

Los sistemas de señalización en España: El ERTMS y el ASFA Digital

Signalling Systems in the Spanish Railway Network: ERTMS and ASFA Digital

Dr. Jaime Tamarit^{1*}, Dr. Jorge-Ignacio Iglesias¹

Palabras clave

sistemas de señalización;
ERTMS;
ASFA;

Resumen

Este artículo muestra un análisis comparativo básico de las prestaciones de los sistemas de señalización ERTMS y ASFA, desplegados en la red ferroviaria Española. El primero es un sistema de protección de las más altas prestaciones y el segundo es un sistema de ayuda a la conducción utilizado como sistema de respaldo para posibles situaciones degradadas en que pudiera incurrir el sistema ERTMS.

Keywords

signalling systems;
ERTMS;
ASFA;

Abstract

This communication shows a basic comparative study of the performances of the ERTMS and ASFA signalling systems deployed throughout the Spanish Railway Network. The first is a safe protection system of the highest performance and the second is a driving support system used to get out from degraded situations into which ERTMS could fall.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de señalización desplegados en la Red Ferroviaria Española son el LZB instalado en la línea Madrid – Sevilla, el EBICAB instalado en el corredor mediterráneo, el ERTMS desplegado en las líneas de Alta Velocidad puestas en servicio a partir del año 2000 y en la línea C4 de Cercanías de Madrid y el sistema ASFA, desplegado en toda la red convencional y utilizado como respaldo en las líneas de alta velocidad y de cercanías.

En la actualidad el sistema ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático) se está actualizando a una versión mejorada reconocida como “ASFA Digital” que será la versión utilizada en todo el despliegue ferroviario junto con el sistema ERTMS, base de la interoperabilidad. El paso del ASFA convencional a la versión ASFA digital se reconoce en el sector ferroviario como el “apagón analógico”. Por el impacto que tiene esta evolución es conveniente que presentemos de manera básica las funcionalidades que ofrece cada uno de los dos sistemas que prevalecerán en el futuro.

2. EL SISTEMA ASFA DIGITAL

2.1. Configuración de los equipos embarcados

La especificación del sistema ASFA proporciona la siguiente definición funcional del sistema:

“El sistema ASFA Digital es un sistema de ayuda a la conducción que anuncia en cabina las condiciones más

relevantes de la señalización lateral. Es un sistema de transmisión puntual y de supervisión continua de la velocidad de control.”

Este sistema consta de dos elementos básicos que se muestran en la figura 1:

- **Subsistema de captación:**
Recibe las señales procedentes de las balizas y las transforma para su tratamiento por parte del Equipo de Control y Proceso (ECP).
- **Subsistema de control y presentación de información,**
Este subsistema consta de:
 - Equipo de Control y Proceso (ECP): donde se incluyen los módulos electrónicos responsables de la ejecución de las diferentes funciones de protección e indicación del sistema embarcado.
 - Subsistema de actuación y presentación de indicaciones: Este subsistema constituye el elemento de interacción con el personal de conducción mediante indicadores, pulsadores y conmutadores. Incluye el panel de pulsadores y la pantalla de visualización.
 - Combinador General y Dispositivo de Identificación de Vehículo (DIV) que integra conmutadores y selectores, entre los que se encuentra el DIV.

El equipo embarcado se conecta a través de los Interfaces con los equipos del tren: Transductores de velocidad, freno, equipos externos LZB y ERTMS y batería.

* Autor de contacto: jaime.tamarit@cedex.es

¹ Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX.

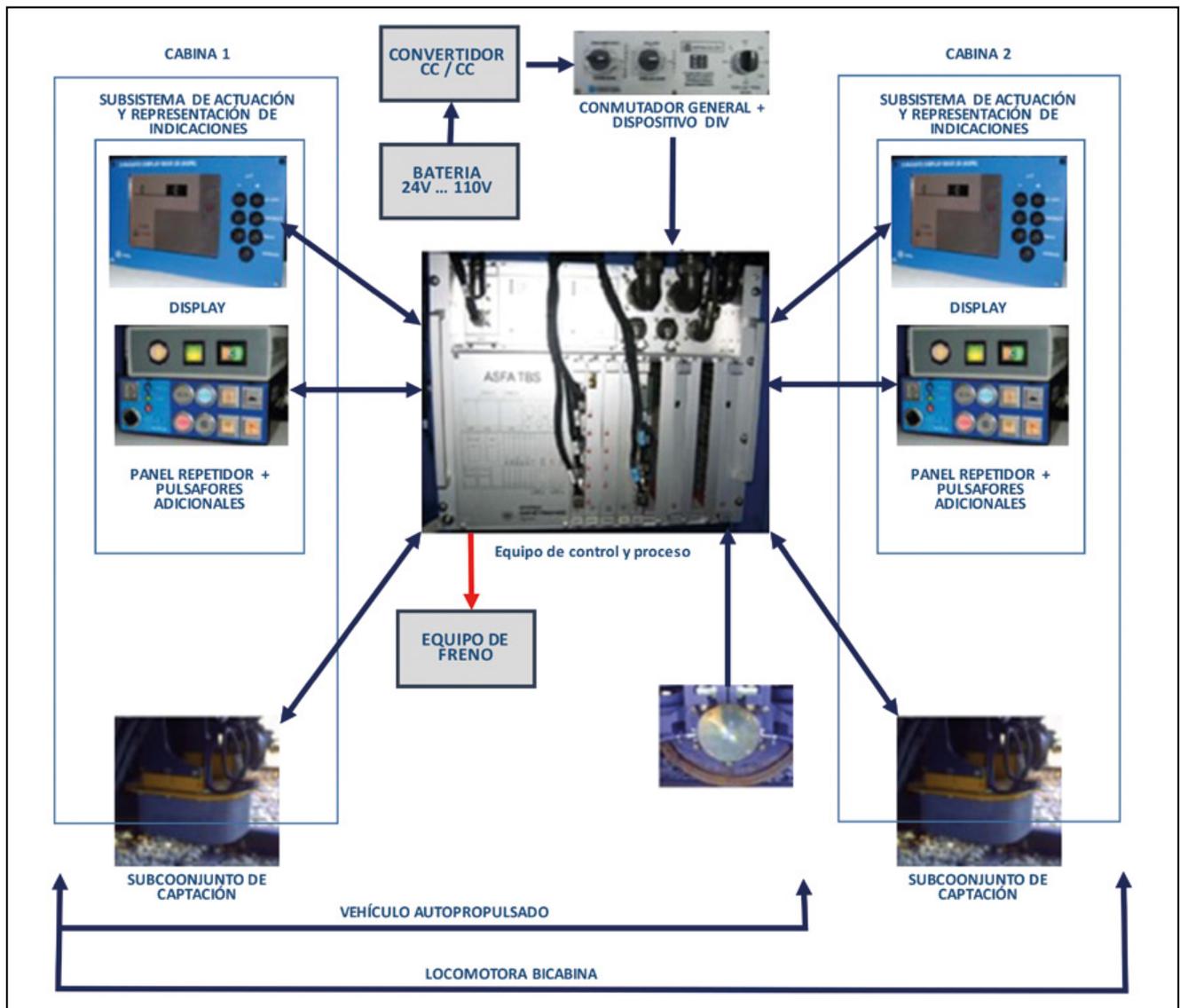


Figura 1. Arquitectura básica del Sistema ASFA.

2.2. La comunicación entre infraestructura y equipo embarcado

La comunicación entre infraestructura y equipo embarcado se utiliza para informar en cabina acerca de los aspectos de las señales y desencadenar las correspondientes acciones de protección que debe llevar a cabo el equipo embarcado para asegurar una conducción segura del tren.

Frecuencia Nominal (Hz.)	
FP	111.103
L1	60.300
L2	64.270
L3	68.510
L4*	73.032
L5*	77.852
L6*	82.990
L7	88.690
L8	96.128
L9*	104.191

Tanto el sistema ASFA como el ASFA Digital utilizan balizas analógicas que emiten una serie de frecuencias en función de los aspectos de las señales. A cada una de estas frecuencias se les asigna una función que seguidamente se analizará.

Estas frecuencias son L1, L2, L3, L4 y L5 en el ASFA y se han ampliado con las cuatro nuevas frecuencias L4, L5, L6 y L9 con objeto de aumentar las posibles combinaciones y funciones adicionales asociadas a un control más preciso con el sistema mejorado ASFA Digital (en la versión final del Asfa Digital se añaden dos frecuencias adicionales L10 y L11 para ampliar el número de valores de limitaciones temporales de velocidad).

