



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

Trabajo de Fin de Máster

“Análisis de retrasos y repercusión de averías del sistema
ERTMS nivel 2 en una línea”

Autor: Pedro Martínez-Osorio

Director: Javier Molejón Asenjo

Madrid, julio de 2017



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

ÍNDICE DE LA MEMORIA



Índice de la memoria

Capítulo 1	Introducción	5
1.1	Estado del Arte	5
1.2	Motivación del proyecto.....	9
1.3	Objetivos y tareas	9
1.4	Recursos	10
1.5	Planificación.....	10
Capítulo 2	Análisis de averías en una línea con ERTMS N2 implantado	11
2.1	Averías equipo embarcado ERTMS	11
2.2	Averías equipo de vía ERTMS	12
2.3	Incidencias por tipo de avería.....	12
Capítulo 3	Requisitos de operatividad	14
3.1	Índice de desempeño o Performance Score (PS).....	14
3.2	Cálculo de Bonus / Penalizaciones.....	15
3.3	Índice Operacional (OPI-Puntualidad).....	16
3.4	Índice de Terminación o Termination Score (TeS).....	17
Capítulo 4	Estudio de retrasos originados por averías en el sistema ERTMS N2	19
4.1	Retrasos por entrada en TRIP sin recuperar FULL SUPERVISION	21
4.2	Retrasos por entrada en TRIP recuperando FULL SUPERVISION en la siguiente pantalla virtual	29
4.3	Retrasos por pérdida momentánea de comunicación con el RBC, sin detener el tren	33
4.4	Retrasos por fallo en el RBC	35
Capítulo 5	Estimación de Penalizaciones	41
Capítulo 6	Conclusiones y Futuros Desarrollos	45
Capítulo 7	Bibliografía	49
Apéndice I: Targets	51	



Índice de figuras

Figura 1: Funcionalidad ERTMS N2 [2].....	7
Figura 2: DMI en FS. Supervisión de Velocidad [3].....	8
Figura 3: Componentes del Índice de Desempeño [5].....	14
Figura 4: Cálculo de Bonus y Penalización en función del PS	16
Figura 5: Requerimiento de intervalo entre trenes.....	20
Figura 6: Valores de aceleración, freno servicio y freno de emergencia	22
Figura 7: Curvas velocidad/distancia para freno de servicio y emergencia	22
Figura 8: gráfico distancia/tiempo en el frenado	23
Figura 9: Esquema persecución de trenes.....	23
Figura 10: Detalle del tren averiado, que acusa TRIP y no recupera FS.....	24
Figura 11: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=40\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y no recupera FS.	25
Figura 12: Circulación perturbada con trenes cada 6', $v_{SR}=40\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y no recupera FS.	25
Figura 13: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=100\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y no recupera FS.	26
Figura 14: Detalle del tren averiado, que acusa TRIP y recupera FS.....	30
Figura 15: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=40\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y recupera FS.	31
Figura 16: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=200\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y recupera FS.	31
Figura 17: Detalle del tren averiado, que pierde comunicación con el RBC momentáneamente.....	33
Figura 18: Circulación perturbada con trenes cada 4', cuando un tren pierde comunicación con el RBC.....	34
Figura 19: Esquema del ámbito del RBC en una vía.....	36
Figura 20: Colas de trenes frente al ámbito del RBC averiado. Avería indefinida.	37
Figura 21: circulación perturbada con avería del RBC de 20' de duración. $V_{SR}=40\text{km/h}$	37
Figura 22: circulación perturbada con avería del RBC de 20' de duración. $V_{SR}=200\text{km/h}$	38
Figura 23: circulación perturbada con avería del RBC de 20' de duración. $V_{SR}=100\text{km/h}$	38
Figura 24: Requisitos de márgenes en la operación.....	46
Figura 25: Estimaciones de tráfico de la línea.....	47
Figura 26: Train Stopping Pattern.....	47



Índice de tablas

Tabla 1: Desglose de incidencias por tipo de avería [4]	12
Tabla 2: Puntualidad mínima, objetivo y máxima por años.....	17
Tabla 3: Retrasos originados por entrada en TRIP sin recuperar FS, para tres valores de V_SR.....	26
Tabla 4: Retrasos originados por entrada en TRIP recuperando FS, para tres valores de V_SR.....	32
Tabla 5: Retrasos originados por pérdida de comunicación con RBC.....	34
Tabla 6: Retrasos originados por fallo del RBC de 20', para 3 v_SR distintas.....	39
Tabla 7: Desglose de incidencias por tipo de avería extrapolado a la línea en estudio	41
Tabla 8: Resumen de retrasos originados por cada tipo de avería y v_SR.....	42
Tabla 9: Cálculo del índice de puntualidad global, para 3 valores de v_SR	42
Tabla 10: Resumen de retrasos originados por cada tipo de avería y v_SR, considerando márgenes de recuperación.	46
Tabla 11: Cálculo del índice de puntualidad global, para 3 valores de v_SR, considerando márgenes de recuperación	46



Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

La sociedad de hoy en día es cada vez más exigente respecto a los medios de transporte. No requiere únicamente que estos transporten cómoda y rápidamente a los pasajeros hasta su destino, sino que lo hagan de manera fiable y puntual.

Estas crecientes exigencias requieren sistemas eficientes que minimicen los efectos de posibles averías. Un retraso o cancelación puede implicar no llegar a una reunión – en caso de viajes de negocios, o perturbaciones en los planes y largas esperas – en caso de viajes de placer.

La popularidad que ha ganado el transporte ferroviario de alta velocidad frente a medios como el avión no se debe únicamente a factores como comodidad o rapidez, sino a las garantías de puntualidad que éste ofrece. Operadores como Renfe ofrecen devoluciones a los usuarios en caso de retrasos mínimos, para captar aquellos clientes que valoran estas garantías. Sistemas cada vez más avanzados de protección automática del tren y de control y gestión del tráfico permiten estas mejoras.

1.1 ESTADO DEL ARTE

ERTMS (European Rail Traffic Management System) es un importante proyecto industrial con el apoyo de la Unión Europea en su desarrollo e implantación en las líneas de ferrocarril transeuropeas. Su objetivo es crear un sistema común de gestión y señalización de las líneas ferroviarias en Europa para así mejorar la competitividad del ferrocarril como modo de transporte.

Este estándar permite mejorar decisivamente la interoperabilidad del material rodante definiendo un estándar técnico de señalización y seguridad que permita superar las

diferencias entre los distintos países de Europa. También permite teóricamente la intercambiabilidad de equipos de distintos fabricantes.

El sistema ERTMS ha permitido igualmente un aumento en la capacidad de las líneas (reduciendo el intervalo entre trenes), mejorar los niveles de seguridad y disminuir los costes al sustituir los sistemas ATP tradicionales, propiedad de cada fabricante, por sistemas abiertos y competitivos [1]. Estas ventajas han hecho que el proyecto ERTMS haya traspasado las fronteras de la Unión a otros países.

El presente trabajo trata una línea equipada con el nivel 2 del ERTMS. Sin embargo, para una mejor comprensión a continuación se resumen las funcionalidades de los principales modos [2]:

- i. Nivel 1: la información se transmite de manera unidireccional desde la vía al tren a través de balizas colocadas sobre la vía. Estas balizas enviarán telegramas variables al tren (por ejemplo, autoridades de movimiento), al recibir información de enclavamiento a través de un *LEU (lineside electronic unit)*.

La información, recibida de manera puntual, será supervisada por el ETCS de forma continua, específicamente las curvas de velocidad. Los sistemas de vía necesitan sistemas de detección del tren para conocer su posición, pues no existe comunicación bidireccional.

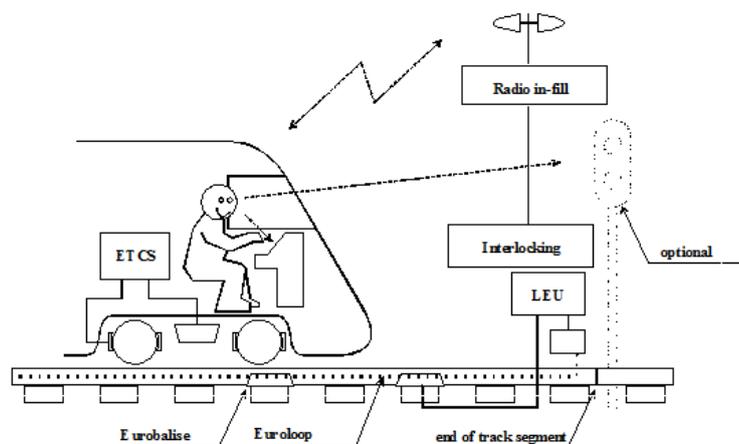


Figura 1: Funcionalidad ERTMS N1 con Infill [2]

En este nivel de aplicación, la señalización lateral es obligatoria. Se fijará una velocidad de liberación para que el maquinista pueda acercarse a la baliza de pie de señal y así recibir el *MA*, cuando la señal esté en aspecto permisivo. Alternativamente, se podrá implementar un *infill* semicontinuo a través de Eurolazo y Euroradio.

- ii. Nivel 2: se basa en un intercambio bidireccional y continuo de información entre vía y tren a través de radio GSM-R. La comunicación se realiza entre el RBC (vía) y el EVC (tren). Las autoridades de movimiento son generadas por los sistemas de vía y transmitidas al tren vía Euroradio. El ERTMS N2 proporciona una supervisión continua de la velocidad, impidiendo igualmente sobrepasar el *EoA*.

Permite prescindir de la señalización lateral (*cab signalling*), pero la detección de tren (circuitos de vía o contadores de ejes) sigue siendo necesaria pues no hay sistemas que garanticen la integridad de éste. El nivel 2 permite acercar el *end of authority (EoA)* del tren perseguidor al último CV ocupado por el tren perseguido.

Al recibir la información vía radio, las balizas en este modo serán fijas y contendrán información de vía. Serán empleadas como referencia geográfica.

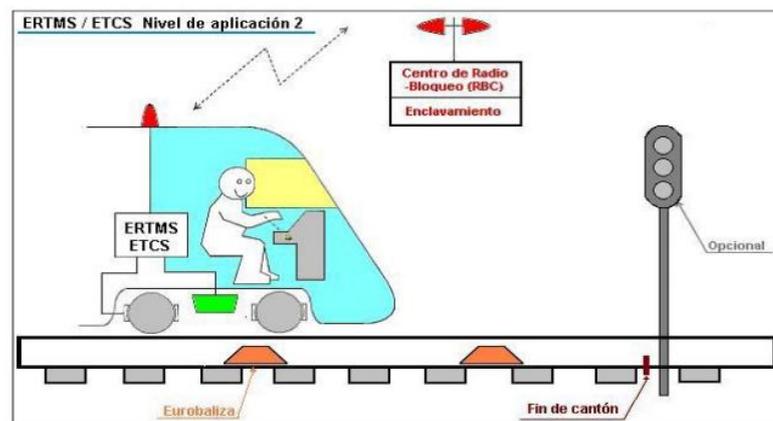


Figura 2: Funcionalidad ERTMS N2 [3]

- iii. Nivel 3: similar al 2, la mayor diferencia radica en la existencia de sistemas que garantizan la integridad del tren. Esto permite prescindir de los sistemas de detección del tren y acercar el *EoA* a la cola del tren perseguido, reduciendo aún más el intervalo entre trenes.



- iv. Nivel 0: concebido para que los trenes equipados con ETCS puedan circular por vías sin equipar, siguiendo la señalización lateral. El ETCS solo supervisará una velocidad máxima predefinida. No hay comunicación entre tren y vía salvo las balizas de cambio de nivel.
- v. Nivel STM (o NTC): concebido para que los trenes equipados con ETCS puedan circular en líneas equipadas con sistemas nacionales de protección del tren. El nivel de protección alcanzable será equivalente al de dicho sistema nacional. Las balizas, igual que en nivel 0, serán leídas para detectar órdenes de cambio de nivel. La configuración e interfaces del sistema STM dependerán de las especificidades de cada sistema nacional.

