$W_{Fr\_E}^R|_i^{\Delta x_E^*} = \eta * F_{Fr\_E}|_i^{\Delta x_E^*} * \Delta x_E^*$$

### 5.6.3.3 Energía consumo de auxiliares

El consumo de los equipos auxiliares del tren se refleja en una dato de entrada y es considerado (como aproximación) constante durante todo el recorrido. El dato de entrada para el cálculo de la energía consumida por los equipos auxiliares es la potencia instalada (kW).

Partiendo de este dato, a cada iteración se calcula la energía consumida por los auxiliares como:

$$W_{aux}|_i^{\Delta t} = P_{aux} * \Delta t|_i$$

**5.6.4 Algoritmo de cálculo Dinámico y Cinemático**

Definidas las bases de cálculo de las fuerzas y el paso de integración, en esta capitulo se describe el flujo de cálculo utilizado el simulador para calcular la posición, velocidad, aceleración y tiempo del tren.

Los pasos en los que se ejecuta la simulación son los siguientes

- [1]. Calculo de la fuerzas externas al tren (Gradiente, Curva, resistencia al avance)
- [2]. Calculo del paso de integración máximo permitido. (cap.6.6.1).
- [3]. Existencia de ZN que afectan al tren.
- [4]. Aceleración/Deceleración objetivo en función de la curva CVMO.
- [5]. Esfuerzo de tracción/freno máximo aplicable para la velocidad en el instante i.
- [6]. Calculo de aceleración/deceleración del tren y el esfuerzo de tracción/freno aplicado en función de la Estrategia de conducción, aceleración/deceleración demandada, la existencia de ZN, la resultante de las fuerzas de resistencia al avance y aceleración de confort
- [7]. Calculo de la velocidad, posición y tiempo en el instante i+1
- [8]. Calculo de la energía consumida, regenerada.

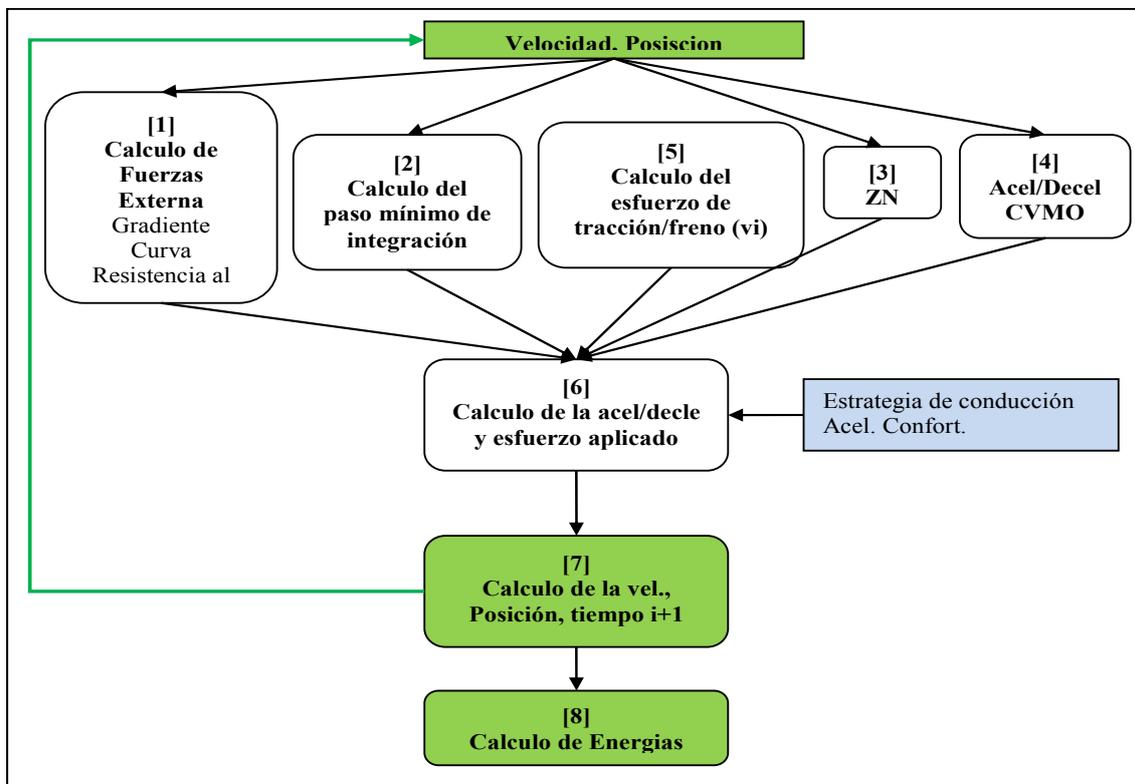


Ilustración 28

El resultado de la simulación dinámica se puede presentar mediante gráficas y sería el siguiente:

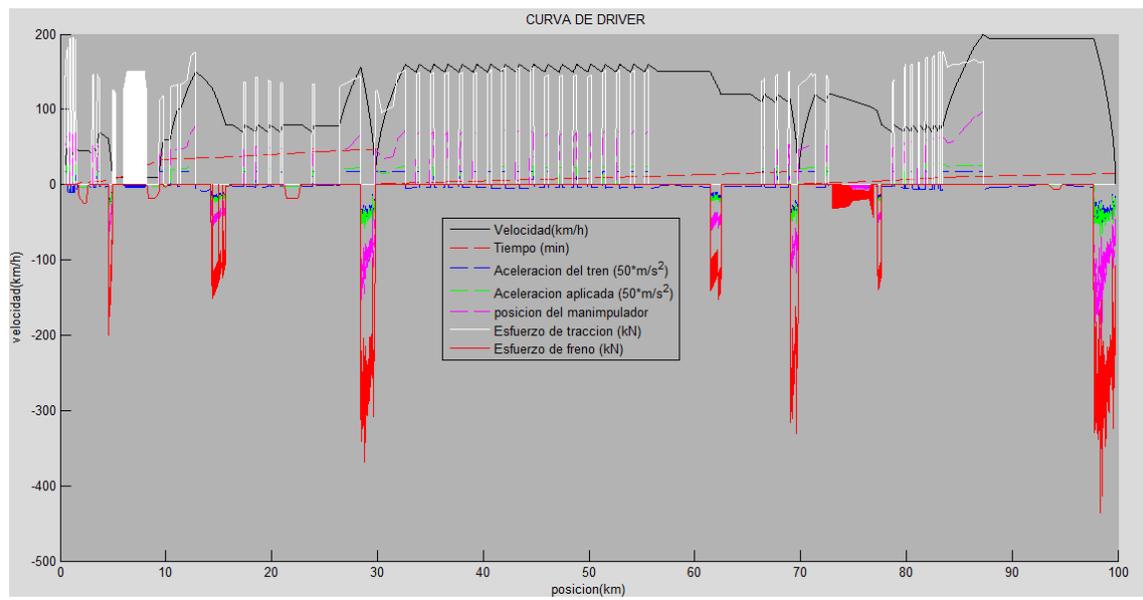


Ilustración 29

---

## 5.7 Calculador de Intervalos mínimos de Circulación

---

En este apartado se describe el procedimiento de cálculo de los intervalos mínimos de circulación y los tiempos mínimo de circulación.

El cálculo de los tiempos mínimos de circulación parte los resultados obtenidos en la simulación del recorrido del tren, junto con los datos de configuración de la señalización de la vía y el nivel de ERTMS para el cual se calculan los tipos mínimos.

La información de entrada necesaria para el cálculo de los tiempos mínimos de circulación y el intervalo mínimo de circulación es:

- Datos obtenidos de la simulación
  - Posición del tren en cada momento Pk.
  - Velocidad
  - Tiempo absoluto del tren en a cada posición.
- Datos de Configuración.
  - Posición de las señales.
  - Posición de las balizas de señal.
  - Posición de la baliza infill.
  - Distribución de los circuitos de vía.
  - Tiempo de retardo en la liberación de los circuitos de vía.
  - Nivel ERTMS de explotación (N1, N1+infil, N2 , N3)
  - Distancia de seguridad (N3).
  - Número de aspectos de la señalización lateral (3 o 4).
  - Longitud del tren.

No toda esta información es utilizada para el cálculo de los tiempos mínimos de circulación, sino que dependiendo del nivel ERTMS en el cual se realice la explotación de la línea, se aplicara una u otra información.

Definiéndose como intervalo mínimo:

***Tiempo mínimo que debe transcurrir entre circulaciones en un punto determinado de la línea, habiéndose de cumplir que la marcha del tren perseguidor no se ve afectada por la marcha del primero.***

### 5.7.1 Nivel 1

El cálculo de los intervalos mínimos de circulación y el tiempo mínimo de circulación en nivel 1, se encuentra condicionado por los siguientes aspectos:

- a. Definición de tiempo mínimo de circulación.
- b. Número de aspectos de la señalización lateral.
- c. Posición de las señales laterales.
- d. Posición de las balizas de señal.
- e. Tipo de tren (Simulación del recorrido del tren)
- f. Capacidad de frenado del tren. (distancia de frenado).
- g. Tiempos de gestión de la señalización (liberación de CV y cambio de aspectos de la señalización).

Partiendo de estos datos el simulador de dinámica de marcha es capaz de calcular los siguientes resultados:

1. Intervalos mínimos de circulación.
  2. Tiempo mínimo de circulación.
  3. Posición óptima de nuevas balizas avanzadas (Infill).
  4. Mejora en el tiempo de circulación con las nuevas balizas infill.
- Procedimiento de cálculo de tiempo mínimo

El algoritmo para el cálculo del tiempo mínimo en nivel 1 de forma genérica es el siguiente que se va a exponer. Posteriormente, a modo de ejemplificación, se desarrollara el procedimiento de cálculo para 3 y 4 aspectos de señalización.

Pasos del algoritmo:

- [1]. Partiendo del perfil se la simulación del recorrido del tren en el trayecto, y teniendo el perfil de posición/velocidad del tren se realizan los siguientes cálculos.
- [2]. Se toma como referencia la última señal del recorrido cuyo aspecto será Rojo (S1) y se busca la señal anterior cuyo aspecto será Amarillo (S2).
- [3]. Se toma la posición de la baliza de la señal (S2) como punto EoA de la curva de frenado ERTMS y la posición de la señal S2 como punto DP de la curva de freno.
- [4]. Se calcula la curva de frenado ERTMS hasta el punto de intersección con el perfil de velocidad de la simulación del recorrido del tren. Este punto lo denotamos BA\*\_S2.
- [5]. Esta posición calculada en el apartado [4] (BA\*\_S2), corresponderá a la posición óptima de la baliza avanzada (Infill).

Esta es la posición límite en la cual, si la señal S2 no ha pasado de aspecto Rojo a Amarillo, el tren leería la baliza avanzada y podría realizar un frenado de emergencia sin sobrepasar la señal en rojo.

[6]. El tiempo mínimo se calcula dependiendo del número de aspecto de la señalización.

**3 Aspectos:** Se busca la señal previa a la S2, que denominaremos S3 y que tendría e aspecto de verde. Se define el tiempo mínimo como:

*El tiempo que tarde el tren en recorrer la distancia desde la baliza de señal S3 a la cabeza del tren precedente en el instante en el que se libera el circuito de vía protegido por la señal S2. Esto es el instante en el que la señal S2 para de Rojo a Amarillo.*

**4 Aspectos:** Se busca la segunda señal previa a la S2, que denominaremos S4 y que tendría e aspecto de verde. Se define el tiempo mínimo como:

*El tiempo que tarde el tren en recorrer la distancia desde la baliza previa de S4 a la cabeza del tren precedente en el instante en el que se libera el circuito de vía protegido por la señal S2. Esto es el instante en el que la señal S2 para de Rojo a Amarillo.*

[7]. Realizado este cálculo, se toma la señal S2 como nueva señal S1, y se repite el cálculo desde el punto [2] de forma iterativa hasta el inicio del recorrido.

[8]. El tiempo mínimo de circulación, será el mayor de los intervalos de circulación calculados para el recorrido.

### 5.7.1.1 NI con 3 Aspectos

Partiendo de la definición genérica de intervalo mínimo de circulación, expuesta anteriormente, esta se particulariza para el N1 con 3 aspectos de señalización lateral, quedando como:

#### **Condición Intervalo mínimo N1 (ConTmin\_N1\_Asp3)**

*Es el menor tiempo que tardaría el tren perseguidor (2) en recorrer la distancia que separa ambos trenes (predecesor '1' y seguidor '2') en el preciso instante que el tren (1) hace que la señal vista por el tren (2) tome el aspecto 'verde', sin que la marcha del tren (2) se vea perturbada en ningún momento. Esto es, sin entrar en el régimen de aplicación de freno de servicio. Este instante es cuando el tren 2 lee la baliza de la señal 3 que pasa al aspecto de vía libre (verde).*

La aplicación de la condición ConTmin\_N1\_Asp3 da lugar a la representación de la situación de tiempo mínimo recogida en la siguiente ilustración.

Definición de parámetros:

- **P\_Vsimulación1:** perfil de velocidad del tren en la línea, obtenido de la simulación de la circulación del tren. Perfil de velocidad obtenido sin perturbaciones por la señalización.

- **d<sub>SB(x)</sub>**: Distancia de frenada de servicio en la posición 'x' del tren. La posición va asociada a una velocidad del tren en ese momento.
- **t<sub>ret\_cv</sub>**: Tiempo de retardo en la liberación del circuito de vía.
- **S<sub>X</sub>**: Señal de línea X (X:1, 2, 3...).
- **B<sub>SX</sub>**: Baliza de la señal X (X: 1, 2, 3...)
- **DP**: Punto 'Danger Point' para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las señales de línea son consideradas como DP.
- **EoA**: Punto 'End of Authority' para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las balizas de pie de señal son consideradas como EoA.
- **d<sub>SX\_BY</sub> (d<sub>S<sub>x</sub><sup>B<sub>y</sub></sup>)</sub>**: Distancia de la Señal de la señal X hasta la Baliza Y. Siendo la baliza Y la baliza de la señal Y, señal previa al tren perseguidor y de intervalo mínimo.
- **L<sub>Train</sub>**: Longitud de los trenes. Se considera de los 2 trenes son iguales.
- **d<sub>B\*\_S2</sub>**: Posición de la posible baliza infill de la señal o posicionamiento de la nueva señal S<sub>3</sub> en un posible replanteo.