La frecuencia FP es la frecuencia permanente que emite la baliza cuando no está activada.

2.3. Los aspectos de las señales en el Reglamento General de Circulación

Dada la estrecha vinculación entre los aspectos de las señales y la información transmitida por las nueve frecuencias de las balizas ASFA, es conveniente mostrar los aspectos de las señales y el significado asociado en el Reglamento General de Circulación. Para ello nos limitaremos a las señales fijas luminosas fundamentales, que exponemos en la tabla 1:

Tabla 1. Aspectos de señales según el RGC

	<p>Vía Libre Ordena circular libremente si nada se opone.</p>		<p>Vía Libre condicional Ordena no exceder 160 Km/h al pasar por la señal siguiente salvo que esta ordene vía libre.</p>
	<p>Anuncio de precaución Ordena no exceder la velocidad de 30 Km/h, o la que indique el nº de pantalla (B & C) al pasar por las agujas situadas a continuación de la señal siguiente, no contemplando a estos efectos la señal de retroceso. La pantalla puede ser de indicación fija o luminosa de información variable. La flecha indica la dirección del desvío, a derecha o a izquierda, según la situación en la pantalla.</p>		<p>Preanuncio de parada Ordena no exceder la velocidad que indica el Nº de la pantalla al pasar por la señal siguiente, salvo que esta ordene vía libre, vía libre condicional o preanuncio de parada.</p>
	<p>Anuncio de parada Ordena ponerse en condiciones de parar ante la señal siguiente, piquete de salida de la vía de estacionamiento o final de la vía.</p>		<p>Anuncio de parada inmediata Ordena ponerse en condiciones de parar ante la señal siguiente o final de la vía, situados ambos a corta distancia. (El fondo azul para destacar el destello amarillo)</p>
<p>Señales sucesivas en anuncio de parada o anuncio de parada inmediata</p>			
<p>Cuando se encuentran dos señales sucesivas en anuncio de parada o en anuncio de parada inmediata, si existen agujas a continuación de la segunda señal, no se excederá la velocidad de 30 Km/h al paso por dichas agujas.</p>			
	<p>Parada Ordena parar ante la misma sin rebasarla. Cuando la señal tenga en el mástil la letra P, se reanudará la marcha si nada se opone, y se circulará sin exceder la velocidad de 40 Km/h, con marcha a la vista hasta la señal siguiente, cualquiera que sea la indicación que ésta presente. Si a continuación de la señal siguiente, existen agujas, no se excederá la velocidad de 30 Km/h al paso por ellas. El foco azul podrá lucir a destellos. Es una indicación para el sistema ERTMS: Azul fijo autoriza el paso a trenes en N2 y azul intermitente a trenes en N1 y N2). Para trenes en ASFA es rojo en ambos casos.</p>		
	<p>Rebase autorizado Si se trata de un tren:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Ordena parar ante la señal y reanudar la marcha seguidamente, si nada se opone, con marcha de maniobras hasta el punto de estacionamiento o hasta la señal siguiente. Cuando la señal muestre el aspecto A, procederá de igual forma pero no efectuará parada. – Cuando la señal se encuentra en el interior de una estación, ordena continuar con marcha de maniobras hasta la señal siguiente o hasta el piquete de la vía de estacionamiento, sin rebasar el cartelón límite de la maniobras, si existe. – Cuando se trate de la salida o paso de un tren, sin existir señales de salida, la marcha de maniobras será hasta rebasar las agujas de salida. En la línea de Alta Velocidad de Madrid a Sevilla, en cualquier caso, será hasta que su composición rebasa la última aguja de la estación <p>Si se trata de una maniobra:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Podrá iniciarse o continuar el movimiento, cuando lo ordene el agente encargado de la misma, pero no autoriza a circular hasta la estación siguiente. – El foco blanco B puede estar en alineación horizontal o inclinada respecto al rojo. – El foco de luz blanca C puede tener forma de banda horizontal e indica, en este caso, el establecimiento de un itinerario hacia una vía con final a corta distancia. 		
	<p>Movimiento autorizado Ordena a: Un tren parado ante la señal: Emprender la marcha si nada se opone, con marcha de maniobras hasta la señal siguiente, ateniéndose a lo que ésta ordene, En determinadas estaciones se precisa, además, la señal de marche el tren. Un tren en movimiento: Continuar normalmente, si nada se opone. Una maniobra: Circular cuando lo ordene el agente encargado de la misma pero no marchar hasta la estación siguiente.</p>		
	<p>Paso a Nivel protegido Con luz blanca fija, ordena circular normalmente por el o los PN si nada se opone. Con luz blanca a destellos, ordena circular normalmente debiéndose informar de esta circunstancia al PM por radiotelefonía o al Jefe de Circulación de la primera estación donde se efectúe parada. Si después de rebasada una señal de PN protegido, y antes de llegar al mismo, se diera alguna de las situaciones siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Circular a velocidad igual o inferior a 40 Km/h por circunstancias anormales. – Efectuar paradas accidentales o detenciones. – Efectuar paradas prescritas superiores a dos minutos <p>Se procederá como si dicha señal se hubiera encontrado en la indicación de PN sin protección. Cuando esta señal está relacionada con más de un PN, se indicará con cartelones el número de ellos y el último.</p>		
	<p>Paso a Nivel sin protección Ordena ponerse en condiciones de parar ante el o los PN, sin rebasarlos hasta haberse asegurado de que no están transitados adoptando, en su caso, las medidas complementarias de seguridad que se estimen necesarias. En ningún caso se reanudará la marcha normal hasta que el primer vehículo del tren rebasa el PN. Se informará de esta circunstancia al PM por radiotelefonía o, en su defecto, al Jefe de Circulación en la primera estación abierta. Cuando la señal esté apagada, se procederá de la misma forma.</p>		

2.4. Relación entre las frecuencias recibidas y los aspectos de la señal. Comandos ASFA

De manera general, para la fase final de implantación del sistema ASFA (Fase 2) la relación entre las frecuencias emitidas por las balizas y las indicaciones luminosas fundamentales, se muestran de forma resumida en la tabla 2:

Como ya se ha mencionado anteriormente a estas 9 frecuencias se añadirán dos más para ampliar los valores de LTVs disponibles

Como caso típico de las funciones de protección y por simplificar la exposición, se presenta en la figura 2 una representación gráfica de un proceso de control de velocidad en un movimiento con aspecto de parada al final del mismo en la que aparecen las curvas de frenado teóricas que debería seguir el tren, los aspectos de las señales sucesivas: Verde (Vía libre); Verde/Amarillo (Anuncio de precaución) o Amarillo (Anuncio de Parada) y Rojo (Parada). Se muestran en el esquema también las balizas previas a las

señales en la que es de especial importancia la previa de la señal de parada en rojo cuya misión es asegurar una velocidad que garantice la parada antes de la llegada al pie de la señal (30 o 25 Km/h en función del tipo de tren).

La tabla 3 muestra de manera más completa la relación entre aspectos de las señales, frecuencias recibidas y acciones de control asociadas en una autorización de movimiento para la fase final de implantación del sistema ASFA digital (fase 2) en Alta Velocidad:

Es conveniente compaginar las acciones de control del ASFA con el reglamento General de la circulación para casos puntuales como es el anuncio de precaución o el preanuncio de parada, dadas las limitadas prestaciones de las comunicaciones entre infraestructura y tren.

El sistema ASFA incorpora un pulsador de incremento de las curvas de frenado que pasa a una curva menos restrictiva que permite un aumento de velocidad en los anuncios de precaución, preanuncio de parada y parada con rebase autorizado, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 2. Relación entre frecuencias de Asfa y Señales Luminosas. Como ya se ha mencionado anteriormente a estas 9 frecuencias se añadirán dos más para ampliar los valores de LTVs disponibles

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7 Baliza previa	L8 Baliza señal	L9
Aspecto	A A*	V*	V		A+N	V/A V/A+N		R	
Función	Anuncio de parada	Vía Libre condicional Preanuncio LTV	Vía Libre	PaN (p) Cambio ancho (2 balizas cercanas)	Preanuncio de parada	Anuncio de precaución	Previa de parada	Parada	PaN (sp) LTV

Este color indica función no asociado a señal luminosa. N = Número indicando límite de velocidad. * = Destellos. PaN = Paso a Nivel. LTV = Limitación Temporal de Velocidad.