Los sistemas ERTMS cuentan además con numerosos Modos de Operación para dar respuesta a las distintas circunstancias operacionales que puedan aparecer. Entre ellas, destacan por su utilidad para este trabajo [4]:

- Full Supervision (FS): es el modo más completo, en que se supervisan completamente los movimientos del tren que, en circunstancias normales, no entrará en situaciones peligrosas. Se requiere como información una Autoridad de Movimiento (MA), un perfil estático de velocidades (SSP) y un perfil de gradientes. El equipo de a bordo supervisará un perfil dinámico de velocidad, mostrando al maquinista, a través del DMI, una velocidad máxima permitida, una velocidad y distancia objetivo, etc. Se entra en este nivel desde SR, OS y PT al recibir la información necesaria.



Figura 3: DMI en FS. Supervisión de Velocidad [5]

- Trip (T): el equipo de a bordo entra en *Trip* tras detectar una situación potencialmente peligrosa (pérdida de un grupo de balizas, pérdida de comunicaciones con RBC, haber sobrepasado el MA...). Se aplica el freno de emergencia y se avisa al maquinista, pidiendo su reconocimiento una vez el tren está parado.



- Post Trip (PT): tras el reconocimiento del maquinista, se entra en Post Trip, que libera el freno de emergencia y supervisa una distancia determinada (valor nacional) hacia atrás para sacar al tren de situaciones potencialmente peligrosas.
- Staff Responsible (SR): el maquinista es responsable, a la espera de recibir información de vía que permita circular en un modo más seguro (tras el arranque, fallos en la comunicación con RBC o pérdida de balizas). Este modo supervisa una velocidad máxima (valor nacional). Se entra desde cualquier modo al pulsar “Override” o “Comenzar Misión”.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En el contexto de un proyecto donde se está instalando un sistema ERTMS N2 (sin otros sistemas de respaldo), el cliente fija ciertos índices de desempeño y calidad del servicio, marcando objetivos de puntualidad y disponibilidad. La explotación de la línea también entra en el alcance del contrato. Se desean estimar las posibles penalizaciones en que se pueden incurrir por culpa de averías.

1.3 OBJETIVOS Y TAREAS

- Realizar un análisis de las causas de las principales incidencias que provocan el fallo del sistema ERTMS N2 en una línea donde ya está implantado.
- Extrapolar los resultados de puntualidad y cancelaciones a un proyecto llave en mano actualmente en construcción.
- Estudio de los objetivos de puntualidad y calidad del servicio marcados por el cliente
- Realizar un análisis de las posibles penalizaciones por retrasos y cancelaciones



1.4 RECURSOS

Como recursos se empleará la documentación disponible en la empresa y el software de cálculo *Matlab* con el que el alumno está familiarizado.

1.5 PLANIFICACIÓN

El trabajo se desarrolló en el curso de las prácticas que realizó el alumno durante el curso 2015-2016. Contó con fases de establecimiento de objetivos, documentación, simulación y análisis de resultados.



Capítulo 2 ANÁLISIS DE AVERÍAS EN UNA LÍNEA CON ERTMS N2 IMPLANTADO

La LAV Madrid-Lérida, equipada con ERTMS N2 (y N1 de respaldo) está supervisada por 5 RBC de tecnología *Ansaldo*, distribuidos de la siguiente forma:

- RBC Guadalajara (3+700 - 75+000). Ámbito de 71 km.
- RBC Medinaceli (75+000 - 211+150). Ámbito de 136 km.
- RBC Calatayud (211+150 - 284+200). Ámbito de 73 km.
- RBC Zaragoza (284+200 - 367+500). Ámbito de 83 km.
- RBC Montagut (367+500 - 452+500). Ámbito de 85 km.

Pese a que en la línea en estudio se instalarán RBCs de otro fabricante, se tomarán estos datos para una primera estimación.

Analizando las incidencias debidas al sistema de protección del tren ERTMS N2 de dicha línea, se pueden diferenciar los siguientes tipos:

2.1 AVERÍAS EQUIPO EMBARCADO ERTMS

- a. El tren acusa TRIP y reanuda la marcha en ERTMS N1.
- b. El tren acusa TRIP y reanuda la marcha en ERTMS N2.
- c. El tren pierde la comunicación con el RBC y aplica freno de servicio hasta la parada. El tren reanuda la marcha en ERTMS N1.
- d. El tren pierde la comunicación con el RBC y aplica freno de servicio hasta la parada. El tren reanuda la marcha en ERTMS N2.



- e. El tren pierde la comunicación con el RBC y aplica freno de servicio sin llevarle a la parada.

**El equipo embarcado del tren con que se tomaron estos datos y el que circulará por la línea en estudio tienen ambos una redundancia 2oo3.*

2.2 AVERÍAS EQUIPO DE VÍA ERTMS

- f. Incidencia asociada al RBC.
g. Incidencia asociada al PCI-R.
h. Incidencia asociada al CCE.
i. Incidencia asociada al sistema GSM-R.

2.3 INCIDENCIAS POR TIPO DE AVERÍA

Tabla 1: Desglose de incidencias por tipo de avería

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Total
Equipo Embarcado ERTMS	48	45	68	42	48	251
TRIP o pérdida com. RBC. Parada, reanuda en N1	23	21	23	9	23	105
TRIP o pérdida com. RBC. Parada, reanuda en N2	13	19	24	21	12	89
Pérdida com. RBC sin alcanzar parada	12	5	21	12	7	57
Equipo de vía ERTMS	4	7	13	4	5	33
RBC	4	4	2	1	5	16
PCI-R		2	4			6
CCE			6	3		9
GSM-R		1	1			2
Número de circulaciones en N2	1085	1236	1454	1401	1341	6517
Número de km recorridos en N2 (x10⁶)	0.46	0.53	0.62	0.61	0.58	2.8



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

De estos datos se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Se produce una incidencia del sistema ERTMS N2 cada 10000 km. En la misma línea se había alcanzado una fiabilidad con el N1 de una incidencia cada 15000 km.
- Algo más del 40% de las incidencias en que se detiene el tren recurre al sistema de respaldo (N1) para resolverse.
- El 50% de las incidencias del equipo de vía se deben al RBC.



Capítulo 3 REQUISITOS DE OPERATIVIDAD

En el proyecto en estudio se definen una serie de indicadores que serán utilizados para evaluar el correcto funcionamiento de la línea. Para el presente trabajo es de especial utilidad un indicador en concreto: el referido a la puntualidad de la línea.

En los siguientes apartados se detalla la metodología a seguir para el cálculo de dicho índice, y se plantea la forma de calcular las penalizaciones por incumplimiento del requisito.

3.1 ÍNDICE DE DESEMPEÑO O PERFORMANCE SCORE (PS)

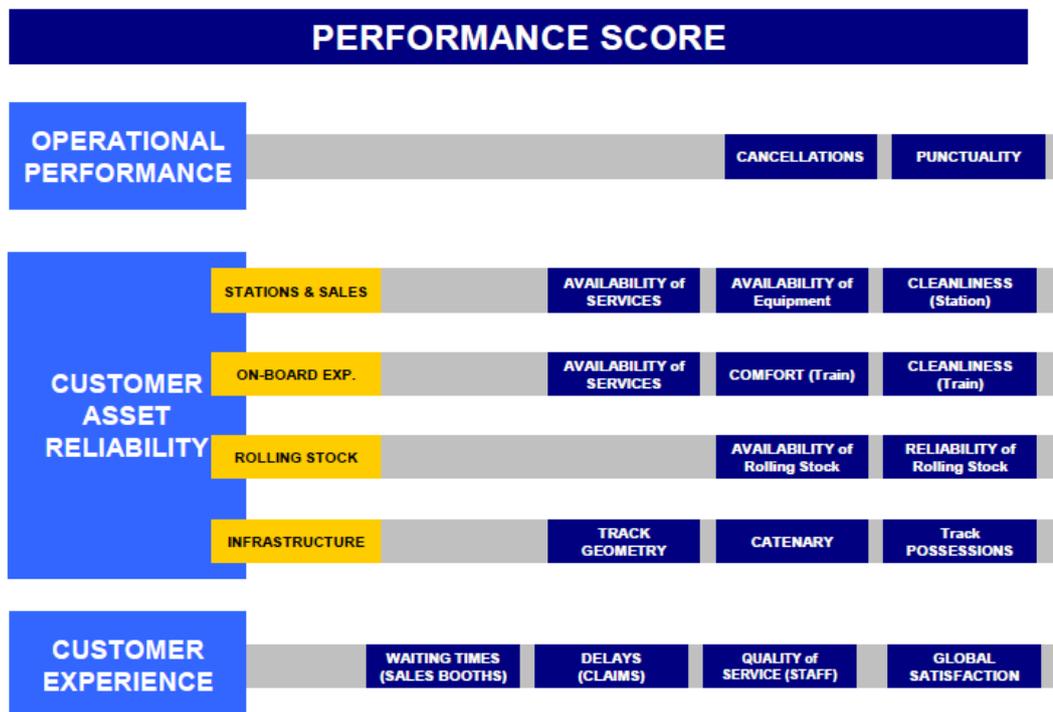


Figura 4: Componentes del Índice de Desempeño [6]

El PS es el indicador global sobre el funcionamiento de la línea. Se descompone en tres partes:



- Desempeño operacional (*Operational Performance*): referido a cancelaciones y puntualidad.
- Fiabilidad de los recursos cliente (*Customer Asset Reliability*): referida a la disponibilidad, fiabilidad, confort y limpieza de estaciones y trenes, así como a la calidad de la infraestructura.
- Experiencia del cliente (*Customer Experience*): referida a los tiempos de espera en quioscos de venta, reclamaciones, calidad del servicio (personal) y satisfacción global.

Mensualmente, se deberá calcular un PS, suma ponderada de todos los indicadores referidos por el cliente. El valor de PS obtenido definirá el grado de cumplimiento que se está alcanzando, determinando de forma directa las penalizaciones o *bonus* en que se incurre:

$$PS = \sum_{i=1}^n w_i * S_i$$

Siendo:

- S_i : puntuación de cada indicador
- w_i : peso de cada indicador.

3.2 CÁLCULO DE BONUS / PENALIZACIONES

Cada mes, la penalización (P) o bonus (B) que el consorcio deberá pagar o recibir será determinada con las siguientes fórmulas en función del Performance Score:

$$\left\{ \begin{array}{l} Si PS \leq PS_{min} \rightarrow P = P_{max} \\ Si PS_{min} \leq PS \leq PS_{target} \rightarrow P = \frac{PS_{target} - PS}{PS_{target} - PS_{min}} * P_{max} \\ Si PS_{target} \leq PS \leq PS_{max} \rightarrow B = \frac{PS - PS_{target}}{PS_{max} - PS_{target}} * B_{max} \\ Si PS_{max} \leq PS \rightarrow B = B_{max} \end{array} \right.$$

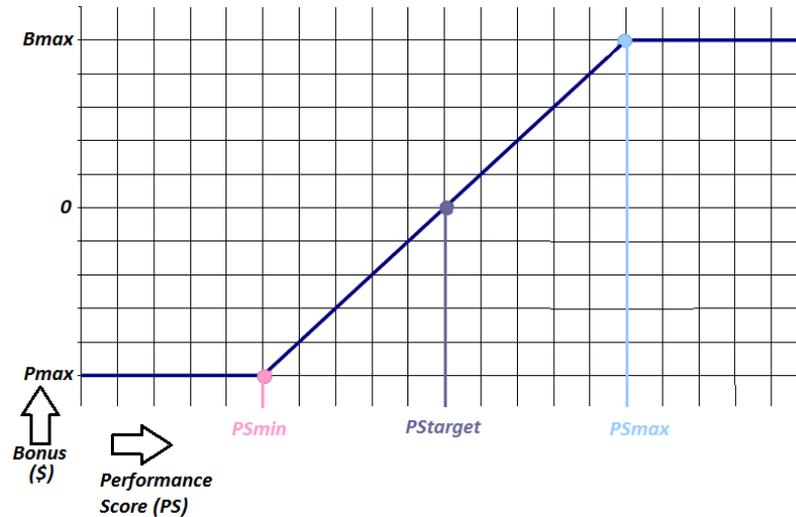


Figura 5: Cálculo de Bonus y Penalización en función del PS

Hay un PS objetivo o *target* en el que no se pagan ni bonus ni penalizaciones. Por encima de este PS, se pagan bonus crecientes al consorcio hasta un PS máximo, a partir del cual se pagará un bonus máximo constante.