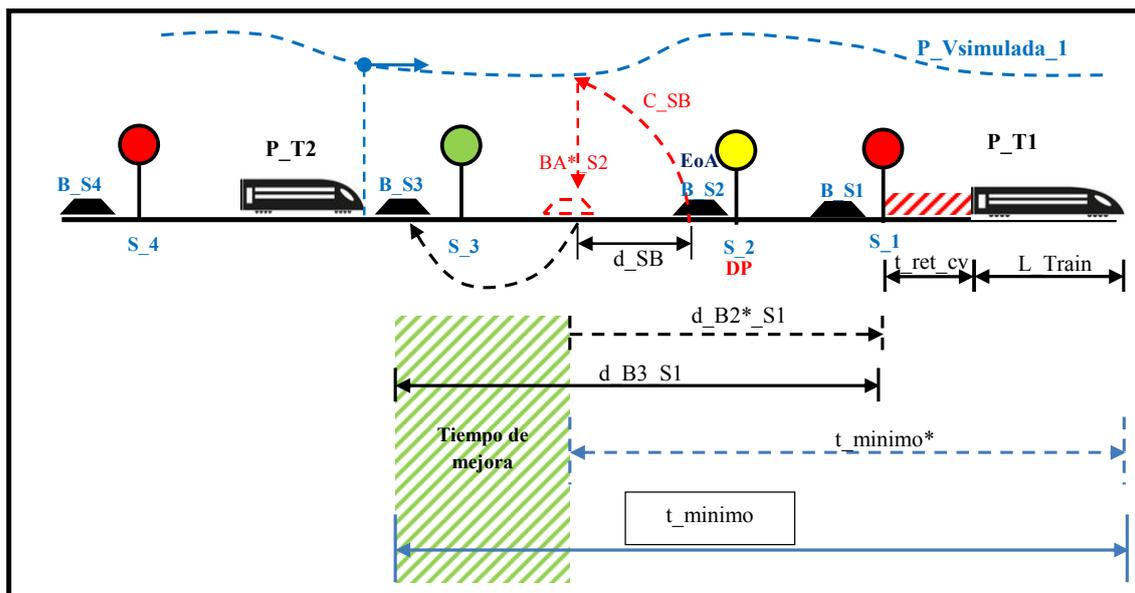


Ilustración 30

Intervalo mínimo en cada posición de señal (S<sub>X</sub>) es:

$$In_{min}|_{N1}^x = \Delta t(d_{S_x}^{B_y}) + t_{ret_{cv}} + \Delta t(L_{train})$$

Por tanto, el tiempo mínimo de circulación se calcula como la suma de los siguientes tiempos:

- [1].  $t_{ret,cv}$ : Tiempo que tarda el sistema en liberar el circuito de vía previo a la señal S\_1.
- [2].  $\Delta t(L_{train})$ : Tiempo que tarda el tren en recorrer su propia longitud a partir del punto en el cual el sistema de señalización considera liberado el circuito de vía de la señal S\_2.
- [3].  $\Delta t(d|_{S_x}^{B_y})$ : Tiempo que tarda el tren en recorrer la distancia entre la señal S\_1 y la baliza B\_S3.

Como se puede observar en la ilustración 21, como la existencia de una nueva baliza avanzada puede mejorar el tiempo mínimo de circulación, al retrasar al máximo el momento en el cual el freno de servicio debe ser aplicado para mantener la seguridad en la circulación.

Un resultado de la simulación sería el siguiente

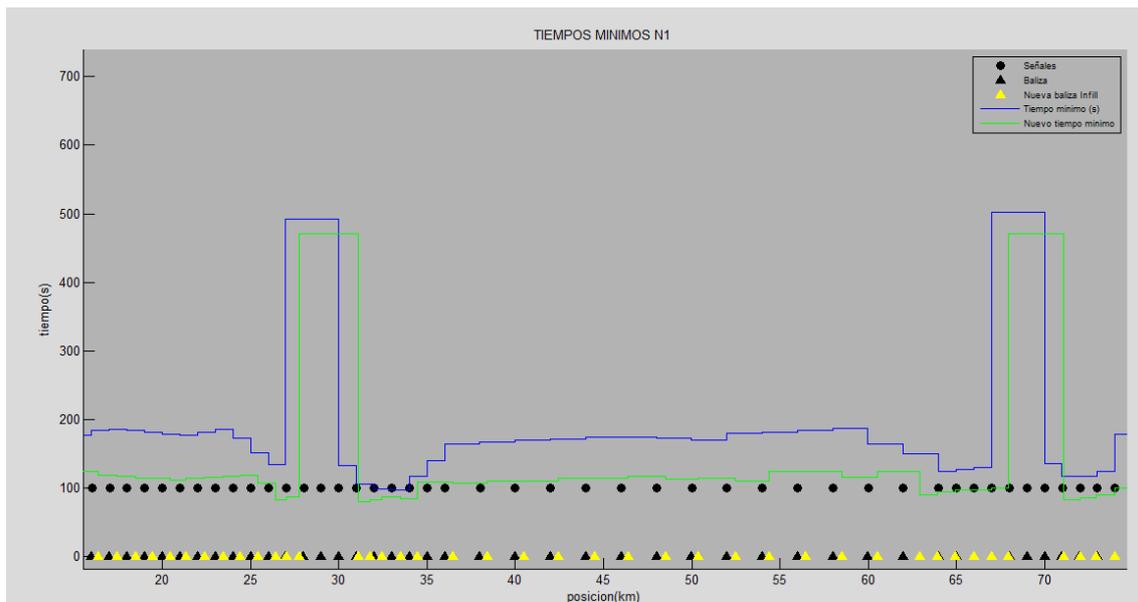
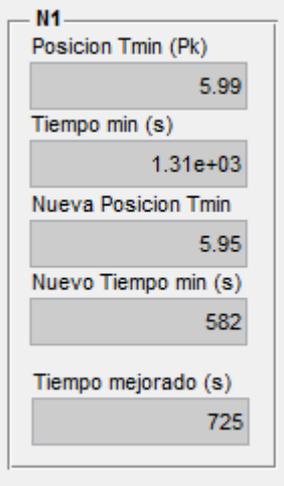


Ilustración 31

En el cual se puede observar en trazo verde la mejora en el tiempo de circulación, junto a la posición para las nuevas balizas avanza (color amarillo). La mejora obtenida con la recolocación de balizas infill es de **725 segundos** en el tiempo mínimo de circulación.

Resultado de Simulador	Análisis de datos obtenidos
 <p>The screenshot shows the following data for N1:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Posicion Tmin (Pk): 5.99</li> <li>Tiempo min (s): 1.31e+03</li> <li>Nueva Posicion Tmin: 5.95</li> <li>Nuevo Tiempo min (s): 582</li> <li>Tiempo mejorado (s): 725</li> </ul>	<p><b>Tiempos mínimos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo mínimo inicial: 1310 segundos.</li> <li>- Tiempo mínimo mejorado 582 segundos.</li> </ul> <p><b>Situación de los Tiempos mínimos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Posición inicial Tmin: Pk 5.99.</li> <li>- Nueva Posición Tmin: Pk 5.95.</li> </ul> <p>Es observa que el punto limitante en la circulación se encuentra entorno al punto kilométrico 6.</p>

### 5.7.1.2 N1 con 4 Aspectos

Partiendo de la definición genérica de Intervalo mínimo de circulación, expuesta anteriormente, esta se particulariza para el N1 con 4 aspectos de señalización lateral, quedando como:

#### Condición Intervalo mínimo N1 (ConTmin\_N1\_As4)

*Es el menor tiempo que tardaría el tren perseguidor (2) en recoger la distancia que separa ambos trenes (predecesor '1' y seguidor '2') en el preciso instante que el tren (1) hace que la señal vista por el tren (2) tome el aspecto 'verde', sin que la marcha del tren (2) se vea perturbada en ningún momento. Esto es, sin entrar en el régimen de aplicación de freno de servicio. Este instante es cuando el tren 2 lee la baliza de la señal 4 que pasa al aspecto de vía libre (verde).*

La aplicación de la condición ConTmin\_N1\_Asp4 da lugar a la representación de la situación de tiempo mínimo recogida en la siguiente ilustración.

Definición de parámetros:

- **P\_Vsimulación1:** perfil de velocidad del tren en la línea, obtenido de la simulación de la circulación del tren. Perfil de velocidad obtenido sin perturbaciones por la señalización.
- **d\_SB(x):** Distancia de frenada de servicio en la posición 'x' del tren. La posición va asociada a una velocidad del tren en ese momento.
- **t\_ret\_cv:** Tiempo de retardo en la liberación del circuito de vía.

- **DP:** Punto ‘Danger Point’ para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las señales de línea son consideradas como DP
- **EoA:** Punto ‘End of Authority’ para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las balizas de pie de señal son consideradas como EoA.
- **S\_X:** Señal de línea X (X:1, 2, 3...).
- **B\_SX:** Baliza de la señal X (X: 1, 2, 3...)
- **d\_SX\_BY ( $d_{S_x}^{B_y}$ ):** Distancia de la Señal de la señal X hasta la Baliza Y. Siendo la baliza Y la baliza de la señal Y, señal previa al tren perseguidor y de intervalo mínimo.
- **L\_Train:** Longitud de los trenes. Se considera de los 2 trenes son iguales.
- **d\_B\*\_S2:** Posición de la posible baliza infill de la señal o posicionamiento de la nueva señal S\_3 en un posible replanteo.

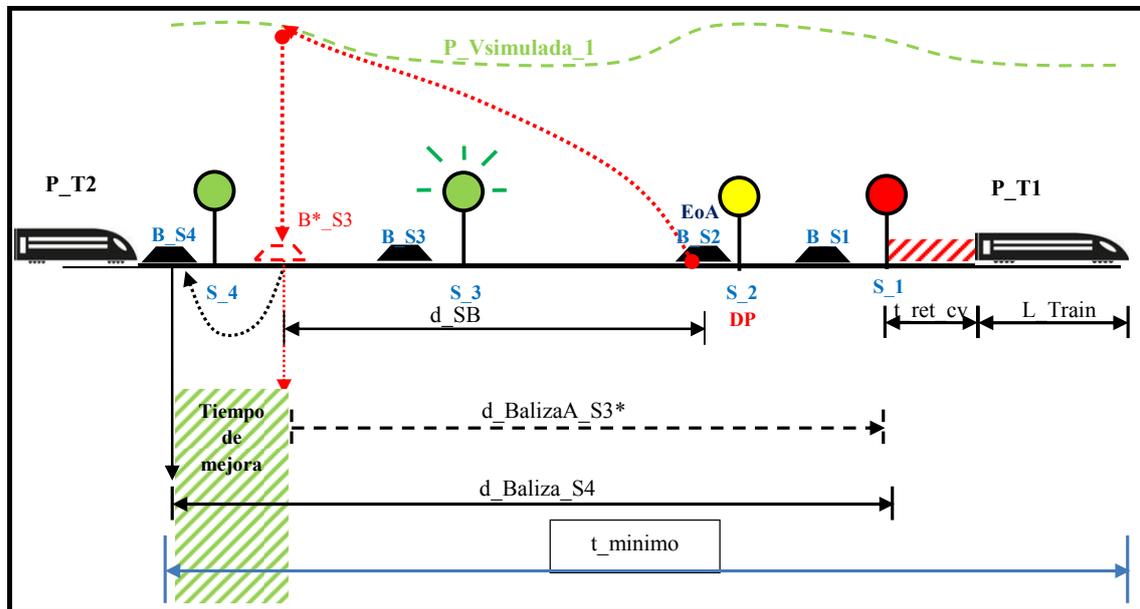


Ilustración 32

Intervalo mínimo en cada punto señal (S\_X) se define como:

$$In_{min|N1}^x = \Delta t(d_{S_x}^{B_y}) + t_{ret_{cv}} + \Delta t(L_{train})$$

Por tanto, el tiempo mínimo de circulación se calcula como la suma de los siguientes tiempos:

- [1].  $t_{ret_{cv}}$ : Tiempo que tarda el sistema en liberar el circuito de vía previo a la señal S\_1.
- [2].  $\Delta t(L_{train})$ : Tiempo que tarda el tren en recorrer su propia longitud a partir del punto en el cual el sistema de señalización considera liberado el circuito de vía de la señal S\_2.

- [3].  $\Delta t(d|_{S_x}^{B,y})$ : Tiempo que tarda el tren en recorrer la distancia entre la señal S\_1 y la baliza B\_S4.

Como se puede observar en la ilustración 23, la recolocación de la baliza avanzada puede mejorar el tiempo mínimo de circulación, al retrasar al máximo el momento en el cual el freno de servicio debe ser aplicado para mantener la seguridad en la circulación.

Un resultado de la simulación sería análogo al representado en la ilustración 22.

### 5.7.2 Nivel 1 + Baliza Infill

El algoritmo de cálculo del tiempo mínimo para un sistema de señalización que tiene balizas avanzadas o infill, es análogo al descrito para el N1 sin balizas infill. El procedimiento de cálculo de la posición óptima de la baliza infill es por tanto igual que para el cálculo de la nueva posición de la baliza infill en nivel 1 sin balizas infill.

A continuación se describe el proceso de cálculo para un sistema de señalización con 3 y 4 aspectos:

#### 5.7.2.1 N1 + infill 3 aspectos

La definición de Intervalo mínimo aplicada al sistema ERTMS de N1 + infill con tres aspectos se convertiría en la siguiente restricción:

#### **Condición Intervalo mínimo N1 + Infill (ConTmin\_N1\_In\_Asp3)**

*Es el menor tiempo que tardaría el tren perseguidor (2) en recoger la distancia que separa ambos trenes (predecesor '1' y seguidor '2') en el preciso instante que el tren (1) libera el circuito de vía protegido por la señal S\_2 y la baliza avanzada (infill) de la señal S\_X (ejemplo S\_3) permite la renovación del MA, de forma que permita al tren perseguidor (2) parar antes de la señal de protección S\_2.*

La aplicación de la condición *ConTmin\_N1\_In\_Asp3* da lugar a la representación de la situación de tiempo mínimo recogida en la ilustración 24.

Definición de parámetros:

- **P\_Vsimulación1**: perfil de velocidad del tren en la línea, obtenido de la simulación del recorrido del tren. Perfil de velocidad obtenido sin perturbaciones por la señalización.
- **d\_SB(x)**: Distancia de frenada de servicio en la posición 'x' del tren. La posición va asociada a una velocidad del tren en ese momento.
- **t\_ret\_cv**: Tiempo de retardo en la liberación del circuito de vía.
- **S\_X**: Señal de línea X (X:1, 2, 3...)
- **B\_SX**: Baliza de la señal X (X: 1, 2, 3...)

- **DP:** Punto ‘Danger Point’ para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las señales de línea son consideradas como DP.
- **EoA:** Punto ‘End of Authority’ para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las balizas de pie de señal son consideradas como EoA.
- **d<sub>SX\_BY</sub> (d<sub>S<sub>x</sub><sup>BA-y</sup>)</sub>**: Distancia de la Señal de la señal X hasta la Baliza Y. Siendo la baliza Y la baliza de la señal Y, señal previa al tren perseguidor y de intervalo mínimo.
- **L<sub>Train</sub>**: Longitud de los trenes. Se considera de los 2 trenes son iguales.
- **d<sub>BA\*\_S3</sub>**: Posición de la posible baliza infill de la señal 3.