Tabla 3. Frecuencias básicas y comandos ASFA

Frecuencias básicas utilizadas en el control de velocidad en ASFA AV, Fase 2 y acciones asociadas en una autorización de movimiento				
	Frecuencias recibidas	Secuencias alternativas	Acciones	Acciones con solicitud de aumento velocidad
1	Vía Libre	L3	$L2$ si $V_{tren} < 160$	$V_{ctrl} = V_{tren}$
2	Vía Libre condicional	L2	$L2 + Rec_{vi}$	Rec en 3 seg ; $V_{ctrl} = 160$
3	Anuncio de precaución	L6		Rec en 3 seg ; $V_{ctrl} = 120$ si $V_{tren} \geq 120$ $V_{ctrl} = V_{tren}$ si $V_{tren} \leq 100$
4	Anuncio de parada	L1		Rec en 3 seg ; $V_{ctrl} = 100$ si $V_{tren} \geq 120$; $V_{ctrl} = V_{tren}$ si $V_{tren} \leq 100$
5	Señales sucesivas en anuncio de parada o anuncio de parada inmediata	(L1) + L1	(L1) + L7 ≠ (L1) + L7+L7+L1	Rec en 3 seg ; $V_{ctrl} = 100$
6	Preanuncio de parada con Número	L5		Rec en 3 seg ; $V_{ctrl} = 80$ si $V_{tren} \geq 120$ $V_{ctrl} = V_{tren} - 60$ si $V_{tren} \leq 100$
7	Parada	L8		Rec en 3 seg ; $V_{ctrl} = 100$ si $V_{tren} \geq 120$ $V_{ctrl} = V_{tren} - 80$ si $V_{tren} \leq 100$
8	Rebase autorizado			Si no rebase: F.E. & $V_{ctrl}=0$ Si Rebase activo: $V_{ctrl}=40$
9	Baliza previa a señal de parada	L7		Solicitado por maquinista
10	Doble Baliza previa a señal de parada	(L7) + L7		$V_{ctrl} = 30$ si $V_{tren} \geq 120$ $V_{ctrl} = 25$ si $V_{tren} \leq 100$ FE si no se recibe L8 en 600 m.
11	Paso a Nivel sin protección	L9		$V_{ctrl} = 15$ FE si no se recibe L8 en 600 m.
				Rec en 3 seg ; $V_{ctrl} = 100$ si $V_{tren} \geq 120$; $V_{ctrl} = V_{tren}$ si $V_{tren} \leq 100$ Fin de ctrl a 1.800 m.

V_{ctrl} = Velocidad de consigna. V_{tren} = Velocidad máxima del tren o tipo de tren. Rec = Pulsar reconocimiento. FE = Aplicar freno emergencia.

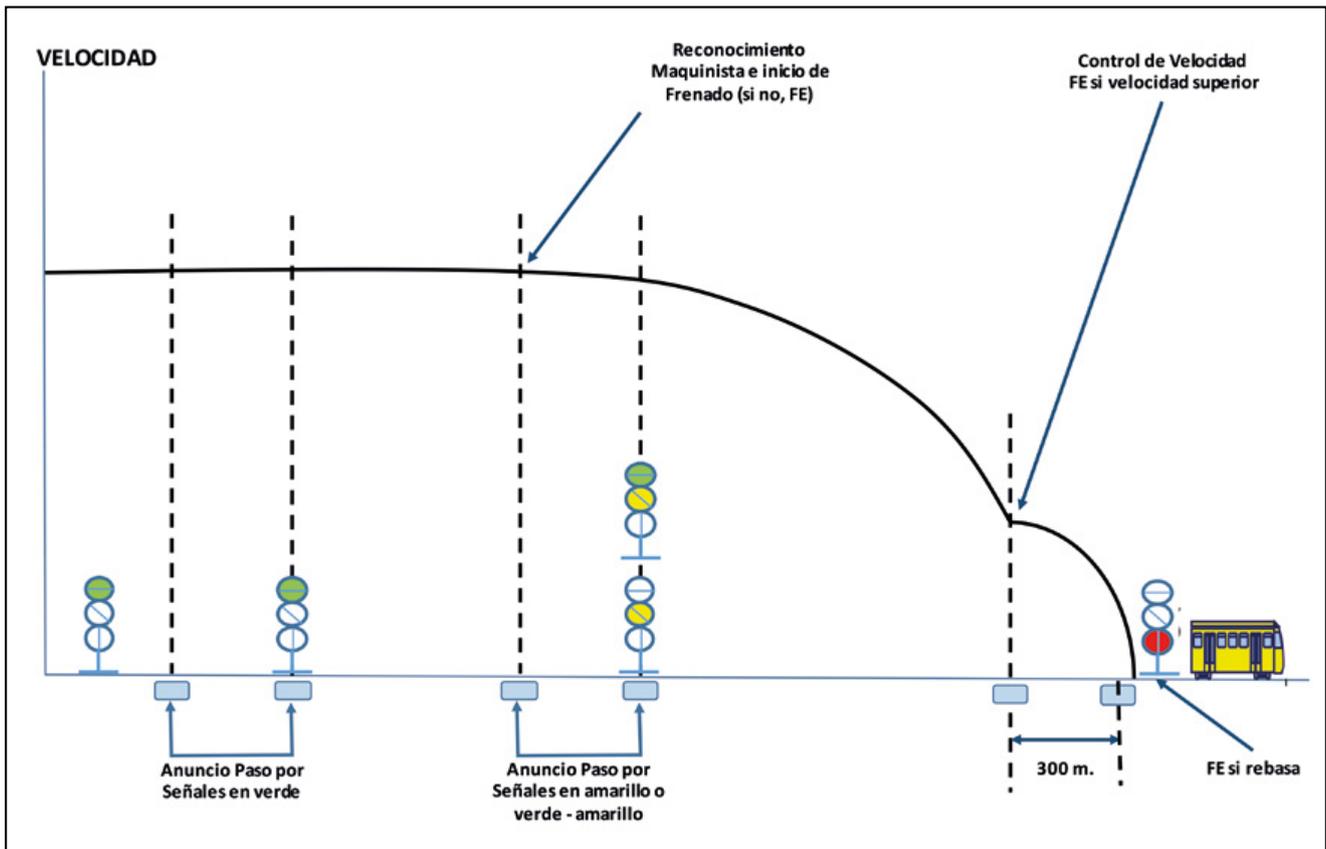


Figura 2. Movimiento ASFA a señal en parada.

2.5. Las curvas (rectas) de frenado en el sistema ASFA

El sistema ASFA Digital incorpora una supervisión continua de las curvas (rectas) de frenado en las proximidades de una señal, aunque la transmisión sea puntual. Es importante señalar que esta supervisión solamente se da en las proximidades de una señal ya que el equipo embarcado no dispone del perfil estático de velocidades de la línea y por tanto no es capaz de llevar a cabo una supervisión continua de la velocidad a lo largo de todo el trayecto recorrido por el tren. Las curvas de frenado se especifican para

cada uno de los controles que incorpora el sistema ASFA, tal como se muestra en la tabla anterior de comandos.

Estas curvas son aproximadas, ya que el ASFA Digital no posee información del gradiente de vía. El sistema aproxima estas curvas mediante rectas de pendiente constante entre la velocidad de partida en origen y la velocidad objetivo en el destino, tal como se muestra en la figura siguiente. La recta de intervención del freno de emergencia (en rojo) se programa 3 Km/h por encima de la velocidad de control, tal como puede verse en la figura 3:

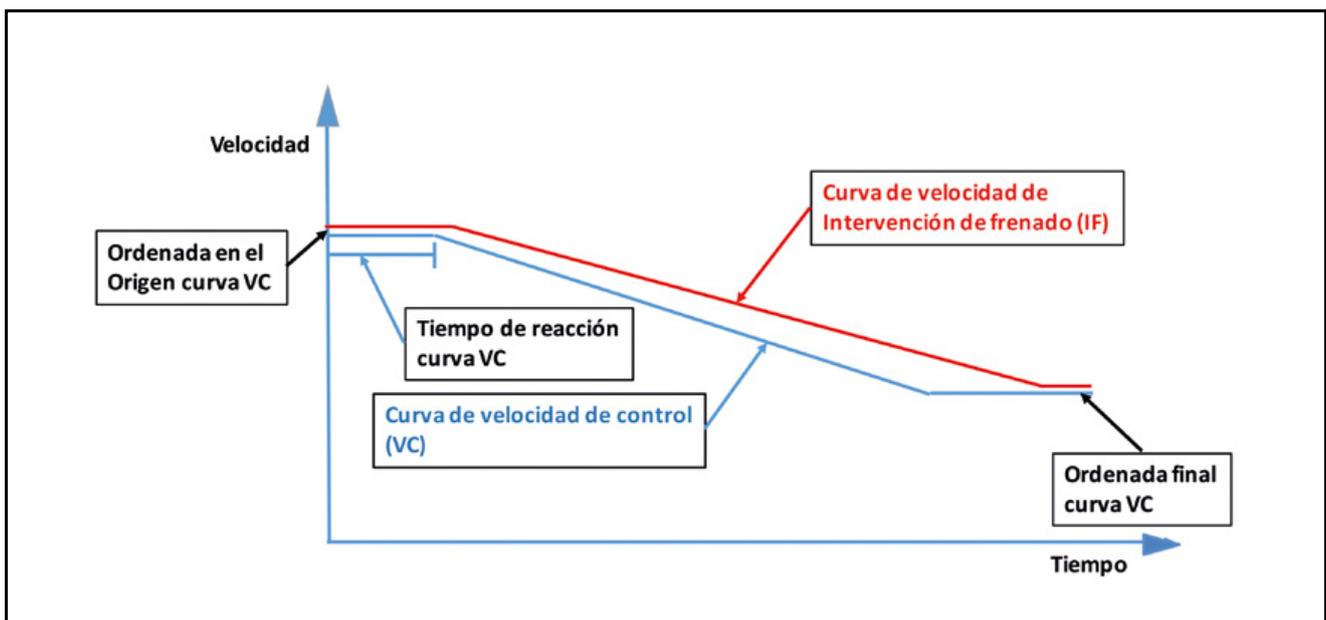


Figura 3. Curvas de frenado e intervención del freno de emergencia en el sistema ASFA.

3. EL SISTEMA ERTMS/ETCS

3.1. Arquitectura y canales de comunicación

El sistema ERTMS (European Rail Traffic Management System) con su subsistema de control y protección ETCS (European Train Control System), es un sistema de protección automática de trenes (ATP) con señalización en cabina y nivel de seguridad SIL 4 (Tasa admisible de fallos: $2 \cdot 10^{-9}$ fallos de seguridad/hora). Es un sistema interoperable, lo que permite proyectos cruzados tren / vía con suministradores diferentes y la consiguiente liberalización y globalización del mercado de señalización ferroviario.

El sistema de control y protección de trenes está compuesto esencialmente por dos subsistemas, uno embarcado y otro de vía que se comunican a través de canales de comunicación interoperables, tal y como se muestra en la figura 4:

El equipo embarcado ETCS es el European Vital Computer (EVC) y los equipos ETCS de vía son esencialmente los grupos de Eurobalizas y LEUs (LEU= Lineside Electronic Unit), asociados a las comunicaciones del Nivel 1 de aplicación del sistema y el Radio Block Center (RBC), asociado al Nivel 2 de aplicación.

Las especificaciones del sistema son un estándar Europeo que se ha ido consolidando gracias al laborioso

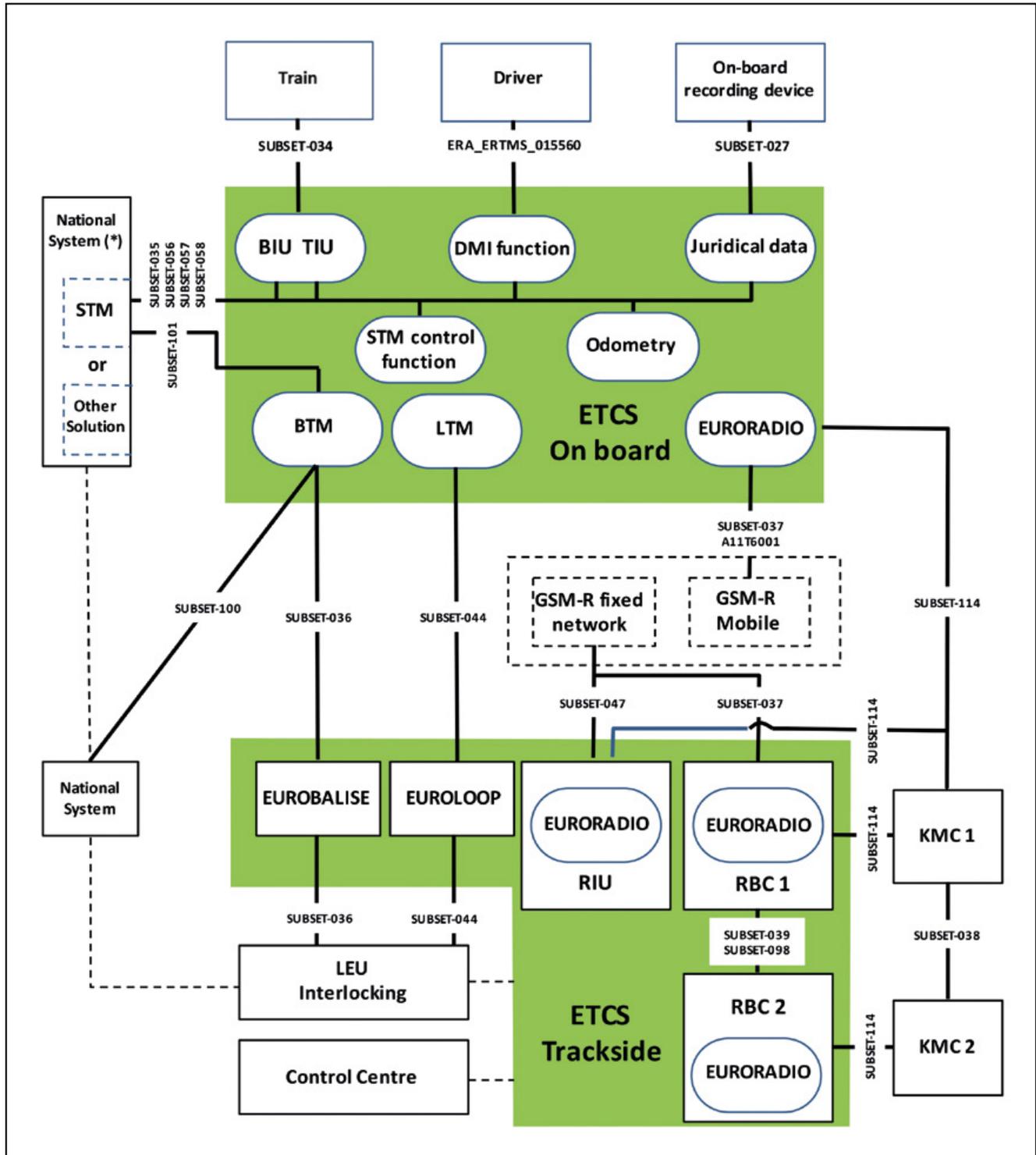


Figura 4. Arquitectura ETCS de referencia con identificación de los documentos de especificación de sus interfaces.

proceso del despliegue ferroviario Español y que en su línea de base 2 se puede considerar consolidado y estable.

La interoperabilidad del sistema se basa en la especificación de sus canales de comunicación entre la vía y el tren, que están especificadas en sus aspectos lógicos y físicos (Especificación FFFIS: Form Fit Functional Specification). Estos canales de comunicación son esencialmente la comunicación puntual por Eurobalizas y la comunicación continua y bidireccional por radio. Existen otros canales de comunicación como el Eurolazo y el STM en los que no entraremos con objeto de centrar la atención en un proceso básico de control de una autorización de movimiento.

Desde el punto de vista físico de las comunicaciones, estos dos canales tienen las características siguientes:

- Eurobaliza:

El sistema de comunicación por Eurobaliza es un sistema puntual que transmite telegramas que generalmente son de 1.023 bits, pudiendo asociarse balizas hasta en grupos de ocho para la transmisión de información compleja de vía.

Es un sistema puntual de comunicación a 4,23 MHz que transmite información digital codificada en frecuencia ('0' = 3,951 MHz; '1' = 4,516 Mhz). Los telegramas son transmitidos cuando la Eurobaliza es activada por la antena del tren, que emite de manera continua una frecuencia de activación de 27 Mhz. El protocolo de transmisión lleva incluida una capa de encriptación de mensajes en la creación de los telegramas que se transmiten. La transmisión se verifica para velocidades de hasta 500 Km/h.

Los grupos de Eurobalizas tienen asignado un número de referencia que permite identificar de manera unívoca su posición geográfica y cada una de las balizas del grupo tiene un número de orden dentro del grupo. Esto permite resetear los errores de odometría cada vez que se lee un grupo, función básica de seguridad. Los grupos de Eurobalizas están

enlazados, lo que significa que el equipo embarcado ETCS conoce los grupos que debe leer en su trayecto. Esto permite añadir una función también básica para la seguridad al poder identificar la posible pérdida de lectura de un grupo de Eurobalizas o de una baliza dentro del grupo con la consiguiente reacción de seguridad asociada (detención del tren).