Por debajo del PS objetivo o *target*, el consorcio deberá pagar penalizaciones crecientes hasta un PS mínimo, a partir del cual pagará una penalización máxima constante.

3.3 ÍNDICE OPERACIONAL (OP1-PUNTUALIDAD)

Se trata de un indicador cuyo objetivo es medir la puntualidad. Es el principal objeto de este trabajo. Se ha de calcular una relación entre trenes puntuales y trenes operados, considerando que un tren está retrasado si llega con 5 o más minutos de retraso respecto al horario previsto.

Así, mes a mes se debe ir actualizando el valor de OP1 como la media de todos los meses anteriores (OP_m), obteniendo un valor medio acumulado para OP1.

$$OP_m = \frac{T5}{T}$$

Siendo:

- T5: número de trenes que llegan con menos de 5 minutos de retraso en un mes.



- T: número total de trenes que operan en un mes.

Dicho valor obtenido se corresponderá con un “score” determinado, de forma que se obtiene una puntuación (S) asociada a la puntualidad:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } OPm \geq Punct_{max} \rightarrow S_{punct} = 200 \\ \text{Si } Punct_{max} \geq OPm \geq Punct_{target} \rightarrow S_{punct} = 100 * \left(1 + \frac{OPm - Punct_{target}}{Punct_{max} - Punct_{target}} \right) \\ \text{Si } Punct_{target} \geq OPm \geq Punct_{min} \rightarrow S_{punct} = 100 * \left(1 + \frac{Punct_{target} - OPm}{Punct_{target} - Punct_{min}} \right) \\ \text{Si } Punct_{min} \geq OPm \rightarrow S_{punct} = 0 \end{array} \right.$$

La puntualidad máxima, mínima y objetivo son menores en los años 1 y 2 de la operación de la línea, dejando lugar a una “curva de aprendizaje” que sea más flexible para subsanar fallos:

Tabla 2: Puntualidad mínima, objetivo y máxima por años

	Año 1	Año 2	Año 3 y siguientes
Punt min	80%	85%	90%
Punt target	85%	90%	95%
Punt max	90%	95%	98%

3.4 ÍNDICE DE TERMINACIÓN O TERMINATION SCORE (TES)

Se trata de un indicador crítico, calculado como la suma de todos los “Termination Points (TeP)”. Marca un umbral que no se debe sobrepasar por indicación del Gobierno.

$$TeS = \sum TeP$$

Si $TeS \geq 100$ durante 3 meses consecutivos el gobierno podría rescindir el contrato.



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

Para el caso de puntualidad, el TeP tiene un valor de 100 y su umbral límite es del 75%. Esto quiere decir que tres meses con una puntualidad inferior al 75% bastarían para rescindir el contrato. También podría rescindir el contrato por combinación de otros factores (pueden distintos cada mes) que sumen un peso de más de 100.

Es necesario tener muy en cuenta que el resto de los indicadores tienen su TeP asociado con su correspondiente umbral. El TeP de la puntualidad es de mayor valor por su gran importancia. Tres meses de incumplimiento de un único indicador con peso inferior a 100 no son suficientes para la rescisión del contrato.



Capítulo 4 ESTUDIO DE RETRASOS ORIGINADOS POR AVERÍAS EN EL SISTEMA ERTMS N2

En este capítulo se estiman los retrasos que se producirían en las circulaciones debidas a las incidencias comentadas en el Capítulo 2.

Se debe tener en cuenta que los tiempos perdidos NO tienen en cuenta las holguras de tiempo con las que se diseña una malla de explotación y que permitirían recuperar parte de los retrasos. Por esta razón, estos tiempos no van a corresponderse exactamente con los retrasos de dichos trenes al final de su recorrido, sirviendo solo a modo de estimación.

Los retrasos son calculados sencillamente como la diferencia de tiempo existente entre un tren que se ve afectado por la incidencia en cuestión respecto a ese mismo tren si circulase todo este tiempo a velocidad máxima. En los siguientes casos de estudio se han considerado distintas velocidades de SR:

- 40 km/h, por ser el valor por defecto definido por la ERA para este modo,
- 100 km/h, por ser el valor nacional en España para este modo.
- 200 km/h, valor a estudiar

Este aspecto es clave, debido a que la línea no cuenta con ningún otro sistema de señalización de respaldo. No existen señales de avanzada ni balizas conmutables. Esto provoca que, en caso de avería, no quede otra alternativa que circular en modo SR.

Para el intervalo entre trenes se escogen 4', el caso más desfavorable especificado en el pliego (Figura 6).



"As for the main line signalling and interlocking system, an ERTMS L2 is required, allowing a 4-minute interval between two consecutive trains running in the same direction. ERTMS SRS version shall be 2.3.0d"

Figura 6: Requisito de intervalo entre trenes

En la realidad los trenes circularán solo con ese intervalo en circunstancias especiales, por lo que la repercusión de las averías será menor. De hecho, el pliego especifica que el tráfico habitual previsto entre las dos estaciones más concurridas es de 7 trenes/h en (2012-2022). Esto equivale a 8.57' de intervalo. Para 2042 las previsiones de evolución del tráfico establecen 11 trenes/h (5.46'). Sin embargo, se trata de una línea con características especiales, con picos muy pronunciados de demanda en ciertos días, de ahí que se haya empleado ese intervalo de 4' como caso más desfavorable.

Es importante destacar los siguientes factores:

- Cada caso de estudio se ha analizado para unas premisas muy particulares y especialmente desfavorables para la explotación.
- Los retrasos que se obtienen para cada caso se podrían recuperar mediante las holguras de tiempo disponibles en la malla de explotación.
- La impuntualidad es únicamente un factor en el cálculo del Performance Score, por lo que se deberían tener en cuenta el resto de indicadores para obtener el valor del Performance Score que permitiera calcular las penalizaciones.
- También, las averías del sistema de protección del tren ERTMS N2 no son más que una de las razones por las que un tren puede incurrir en retrasos. Por lo que para calcular el número de trenes retrasados al mes también se deberían considerar el resto de factores que pueden provocar retrasos en la circulación.



4.1 RETRASOS POR ENTRADA EN TRIP SIN RECUPERAR FULL SUPERVISION

Escenario

El escenario supone que existe una alta densidad de tráfico, en la que circulan trenes cada 4 minutos en ambos sentidos, todos en el sistema nominal de circulación, ERTMS N2. En este momento uno de los trenes sufre un fallo y entra en TRIP. En el momento en el que se produce el fallo, este tren está situado a 35 km de un *Siding* (PAET). Se toma este valor por ser ésta la distancia aproximada entre los *Sidings* de la línea en cuestión.

En ese momento se aplica el freno de emergencia llevando el tren a la parada. Se establece que el tren pasa parado 1 minuto. Tras pasar por el modo POST TRIP, este tren reinicia la marcha en un modo degradado (modo STAFF RESPONSIBLE de ERTMS). Se supone que el tren reintentará entrar en FULL SUPERVISION sin éxito, por lo que tiene que continuar su viaje en SR. Este fallo sólo afecta a un tren, si bien el resto verán modificada su marcha y recortado su MA al tener por delante un tren más lento.

Por tanto, se calcula el tiempo de retraso acumulado por cada tren perseguidor del tren averiado, el cual se limita a circular a la máxima velocidad definida para el modo SR hasta ser apartado en el Siding más cercano.

Datos útiles para el cálculo

Las especificaciones de material rodante establecen una aceleración de 0.3m/s^2 y una deceleración en freno de servicio de -0.6m/s^2 de 230km/h a 0 y de -0.35m/s^2 de 320 a 230km/h .

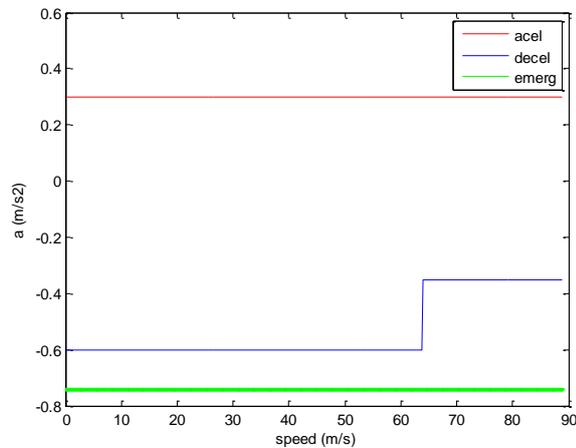


Figura 7: Valores de aceleración, freno servicio y freno de emergencia

Con estos valores se deduce una gráfica velocidad/espacio en el frenado como la siguiente:

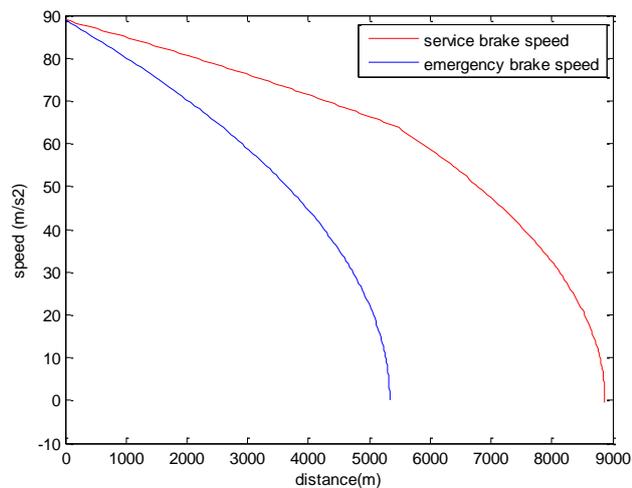


Figura 8: Curvas velocidad/distancia para freno de servicio y emergencia

La curva de freno servicio será particularmente útil porque será empleada en el modelo como aquella a supervisar en FULL SUPERVISION (se entiende que la interfaz con freno de servicio está implementada). En efecto, al perturbarse la circulación, los trenes perseguidores verán acortada su autoridad de movimiento y tendrán que circular más juntos y más lentamente, según lo que indica esta curva.

Cabe destacar que los perseguidores en ningún caso perderán el modo FULL SUPERVISION, simplemente este modo les obligará a circular más lentamente.