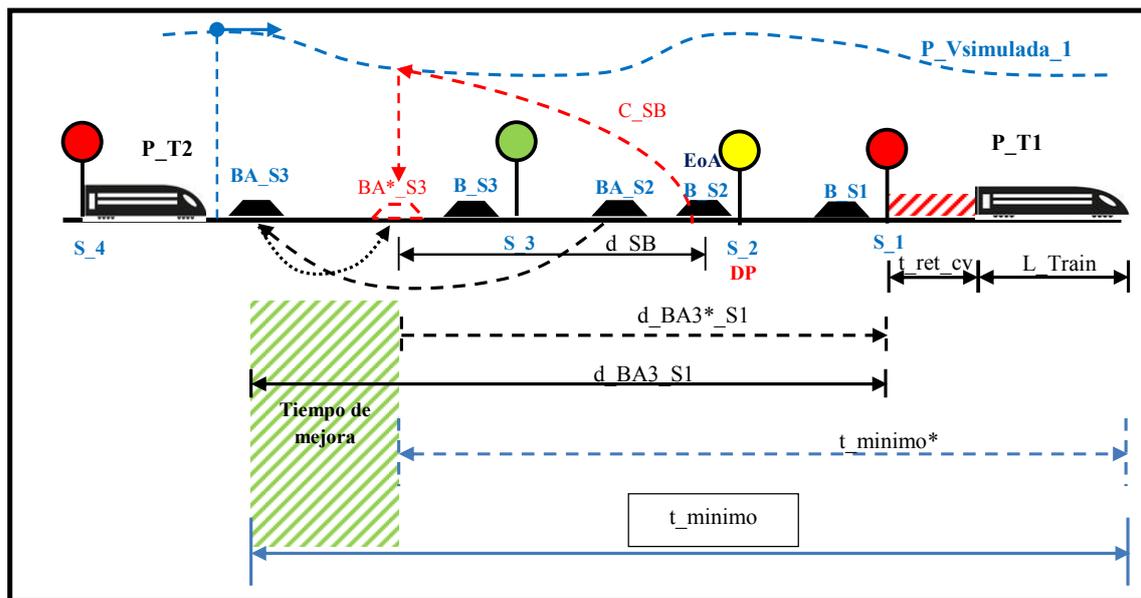


Ilustración 33

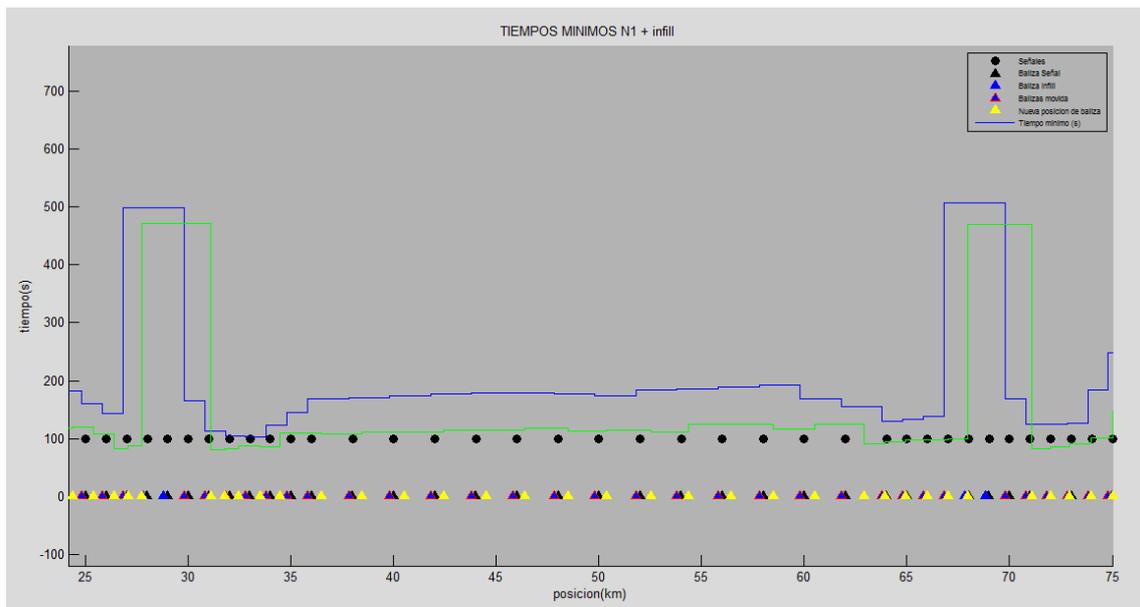
Intervalo mínimo en cada punto señal (S<sub>X</sub>) es:

$$In_{min}^x_{N1} = \Delta t(d_{S_x}^{BA-y}) + t_{ret\_cv} + \Delta t(L_{train})$$

Por tanto, el tiempo mínimo de circulación se calcula como la suma de los siguientes tiempos:

- [1]. **t<sub>ret\_cv</sub>**: Tiempo que tarda el sistema en liberar el circuito de vía previo a la señal S<sub>1</sub>.
- [2]. **Δt(L<sub>train</sub>)**: Tiempo que tarda el tren en recorrer su propia longitud a partir del punto en el cual el sistema de señalización considera liberado el circuito de vía de la señal S<sub>2</sub>.
- [3]. **Δt(d<sub>S<sub>x</sub><sup>BA-y</sup>)</sub>**: Tiempo que tarda el tren en recorrer la distancia entre la señal S<sub>1</sub> y la baliza BA<sub>S3</sub>.

El resultado obtenido por medio de la simulación sería el representado en la ilustración siguiente.



**Ilustración 34**

Se puede observar el reposicionamiento de las balizas infill (balizas amarillas) de forma que se reduzca el intervalo de circulación. La mejora obtenida con la recolocación es de una disminución en **776 segundos** en el tiempo mínimo de circulación.

Resultado de Simulador	Análisis de datos obtenidos
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><b>N1 + infill</b></p> <p>Posicion Tmin (Pk)</p> <p style="text-align: right;">5.8</p> <p>Tiempo min (s)</p> <p style="text-align: right;">1.36e+03</p> <p>Nueva Posicion Tmin</p> <p style="text-align: right;">5.95</p> <p>Nuevo Tiempo min (s)</p> <p style="text-align: right;">582</p> <p>Tiempo mejorado (s)</p> <p style="text-align: right;">776</p> </div>	<p><b>Tiempos mínimos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo mínimo inicial: 1360 segundos.</li> <li>- Tiempo mínimo mejorado 582 segundos.</li> </ul> <p><b>Situación de los Tiempos mínimos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Posición inicial Tmin: Pk 5.8.</li> <li>- Nueva Posición Tmin: Pk 5.95.</li> </ul> <p>Es observa que el punto limitante en la circulación se encuentra entorno al punto kilométrico 6.</p>

El tiempo mínimo tan elevado es debido a que sea posicionado una ZN muy larga con un SSP muy bajo, lo que lleva a tiempos de circulación muy altos

### 5.7.2.2 N1 + infill 4 aspectos

La definición de Intervalo mínimo aplicada al sistema ERTMS de N1 + infill con 4 aspectos se convertiría en la siguiente restricción:

#### **Condición Intervalo mínimo N1 + Infill (ConTmin\_N1\_In\_Asp4)**

*Es el menor tiempo que tardaría el tren perseguidor (2) en recoger la distancia que separa ambos trenes (predecesor '1' y seguidor '2') en el preciso instante que el tren (1) libera el circuito de vía protegido por la señal S\_2 y la baliza avanzada (infill) de la señal S\_X (ejemplo S\_4) permite la renovación del MA, de forma que permita al tren perseguidor (2) parar antes de la señal de protección S\_2.*

La aplicación de la condición *ConTmin\_N1\_In\_Asp4* da lugar a la representación de la situación de tiempo mínimo recogida en la ilustración 25.

Definición de parámetros:

- **P\_Vsimulación1**: perfil de velocidad del tren en la línea, obtenido de la simulación del recorrido del tren. Perfil de velocidad obtenido sin perturbaciones por la señalización.
- **d\_SB(x)**: Distancia de frenada de servicio en la posición 'x' del tren. La posición va asociada a una velocidad del tren en ese momento.
- **t\_ret\_cv**: Tiempo de retardo en la liberación del circuito de vía.
- **S\_X**: Señal de línea X (X:1, 2, 3...)
- **B\_SX**: Baliza de la señal X (X: 1, 2, 3...)
- **DP**: Punto 'Danger Point' para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las señales de línea son consideradas como DP.
- **EoA**: Punto 'End of Authority' para el cálculo de la curva de freno ERTMS. Las balizas de pie de señal son consideradas como EoA.
- **d\_SX\_BY (d<sub>S\_x</sub><sup>B\_y</sup>)**: Distancia de la Señal de la señal X hasta la Baliza Y. Siendo la baliza Y la baliza de la señal Y, señal previa al tren perseguidor y de intervalo mínimo.
- **L\_Train**: Longitud de los trenes. Se considera de los 2 trenes son iguales.
- **d\_BA\*\_S3**: Posición de la posible baliza infill de la señal 3.

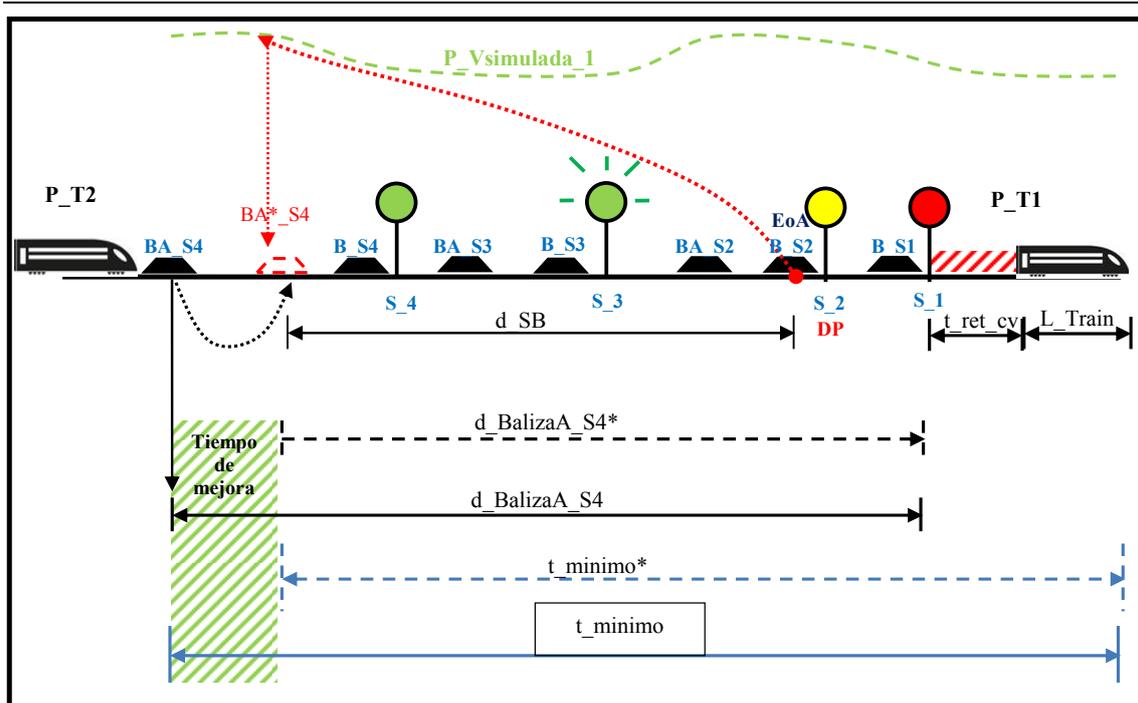


Ilustración 35

Intervalo mínimo en cada punto señal (S\_X) es:

$$In_{min}|_{N1}^x = \Delta t(d|_{S_x}^{BA_y}) + t_{ret_{cv}} + \Delta t(L_{train})$$

Por tanto, el tiempo mínimo de circulación se calcula como la suma de los siguientes tiempos:

- [4].  $t_{ret_{cv}}$ : Tiempo que tarda el sistema en liberar el circuito de vía previo a la señal S\_1.
- [5].  $\Delta t(L_{train})$ : Tiempo que tarda el tren en recorrer su propia longitud a partir del punto en el cual el sistema de señalización considera liberado el circuito de vía de la señal S\_2.
- [6].  $\Delta t(d|_{S_x}^{BA_y})$ : Tiempo que tarda el tren en recorrer la distancia entre la señal S\_1 y la baliza BA\_S3.

5.7.3 Nivel 2

En el caso de un nivel 2 de señalización ERTMS, la señalización lateral no es necesaria y la limitación sobre los intervalos de circulación recae en la longitud de los circuitos de vía, dado que estos son los encargados de situar al tren en la infraestructura y asegurar su posicionamiento de cara al enclavamiento.

Por tanto, las características que determinan el cálculo de los intervalos mínimos de circulación son:

- El posicionamiento del tren en base a los circuitos de vía.
- El conocimiento de las distancia de frenado.

La definición de Intervalo mínimo aplicada al sistema ERTMS de N2 se convertiría en la siguiente restricción:

**Condición Intervalo mínimo N2 (ConTmin\_N2)**

*Es el menor tiempo que tardaría el tren perseguidor (2) en recoger la distancia que separa ambos trenes (predecesor '1' y seguidor '2') en el preciso instante en que se produce la liberación del circuito de vía predecesor del tren predecesor (1) más una distancia de seguridad predeterminada, permitiendo realizar una parada de servicio por parte del tren seguidor (2)*

Partiendo de la condición *ConTmin\_N2* da lugar a la representación de la situación de tiempo mínimo recogida en la ilustración 26.

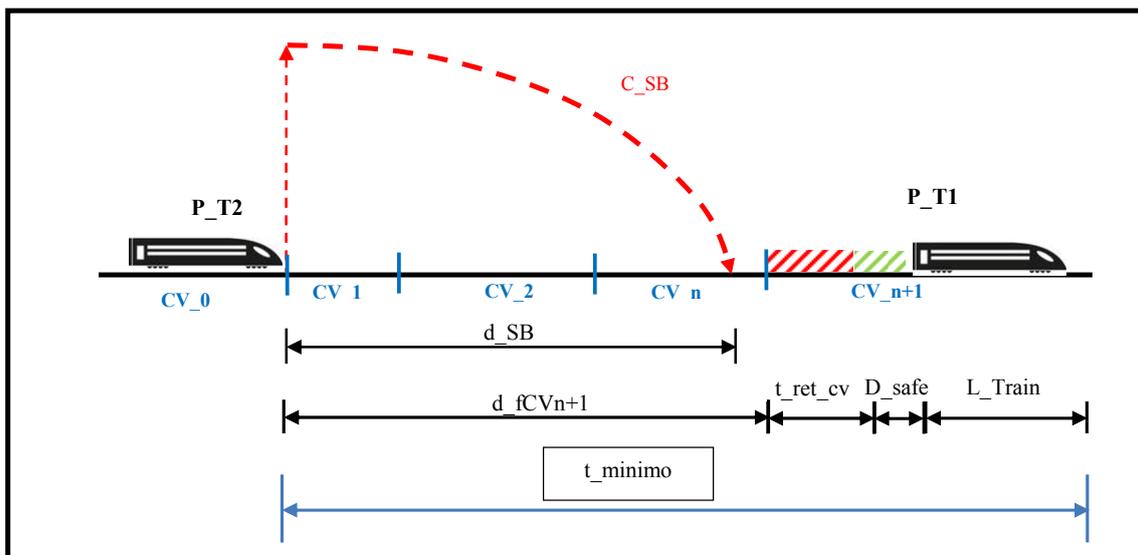


Ilustración 36

Definición de parámetros:

- **d<sub>SB(x)</sub>**: Distancia de frenada de servicio en la posición ‘x’ de la simulación. La posición va asociada a una velocidad del tren en ese momento.
- **t<sub>ret\_cv</sub>**: Tiempo de retardo en la liberación del circuito de vía.
- **D<sub>safe</sub>**: Distancia de seguridad.
- **D<sub>fCVn</sub>**: distancia desde la posición del tren hasta el circuito n+1. Circuito siguiente al que ocuparía el tren en parada de freno de servicio máximo.
- **L<sub>Train</sub>**: Longitud de los trenes. Se considera de los 2 trenes son iguales.
- **Intervalo mínimo de circulación:**

$$I_{n_{min}|N2} = \Delta t(d_{fCVn+1}) + t_{ret_cv} + \Delta t(D_{safe}) + \Delta t(L_{train})$$