Este canal de comunicación puntual es el utilizado en el Nivel 1 de aplicación del sistema ETCS. Las especificaciones Europeas de esta canal de comunicación se encuentran en el

– SubSet-036: FFFIS for Eurobalise.

- GSM-R + Euroradio

Las comunicaciones vía radio entre el tren y la vía son bidireccionales. El equipo de vía conoce al tren y viceversa. Están basadas en las especificaciones de telefonía móvil más unos requisitos adicionales recogidos en las especificaciones EIRENE. Este canal de comunicaciones incorpora una capa de seguridad de encriptación de mensajes que se reconoce como Euroradio.

Para este canal de comunicaciones GSM-R del sector ferroviario se han asignado dos bandas de comunicación que son comunes en toda Europa: 921 – 925 MHz para la comunicación tren – tierra y 876 – 880 MHz tierra – tren.

Este canal de comunicación continuo y bidireccional es el utilizado en el Nivel 2 de aplicación del sistema ETCS. Este Nivel 2 utiliza Eurobalizas con mensaje fijos de posición para la puesta a cero de los errores de odometría. Las especificaciones Europeas para este canal de comunicación son:

– UNISIG SUBSET-037: Euroradio FIS

– A11T6001 12 (MORANE): Radio Transmission FFFIS for EuroRadio

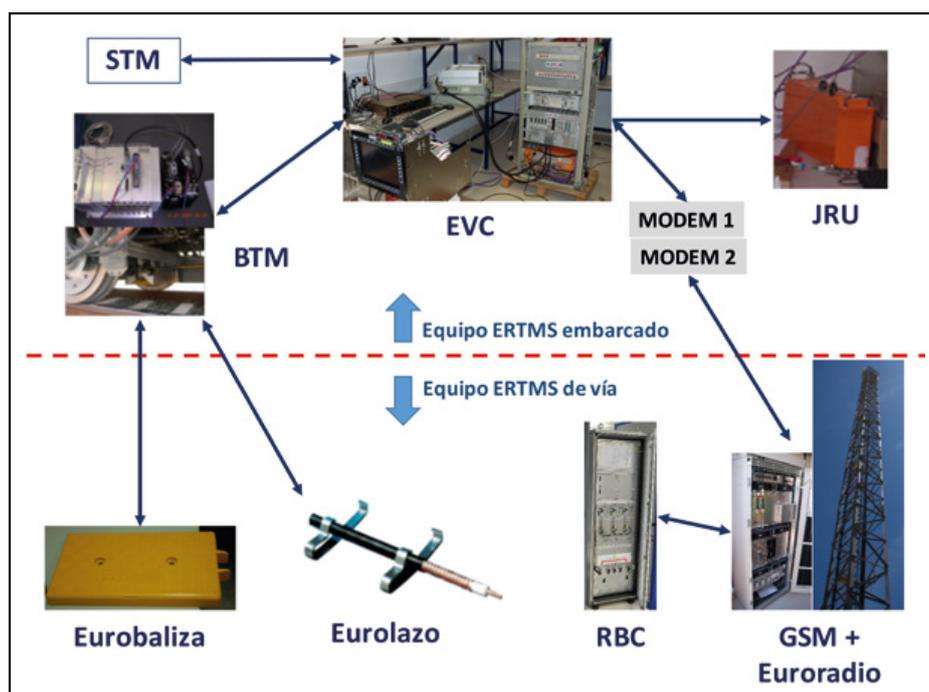


Figura 5. Componentes de vía y embarcados del sistema ETCS.

3.2. El lenguaje ERTMS y la información transmitida al equipo embarcado

El lenguaje ETCS está estructurado en tres niveles: Variables, paquetes y telegramas:

- Las **variables** se utilizan para la especificación de parámetros y magnitudes físicas, como son distancias, velocidades, tiempos, aceleraciones, gradientes, cualificadores, misceláneos, etc.
- Los **telegramas** se utilizan para construir comandos y transmitir información. Comandos como una autorización de movimiento, una limitación de velocidad, etc. Información como el perfil de gradientes de una línea, el perfil estático de velocidades de una línea, condiciones de vía como pueden ser zonas neutras, túneles, puentes, etc que pueden requerir un comportamiento específico del equipo embarcado.
- Los **mensajes** son agrupaciones de telegramas que se empaquetan en una baliza o grupo de Eurobalizas para transmitir la información completa necesaria para la protección del movimiento del tren.

La especificación Europea del lenguaje ETCS se encuentra recogida en los capítulos 7 y 8 de las especificaciones técnicas del sistema ERTMS/ETCS:

- SubSet-026: System Requirements Specification.

Con objeto de introducir las prestaciones del sistema ETCS cuando actúa en el modo de supervisión completa, analizaremos la información intercambiada entre la vía y el tren en un recorrido con una Autorización de Movimiento.

El sistema ofrece 15 modos técnicos de funcionamiento. Los dos modos básicos para un funcionamiento normal son los siguientes:

- FS: Full Supervision: Modo de supervisión completa en el que el equipo embarcado dispone de toda la información necesaria para proteger de manera segura al tren. es el modo de funcionamiento nominal del ETCS.
- SR: Staff Responsible: Modo de supervisión bajo responsabilidad del maquinista. En este modo el equipo embarcado no dispone de toda la información necesaria para proteger de manera segura al tren y el maquinista asume la responsabilidad de la conducción del tren. Es el modo de funcionamiento degradado del ETCS.

Analizamos seguidamente el proceso de un movimiento con una autorización de movimiento en modo FS identificando la información que necesita el equipo embarcado para proteger de manera segura el movimiento del tren. Para ello analizaremos en primer lugar los paquetes 12 y 15 del lenguaje ERTMS, que se muestran en la tabla 4, que se utilizan para transmitir autorizaciones de movimiento desde la vía al equipo embarcado:

La Tabla 4 muestra la estructura de un paquete 12 correspondiente a una Autorización de Movimiento (MA) en Nivel 1.

Vemos en esta estructura que la MA especifica lo siguiente:

- Velocidad de la línea
- Velocidad al fin de la MA
- Temporizador para el fin de la MA
- N° de secciones; Para cada sección:
 - Longitud de la sección
 - Cualificador de temporización
 - Temporizador si cualificador a uno
 - Punto de parada si expira el temporizador
- Parámetros de la sección final
- Cualificador de información punto de peligro (DP) protegido
- Distancia desde el fin de la MA al DP
- Velocidad de liberación para sobrepasar el LOA (Límite de la Autorización de Movimiento)
- Información de solapamiento: Tiempo, distancia y velocidad.

Tabla 4. Paquete 12 del lenguaje ERTMS: Autorización de movimiento en Nivel 1

Packet 12: Transmission of a movement authority for level 1.	
Variable	Comment
NID_PACKET	
Q_DIR	
L_PACKET	
Q_SCALE	
V_MAIN	
V_LOA	
T_LOA	Can be set to "no time out"
N_ITER	Set to zero if V_MAIN = 0 or if only one section in the MA
L_SECTION(k)	Para cada sección k:
Q_SECTIONTIMER(k)	Cualificador de temporización.
T_SECTIONTIMER(k)	Si sección temporizada:
D_SECTIONTIMERSTOPLOC(k)	– Temporizador + – Punto de parada si expira T
L_ENDSECTION	
Q_SECTIONTIMER	Parámetros para la sección final.
T_SECTIONTIMER	
D_SECTIONTIMERSTOPLOC	
Q_ENDTIMER	
T_ENDTIMER	
D_ENDTIMERSTARTLOC	
Q_DANGERPOINT	
D_DP	
V_RELEASEDP	
Q_OVERLAP	
D_STARTOL	
T_OL	
D_OL	
V_RELEASEOL	

La estructura de este paquete permite compatibilizar la Autorización de Movimiento con las funciones del enclavamiento gracias a los temporizadores de cada sección. De esta manera si, por ejemplo, una ruta incluye un segmento que corresponde a una estación con parada, puede disolverse la ruta si por cualquier problema la parada del

tren en la estación tiene una duración superior a lo permisible. Esto estará en consonancia con los diferímetros del enclavamiento que desenclavaran la ruta si se superan las temporizaciones

La figura 6 muestra un ejemplo de autorización de movimiento (MA) con tres secciones, la segunda de las cuales comprende una parada en estación con temporizador para el caso de que el tiempo de parada exceda el máximo asignado en el programa de explotación y haya que disolver la ruta asignada. Se muestra también la distancia al punto de peligro a proteger (Vgr. un desvío). La señal de protección del punto de peligro tendrá una velocidad de liberación asociada.