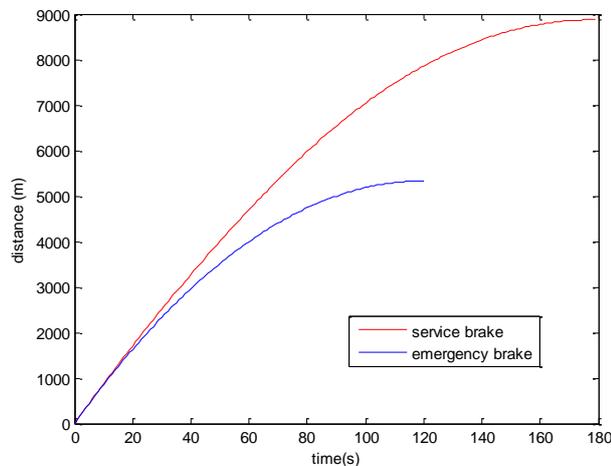


Figura 9: gráfico distancia/tiempo en el frenado

En la Figura 9 se muestra la gráfica distancia/tiempo en los dos tipos de frenado, que se reflejarán en la malla. El frenado de servicio tarda 3' y 9km en llegar de 320km/h a 0. El frenado de emergencia tarda 2' y 5,5km.

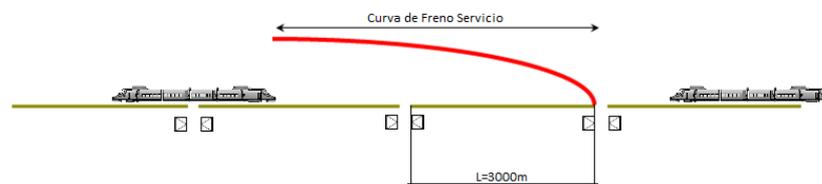


Figura 10: Esquema persecución de trenes

El criterio tomado para la persecución de trenes, debido a la dificultad de discretizar la línea ferroviaria en el código empleado, ha sido colocar la autoridad de movimiento a 3000m de la cola del tren precedente. Se trata de la longitud de un ACS o *axle counter section*, distancia máxima y caso más desfavorable.

De este modo, la autoridad de movimiento en nuestro programa se moverá de forma dinámica, en lugar de “a saltos” cada vez que el tren perseguido libere un ACS. La velocidad del tren perseguidor se adaptará a la distancia a la que se encuentre al End of Authority, supervisando la velocidad dada por la curva de freno de servicio vista anteriormente.

Resultados

Los resultados que se han obtenido en las distintas simulaciones son las siguientes:

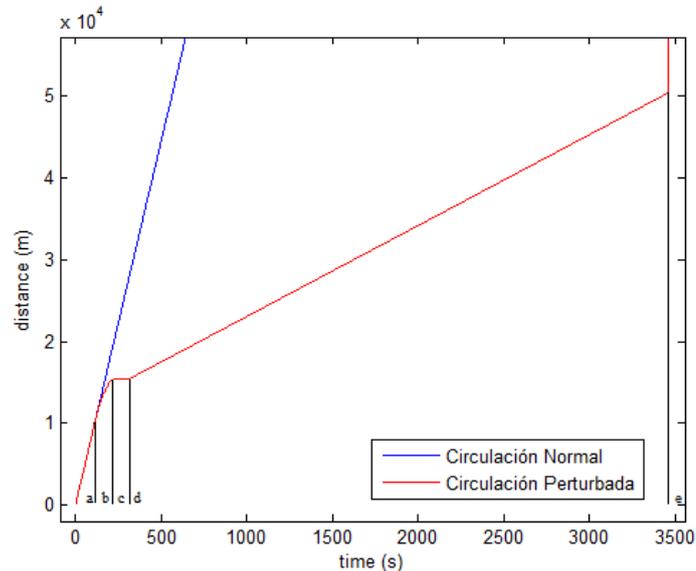


Figura 11: Detalle del tren averiado, que acusa TRIP y no recupera FS

En la gráfica precedente se pueden apreciar varias regiones

- El tren circula sin perturbar 10km, momento en que acusa TRIP
- El tren acusa TRIP y aplica freno de emergencia, tardando 2' y 5.5km en detenerse
- El tren pasa 1 minuto parado. Durante ese minuto el maquinista reconoce el TRIP, intenta recuperar el modo FS sin éxito y termina por reanudar la circulación en SR.
- El tren acelera hasta la velocidad definida en SR (en este caso 40km/h). Circula 35km a esta velocidad hasta el Siding. A una velocidad tan baja, tardará más de 50 min en recorrer esa distancia.
- El tren se aparta en el Siding, la perturbación tardará algo más en extinguirse, sin embargo.

Añadiendo trenes perseguidores cada 4' al sistema y generando la malla correspondiente se obtienen los resultados de la Figura 12.

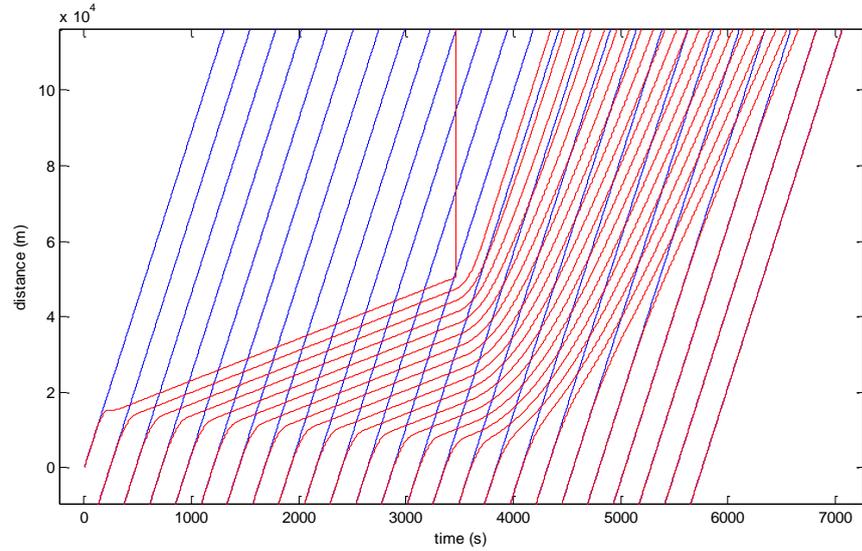


Figura 12: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=40\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y no recupera FS.

Como puede observarse, los 22 trenes siguientes al que falla sufren una perturbación en su circulación. Con el código desarrollado podemos ver cómo afecta a la circulación un intervalo entre trenes más realista, de 6'.

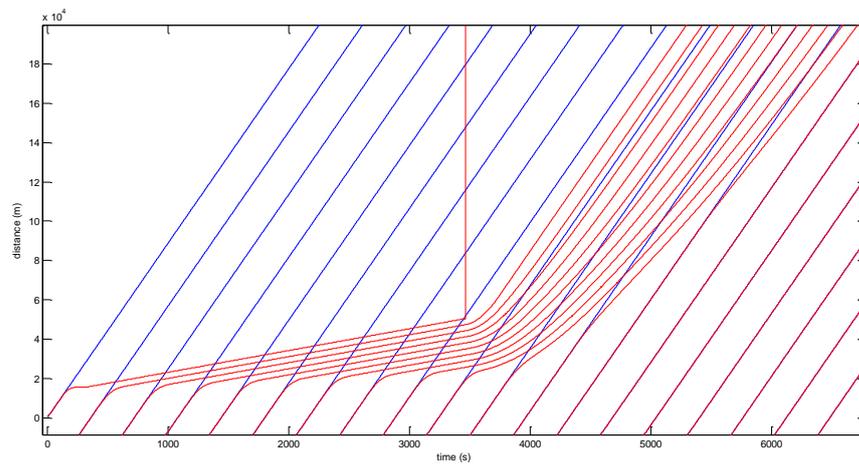


Figura 13: Circulación perturbada con trenes cada 6', $v_{SR}=40\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y no recupera FS.



En este caso, solo los 12 trenes siguientes sufren perturbación. Es posible observar cómo afecta a la operación un aumento de la velocidad en STAFF RESPONSIBLE:

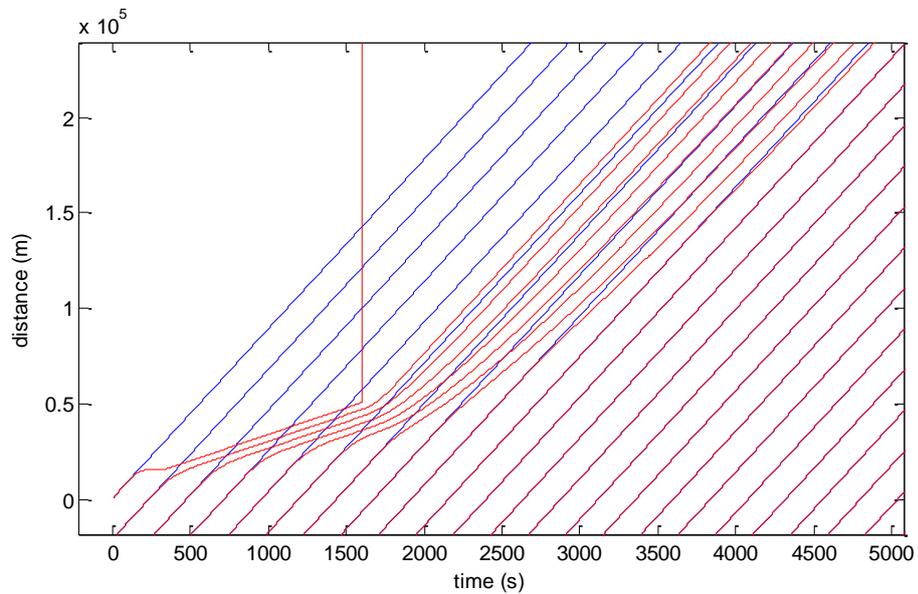


Figura 14: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=100\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y no recupera FS.

En este caso, el primer tren tarda sólo unos 20 minutos en alcanzar el *Siding*, por lo que la repercusión en la circulación es mucho menor, afectando únicamente a los 9 trenes posteriores al primero.

Midiendo los tiempos para los tres valores de V_{SR} propuestos, se calcula el retardo como la diferencia de tiempos con que llegan los trenes al km 150:

Tabla 3: Retrasos originados por entrada en TRIP sin recuperar FS, para tres valores de V_{SR}

V_SR	Retraso (min)		
	40km/h	100km/h	200km/h
Tren 1	Anulado	Anulado	Anulado
Tren 2	46,7166667	15,05	4,86666667
Tren 3	44,93333333	13,25	3,06666667
Tren 4	43,1166667	11,43333333	1,26666667



Tren 5	41,2666667	9,6	0
Tren 6	39,4	7,73333333	0
Tren 7	37,4833333	5,81666667	0
Tren 8	35,5333333	3,88333333	0
Tren 9	33,55	1,91666667	0
Tren 10	31,55	0,1	0
Tren 11	29,5	0	0
Tren 12	27,4166667	0	0
Tren 13	25,3166667	0	0
Tren 14	23,1833333	0	0
Tren 15	21,0333333	0	0
Tren 16	18,8666667	0	0
Tren 17	16,6833333	0	0
Tren 18	14,4666667	0	0
Tren 19	12,25	0	0
Tren 20	10	0	0
Tren 21	7,75	0	0
Tren 22	5,48333333	0	0
Tren 23	3,21666667	0	0
Tren 24	1,08333333	0	0
Tren 25	0	0	0

Conclusiones

Como se puede observar en la tabla anterior, el número de trenes que sufren retraso se va reduciendo de forma muy importante a medida que se aumenta la velocidad de circulación del modo SR. Lógicamente, el tren averiado debe liberar la vía para que los trenes perseguidores sufran el menor retraso posible.

Un tren circulando a 40 km/h tarda algo más de 50 minutos en recorrer los 35 km hasta poder apartarse, en cambio un tren circulando a 100 km/h tarda aproximadamente 20 minutos y a 200 km/h, 10 minutos. En cambio un tren circulando a la velocidad máxima de la línea habría recorrido esta distancia en 6 minutos y medio. Esta diferencia de tiempos es la que provoca resultados tan diferentes para cada velocidad.