- El procedimiento de cálculo implementado en el simulador es el siguiente:

- [1]. Se busca la posición del inicio del CV  $\rightarrow P_i^{CVn}$
- [2]. En el perfil de simulación de recorrido del tren se busca el tiempo absoluto en el cual el tren pasó por la posición  $P_i^{CVn}$ , obteniendo se el tiempo:  $t_i^{CVn}$  y la velocidad a la cual circulaba:  $P_i^{CVn}$
- [3]. Se calcula la distancia de frenado de servicio en la posición  $P_i^{CVn}$  y a la velocidad  $V_i^{CVn}$ . Por medio del calculador ERTMS y se obtiene la distancia de frenado:  $d_{SB|i}$ .
- [4]. Partiendo de la posición  $P_i^{CVn}$  se le suma la distancia de frenado de servicio  $d_{SB|i}$  y se obtiene la posición del final de la curva de frenado  $P_{fSB|i}^{CVn}$ .
- [5]. Partiendo de la posición  $P_{fSB|i}^{CVn}$  se busca el final del CV en el cual finalizaría el frenado de servicio, obteniéndose la posición del final del CV que quedaría ocupado en caso de la aplicación del freno de servicio  $P_i^{CVm}$ .
- [6]. Dado que la liberación del CV por parte del tren 1 se realiza por cola, a la posición final del CVm hay que añadirle la longitud del tren y una distancia de seguridad configurada en el sistema. Siendo la posición final de cálculo de tiempo mínimo:

$$P_i^{fn} = P_i^{CVm} + L_{tren} + D_{safe}$$

- [7]. Conocida la posición final de la cola del tren 1 y teniendo la información del perfil de velocidad/posición/tiempo de la simulación de recorrido del tren, se obtiene el tiempo absoluto en la posición  $P_i^{fn}$ :  $t(P_i^{fn}) = t_i^{fn}$
- [8]. Partiendo de la definición de intervalo mínimo, el intervalo mínimo de circulación en el CV n es:

$$In|_i^n = (t|_i^{fn} - t|_i^{CVn}) + t_{ret\_N2}$$

El resultado obtenido por medio del simulador sería el representado en la ilustración 27. Esta simulación se ha realizado en un recorrido con 4 estaciones:

- Estación de salida Pk 0.
- Estaciones intermedias Pks 30 y 70.
- Estación de parada Pk 100.

En las estaciones intermedia se observa el aumento del intervalo de circulación debido a la disminución de la velocidad y al tiempo de parada del tren. Entorno al Pk 6 se vuelve a detectar el aumento del intervalo mínimo de circulación, siendo el cuello de embudo de la explotación.

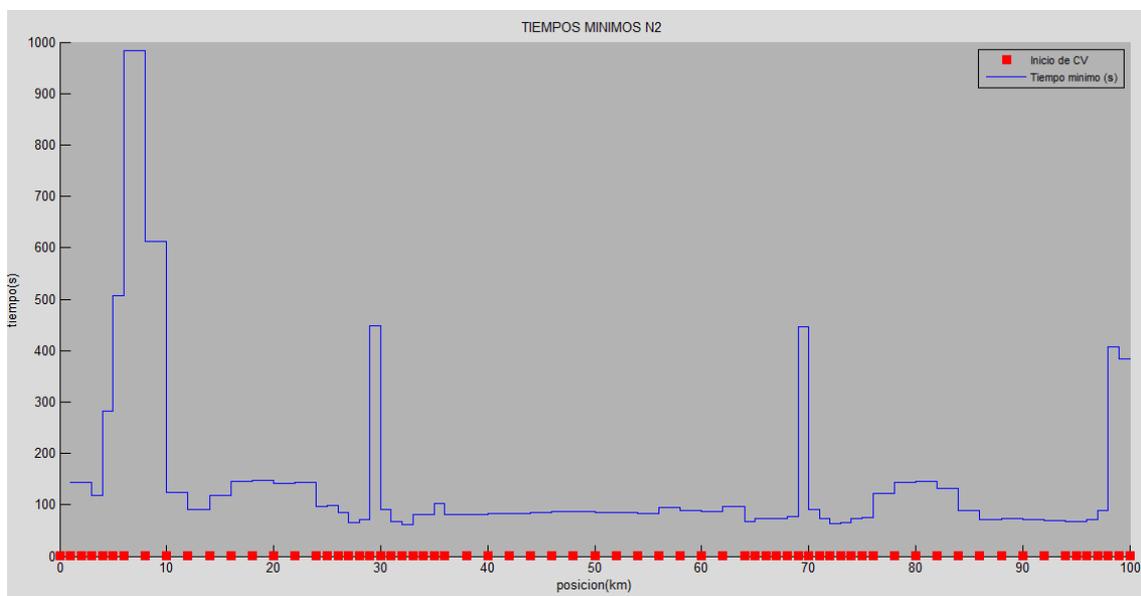


Ilustración 37

Resultado de simulación	
<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin: 5px;"> <p><b>N2</b></p> <p>Posicion Tmin (Pk)</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; text-align: center; width: 50px; margin: 2px auto;">6</div> <p>Tiempo min (s)</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; text-align: center; width: 50px; margin: 2px auto;">983</div> </div>	

5.7.4 Nivel 3

En el caso de un nivel 3 de señalización ERTMS, tanto la señalización lateral como los circuitos de vías no son necesarios, dado que el tren es el encargado de informar al enclavamiento (vía RBC) de su situación.

Por tanto, las características que determinan el cálculo de los intervalos mínimos de circulación son:

- El posicionamiento del tren.
- El conocimiento de las distancia de frenado.

La definición de Intervalo mínimo aplicada al sistema ERTMS de N3 se convertiría en la siguiente restricción:

**Condición Intervalo mínimo N3 (ConTmin\_N3)**

*Es el menor tiempo que tardaría el tren perseguidor (2) en recoger la distancia de frenado de servicio, el caso de que el tren predecesor (1) parara instantáneamente en la posición final de la curva de frenado del tren (2).*

A la definición de tiempo mínimo debe añadirse unos tiempos y distancias de seguridad que corresponden al tiempo en la gestión de las comunicaciones entre el tren-RBC y una distancia de seguridad en la cola del tren predecesor.

Por tanto, estos tiempos aumentan el intervalo mínimo de circulación teórico.

Partiendo de la condición *ConTmin\_N3* da lugar a la representación de la situación de tiempo mínimo recogida en la ilustración 29.

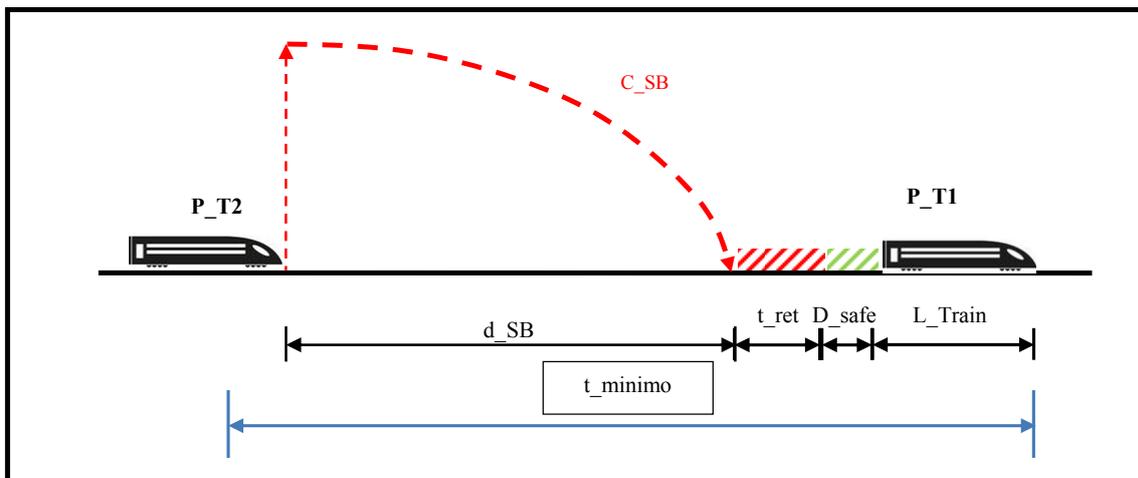


Ilustración 38

La definición de los parámetros de cálculo es la siguiente:

- **d<sub>SB(x)</sub>**: Distancia de frenada de servicio en la posición ‘x’ de la simulación. La posición va asociada a una velocidad del tren en ese momento.
- **D<sub>safe</sub>**: Distancia de seguridad desde el final de la cola del tren1.
- **t<sub>ret</sub>**: Tiempo de retardo en la gestión de las comunicaciones y la lógica de seguridad del RBC y enclavamiento.
- **L<sub>Train</sub>**: Longitud de los trenes. Se considera de los 2 trenes son iguales.

El intervalo mínimo de circulación se define por tanto, como:

$$In_{min|N3} = \Delta t(d_{SB}) + \Delta t(D_{safe}) + \Delta t(L_{train}) + t_{ret}$$

Ecuación 13

- El procedimiento de cálculo implementado en el simulador es el siguiente:

- [1]. Para cada posición del tren  $P_i$ , obtiene el tiempo absoluto y la velocidad del tren en ese punto  $t_i$  y  $v_i$ .
- [2]. Se calcula la curva de frenado de servicio en cada  $P_i$ , obteniéndose la distancia de frenado de servicio  $d_i^{SB}$ .
- [3]. A la distancia de frenado de servicio en ‘i’ se le suma la distancia de seguridad ( $D_{safe}$ ) y la longitud del tren ( $L_{tren}$ ). Obteniéndose la posición de seguridad de la cola del tren 1, sin tener en cuenta los retardo de comunicación y gestión de la información.

$$P_i^{cola*} = P_i + d_i^{SB} + (D_{safe}) + L_{tren}$$

- [4]. Por medio del perfil de velocidad de simulación del recorrido del tren, se obtiene el valor del tiempo absoluto en la posición  $P_i^{cola*}$  :  $t(P_i^{cola*}) = t_i^{cola*}$
- [5]. Partiendo de la definición de intervalo mínimo, el intervalo mínimo de circulación en cada posición i es:

$$In_i = (t_i^{cola*} - t_i) + t_{ret}$$

Ecuación 14

El resultado obtenido por medio del simulador sería el representado en la ilustración 29. Esta simulación se ha realizado en un recorrido con 4 estaciones:

- Estación de salida Pk 0.
- Estaciones intermedias Pks 30 y 70.
- Estación de parada Pk 100.

En las estaciones intermedia se observa el aumento del intervalo de circulación debido a la disminución de la velocidad y al tiempo de parada del tren configurado como 300 segundos.

**Resultado de simulación**

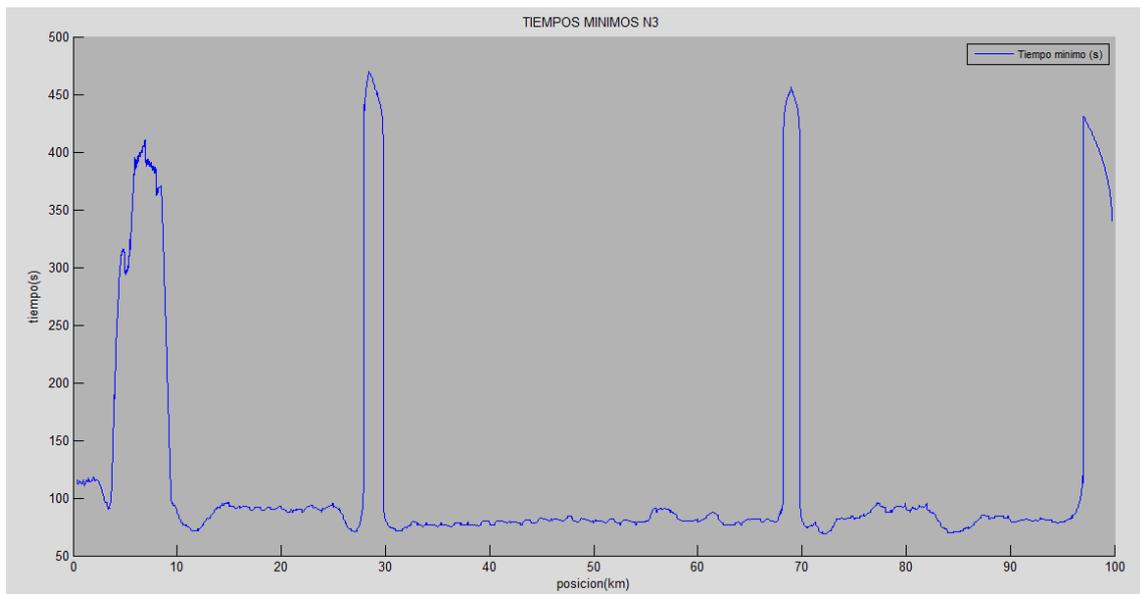
**N3**

Posicion Tmin (Pk)

28.4

Tiempo min (s)

470



**Ilustración 39**

## 6. INTERFAZ CON EL USUARIO

La interfaz con el usuario permite la carga de los datos de configuración y la visualización rápida e inmediata del resultado obtenidos. También permite la representación gráfica de los resultados.

La interfaz gráfica consta de los siguientes elementos:

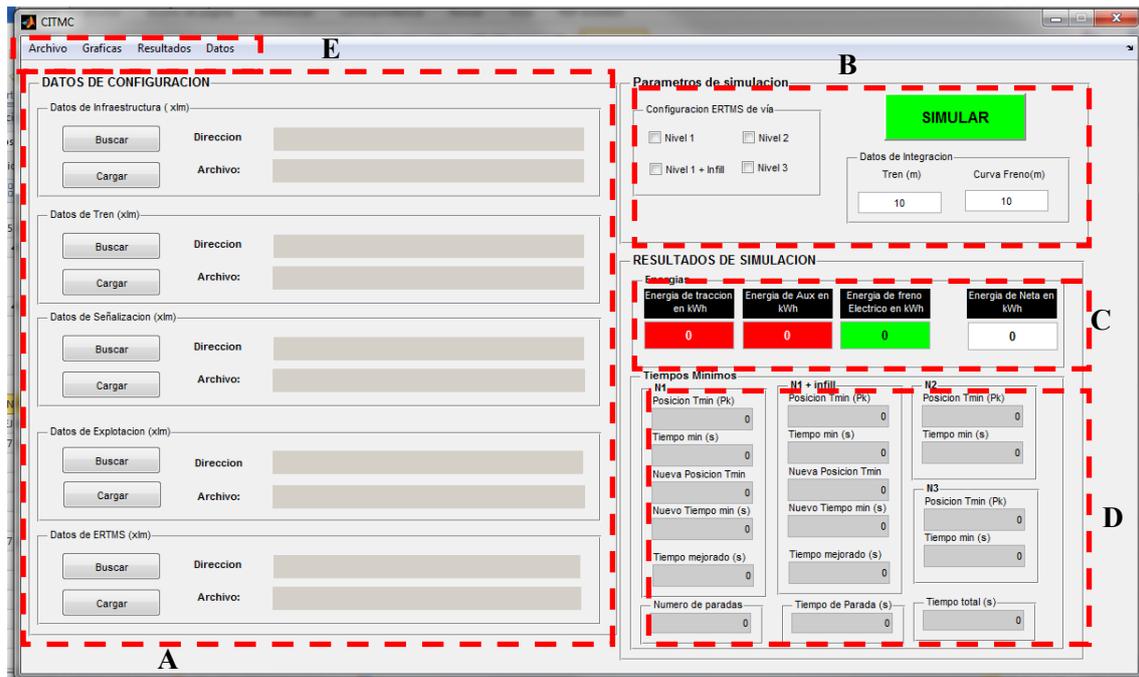


Ilustración 40

### A. Panel de adquisición de datos

Mediante este panel se seleccionan los archivos \*.xls que contienen los datos de configuración de **Infraestructura**, **Tren**, **Señalización**, **Explotación** y **ERTMS embarcado**.