Para que el movimiento del tren correspondiente a esta MA se realice de manera segura en modo FS, el equipo embarcado debe disponer de información adicional sobre la vía. Esta información consiste en los perfiles estáticos de velocidad de la línea, perfiles de gradiente de la línea e información de enlace de los grupos de Eurobalizas.

Los paquetes de perfiles de velocidad (tabla 5) tienen una estructura por segmentos en la que se especifica:

Tabla 5. Paquete 27: Perfil estático internacional de velocidad

Variable	Comment
NID_PACKET	
Q_DIR	
L_PACKET	
Q_SCALE	
D_STATIC	
V_STATIC	
Q_FRONT	
N_ITER	
NC_DIFF(n)	
V_DIFF(n)	
N_ITER	
D_STATIC(k)	
V_STATIC(k)	
Q_FRONT(k)	
N_ITER(k)	
NC_DIFF(k,m)	
V_DIFF(k,m)	

- Dirección para la que es válida la información.
- Escala de longitudes (cm, dm, m, etc.)
- Distancia al primer segmento
- Velocidad estática asignada a ese segmento
- Cualificador: Se respeta con el frente o con la cola
 - Nº de categorías de trenes. Para cada categoría:
 - Categoría tipo de tren
 - Velocidad diferencial para ese tren
- Nº de segmentos adicionales. Para cada segmento:
 - Distancia al segmento del perfil
 - Velocidad estática asignada a ese segmento
 - Cualificador: Se respeta con el frente o con la cola del tren
 - Nº de categorías de trenes. Para cada categoría:
 - Categoría tipo de tren
 - Velocidad diferencial para ese tren

Los paquetes de perfiles de gradiente (tabla 6) tienen asimismo una estructura por segmentos en la que se especifica:

Tabla 6. Paquete 21: Perfil de gradientes

Paquete 21: Transmission of the gradient. D_GRADIENT gives the distance to the next change of the gradient value. The gradient value is the minimum gradient for the given distance.

Variable	Comment
NID_PACKET	
Q_DIR	
L_PACKET	
Q_SCALE	
D_GRADIENT	
Q_GDIR	0 = downhill 1 = uphill
G_A	
N_ITER	
D_GRADIENT(k)	
Q_GDIR(k)	0 = downhill 1 = uphill
G_A(k)	

- Dirección para la que es válida la información.
- Escala de longitudes (cm, dm, m, etc.)
- Longitud del primer segmento
- Cualificador de pendiente: Positiva o negativa
- Aceleración equivalente

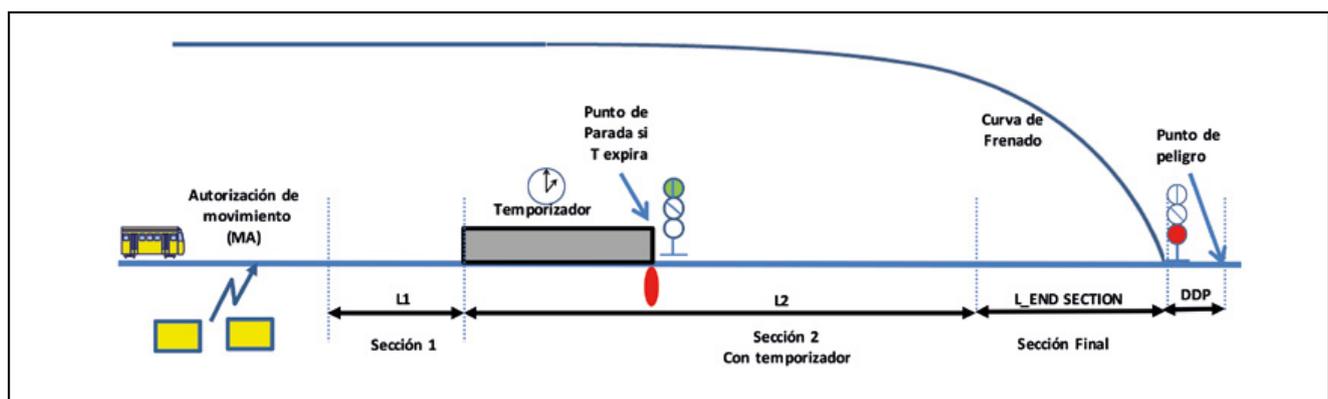


Figura 6. Ejemplo de Autorización de Movimiento (MA) con tres secciones y temporizador en la segunda sección.

- N° de segmentos adicionales. Para cada segmento:
 - Longitud del segmento
 - Cualificador de pendiente: Positiva o negativa
 - Aceleración equivalente

El paquete 27 permite pues especificar los perfiles estáticos de velocidad de una línea por segmentos y diferenciarlos para cada tipo de tren. Los perfiles de gradiente especificados por el paquete 21 para una línea, son definidos también por segmentos, lo que supone la identificación de las aceleraciones adicionales por pendientes a tener en cuenta en los procesos de frenado.

Desde el punto de vista de la seguridad un paquete fundamental es el de información de enlace, paquete 5 (tabla 7). Este paquete facilita información al equipo embarcado acerca de los grupos de balizas que debe encontrar en su recorrido. En caso de pérdida de lectura de un grupo de balizas o de una baliza dentro de un grupo, el equipo embarcado aplicará la reacción de seguridad especificada en el paquete para el grupo perdido. Esta reacción, llamada de enlace, puede programarse desde el desencadenamiento de la parada del tren a una ausencia de actuación, dependiendo del impacto de la información contenida en el grupo de Eurobalizas.

Los paquetes de información de enlace de grupos de Eurobalizas tienen la siguiente estructura:

Tabla 7. Paquete 5: Información de enlace

Paquete 5: Linking Information.	
Variable	Comment
NID_PACKET	
Q_DIR	
L_PACKET	
Q_SCALE	
D_LINK	
Q_NEWCOUNTRY	
NID_C	if Q_NEWCOUNTRY = 1
NID_BG	
Q_LINKORIENTATION	
Q_LINKREACTION	
Q_LOCACC	
N_ITER	
D_LINK (k)	
Q_NEWCOUNTRY(k)	
NID_C (k)	if Q_NEWCOUNTRY = 1
NID_BG (k)	
Q_LINKORIENTATION (k)	
Q_LINKREACTION (k)	
Q_LOCACC (k)	

- Dirección para la que es válida la información.
- Escala de longitudes (cm, dm, m, etc.)
- Distancia de enlace primer grupo
- Cualificador nueva línea o país
- Identificación nueva línea o país
- Identificación grupo de Eurobalizas enlazado
- Cualificador de reacción si se pierde la lectura del grupo

- Cualificador de la precisión de localización
- Número de grupos de Eurobalizas enlazados. Para cada grupo:
 - Distancia de enlace
 - Cualificador nueva línea o país
 - Identificación nueva línea o país
 - Identificación grupo de Eurobalizas enlazado
 - Cualificador de reacción si se pierde la lectura del grupo
 - Cualificador de la precisión de localización

3.3. Las curvas de frenado del sistema ERTMS / ETCS

El sistema ETCS embarcado, cuando dispone de la información necesaria para una supervisión completa (Autorización de movimiento más perfiles de velocidad más perfiles de gradiente más información de enlace) puede realizar un cálculo dinámico de la velocidad permitida que garantiza el movimiento seguro del tren para respetar los perfiles de velocidad y autorizaciones de movimiento.

La armonización de las curvas de frenado tiene un impacto importante en el diseño de la infraestructura y sobre la interoperabilidad. Sobre la infraestructura porque afecta a la distancia a la que se emiten informaciones avanzadas y condiciones de vía, por ejemplo. Sobre la interoperabilidad porque los procesos de frenado de un tren son básicos para su entrada en servicio en líneas de otros países.

Es por este motivo que la Línea de Base 3 de la especificación técnica (SRS 3.4.0 y SRS 3.6.0.), incluye como nueva funcionalidad la armonización de las curvas de frenado y la ERA ha elaborado un modelo teórico para su evaluación. En este cálculo el equipo embarcado tiene en cuenta las aceleraciones adicionales debidas a los gradientes de la línea y toda información adicional referente a los perfiles de velocidad de la línea, limitaciones de velocidad, etc.

En la figura 7 se muestra una familia armonizada de curvas de frenado tal como se especifica en la Línea de Base 3 para una categoría de tren.