Se debe mencionar que para conseguir perturbar al menor número posible de trenes, se ha tenido que apartar el tren averiado en el PAET más cercano, lo cual es sólo una suposición que no puede ser llevada a cabo sin un mecanismo para asegurar que dicho tren también pueda llegar a destino.



Lo que queda demostrado es que si se mantuviera el tren averiado circulando en modo degradado hasta su destino, sin liberar la vía, se irán viendo afectados muchos más trenes perseguidores, por lo que los retrasos acumulados por todos ellos serían inaceptables.

El análisis anterior demuestra también que con las distancias consideradas, mantener un tren circulando a 40 km/h hasta el PAET más cercano provoca unos retrasos enormes en sus perseguidores, además de un elevado número de trenes retrasados, lo cual es, desde cualquier punto de vista, inasumible.

Por otro lado, al equipar la vía con algún sistema que permitiese fijar la velocidad de SR en 200 Km/h, vemos que los retrasos se reducen enormemente, quedando en este caso todos ellos por debajo de los 5 minutos fijados como límite en el pliego del cliente.



4.2 RETRASOS POR ENTRADA EN TRIP RECUPERANDO FULL SUPERVISION EN LA SIGUIENTE PANTALLA VIRTUAL

Escenario

El escenario supone que existe una alta densidad de tráfico, en la que circulan trenes cada 4 minutos (según Req. 20 del pliego “Interlocking and Main Line Signaling”) en ambos sentidos, todos en el sistema nominal de circulación, ERTMS N2. En este momento uno de los trenes sufre un fallo y entra en TRIP.

Después de frenar y permanecer parado durante un minuto (tiempo que se supone que es necesario hasta que se puede reiniciar la marcha y que además permite que el tren precedente libere el cantón hasta la siguiente señal luminosa), este tren reinicia la marcha en un modo degradado (en modo SR de ERTMS). Se supone el caso desfavorable de que el tren esté a 3.000 metros (supuesta longitud de un cantón) de una pantalla virtual en la que, también supuestamente, puede recuperar el Full Supervision. De esta forma, el tren recorrería 3.000 metros en N2 SR. Este fallo sólo afecta a un tren, si bien el resto verán modificada su marcha y recortado su MA al tener por delante un tren más lento.

Por tanto, se calcula el tiempo de retraso acumulado por cada tren perseguidor además del que tendría el tren que ha acusado el TRIP.

La simulación se ha realizado para velocidades de SR de 40 km/h (valor por defecto definido por la ERA), de 100 km/h (valor nacional en España) y de 200 km/h (valor en estudio).

Resultados

Los resultados obtenidos de la simulación son los siguientes:

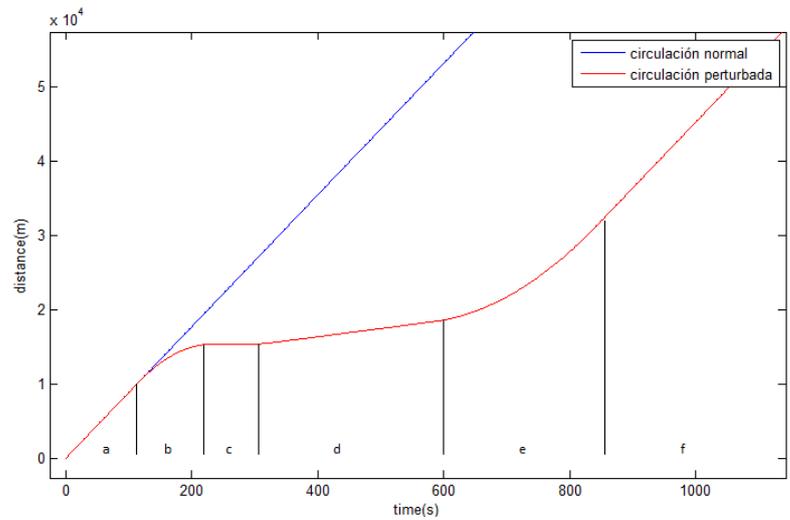


Figura 15: Detalle del tren averiado, que acusa TRIP y recupera FS

En la gráfica precedente se pueden apreciar varias regiones

- El tren circula sin perturbación 10km, hasta donde acusa TRIP
- El tren acusa TRIP y aplica freno de emergencia, tardando 2' y 5.5km en detenerse
- El tren pasa 1 minuto parado. Durante ese minuto el maquinista reconoce el TRIP, y reanuda la circulación en SR.
- El tren acelera hasta la velocidad definida en SR (en este caso 40km/h). Circula 3 km hasta la siguiente pantalla virtual.
- El tren recupera FS en la pantalla virtual, y acelera hasta los 320km/h
- Circulación a la velocidad máxima de la línea.

La separación entre las líneas paralelas roja y azul una vez recuperados los 320km/h es de unos 8 min, que serán el retraso sufrido por el primer tren.

Añadiendo trenes perseguidores cada 4' al sistema y generando la malla se obtienen los resultados de la Figura 16.

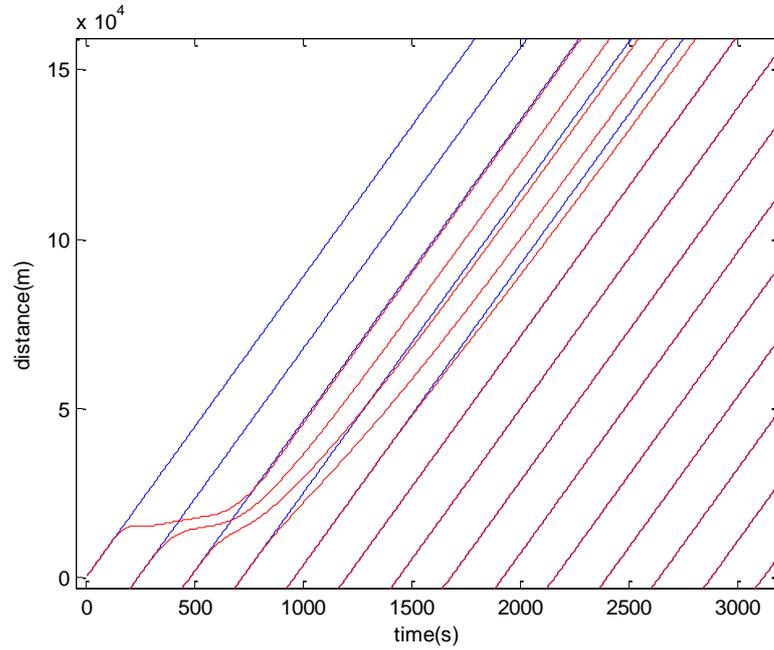


Figura 16: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=40\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y recupera FS.

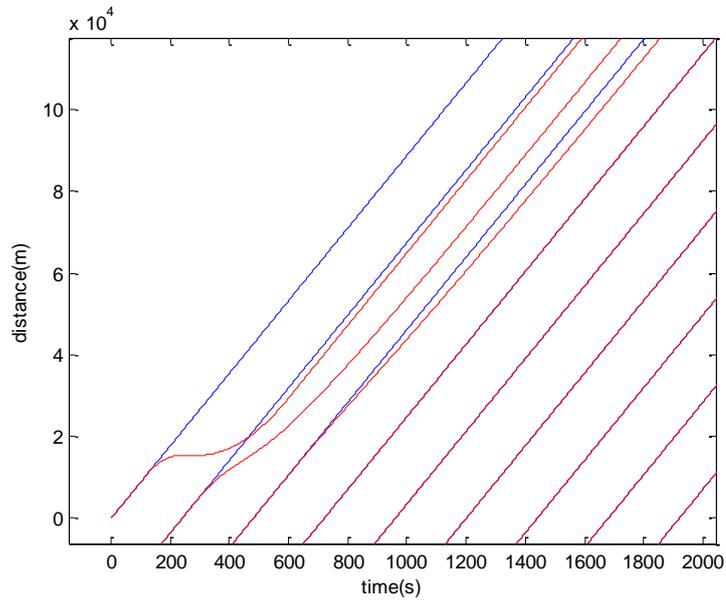


Figura 17: Circulación perturbada con trenes cada 4', $v_{SR}=200\text{km/h}$, cuando un tren acusa TRIP y recupera FS.



Midiendo los tiempos para los tres valores de V_{SR} propuestos, se calcula el retraso con que llegan los trenes al km 150:

Tabla 4: Retrasos originados por entrada en TRIP recuperando FS, para tres valores de V_{SR}

	Retraso (min)		
	40km/h	100km/h	200km/h
Tren 1	8,15	5,16666667	4,46666667
Tren 2	6,36666667	3,38333333	2,66666667
Tren 3	4,58333333	1,58333333	0,88333333
Tren 4	2,76666667	0	0
Tren 5	0,95	0	0
Tren 6	0	0	0

Conclusiones

Respecto al caso anterior, se puede apreciar cómo los tiempos de viaje de todos los trenes disminuyen en gran medida, reduciéndose también el número total de trenes retrasados.

Esto es debido a que el tiempo que el tren averiado debe circular en modo SR es mucho menor que en el caso anterior, ya que consigue entrar en FS a 3.000 metros del punto en el que se ha detenido, con lo cual ese tiempo circulando en modo degradado no impacta tan negativamente como lo hacía en el caso anterior.

Además, en este caso, todos los trenes llegan a destino, incluido el tren averiado, ya no es necesario que se aparte en el PAET, como sucedía en la anterior simulación.

El análisis anterior demuestra también que la velocidad fijada para el modo SR no es tan decisiva en los tiempos de retraso como lo era en el caso anterior, ya que al ser la distancia a recorrer en ese modo mucho menor, no degrada tanto la operación el hecho de circular a una u otra velocidad de SR.



4.3 RETRASOS POR PÉRDIDA MOMENTÁNEA DE COMUNICACIÓN CON EL RBC, SIN DETENER EL TREN

Escenario

En este caso se supone una pérdida de comunicación momentánea de un tren con el RBC que lo está supervisando, que no obliga al tren a parar, ya que se restablece la comunicación antes de que esto suceda.

Se suponen las mismas condiciones de partida que para los casos anteriores: 4 minutos de intervalo entre trenes y una velocidad de FS de 320 km/h.

Se supone que la pérdida de comunicaciones con el RBC produce la aplicación de freno de servicio, al igual que en las líneas españolas.

Resultados

Los resultados obtenidos por simulación son los siguientes:

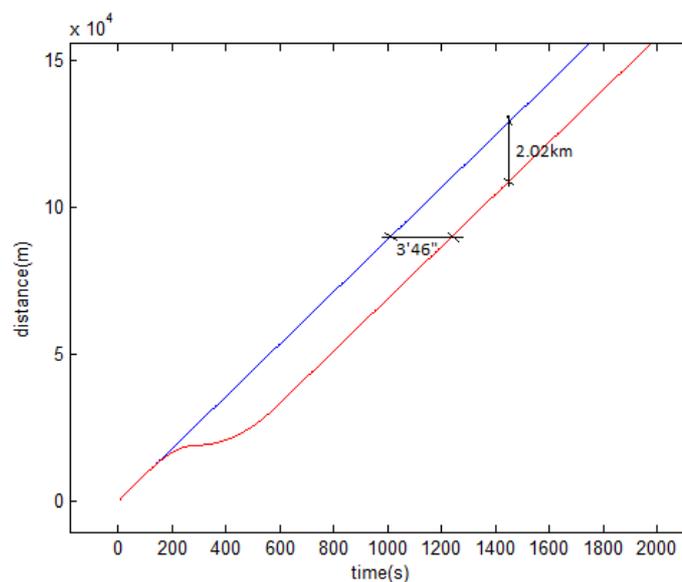


Figura 18: Detalle del tren averiado, que pierde comunicación con el RBC momentáneamente

En la figura anterior puede apreciarse como, en el km 10, el tren pierde comunicación con el RBC y aplica freno de servicio hasta llegar prácticamente a la parada, para justo



entonces recuperarla y volver a acelerar hasta 320 km/h. Esto provoca que el tren se retrase 2,02km (en distancia) o 3 min 46 s (en tiempo).