### B. Panel de Configuración de Simulación

En esta panel se configura los niveles ERTMS que se desean calcular, **N1**, **N1+infill**, **N2** y **N3**. También se configura el paso máxima de integración en el simulador de marcha (Tren) y el paso máxima de integración en el cálculo de la curvas de frenado.

### C. Panel Resultados de Energía.

Este panel presenta los resultados de Energía Total **consumida por tracción** y **Auxiliares**, la **energía regenerada** en frenado y **energía neta consumida**.

**D. Panel Resultados de Tiempos mínimos**

Este panel presenta los resultados de los tiempos mínimos de circulación calculados para los niveles ERTMS seleccionados para ser calculados, junto con las mejoras en los tiempos mínimos en N1 y N1+infill.

**E. Menú Tratamiento de Resultados**

Mediante el menú superior de la pantalla se accede a dos tipos de herramientas:

- Representación grafica
  - El menú ‘Gráficas’ permite la representación gráfica de los resultados de la simulación.



**Ilustración 41**

- Guardado de resultados
  - El menú ‘Guardar’ permite almacenar los resultados obtenidos de la simulación, junto con el nombre y ruta de los archivos origen de los datos de configuración.
  - Con esta medida se pretende tener cierta trazabilidad entre los resultados obtenidos de la simulación y los datos de configuración.

## 7. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO

De forma ejemplificaste del funcionamiento calculador de tiempos mínimos se presenta en este apartado los resultados obtenidos, paso a paso, de una simulación de un recorrido.

### 7.1 Datos de configuración

#### 7.1.1 Tren

Los datos relevantes del tren son:

Velocidad máxima: 300 km/h	Eficiencia del sist. tracción 95%
Longitud: 250 m.	Potencia auxiliares: 1000 kWh
Masa del tren 400t y carga de 100t.	Masa rotativa: 10%.

#### 7.1.2 Infraestructura

- Perfil de gradiente

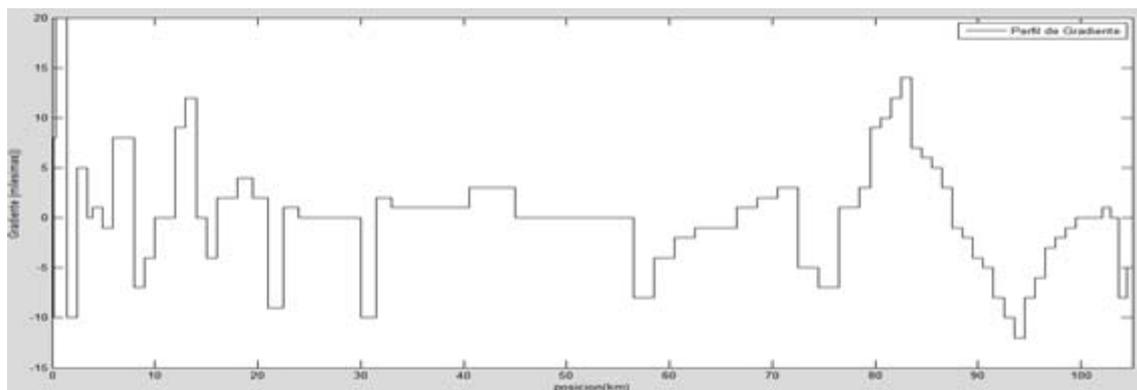


Ilustración 42

- Perfil de curvas

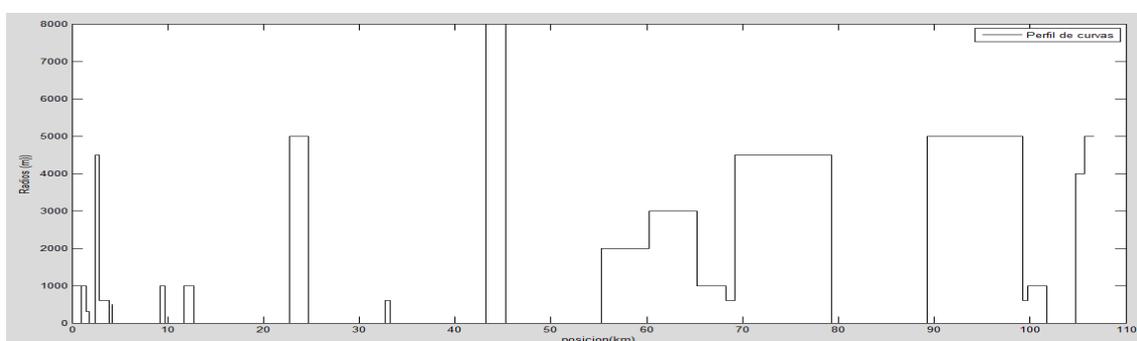


Ilustración 43

- ZN y Túneles

ZN		TUNELES		
Pos(km)	Long.(m)	Pos (km)	Long(m)	Factor
20	10	10	400	1,6
60	20	50	100	1,1
80	20	70	100	1,1
		70,5	200	1,5
		80	50	1,3

- SSP

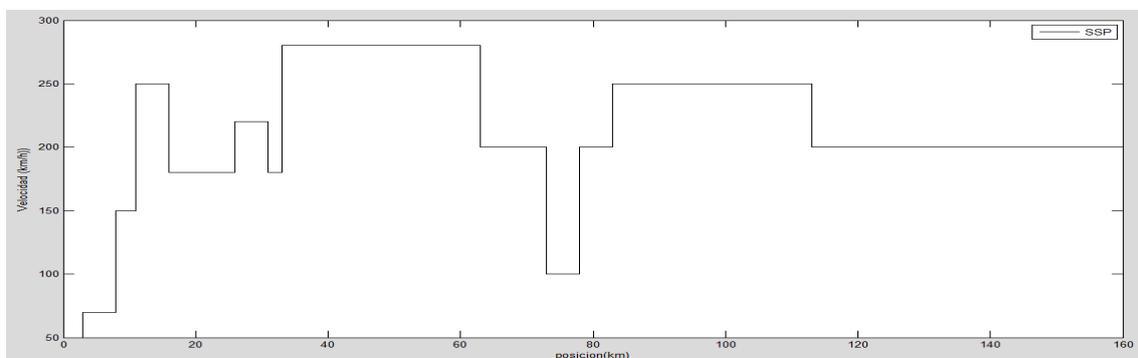


Ilustración 44

### 7.1.3 Señalización

Se configura la infraestructura con datos de N1 y N1+infill para 4 aspectos de señalización.

### 7.1.4 Explotación

Se trata de un trayecto compuesto únicamente por una estación de salida y una estación de llegada a 100 km.

Conducción en modo deriva	Deceleración máxima de $0.3 \text{ m/s}^2$
Delta_v: 10 km/h	Velocidad máxima de explotación 280 km/h
Aceleración máxima de $0.35 \text{ m/s}^2$	Explotación en modo ATO

## 7.2 Resultados obtenidos

Tras ejecutar la simulación los resultados que se muestran a continuación, se presenta en orden de obtención del SW según se realiza su ejecución.

### 7.2.1 MRSP

En primer lugar el simulador calcula el perfil estático de velocidad más restrictivo.

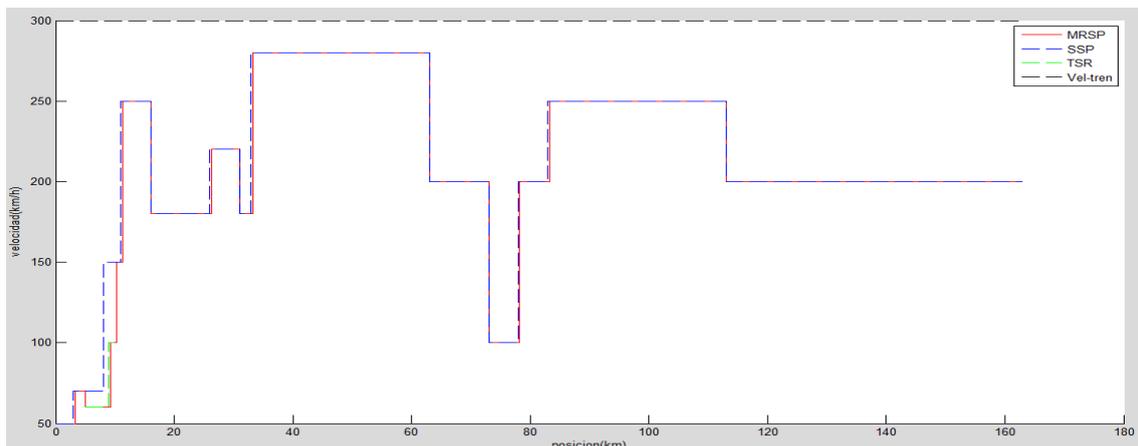


Ilustración 45

### 7.2.2 CSM

Partiendo del MRSP y los valores de configuración del equipo ERTMS se calcula el Ceiling Speed Monitoring.

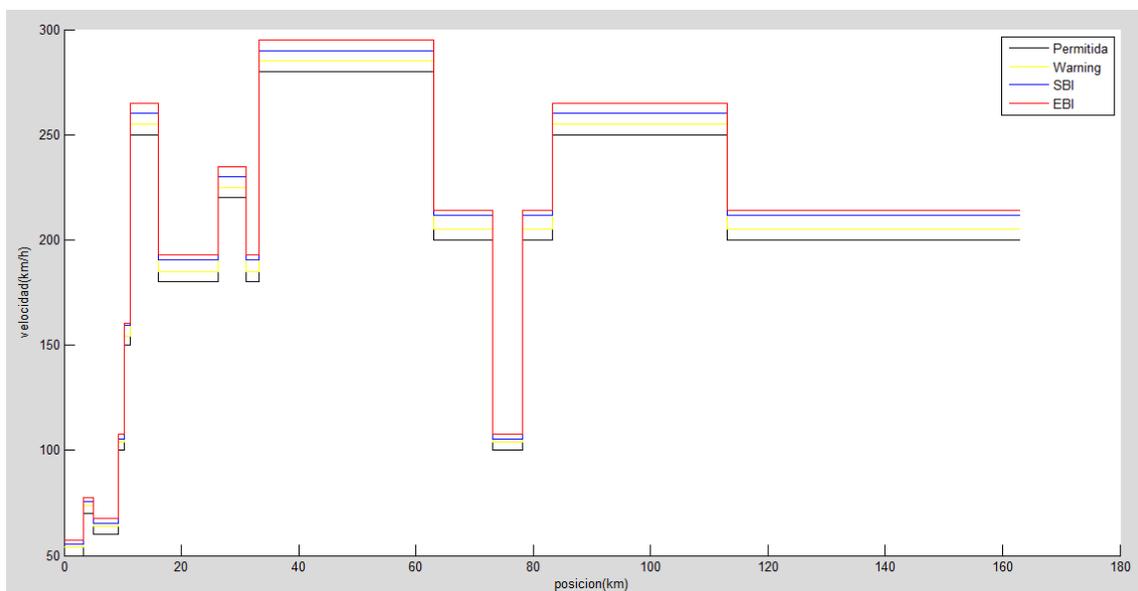


Ilustración 46

### 7.2.3 MRSBCP

Con el perfil CSM y los puntos de EoA y DP que son obtenidos de como los puntos de parada de la estación, se calcula la curva de MA o como se ha denominado en este trabajo MRSBCP.

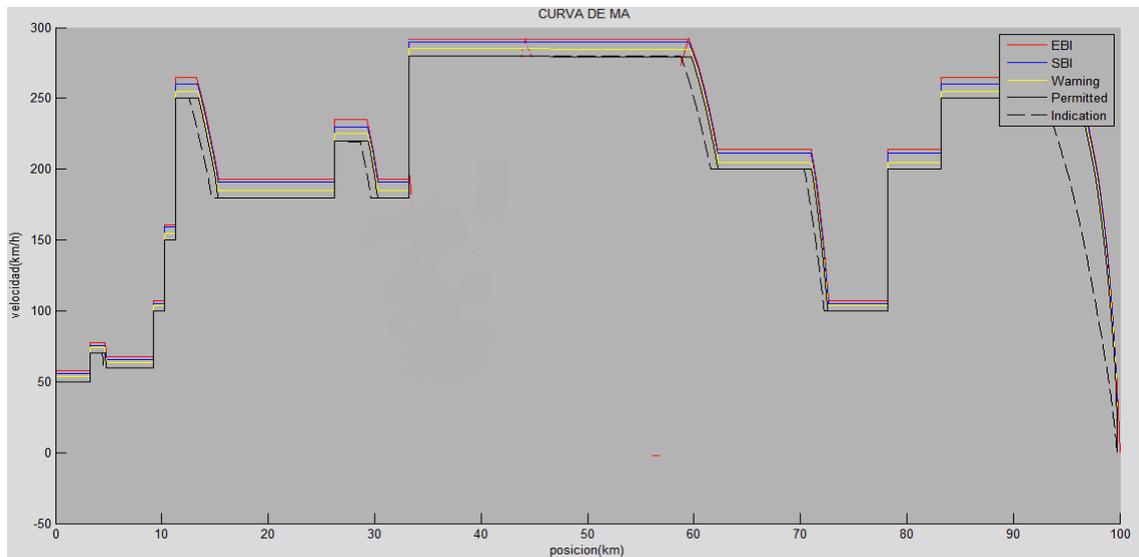


Ilustración 47

### 7.2.4 CVMO

Partiendo del al curva de MA, se aplican las limitaciones de desaceleración de confort, velocidad máxima de explotación y el tipo de Explotación (conducción manual o ATO). De forma que se construye la curva CVMO o curva de operación. En la siguiente figura se representa en color magenta, superpuesta sobre la curva de MA.

Como se puede observar, dado que el modo de explotación elegido en tipo ATO, la curva límite de velocidad del perfil MRSBCP, que es tomada como referencia para el cálculo de la curva CVMO, es la curva Permitted y no la curva de Indicación.