En estos gráficos se muestran las curvas de prevención (verde claro), de intervención del freno de servicio (en verde oscuro) y del freno de emergencia (en azul oscuro), situadas a distancias especificadas de la curva de velocidad permitida.

3.4. El interfaz Conductor-Máquina (DMI)

Hasta el momento, se han presentado los aspectos técnicos de la interoperabilidad, pero los aspectos ergonómicos de la conducción constituyen un 50% de la misma. Es por ello que en el proceso de consolidación del sistema ERTMS/ETCS se haya prestado una atención especial a la pantalla de conducción. Los esfuerzos dedicados por todas las instituciones Europeas involucradas a esta especificación a lo largo de 20 años, ha permitido un diseño compacto que proporciona una información completa y clara, tal como se muestra en la figura 8.

Esta figura muestra el aspecto del interfaz Conductor – Máquina en un viaje real en el que pueden apreciarse informaciones sobre los aspectos siguientes:

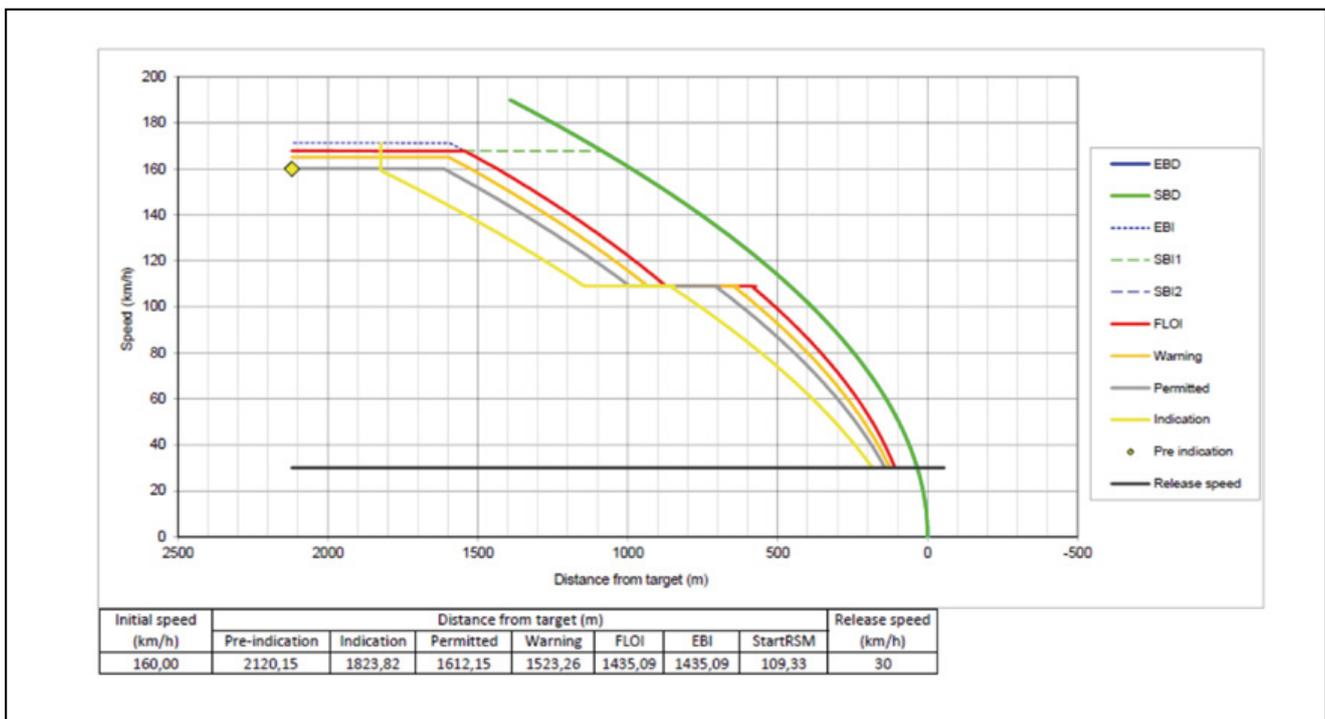


Figura 7. Estudio comparativo del cálculo dinámico de la velocidad permitida en un proceso de frenado del sistema ERTMS.

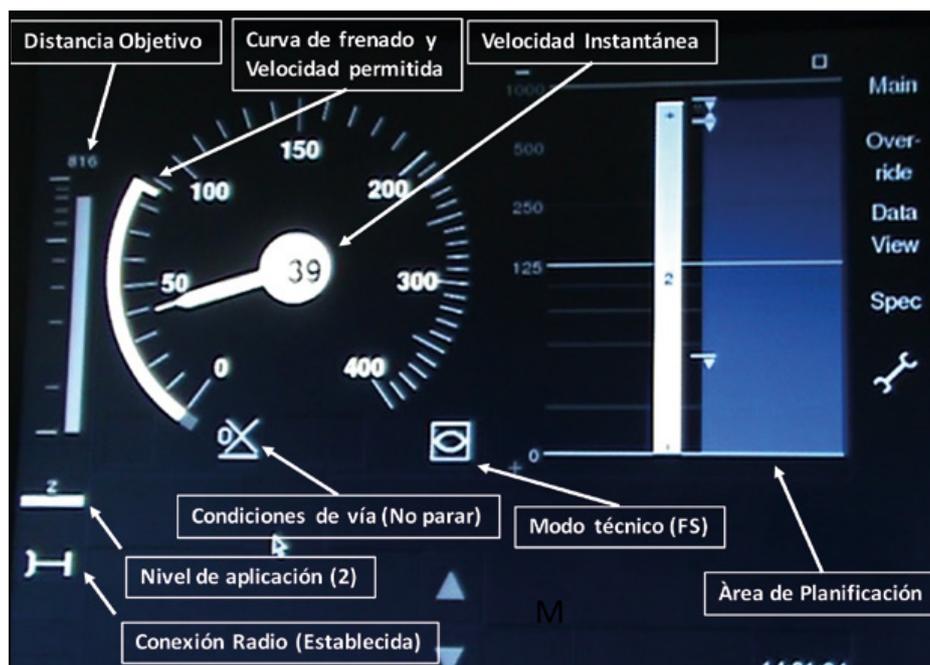


Figura 8. Aspectos ergonómicos del Interfaz Conductor – Máquina (DMI).

- Curva dinámica de frenado (Velocidad Permitida)
- Velocidad instantánea
- Modo técnico de conducción
- Nivel ERTMS de aplicación
- Conexión Radio
- Condiciones de vía
- Distancia objetivo
- Área de planificación

4. ASFA VS. ERTMS

Los sistemas ASFA y ERTMS se despliegan de manera superpuesta sobre la red Española de alta velocidad donde el primero actúa como respaldo del segundo. En la red

convencional ferroviaria la protección recae de manera exclusiva en el sistema ASFA.

Si bien el sistema ASFA ha incorporado mejoras en su actualización a la versión reconocida como “digital”, conviene conocer de manera precisa el alcance de estas mejoras y compararlas con las prestaciones del sistema ERTMS para comprender el alcance de cada uno de los sistemas a la vista de sus acciones de protección. Para ello facilitamos la siguiente tabla comparativa (tabla 8) de las prestaciones de cada sistema, en la que además de la comparación funcional se presenta una comparación económica entre un sistema ERTMS N1 de bajo coste descentralizado en el que la información ERTMS se toma de la propia señal luminosa, y un sistema ASFA Digital:

Tabla 8. Análisis comparativo en coste y prestaciones de un ERTMS N1 descentralizado y el ASFA Digital