Como ni siquiera el tren averiado llega a retrasarse más de 5 minutos, parece obvio que sus perseguidores tampoco lo harán:

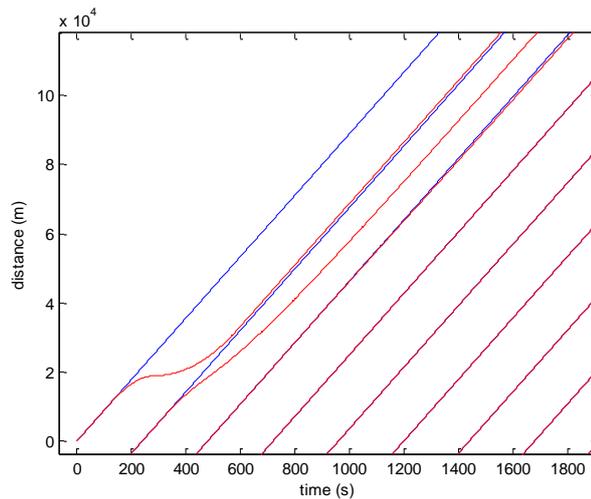


Figura 19: Circulación perturbada con trenes cada 4', cuando un tren pierde comunicación con el RBC.

Midiendo el retraso que esta perturbación provoca:

Tabla 5: Retrasos originados por pérdida de comunicación con RBC

	Retraso (min)
Tren 1	3,78333333
Tren 2	2
Tren 3	0,18333333
Tren 4	0

Conclusiones

Este caso no genera impuntualidades, por sí solo, ya que ningún tren llega con 5 o más minutos de retraso, por lo tanto no tendría que tenerse en cuenta para posibles penalizaciones. Nótese que en este caso la velocidad en SR no afecta ya que el tren nunca pierde el modo FS.



4.4 RETRASOS POR FALLO EN EL RBC

Escenario

Se analiza el caso en el que un RBC falla durante un momento de máxima densidad de trenes, un tren cada cuatro minutos.

Para la realización del estudio se ha considerado un ámbito medio de RBC de 45 km, obtenido de dividir el trayecto de la línea (450 km) por los 10 RBC que van a ser instalados.

La velocidad máxima de circulación en modo Full Supervision es de 320 km/h, en modo Staff Responsible se han considerado tres casos posibles: 40 Km/h, 100 km/h y 200 km/h.

De la experiencia obtenida de la explotación de otras líneas de alta velocidad operando con ERTMS N2, se puede estimar que los fallos en RBC duran un tiempo que oscila entre los 10 y los 30 minutos. Se toma como valor típico 20 min. Además, se ha considerado un tiempo de un minuto desde que el tren se para hasta que reinicia la marcha.

Por último, se ha tenido en cuenta que en el momento del fallo, debido a la frecuencia de paso de trenes, se encuentran tres trenes (por vía) dentro del ámbito del RBC y suponemos, como caso más desfavorable, que uno de ellos se encuentra justo a la entrada del ámbito del RBC. Inicialmente, todos los trenes están separados una distancia igual al espacio que recorre cada uno de ellos en 4 minutos a una velocidad de 320 km/h, es decir, 21,33 km. Así mismo, se dispone de una señal luminosa ubicada a unos 20 km del inicio del ámbito del RBC.

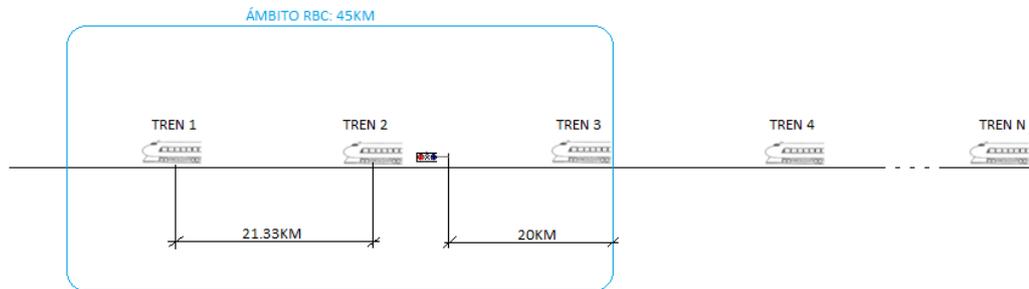


Figura 20: Esquema del ámbito del RBC en una vía

Mientras el RBC está caído, se impone la restricción de que ningún tren pueda sobrepasar el inicio de dicho RBC hasta que el tren que esté dentro sobrepase la señal luminosa, liberando así el cantón, de unos 20 km, tenido en cuenta para este caso. Esta situación conlleva a que se forme una cola de trenes, cada uno en su correspondiente cantón, justo a la entrada del RBC. Una vez solucionados los problemas en el RBC, y por tanto restablecido el sistema de protección, se irán lanzando trenes de forma que se mantengan entre ellos las distancias mínimas necesarias.

Resultados

Para ilustrar las colas que se forman frente a la entrada del ámbito controlado por el RBC averiado, se realizó primeramente una simulación en la que la duración de la avería es indefinida. De este modo se ve más fácilmente que con una avería de 20 minutos.

En la Figura 21 (con 7 trenes) puede apreciarse cómo se crea una cola de trenes separados por 3km (la longitud de un ACS) frente a la entrada del RBC. Estos trenes sólo irán lanzándose a medida que el tren precedente haya sobrepasado la señal luminosa del km 20. Téngase en cuenta que la zona sombreada en gris corresponde a la avería.

Puede apreciarse igualmente cómo el primer tren apenas se ve afectado, al encontrarse casi fuera del ámbito del RBC cuando se produce la avería (km 43 de 45).

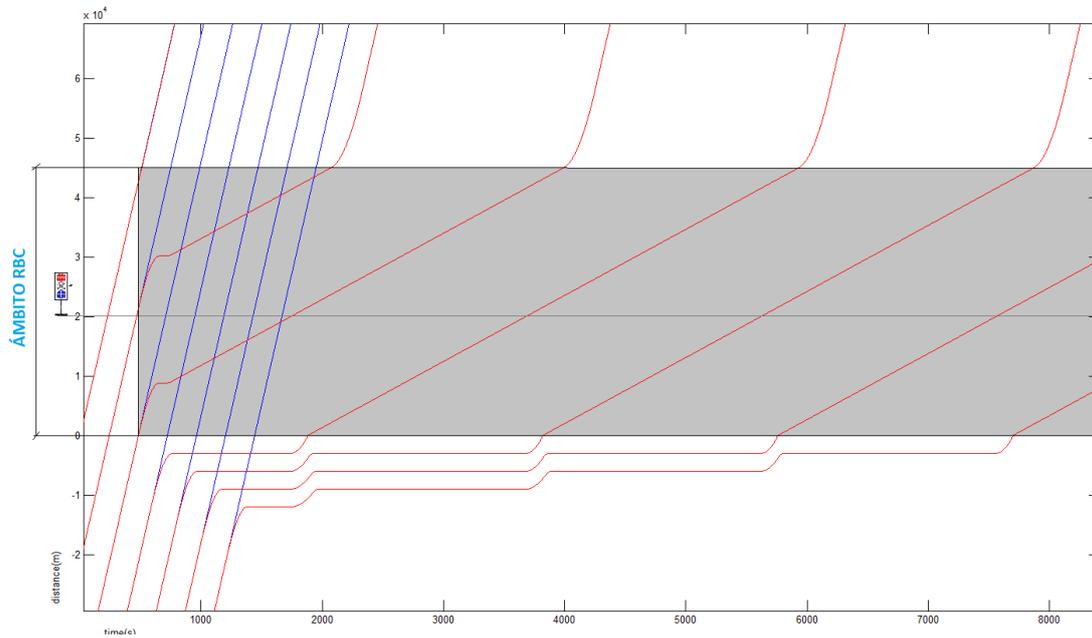


Figura 21: Colas de trenes frente al ámbito del RBC averiado. Avería indefinida.

Se estudiaron los retrasos para los tres valores de v_{SR} considerados, con una avería de 20' de duración:

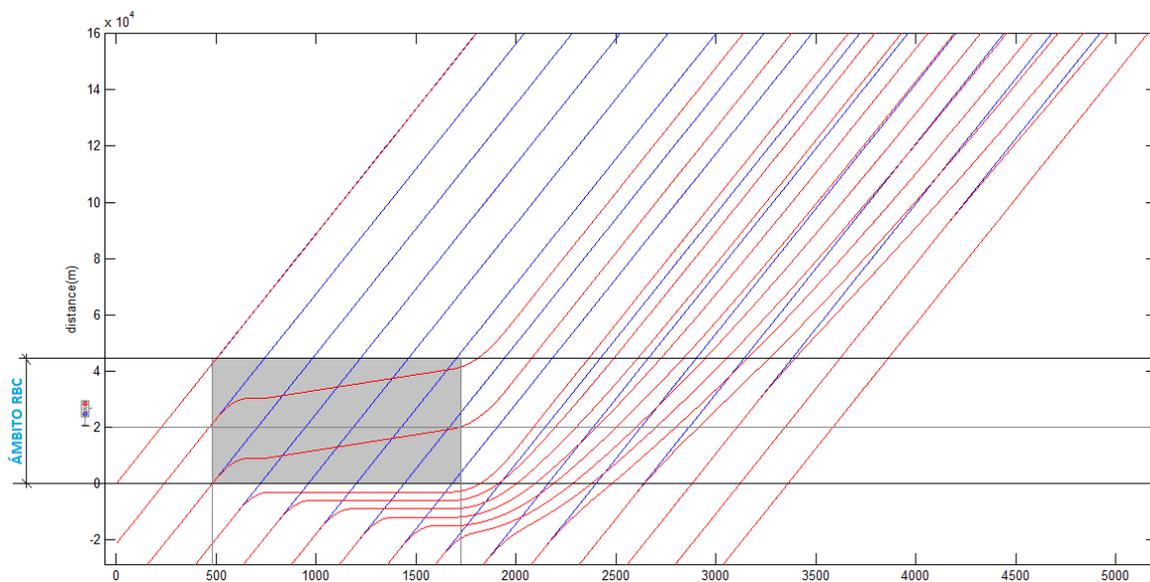


Figura 22: circulación perturbada con avería del RBC de 20' de duración. $V_{SR}=40\text{km/h}$



En la Figura 22 puede apreciarse cómo, con una velocidad SR tan baja, el tercer tren aún no ha liberado la señal luminosa cuando se soluciona la avería. El tren 2 y los 12 siguientes ven su circulación afectada.