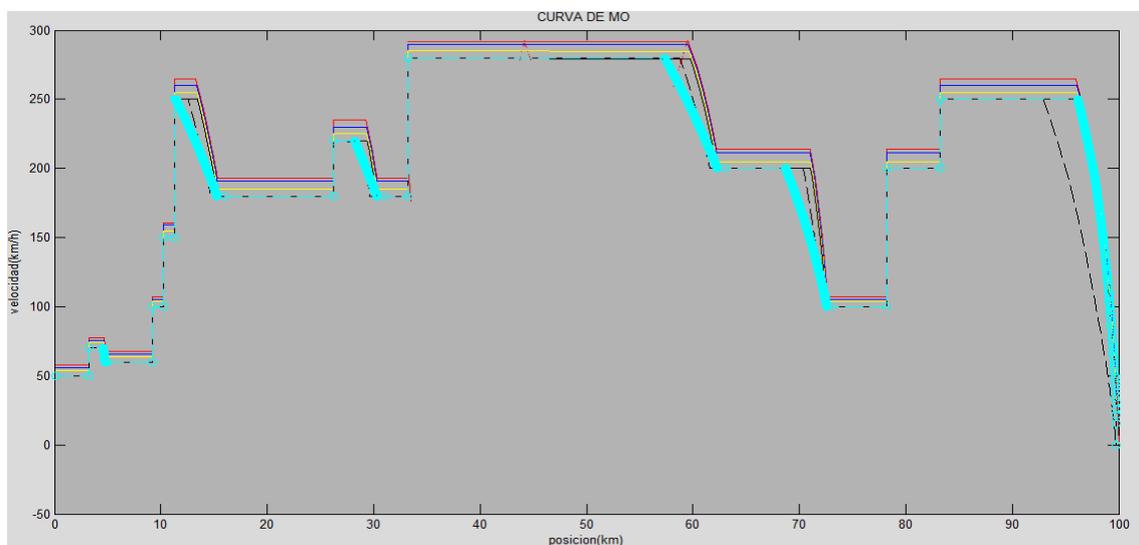


Ilustración 48

### 7.2.5 Conducción y energía

Un vez calculada la curva CVMO que será la curva de referencia de velocidad que seguirá el simulador de marcha, se realizó la simulación de la dinámica del tren.

En la siguiente gráfica se puede observar el perfil de velocidad de conducción, junto con los esfuerzos de tracción y freno obtenido del simulador de marcha.

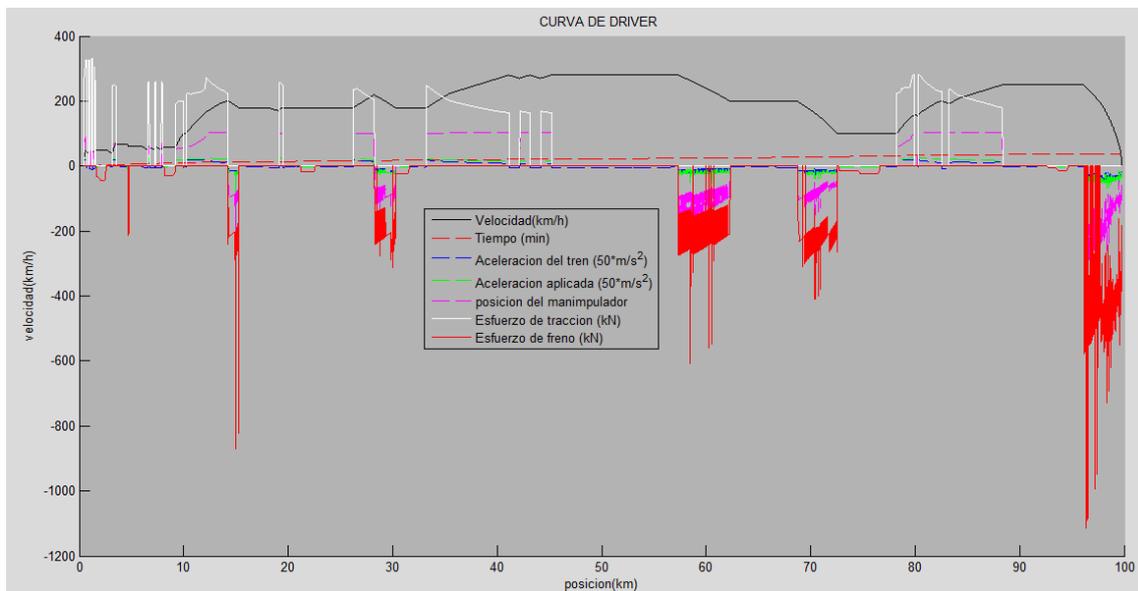


Ilustración 49

Partiendo de los datos de simulación de marcha son calculadas las energías puestas en juego durante el recorrido del tren, que se representan en la siguiente gráfica.

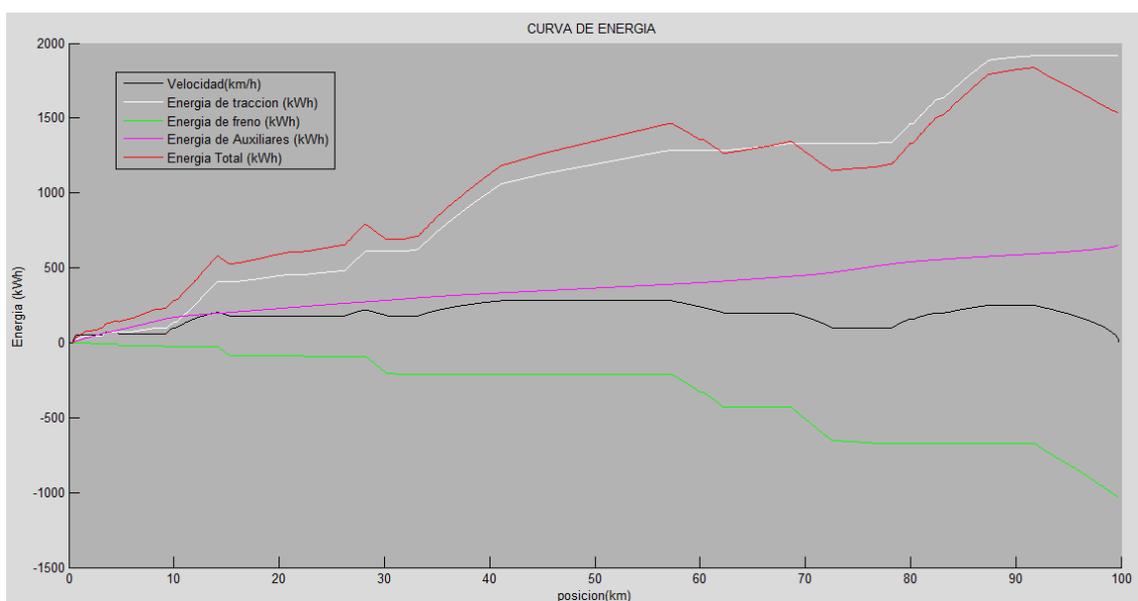


Ilustración 50

### 7.2.6 Tiempos mínimos N1

Partiendo de los datos obtenidos de la simulación de marcha del tren y los datos de configuración de N1, juntos con el calculador de curvas de frenado ERTMS, el simulador es capaz de **calcular** en este momento los **intervalos mínimos de circulación** y el **tiempo mínimo del recorrido** para el sistema ferroviario y el tren seleccionado.

Pero también, calcula **la posición de las posibles balizas avanzadas** que podrían mejorar los **intervalos de circulación** y el **nuevo tiempo mínimo** para la infraestructura dotada de balizas avanzadas.

Para el ejemplo seleccionado se obtiene el siguiente gráfico que muestra la mejora en los intervalos de circulación y la reducción del tiempo mínimo de circulación en 89 segundos.

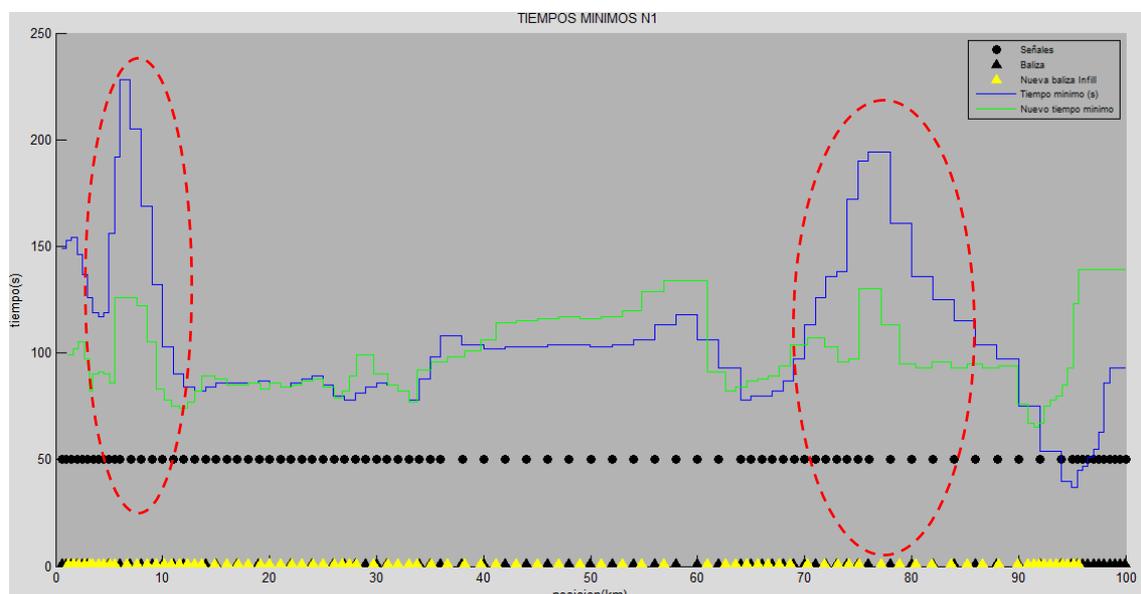


Ilustración 51

El tiempo mínimo sin balizas infill es: 228 seg. en el Pk: 5.99.

El nuevo tiempo mínimo con balizas infill es: 139 seg. en el Pk: 95.6.

Se puede observar la importante reducción del intervalo de circulación en el entorno de los Pk 10 y 80.

### 7.2.7 Tiempos mínimos N1 + Infill

Se ha simulado la misma infraestructura pero con balizas infill colocadas a 200m de las señales. Se ha lanzado el simulador para que recalcule la posición óptima de las balizas infill y la mejor en los tiempos mínimos y los intervalos de circulación.

Se obtiene una mejora en el tiempo mínimo de 99 segundos y se establece el tiempo mínimo de circulación en 95.6 segundos. El mismo resultado que se obtuvo para la simulación en N1.

En el grafico se puede observar la nueva colocación de las balizas avanzadas (marcada en amarillo)

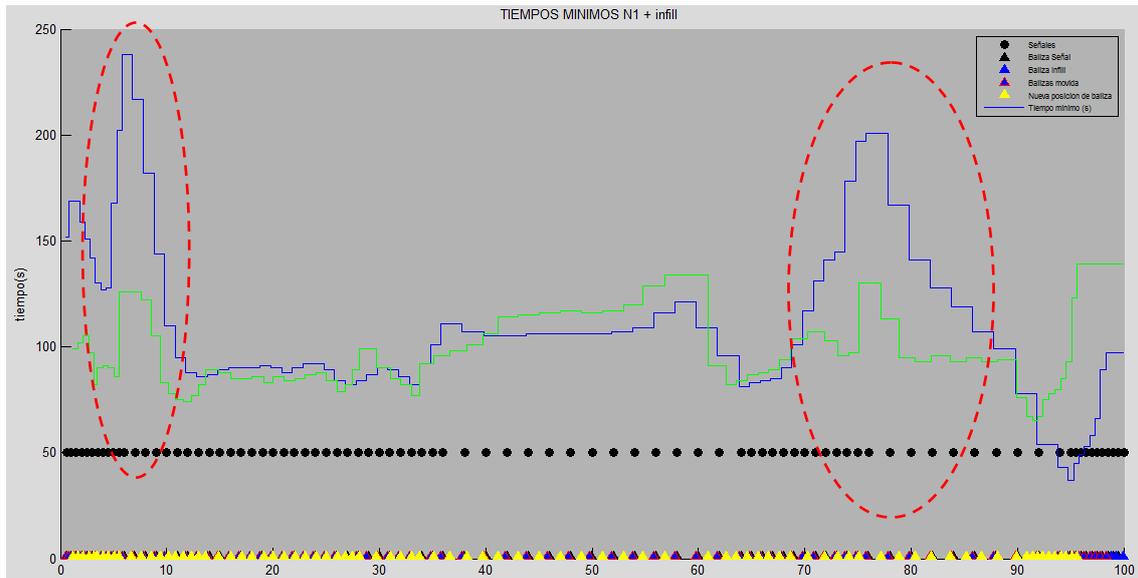


Ilustración 52

### 7.2.8 Tiempo mínimo N2

El simulador calcula partiendo del perfil de velocidad del simulador de marcha, las curvas de frenado ERTMS y la posición de los CV, los intervalos de circulación y el tiempo mínimo de circulación para los datos de simulación dados.

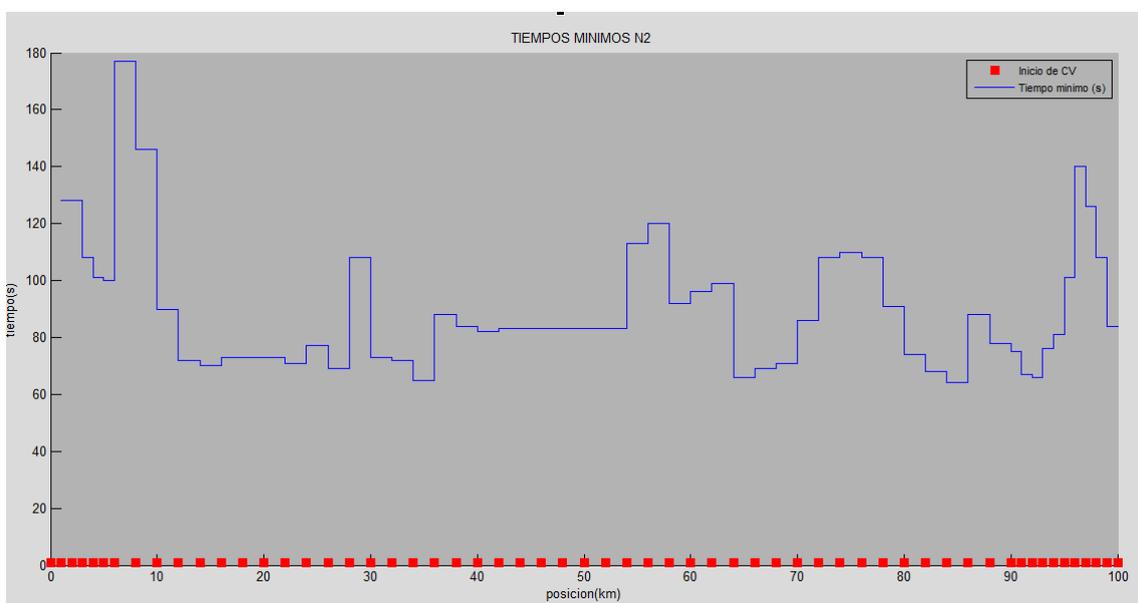
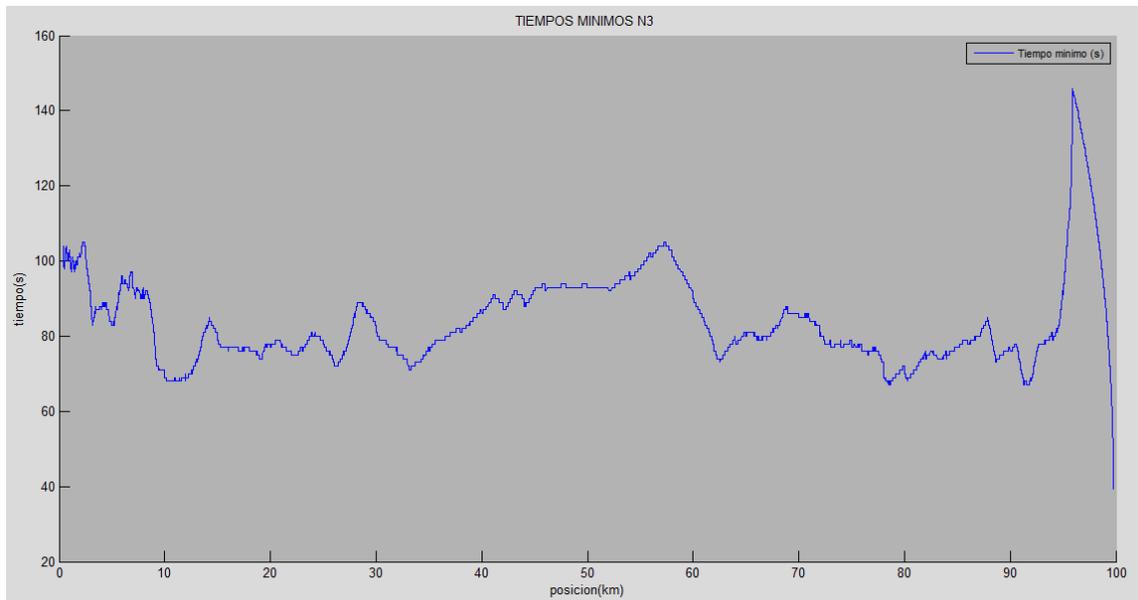


Ilustración 53

Se puede observar que el tiempo mínimo de circulación y los intervalos de circulación se reducen notablemente. Pasando de un tiempo mínimo de **228 s en N1**, a un tiempo mínimo de **177s en N2**.