Concepto	Sistema de protección	
Característica	ERTMS Descentralizado	ASFA Digital
Datos del tren	Completos: Peso, freno, longitud, etc	Limitado a categorías por velocidades
Perfil de velocidades	Supervisión continua del perfil dinámico	Rectas de frenado entre señales sin datos de vía ni de tren
Perfil de gradientes	SI	NO
Supervisión continua de la velocidad máxima permitida en todo el trayecto	SI	NO. Únicamente en los lugares en que se instalen balizas y con valores fijos
Curvas de frenado	Cálculo dinámico de curvas en función de perfiles de velocidad y gradiente	Rectas de frenado entre señales sin datos de vía ni de tren (aproximadas).
Enlace de balizas	SI	NO
Nivel SIL	4 para el sistema completo de protección automática	Depende del factor humano, complejo en algunas situaciones
Ergonomía	Armonizada y optimizada a escala Europea	Muy limitada y a veces confusa
Impacto implantación en equipo embarcado	No tiene impacto en trenes equipados con ERTMS	Requiere la modificación de los equipos embarcados (SW y quizás HW para leer las dos frecuencias adicionales si se implantan)
Interoperabilidad	SI	NO, la funcionalidad depende además de la línea
Gestión LTVs	Por Baliza fija duplicada instalada en vía (no enlazada) o en baliza conmutable en señal por LEU conectado a sistema de gestión. LTVs programables en longitud y velocidad Si son LTVs de larga duración posibilidad de incluirlo en el SSP (CVM) enviado por las balizas de señal.	Una única velocidad que puede ser aumentada por el conductor a una segunda. Longitud fija de 1.800m
Coincidencias de vía	SI. Túneles, Zonas neutras, Non Stopping areas	NO, Ninguna
Mensajes de Texto	SI. Se envían en la señal los correspondientes a la MA	No. Ninguno
Coste equipamiento vía	SUIZA: Sistema "Limited Supervision" 10.900 €/señal. 120 M€ por 3.000 kms. Contrato adjudicado a Siemens. ESPAÑA: (Preciario de Adif y estudio de una compañía de señalización). 9.927€/señal. Dos balizas (fija+conmutable) a pie de señal +baliza infill+miniLEU en caja adaptable al mástil de la señal. Toma de información de lámparas de señal y primer desvío. (no incluye costes de ingeniería de aprox. 20% según esa compañía de señalización).	Precio ASFA Digital: 7.000-10.000 €/señal. (Preciario de Adif). Precio máximo con el módulo antiinterferencias. No incluye costes de ingeniería (?).
Coste equipo a bordo	180-200 k€	40-70 k€
COMPARATIVA	Costes en infraestructura en un rango comparable. Ligeramente superior el ERTMS descentralizado (alrededor de un 20% superior) pero: A) Un nivel de seguridad muy superior por dos aspectos principales: A1) Supervisión continua de la velocidad en todo el trayecto y A2) Enlace de balizas que prevé de forma segura la rotura o robo de una baliza. B) Un nivel de prestaciones muy superior: B1) Sistema interoperable. B2) Alta ergonomía del DMI de conducción. B3) Curvas de frenado precisas con conocimiento exacto del gradiente de vía y B4) Condiciones de vía que proporcionan confort y fiabilidad del sistema ante zonas neutras o túneles.	

5. CONCLUSIONES

Las prestaciones que ofrece el sistema ASFA Digital son ampliamente cubiertas por el sistema ERTMS añadiendo una funcionalidad extremadamente completa y un nivel de seguridad SIL 4. El ASFA Digital presenta dos inconvenientes fundamentales:

- El ASFA digital no se trata estrictamente hablando de un sistema de seguridad, sino de un sistema de ayuda a la conducción, ya que no es un sistema basado en el principio de Fail Safe (por ejemplo la pérdida por robo, rotura o fallo de una baliza no es detectado por el sistema). Por ello no es apropiado asignarle al ASFA Digital un nivel SIL de acuerdo a la Norma 50126 de CENELEC.
- La supervisión del ASFA Digital no es continua, sino solamente puntual en la cercanía de la señal, con unas curvas (rectas) de velocidad de funcionalidad muy limitada. Esto es así porque el ASFA Digital, al tratarse

de un sistema de transmisión analógica entre la vía y el tren, tiene una capacidad muy limitada de transmisión de datos y por tanto limita enormemente la capacidad de supervisión del equipo embarcado

La fiabilidad contrastada una vez consolidado el sistema ERTMS, hace que sea de dudosa utilidad la implantación de un sistema de respaldo no interoperable. Países como Italia implantan el Nivel 2 ERTMS sin respaldo, con excelentes resultados de explotación.

Si bien los costes de implantación del ERTMS hasta la fecha han sido muy superiores a los costes del ASFA, la tabla 8 muestra que el despliegue de un ERTMS de bajo coste descentralizado puede tener un coste cercano al del ASFA Digital con un nivel de prestaciones y sobre todo de seguridad muy superior. Si bien los costes de infraestructura por señal son muy similares por punto señalizado para líneas de débil tráfico, la implantación del Nivel 3 de aplicación ERTMS abaratará todavía más los costes de la infraestructura de señalización. Es urgente abordar estudios y líneas

piloto enfocados hacia el uso del sistema ERTMS descentralizado, el nuevo modo técnico de Supervisión Limitada (LS) de la línea de base 3, o la implantación del Nivel 3 de aplicación ERTMS. Países como Luxemburgo o Hungría han implantado un sistema ERTMS descentralizado conectado a las señales, que manteniendo las prestaciones del sistema subyacente, incorpora la seguridad de un sistema SIL 4 y la interoperabilidad a muy bajo coste.

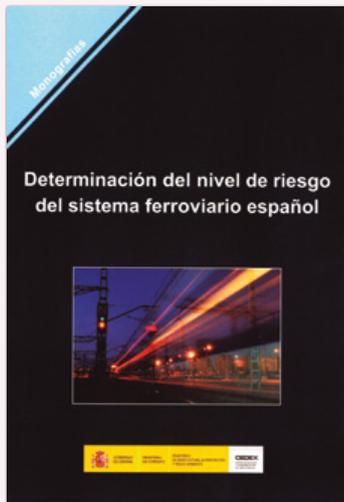
Además es importante señalar que el despliegue masivo del ERTMS en Europa y en el resto del mundo abaratará los costes por una simple razón de economía de escala. Este hecho permitirá a los gestores de infraestructura y a los operadores ferroviarios utilizar las herramientas de reducción de coste que les proporciona un sistema interoperable que puede ser suministrado por múltiples fabricantes y que por tanto libera las cadenas de los mercados cautivos ferroviarios que existían con los antiguos sistemas nacionales.

Considerando la red ferroviaria convencional, un equipamiento con sistema ERTMS de bajo costo tendría dos ventajas evidentes

- Los equipos embarcados se reducirían a un solo equipo que sería capaz de operar sobre todas las líneas desde alta velocidad, hasta regionales de débil tráfico o urbanas.
- Toda la red sería interoperable y se cumplirían los requisitos de la Comisión Europea que solicita a los países-miembro de la Unión que definan su estrategia de migración a largo plazo hacia un sistema único. A la larga no puede exigir cada país la instalación de un sistema adicional para el tráfico internacional.

6. REFERENCIAS

- Reglamento General de Circulación. Edición 2006.
Especificaciones Técnicas y Funcionales del Sistema Embarcado ASFA Digital. v. 2
SubSet-026: System Requirements Specification. V. 2.3.0
D. v. 2.3



Determinación del nivel de riesgo del sistema ferroviario español.

Autores: Francisco Toledo Castillo, María Josefa Sospedra Baeza, Mari Carmen LLoret Catalá y Miguel Figueres Esteban

Serie Monografías: M-113

ISBN: 978-84-7790-536-3

Año: 2012

P.V.P.: 20 €

El presente manual es resultado del proyecto de investigación (PT-2007-035-8IAPM) "Determinación del nivel de riesgo aceptado en el funcionamiento del ferrocarril en España para los diferentes subsistemas existentes" (DETRA) subvencionado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex) dentro del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004- 2007, con el objetivo de proporcionar a la autoridad ferroviaria española información del nivel de riesgo en el ferrocarril español en base al estudio y análisis del histórico de los accidentes e incidentes ocurridos en los últimos años, siendo un referente en la gestión de riesgos desde el enfoque sistémico, tanto a nivel nacional como internacional. El manual se ha estructurado en cuatro grandes bloques. El primer bloque (capítulo 1) ofrece al lector una visión del marco normativo nacional y europeo en la gestión de la seguridad ferroviaria y describe el alcance del proyecto DETRA dentro de este marco. El segundo bloque (capítulo 2) expone la metodología más adecuada para la obtención del nivel de riesgo de un sistema ferroviario, ilustrándola con la experiencia obtenida de la aplicación de dicha metodología a través del proyecto DETRA en el ferrocarril español. En el tercer bloque (capítulo 3) se exponen los resultados de la aplicación de la metodología DETRA al sistema ferroviario español para el período temporal 2000-2008, obteniendo fundamentalmente el nivel de riesgo del sistema ferroviario español mediante los Indicadores de Valor de Referencia (IVR). Finalmente, el último bloque (capítulos 4 y 5) recoge las conclusiones y recomendaciones obtenidas en relación a: i) las tasas de nivel de riesgo; ii) el sistema ferroviario de fallos; iii) los principales colectivos de riesgo; iv) la asignación de los niveles de riesgo a los actores ferroviarios y las personas ajenas al ferrocarril y, v) indicadores de la Directiva de Seguridad Ferroviaria 2004/49/CE.