Para una velocidad SR de 100km/h y 200km/h se observan los siguientes resultados:

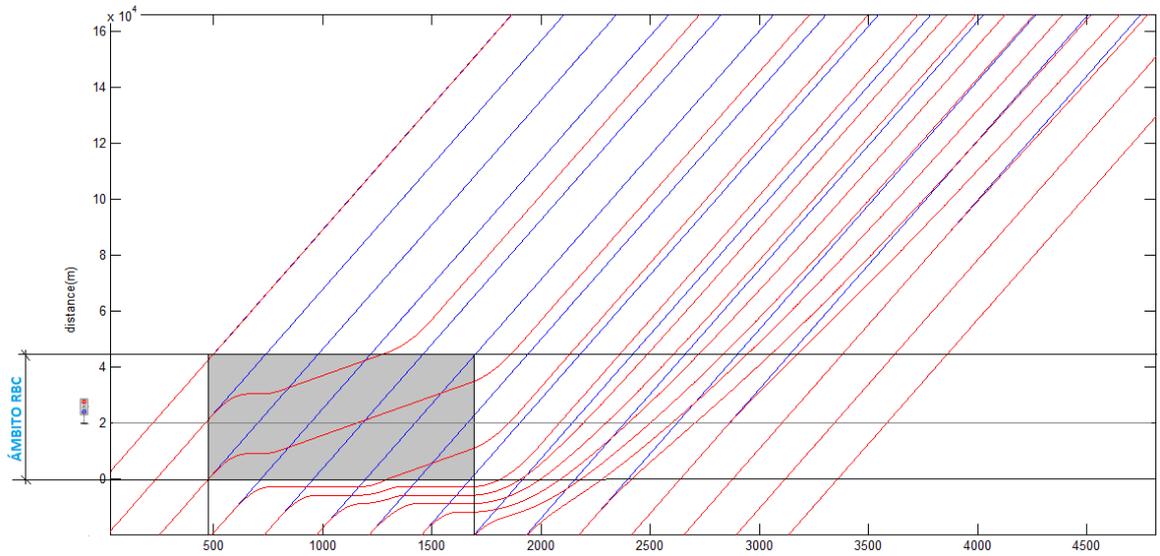


Figura 24: circulación perturbada con avería del RBC de 20' de duración.

$V_{SR}=100\text{km/h}$

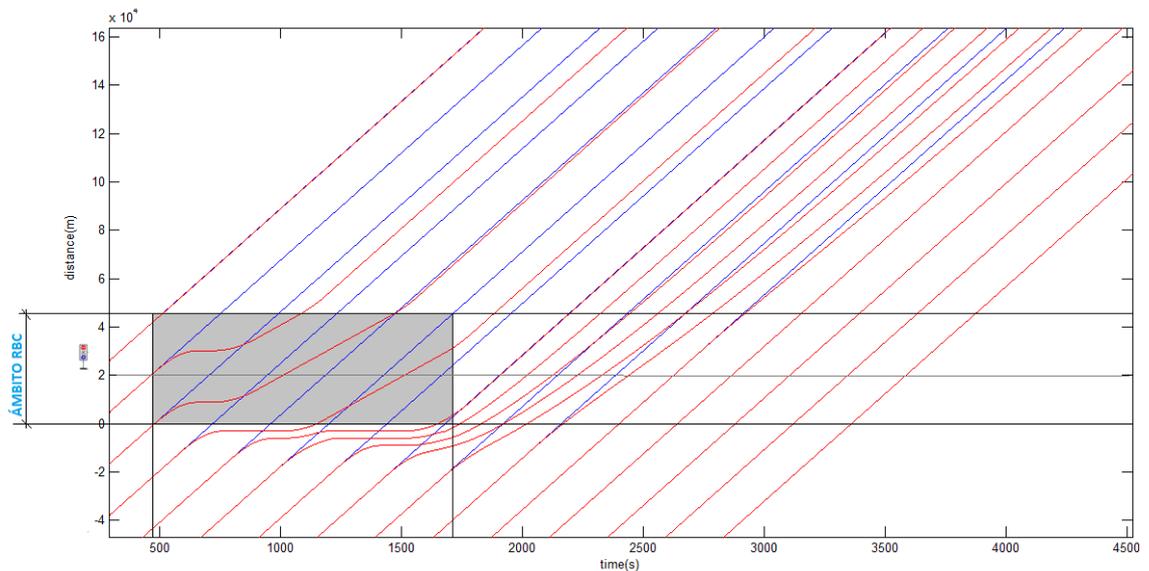


Figura 23: circulación perturbada con avería del RBC de 20' de duración. $V_{SR}=200\text{km/h}$



Tabla 6: Retrasos originados por fallo del RBC de 20', para 3 v_SR distintas

V_SR	Retraso (min)		
	40km/h	100km/h	200km/h
Tren 1	0,18333333	0,18333333	0,18333333
Tren 2	18,2666667	10,3333333	5,85
Tren 3	18,2666667	14,7333333	8,25
Tren 4	19,0166667	15,2	10,8166667
Tren 5	17,2166667	15,0166667	12,0333333
Tren 6	15,4333333	13,2166667	10,25
Tren 7	13,65	11,4333333	8,45
Tren 8	11,8333333	9,6333333	6,6666667
Tren 9	10,0166667	7,8333333	4,85
Tren 10	8,1833333	6,0166667	3,0333333
Tren 11	6,3166667	4,1833333	0
Tren 12	4,4333333	2,3166667	0
Tren 13	2,5333333	0,45	0
Tren 14	0,6333333	0	0
Tren 15	0	0	0

Conclusiones

Como puede observarse, aumentar la velocidad en SR tiene ciertos efectos, aunque no tan dramáticos como en el primer caso estudiado. Aumentando la v_SR de 40 a 100km/h se evita el retraso de 1 solo tren.

Se observa además que el principal problema para este caso es la creación de colas a la entrada del RBC.

Las colas se pueden ver incrementadas, principalmente, por la posición de la señal luminosa respecto al inicio del ámbito del RBC, siendo más perjudicial a medida de que ésta se encuentra más alejada, y por el tiempo de restablecimiento del RBC, siendo igualmente más perjudicial a medida que aumenta.

Además se podría llegar a crear otra cola a la altura de la señal luminosa, dependiendo esto de la posición de la señal y de la longitud del ámbito del RBC, si bien es cierto, no se prevé que un RBC controle mucho más de 45 km.



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

En este caso también se puede destacar que el aumento de la velocidad de SR no es un factor clave para reducir notablemente el número de trenes retrasados. El factor determinante en este caso es el tiempo de restablecimiento del RBC.



Capítulo 5 ESTIMACIÓN DE PENALIZACIONES

Como hipótesis de partida, se estimará que el número de averías por tren-km será igual al caso estudiado (Capítulo 2). Esto sirve meramente como aproximación. De esta manera se extrapolan los datos a un caso básico, una línea de 450km con trenes circulando a un intervalo de 4' durante 16h al día.

Téngase en cuenta que los fallos de los equipos de vía se considerarán independientes del tráfico: al haber el doble de RBCs que en la línea española, se considera por extrapolación que habrá aproximadamente el doble de averías.

Tabla 7: Desglose de incidencias por tipo de avería extrapolado a la línea en estudio

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Total
Equipo Embarcado ERTMS	339	275	355	223	234	1426
TRIP o pérdida com. RBC. Parada, reanuda en N1	162	128	120	48	128	586
TRIP o pérdida com. RBC. Parada, reanuda en N2	92	116	125	111	67	511
Pérdida com. RBC sin alcanzar parada	85	31	110	64	39	329
Equipo de vía ERTMS	8	14	26	8	10	66
RBC	8	8	4	2	10	32
PCI-R	0	4	8	0	0	12
CCE	0	0	12	6	0	18
GSM-R	0	2	2	0	0	4
Número de circulaciones en N2	7200	7200	7200	7200	7200	36000
Número de km recorridos en N2 (x10⁶)	3,224	3,224	3,224	3,224	3,224	16,1208



La Tabla 8 resume el número de retrasos ocasionados por avería, para cada valor de v_{SR} considerado:

Tabla 8: Resumen de retrasos originados por cada tipo de avería y v_{SR}

Tipo de avería	trenes retrasados > 5'		
	$v_{SR}=40\text{km/h}$	$v_{SR}=100\text{km/h}$	$v_{SR}=200\text{km/h}$
CASO 1: entrada en trip sin recuperar FS	22	7	1
CASO 2: entrada en trip recuperando FS	2	1	0
CASO 3: perdida com sin parada	0	0	0
CASO 4: fallo RBC	10	9	7

En la Tabla 9 se calcula el índice de puntualidad de la línea. Se obtiene el número total de trenes retrasados más de 5 minutos contabilizando el número de averías de cada tipo y multiplicándolo por el número de trenes retrasados que origina cada avería, para cada valor de v_{SR} :

Tabla 9: Cálculo del índice de puntualidad global, para 3 valores de v_{SR}

	nº averías	trenes retrasados > 5'		
		$v_{SR}=40\text{km/h}$	$v_{SR}=100\text{km/h}$	$v_{SR}=200\text{km/h}$
CASO 1: entrada en trip sin recuperar FS	586	12892	4102	586
CASO 2: entrada en trip recuperando FS	511	1022	511	0
CASO 3: perdida com sin parada	329	0	0	0
CASO 4: fallo RBC	32	320	288	224
Total trenes retrasados		14234	4901	810
Índice Operacional de Puntualidad		0,604611111	0,863861111	0,9775

Es reseñable que, a todos los efectos, una velocidad para el modo SR de 40km/h es insuficiente y hace que el índice de puntualidad sea un 20% inferior al valor mínimo para el año 1 (ver *Tabla 2: Puntualidad mínima, objetivo y máxima por años*). Esto no solo obligaría al consorcio a pagar siempre la máxima penalización, sino que probablemente terminaría en una rescisión del contrato, según lo visto en el apartado *Índice de Terminación o Termination Score (TeS)*.

Con una v_{SR} de 100 km/h se alcanza un índice de puntualidad algo superior al 85%, valor *target* u objetivo para el año 1. Con una mejora adecuada en los años siguientes



a la puesta en servicio, no se debería incurrir en graves penalizaciones. Además, si se tienen en cuenta los márgenes en la confección de la malla de circulación, ciertos retrasos podrían compensarse. De esta manera el índice aumentaría.

Con una velocidad v_{SR} de 200 km/h se alcanzaría un índice de puntualidad del 97,7%, cercana al valor máximo para el año 3 y siguientes. Sin embargo sería necesario valorar desde el punto de vista de la seguridad esa decisión. Circular en un modo degradado a una velocidad tan alta puede comprometer la seguridad de los pasajeros.

Considerando los *targets* del año 1 (ver Tabla 2: *Puntualidad mínima, objetivo y máxima por años*), el valor del *score* del indicador “puntualidad” sería el siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} Si V_{SR} = 200 \frac{km}{h} \rightarrow S_{punct} = S_{PUNCT_{MAX}} = 200 \\ Si V_{SR} = 100 \frac{km}{h} \rightarrow S_{punct} = 100 * \left(1 + \frac{OPm - Punct_{target}}{Punct_{max} - Punct_{target}} \right) = \\ 100 * \left(1 + \frac{0.8638 - 0.85}{0.9 - 0.8} \right) = 13.8 \\ Si V_{SR} = 40 \frac{km}{h} \rightarrow S_{punct} = S_{PUNCT_{MIN}} = 0 \end{array} \right.$$

De donde se obtiene la contribución de la puntualidad al *Performance Score* global

$$PS = \sum_{i=1}^n w_i * S_i$$

El valor de w_{punct} (el peso ponderado del indicador “puntualidad”) puede obtenerse de las tablas del *Apéndice I: Targets*. Este valor es de 260, un 26% del total. Para conocer la bonificación o penalización total a pagar sería necesario conocer el desempeño en el resto de indicadores.



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } V_{SR} = 200 \frac{km}{h} \rightarrow PS_{PUNCT} = w_{PUNCT} * S_{PUNCT} = 260 * 200 = 52000 \\ \text{Si } V_{SR} = 100 \frac{km}{h} \rightarrow PS_{PUNCT} = w_{PUNCT} * S_{PUNCT} = 260 * 13.8 = 3588 \\ \text{Si } V_{SR} = 40 \frac{km}{h} \rightarrow PS_{PUNCT} = w_{PUNCT} * S_{PUNCT} = 260 * 0 = 0 \end{array} \right.$$



Capítulo 6 CONCLUSIONES Y FUTUROS

DESARROLLOS

Como conclusión, habría de valorarse la necesidad de implementar como sistema de respaldo el ERTMS N1, que permitiría reanudar la circulación en FS en caso de pérdida de la comunicación con el RBC, evitando circular un gran número de km en SR. Esto suavizaría las perturbaciones del CASO 1 estudiado, especialmente cuando los trenes se ven obligados a circular a 40 km/h.