**7.2.9 Tiempo mínimo N3**

El simulador calcula partiendo del perfil de velocidad del simulador de marcha y las curvas de frenado ERTMS, los intervalos de circulación y el tiempo mínimo de circulación para los datos de simulación dados.



**Ilustración 54**

Se produce una nueva mejor del tiempo mínimo de circulación, junto con unos intervalos de circulación más constante. Únicamente se observa un aumento del intervalo de circulación en el momento de la aproximación al final del trayecto debida la parada en la estación y la disminución de la velocidad.

Los tiempos mínimos obtenidos son:

N1	N1 + infill	N2	N3
223 s	238 s	177 s	146 s
N1 + infill calculado	N1 + infill recalculado		
139 s	139s		

---

## 8. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

---

En el presente trabajo final de master se ha conseguido desarrollar una herramienta SW que es capaz de realizar las siguientes acciones:

- Simular la marcha de un tren por una infraestructura definida en detalle.
- Simular 2 modos de conducción diferentes (tracción máxima y deriva).
- Calcular la posición, tiempo, velocidades, aceleraciones, esfuerzos, energía y posición del manipulador de tren simulado.
- Calcular los intervalos mínimos de circulación para los niveles de ERTMS N1, N1+Infill, N2 y N3 y con 3 o 4 aspectos de señalización lateral.
- Calcular los tiempos mínimos de circulación para los niveles de ERTMS N1, N1+Infill, N2 y N3.
- Calcular la posición óptima de las nuevas balizas Infill, en un sistema de señalización con solo balizas de señal.
- Calcular la mejora en los intervalos mínimos de circulación y tiempos mínimos al pasar de un N1 a N1+Infil.
- Recalcular la posición de las balizas Infill, en un sistema de señalización con balizas avanzadas.
- Calcular la mejora en los intervalos mínimos de circulación y tiempos mínimos con el reposicionamiento de las balizas infill.

Las limitaciones que tiene la herramienta desarrollada son las siguientes:

- Solo puede realizar simulaciones en un sentido de recorrido de la línea.
- Solo calcula los intervalos de seguimiento entre trenes. No se encuentran elementos como agujas o escapes que interfieren en la circulación, circulación cuando la autorización de movimiento la determinan estos elementos y no el tren precedente
- El cálculo de los tiempos mínimos e intervalos de circulación se realiza para una línea explotada con un único tipo de servicio y material rodante.

Por tanto, la principal aportación de este TFM es:

La creación de una herramienta de simulación de dinámica de marcha, cálculo de intervalos mínimos de circulación y tiempos mínimos, con una **flexibilidad en la configuración de los datos de partida** de la simulación y cuyos resultados aporta información para la **optimización de un sistema ferroviario ERTMS** en explotación o diseño.



### 9. BIBLIOGRAFIA

---

#### Curvas de frenado - ERTMS

---

- [1]. Introduction to ETCS braking curves. ERTMS unit. Ref. ERA\_ERTMS\_040026. Ver. 1.2. Fecha 19/06/12. European Railway Agency.
- [2]. Baseline 2. Requirements for implementation of braking curves functionality. ERTMS Unit. Ref. ERA\_ERTMS\_040022. Ver. 2.0. fecha 19/06/12.
- [3]. SUBSET-026. System Requirement Specification. Ver. 3.5.0. Fecha 18/12/2015. European Railway Agency.

#### Dinámica ferroviaria

---

- [4]. DINÁMICA DE LOS TRENES EN ALTA VELOCIDAD. 10ª Edición, Marzo 2015. Alberto García Álvarez. FFE.
- [5]. Energía y Ferrocarril. Presentación Abril-Mayo 2015. Alberto García Álvarez. MSF Universidad de Comillas.
- [6]. Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril. Marzo 2011. Alberto García Álvarez. FFE.
- [7]. Energy Consumption and Running Time for Trains. Modelling of running resistance and drivebehaviour based on full scale testing. 2011. Doctoral Thesis by Piotr Lukaszewicz.
- [8]. Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material. Alberto García Álvarez, Mª del Pilar Martín Cañizares. ElecRail/5. FFE.
- [9]. Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad. Instituto de investigación tecnológico, Universidad Pontificia de Comillas.. ElecRail/5.

#### Tiempo mínimo

---

- [10]. Influence of ETCS on line capacity. Generic study. UIC, Paris 2008. ISBN 2-7461-1455-0.
  - [11]. Apuntes de SISTEMAS AVANZADOS DE DISEÑO Y CONTROL DE TRÁFICO. “Diseño de la Señalización. Intervalos mínimos. Herramientas de diseño”. Curso 2012-2013 Universidad Pontificia de Comillas. ICAI.
  - [12]. “Teoría de la Capacidad”. Apuntes Máster de sistemas ferroviarios ICAI. Asignatura: Planificación y Programación del Transporte. José Estrada. Versión 1 de 13/02/2009.
-

- [13]. Optimización de la posición de balizas infill en línea suburbana para ERTMS nivel 1 mediante la creación de una herramienta de simulación.
- [14]. Señalización Ferroviaria. Del guardagujas a la operación sin conductor. 2009. Francisco Javier González Fernández. ISBN 978-84-612-9599-9. Editorial Piscegraf.

### Matlab

---

- [15]. Página web de Matlab:  
“[http://es.mathworks.com/help/matlab/functionlist.html?s\\_cid=doc\\_ftr](http://es.mathworks.com/help/matlab/functionlist.html?s_cid=doc_ftr)” . Fecha 01/04/2017.

## 10. ANEXOS

---

### 10.1 Detalle de Datos de Entrada

---

Los se introducen en el programa mediante archivos .xls que tienen la siguiente información

#### 10.1.1 Infraestructura

- Límites máximos de velocidad de infraestructura.
- Perfil de gradientes:
  - Pk<sup>11</sup> de inicio de los gradientes.
  - Longitud del tramo de gradiente.
  - Milésimas del gradiente.
  - Sentido del gradiente: creciente o decreciente.
- Perfil de radios de curvas:
  - Pk inicio de la curva.
  - Longitud de la curva.
  - Radio de curva.
- Perfil de túneles:
  - Pk de inicio del túnel.
  - Longitud del túnel.
  - Factor aerodinámico de túnel.
- Zonas neutras:
  - Pk de inicio de la zona neutra
  - Longitud de la zona neutra.
- Distancia de apertura del disyuntor antes de las zonas neutras.
- Ancho de Vía.

#### 10.1.2 Señalización en vía

- Descripción de los circuitos de vía:
  - Pk de inicio de los circuitos de vía.
  - Longitud de los circuitos de vía.
- Posición de las señales.
- Posición de las balizas de señal.
  - Posición de las balizas (Pk).

---

<sup>11</sup> Pk: Punto kilométrico

- 
- (o) Distancia de la baliza de señal.
  - Posición de las balizas avanzada (Infill).
    - Posición de las balizas (Pk).
    - (o) Distancia de la baliza de señal.
  - Tiempo retardo en la gestión del posicionamiento del tren por el enclavamiento para cada nivel ERTMS de explotación.
    - Niveles 1 y 2: tiempo de retardo en la gestión de la liberación del circuito de vía.
    - Nivel 3: tiempo de gestión de las comunicaciones.
  - Nivel ERTMS (1, 1+Infill, 2, 3).
  - Distancia de seguridad entre trenes.
    - Distancia para el nivel 2.
    - Distancia para el nivel 3.
  - Número de aspecto de la señalización.
    - Tres aspectos (Verde, Amarillo, Rojo).
    - Cuatro aspectos (Verde, Verde intermitente, Amarillo, Rojo).

### 10.1.3 Tren

- Curva de esfuerzo de tracción
- Curva de esfuerzo de frenado del freno eléctrico.
- Velocidad mínima de aplicación del freno eléctrico .
- Longitud del tren
- Masa del tren (tara)
- Masa de carga del tren.
- Velocidad Máxima del tren.
- Factor de masas rotativas.
- Coeficientes aerodinámicos (A, B y C).
- Potencia de auxiliares instalada.
- Factor de rendimiento de la cadena de tracción.

### 10.1.4 Explotación

- Posiciones del punto de parada en las estaciones con parada.
- Posición de no rebase en la estación (Danger Point).
- Tiempos de parada en estación.

- Aceleración máxima permitida en tracción.
- Deceleración máxima permitida.
- Velocidad máxima de conducción.
- Tipo de conducción (tracción máxima o deriva)
- Modo de conducción (Manual o ATO).
- Limitaciones temporales de velocidad.
- Sentido de recorrido de la línea.

### 10.1.5 ERTMS

<b>DATOS DEL TREN</b>	<i>L_train</i>	250	Longitud del tren
	<i>V_max</i>	300	Velocidad máxima del tren
	<i>bool_Trac</i>	2	Booleano que informa si el valor de tracción es fijo (1), matriz (0), aceleración máxima del tren (2)
	<i>ac_est1</i>	0,5	Valor de aceleración m/s2
	<i>bool_err_odo</i>	0	valor booleano que informa de si se ha definido un erro estático de odometría
	<i>err_odo</i>	0	error estático de odometría en metros.
<b>DATOS GRADIENTES</b>	<i>M_rot_max</i>	15	Masa rotativa máxima
	<i>M_rot_min</i>	2	Masa rotativa mínima
	<i>M_rot</i>	-1	Masa rotativa (si <0 no está definida)
	<i>Kn_POS_gr</i>		Matriz de factor de corrección de gradiente Positivo FnS (3.13.2.2.9.2.3)
	<i>Kn_NEG_gr</i>		Matriz de factor de corrección de gradiente Negativo FnS (3.13.2.2.9.2.3)
<b>TIEMPOS DE RETARDO</b>	<i>Imp_V_warn</i>	1	Define si se implementa el corte de tracción por V_warning superada.
	<i>T_traction</i>	2	
	<i>T_warn</i>	2	
	<i>T_driver</i>	4	
<b>DIFERENCIALES DE VEL</b>	<i>dV_ebi_min</i>	7,5	
	<i>dV_ebi_max</i>	15	
	<i>V_ebi_min</i>	110	
	<i>V_ebi_max</i>	210	
	<i>dV_sbi_min</i>	5,5	
	<i>dV_sbi_max</i>	10	
	<i>V_sbi_min</i>	110	
	<i>V_sbi_max</i>	210	
	<i>dV_warn_min</i>	4	
	<i>dV_warn_max</i>	5	
	<i>V_warn_min</i>	110	
	<i>V_warn_max</i>	210	

<b>TIPO DE MODELO</b>	<i>Modelo_D</i>	0	Modelo de datos: Datos de tren = 0 Modelo de conversión = 1
<b>MODELO: DATOS DE TREN</b>	<i>bool_kdry</i>	0	Valor booleano que defina si Kdry_rst en matriz (0) o entero (1)
	<i>kdry_rst</i>	0,75	Factor corrección del freno de emergencia SECO independiente de Vel.
	<i>bool_kwet</i>	0	Valor booleano que defina si KWET_rst en matriz (0) o entero (1)
	<i>kwet_rst</i>	0,8	Factor corrección del freno de emergencia HUMEDO independiente de Vel.
	<i>M_NVAVADH</i>	0,8	Factor de ponderación de adherencia disponible (0-1)
	<i>M_NVEBCL</i>	99,9999	valor de confianza %
	<i>T_brake_emergency</i>	5	Tiempo de retardo en la aplicación del freno de emergencia
	<i>T_brake_service</i>	1	Tiempo de retardo en la aplicación del freno de servicio
<b>MODELO:CONVERSION</b>	<i>Lamda</i>	200	Porcentaje de freno del tren
	<i>Brake_pos</i>	3	Posición del freno: PP=1, GP=2, GG=3
	<i>V_max_conv</i>	200	Velocidad máxima de aplicación del modelo 3.13.3.2.1
	<i>Lamda_min</i>	30	Porcentaje de freno mínimo 3.13.3.2.1
	<i>Lamda_max</i>	250	Porcentaje de freno máximo 3.13.3.2.1
	<i>L_max_PP</i>	900	Longitud máxima para posición de freno de Pasajeros 3.13.3.2.1
	<i>L_max_G</i>	1500	Longitud máxima para posición de freno de Locomotora+coches o mercancías 3.13.3.2.1
	<i>bool_kv</i>	0	Valor que dice si se usa matriz o factor de kv_int bool_kv = 0: significa matriz
	<i>kv_int</i>	0,7	Factor de integración por velocidad(si no se define la matriz) M_NVKVINT
	<i>bool_kr</i>	0	Valor que dice si se usa matriz o factor de kr_int bool_kr = 0: significa matriz
	<i>kr_int</i>	0,9	Factor de integración por longitud del tren(si no se define la matriz) M_NVKRINT
	<i>kt_int</i>	1,1	factor de integración por tiempo de reacción
	<i>A_P12</i>	1	
	<i>A_P23</i>	1,4	
<b>ADHERENCIA</b>	<i>Esp_Adh_PP</i>	1	Define si hay adherencia especial
	<i>A_MAXREDADH1</i>	1	Valor límite de adherencia para posición de freno PP y Esp_Adh=1.
	<i>A_MAXREDADH2</i>	0,7	Valor límite de adherencia para posición de freno PP y Esp_Adh=0
	<i>A_MAXREDADH3</i>	0,7	Valor límite de adherencia para posición de

			freno GP o GG
--	--	--	---------------

**Datos de modelo de tren:**

- Matriz de aceleración por corte de tracción
- Matriz de aceleración de freno de emergencia
- Matriz de aceleración de freno de servicio
- Matriz Kdry\_rst
- Matriz Kwet\_rst

**Datos de modelo de conversión:**

- Matriz Kv\_int\_a
- Matriz Kv\_int\_b
- Matriz Kv\_int\_G
- Matriz Kr\_int
- Coeficientes definidos en el Apartado A.3.7.1 del Subset-026-3
- Coeficientes definidos en el Apartado A.3.7.6 del Subset-026-3

**10.2 Datos de Salida (resultados)**

- Dirección y nombre de los archivos de datos e configuración.
- Perfil de velocidad CSM
- Perfil de velocidad MRSBP
- Curva de MA
- Curva de MO (perfil de velocidad de operación).
- Matriz de resultados del simulador conducción
  - Posición del tren (Pk).
  - Velocidad (km/h).
  - Tiempo absoluto en cada posición (s).
  - Aceleración del tren ( $m/s^2$ ).
  - Aceleración aplicada al tren ( $m/s^2$ ).
  - Posición del manipulador (tracción, freno, deriva)
  - Tipo de actuación del sistema de tracción/freno (eléctrica o neumática).
  - Esfuerzo de tracción aplicado (kN).
  - Esfuerzo de frenado aplicado (kN).
  - Energía total consumida de tracción (KJ).
  - Energía total regenerada en freno (KJ).
  - Energía consumida por auxiliares (KJ).

- Energía Neta consumida (KJ).
- Resultados de Energía consumida
- Matriz de intervalos mínimos de circulación N1
- Matriz de intervalos mínimos de circulación N1+infill
- Matriz de intervalos mínimos de circulación N2
- Matriz de intervalos mínimos de circulación N3
- Tiempos mínimos de circulación N1
- Tiempos mínimos de circulación N1 + infill
- Tiempos mínimos de circulación N2
- Tiempos mínimos de circulación N3
- Posición de las nuevas balizas infill
- Posición de las balizas infill recolocadas.

---

## 10.3 Calculo Dinámico

---

### 10.3.1 Masas rotativas

En este anexo se describe el procedimiento por el cual se ha obtenido el coeficiente corrector de masas rotativas, aplicado a la aceleración/deceleración del tren.

Se parte del sumatorio de las fuerzas que actúan de forma longitudinal sobre el tren.

$$(M_T + M_{giratorias}) * a_{corr} = \sum F_{Longitudinales}$$

$$M_T = \text{Masa del tren (M}_{tren}) + \text{Masa de carga (M}_{carga})$$

$$M_{giratoria} = fg * M_{tren} \text{ (fg el \% de masa giratoria del tren)}$$

Expresando el sumatorio de las fuerzas longitudinales como una aceleración aplicada sobre la masa del tren:

$$\sum F_{Longitudinal} = M_T * a_t$$

Y sustituyéndola en la ecuación primera:

$$(M_T + M_{giratorias}) * a_{corr} = \sum F_{Longitudinales} = M_T * a_t$$

Reorganizando la ecuación se obtiene:

$$a_{corr} = \frac{M_T}{M_T + M_{giratoria}} a_t$$

Si lo expresamos todo en función de la masa del tren y de la carga, se obtiene:

$$a_{corr} = \frac{M_T}{(1 + fg) * M_t + M_{carga}} a_t$$

Por tanto, el factor de corrección de la aceleración del tren, debido a las masas rotativas es:

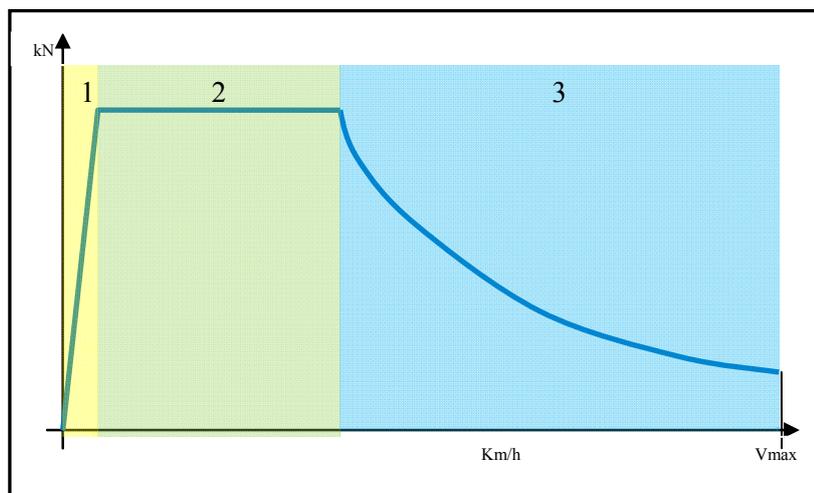
$$C_{mgira} = \frac{M_T}{(1 + fg) * M_t + M_k}$$

### 10.3.2 Esfuerzos de tracción y freno

El cálculo del esfuerzo de tracción y freno en cada instante de la simulación se realiza partiendo de la velocidad a la que circula el tren en el instante 'i' y las curvas de prestaciones de tracción y freno introducidas al simulador como datos de partida.

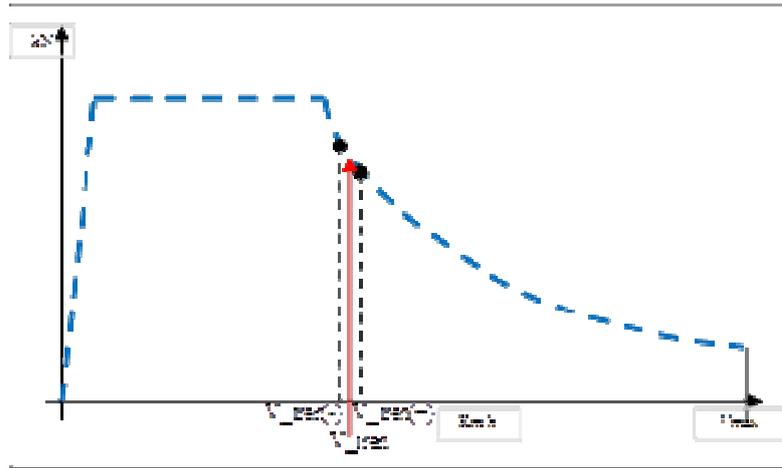
Las curvas de tracción se dividen en 3 partes:

1. Aceleración.
2. Esfuerzo constante.
3. Potencia Constante.



Dado que las curvas de tracción y freno están constituidas por puntos, el cálculo del esfuerzo a una velocidad que se encuentre entre 2 puntos de las curvas se realiza mediante la interpolación de los puntos.

- **Zona 1:** En el caso de los puntos que se encuentra en la zona 1 (Aceleración), el esfuerzo de tracción/freno se obtiene por medio de una interpolación línea.
- **Zona 2:** el esfuerzo es constante por lo tanto el esfuerzo calculado para una velocidad intermedia de los puntos es el mismo que el de los puntos vecinos.
- **Zona 3:** La zona 3 representa a zona de potencia constante, para realizar la interpolación del punto se toma como premisa el hecho de que la potencia es constante. Por tanto, se realiza una interpolación de tipo inversa, con error linealizado.



Partiendo de los datos de la ilustración anterior se va a desarrollar el procedimiento de cálculo del esfuerzo de tracción/freno a la velocidad  $V_{tren}$ .

**[1]. Linealización del error**

- Cálculo de la potencia en  $V_{tren}(-)$

$$P_{Tr}|_{-} = P_{Tr}(V_{i-}) = F(V_{i-}) * V_{i-}$$

- Cálculo de la potencia en  $V_{tren}(+)$

$$P_{Tr}|_{+} = P_{Tr}(V_{i+}) = F(V_{i+}) * V_{i+}$$

- Error lineal en potencia.

$$err_{mP}(i) = \frac{P_{Tr}|_{+} - P_{Tr}|_{-}}{V_{i+} - V_{i-}}$$

$$Err_p(i) = err_{mP}(i) * [V|_i^{\Delta x} - V_{i-}]$$

**[2]. Cálculo de la aproximación a la potencia linealizada en el punto i**

$$P_{Tr}(V_i) = P_{Tr}|_{-} + Err_p(i)$$

**[3]. El esfuerzo en el punto i será:**

Aplicando la ecuación de  $P=F*V$  obtenemos:

$$F_{Tr}|_i^{\Delta x} = \frac{P_{Tr}(V_i)|^{\Delta x}}{V|_i^{\Delta x}} = \frac{P_{Tr}|_{-} + Err_p(i)|^{\Delta x}}{V|_i^{\Delta x}}$$

Desarrollando el término  $Err_p$  obtenemos el valor final de esfuerzo de tracción/freno en el punto i.

$$F_{Tr}|_i^{\Delta x} = [F(V_{i-}) * \epsilon_i] + [err_{mP}(i) * (1 - \epsilon_i)]$$

$$\epsilon_i = \frac{V|_i^{\Delta x}}{V_{i-}}$$

---

## 10.4 Premisas del cálculo de simulación ERTMS

---

Nº	Premisa	Elemento	Requisito <sup>12</sup>
[P_ERTMS1]	No se tiene en cuenta los tiempos de <b>feedback</b> del freno  $T_{bs1}=T_{bs2}=T_{bs}$	[T_bs]	3.13.9.3.3.3
[P_ERTMS2]	La curva de <b>freno de Servicio*</b> en cada instante se calcula como <i>target EoA</i> .  <i>*Este valor se usa para el cálculo de los tiempos mínimos de circulación.</i>		
[P_ERTMS3]	Para el cálculo de tiempo de corte de tracción <b>si</b> se tiene en cuenta si se ha definido implementar la aplicación del FS al superar la velocidad de warning	[T_Traccion]	3.13.9.3.2.3
[P_ERTMS4]	No se utilizan las curvas de GUI.		3.13.8.5 3.13.9.3 3.13.9.3.5
[P_ERTMS5]	Para el cálculo de “ <b>A_brake_safe(V,d)</b> ” no se tiene en cuenta el uso de frenos especiales y por tanto, es independiente de la variables distancia → $A_{brake\_safe}(v)$ .	A_brake_safe	3.13.6.2.1.4
[P_ERTMS6]	Se considera que la deceleración de emergencia tampoco depende de la posición del tren.	A_brake_emergency	3.13.6.2.1.5

---

<sup>12</sup> Requisitos de las SRS subset-026-ver3.5.0

<p>[P_ERTMS7]</p>	<p>No se tienen en cuenta errores asociados a la odometría, esto es velocidad y posición</p>		
<p>[P_ERTMS8]</p>	<p>Para el cálculo de los <b>tiempos de retraso</b> de aplicación de freno de servicio y emergencia en el <b>modelo de conversión</b>.</p> <p>Se dividen entre 2 posibles longitudes del tren:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L &lt;= 900m</li> <li>- L &gt; 900 m</li> </ul> <p>No se tiene en cuenta el límite máximo de 1500m</p>		<p>A.3.8</p> <p>A.3.9</p>
<p>[P_ERTMS9]</p>	<p>Para el cálculo de A_brake_safe en modo datos de tren, se toman en cuenta las siguientes premisas para la ecuación:</p> <div style="background-color: #e0e0e0; padding: 5px; margin: 5px 0;"> <math display="block">A\_brake\_safe(V) = Kdry\_rst(V) * M\_NVEBCL * ((Kwet\_rst(V) + M\_NVAVADH * (1 - Kwet\_rst(V))) * A\_brake\_emergency(V))</math> </div> <p>Para que <b>A_brake_safe(V) ≠ 0</b> →</p> <p>[1]. <math>Kdry\_rst \neq 0</math>          [2]. <math>M\_NVEBCL \neq 0</math>          [3]. <math>Kwet\_rst = 0 \rightarrow M\_NVAVADH \neq 0</math>.</p>	<p>A_brake_safe</p>	<p>3.13.6.2.1.4</p>
<p>[P_ERTMS10]</p>	<p>Se considera para todos los cálculos que <math>EoA = SvL</math>.</p>		

<p><b>[P_ERTMS11]</b></p>	<p>V_delta0 se calcula de acuerdo al punto 5.3.1.2 del subset-041</p> <p>V_est → V_0</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• V_est &lt; 30km/h error +2km/h</li> <li>• V_est ≥ 30km/h error incremento lineal +12km/h hasta 500km/h</li> </ul> <p>El cálculo inverso: V_0 → V_est</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• V_0 &lt; 30km/h → V_est = V_0 - 2km/h</li> <li>• <math>m_{err} = \frac{12-2}{500-30}</math></li> </ul> $V_{est} = \frac{V_0 + m_{err} * 30 - 2}{1 + m_{err}}$	<p>V_0 V_delta0</p>	<p>3.13.9.3.1.2</p>
<p><b>[P_ERTMS12]</b></p>	<p><b>A_est1:</b> Se calcula mediante una matriz o datos de aceleración del tren configurada en los datos de ERTMS</p>	<p>A_est1</p>	<p>3.13.9.3.2.8</p>
<p><b>[P_ERTMS13]</b></p>	<p>Se considera que en el cálculo de las curvas de frenado los puntos de V_delta0 a V_delta2 están en el mismo gradiente.</p>		
<p><b>[P_ERTMS14]</b></p>	<p>El error de posición se calcula en base a 5.3.1.1 del subser-041</p> <p>Posición = 5m + 5% distancia a la última baliza</p>		
<p><b>[P_ERTMS15]</b></p>	<p>Se toma como curva de aplicación de SBI el mínimo entre las SBI1 y SB2</p> <p>SBI = min(SBI1, SBI2)</p>	<p>SBI</p>	
<p><b>[P_ERTMS16]</b></p>	<p>No se tienen en cuenta las velocidades de liberación.</p>	<p>MA</p>	

---

<b>[P_ERTMS17]</b>	Para el cálculo de la curva TSM en relación al perfil CSM se considera que el paso de integración es mucho más pequeño que la longitud de cada nivel de velocidad	TSM	
--------------------	---	-----	--

## 10.5 Instalación de programa

Para la ejecución del programa CITMC (Calculador de Intervalos de Tiempos Mínimos de Circulación) son necesarios los siguientes elementos:

- Programa Matlab – Versión R2012a o superior.
- El conjunto de archivos del programa:

CITMC.m	f_Calc_CVMO_i.m
CITMC.fig	f_drive_ATO_Full.m
Calc_CITMC.m	f_DRIVER.m
f_Calc_coef_G_i.m	f_Calc_BC_DRIVER_ERTMS_i.m
f_T_mínimo_N.m	f_Calc_CSL.m
f_Calc_coef_C_i.m	f_Calc_CVMA_ERTMS_i.m
f_Calc_MRSP.m	f_Calc_V_Pos_i.m
f_DFs_ERTMS_i.m	f_EBD_ERTMS_i.m
f_Calc_dV_ebi.m	f_plot_Energia_CITMC.m
f_Calc_Tb_conv.m	f_plot_T_mínimos_CITMC.m
f_ac.m	f_plot_M_CVMO_CITMC.m
f_Calc_STEP.m	f_Calc_D_conv_ERTMS.m
f_Conf_ERTMS.m	f_plot_Driver_CITMC.m
f_SBD_ERTMS_i.m	f_plot_MCSL_CITMC.m
f_Calc_BC_ATO_ERTMS_i.m	f_plot_MRSP_CITMC.m
f_Calc_TSM_EoA.m	f_plot_S_MRSBP_CITMC.m
f_Calc_TSM_LoA.m	f_plot_M_CVMA_CITMC.m
f_plot_M_CVMO.m	

- El archivo que se debe ejecutar es **CITMC.m**