Se ha de tener muy presente en la evaluación de los resultados que se parte de unas hipótesis de partida muy concretas, que determinan el resultado final. Las simulaciones se han hecho con escenarios desfavorables para la explotación, con circulaciones de trenes cada 4 minutos y sin márgenes de recuperación. La configuración de la línea, es decir, la posición de los apartaderos y las señales respecto a la avería, también siguen criterios desfavorables para la explotación. Esto hace intuir que el número real de trenes retrasados podría no ser tan alto como el calculado.

Sin embargo, las averías del sistema ERTMS N2 no son más que una de las razones por las que un tren puede incurrir en retrasos. Deberían considerarse el resto de factores que pueden provocar retrasos en la circulación.

También debería considerarse la necesidad real de implementar un sistema como el ERTMS nivel 2, que permite un intervalo tan corto como 4' entre trenes, cuando en la realidad no se va a aprovechar toda esta capacidad. Quizás con un sistema menos sofisticado pero más probado y fiable sería suficiente.

Pese a que en este trabajo no se han considerado los márgenes para recuperación de retrasos, el pliego establece que:



"Train schedule shall include a provision of a recovery margin of 4.5 minutes per 100km. Its graph shall use the line capacity in conformity with UIC standards concerning route capacity (UIC Leaflet 451-1)"

Figura 25: Requisitos de márgenes en la operación

Si se considera que los retrasos se producen a 100km de la estación de pasajeros a la que se presta el servicio, se podrían recuperar 4.5 minutos de retraso por cada tren. Así, la Tabla 8 vería modificados sus valores:

Tabla 10: Resumen de retrasos originados por cada tipo de avería y v_{SR} , considerando márgenes de recuperación.

Tipo de avería	trenes retrasados > 5'		
	$v_{SR}=40\text{km/h}$	$v_{SR}=100\text{km/h}$	$v_{SR}=200\text{km/h}$
CASO 1: entrada en trip sin recuperar FS	20	5	1
CASO 2: entrada en trip recuperando FS	0	0	0
CASO 3: perdida com sin parada	0	0	0
CASO 4: fallo RBC	8	7	3

Esto mejoraría en cierta medida los índices de puntualidad calculados:

Tabla 11: Cálculo del índice de puntualidad global, para 3 valores de v_{SR} , considerando márgenes de recuperación

	nº averías	trenes retrasados > 5'		
		$v_{SR}=40\text{km/h}$	$v_{SR}=100\text{km/h}$	$v_{SR}=200\text{km/h}$
CASO 1: entrada en trip sin recuperar FS	586	11720	2930	586
CASO 2: entrada en trip recuperando FS	511	0	0	0
CASO 3: perdida com sin parada	329	0	0	0
CASO 4: fallo RBC	66	256	224	96
Total trenes retrasados		11976	3154	682
Índice Operacional de Puntualidad		0,667333333	0,912388889	0,981055556

A lo que habría que añadir el hecho de que la circulación continua de trenes cada 4 minutos es una hipótesis ficticia en la que se usa al máximo la capacidad de la línea. En realidad, las previsiones de tráfico son menores, por lo que la repercusión de una

avería sería menos grave que la estudiada en cuanto número de trenes retrasados. El pliego especifica unas previsiones de tráfico de:

"According to the preliminary traffic forecasts appended in appendix 1 (year 2012) and appendix 2 (2022) and assuming 417 seats per unit, the number of trains per hour shall be:
 - 7 trains per hour between XXX Central and XXX Central
 - 4 trains per hour between XXX Central and XXX
 - 2 trains per hour between XXX Central and XXX
 - 2 trains per hour between XXX and XXX Central"

Figura 26: Estimaciones de tráfico de la línea.

Como desarrollos futuros a este trabajo, se podría realizar una ampliación, aumentando la precisión del estudio con los datos de tráfico previsto para cada tramo de la línea, según el *TRAIN STOPPING PATTERN*:

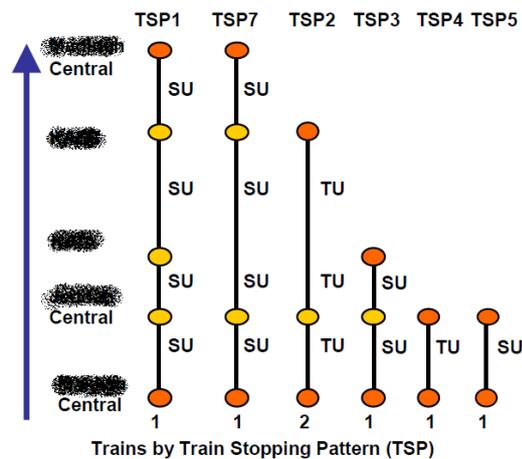


Figura 27: Train Stopping Pattern

Esto permitiría una precisión mucho mayor en el cálculo de los retrasos, permitiendo conocer el intervalo entre los trenes que circulan por cada tramo de la línea, estimar con mayor exactitud los márgenes de recuperación según la longitud del tramo estudiado, etc.



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

Otra mejora cuya implantación no revestiría gran complejidad sería añadir a las curvas de frenado los márgenes especificados en el documento de la ERA de cálculo de curvas de frenado [8], de manera que no se supervise la curva de freno de servicio sino la de intervención de dicho freno. El uso de esta herramienta permitiría introducir nueva funcionalidad como el uso del corte de tracción al sobrepasar la warning speed, etc.



Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://ferropedia.es/wiki/ERTMS>
- [2] SUBSET 026-2 v230. System Requirement Specification Chapter 2: Basic System Description
- [3] Valero Sabater, Sonia. *Máster en Sistemas Ferroviarios (ICAI) Asignatura: ERTMS y RAMS Módulo 1 Niveles de Operación.*
- [4] SUBSET 026-2 v230. System Requirement Specification Chapter 4: Modes and Transitions
- [5] http://www.wikiwand.com/de/European_Train_Control_System
- [6] *Documentación del proyecto: Performance Specification: Performance Requirements*
- [7] *Documentación del proyecto: Performance Specification: Operation Requirements*
- [8] [ERA ERTMS 040026 v1.2 Introduction to braking curves in bsl3](#)



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



APÉNDICE I: TARGETS

Year 1

		Target (TPS)			Min			Max
Performance Score (PS)		100 000			50 000			150 000
		Target (T)	Min (m)	Max (M)	Weighting	Termination Threshold	Termination Points	
Operational Performance								
OP1	Punctuality	85%	80%	90%	260	75%	100	
OP2	Cancellations (per thousand)	5	0	10	50	-	-	
Customer Asset Reliability								
<i>Stations & Sales</i>								
SS1	Availability of Services (1)	95%	90%	98%	10	-	-	
SS2	Availability of Equipment (1)	95%	90%	98%	60	-	-	
SS3	Cleanliness of the Stations (1)	95%	90%	98%	40	-	-	
<i>On-Board Experience</i>								
OB1	Availability of On-Board Services (1)	95%	85%	98%	10	-	-	
OB2	Comfort of the train-sets (1)	95%	90%	98%	50	-	-	
OB3	Cleanliness of the Rolling Stock (1)	90%	80%	95%	60	-	-	
<i>Rolling Stock Maintenance</i>								
RS1	Availability of the Rolling Stock	80%	← (R0 Target)		40	-	-	
RS2	Reliability of the Rolling Stock (in incidents per million.km)	15	10	25	40	30	50	
<i>Infrastructure Maintenance</i>								
IM1	Track Geometry	LL	5%	0%	15%	} 100	30%	100
		TL	5	0	25		-	-
		BR	1	0	6		-	-
		GR	100%	70%	100%		50%	20
IM2	Catenary Quality	CW	5%	0%	15%	} 30	30%	30
		ST	5	0	25		-	-
		RC	1	0	5		-	-
IM3	Possession Times (in minutes per 100 possessions)	10	5	20	20	-	-	
Customer Experience								
CA1	Waiting Times (in minutes) (1)	10	5	15	20	-	-	
CA2	Delays of answer to claims (in days) (1)	5	4	10	10	-	-	
CA3	Quality of Service of the Staff (1)	95%	85%	98%	100	70%	40	
CA4	Global Customer Satisfaction	85%	75%	95%	100	60%	50	



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

Year 2

		Target (TPS)	Min		Max			
Performance Score (PS)		100 000	50 000		150 000			
		Target (T)	Min (m)	Max (M)	Weighting	Termination Threshold	Termination Points	
Operational Performance								
OP1	Punctuality	90%	85%	95%	260	75%	100	
OP2	Cancellations (per thousand)	5	0	10	50	-	-	
Customer Asset Reliability								
<i>Stations & Sales</i>								
SS1	Availability of Services (1)	95%	90%	98%	10	-	-	
SS2	Availability of Equipment (1)	95%	90%	98%	60	-	-	
SS3	Cleanliness of the Stations (1)	95%	90%	98%	40	-	-	
<i>On-Board Experience</i>								
OB1	Availability of On-Board Services (1)	95%	85%	98%	10	-	-	
OB2	Comfort of the train-sets (1)	95%	90%	98%	50	-	-	
OB3	Cleanliness of the Rolling Stock (1)	90%	80%	95%	60	-	-	
<i>Rolling Stock Maintenance</i>								
RS1	Availability of the Rolling Stock	85%	← (R0 Target)		40	-	-	
RS2	Reliability of the Rolling Stock (in incidents per million.km)	10	8	20	40	30	50	
<i>Infrastructure Maintenance</i>								
IM1	Track Geometry	LL	7%	2%	20%	100	30%	100
		TL	7	0	35		-	-
		BR	1	0	6		-	-
		GR	100%	70%	100%		50%	20
IM2	Catenary Quality	CW	7%	2%	20%	30	30%	30
		ST	7	0	35		-	-
		RC	1	0	5		-	-
		IM3	Possession Times (in minutes per 100 possessions)	10	5		20	20
Customer Experience								
CA1	Waiting Times (in minutes) (1)	10	5	15	20	-	-	
CA2	Delays of answer to claims (in days) (1)	5	4	10	10	-	-	
CA3	Quality of Service of the Staff (1)	95%	85%	98%	100	70%	40	
CA4	Global Customer Satisfaction	85%	75%	95%	100	60%	50	

Year 3 and following

		Target (TPS)	Min		Max			
Performance Score (PS)		100 000	50 000		150 000			
		Target (T)	Min (m)	Max (M)	Weighting	Termination Threshold	Termination Points	
Operational Performance								
OP1	Punctuality	95%	90%	98%	260	75%	100	
OP2	Cancellations (per thousand)	5	0	10	50	-	-	
Customer Asset Reliability								
<i>Stations & Sales</i>								
SS1	Availability of Services (1)	95%	90%	98%	10	-	-	
SS2	Availability of Equipment (1)	95%	90%	98%	60	-	-	
SS3	Cleanliness of the Stations (1)	95%	90%	98%	40	-	-	
<i>On-Board Experience</i>								
OB1	Availability of On-Board Services (1)	95%	85%	98%	10	-	-	
OB2	Comfort of the train-sets (1)	95%	90%	98%	50	-	-	
OB3	Cleanliness of the Rolling Stock (1)	90%	80%	95%	60	-	-	
<i>Rolling Stock Maintenance</i>								
RS1	Availability of the Rolling Stock	90%	← (R0 Target)		40	-	-	
RS2	Reliability of the Rolling Stock (in incidents per million.km)	8	5	15	40	30	50	
<i>Infrastructure Maintenance</i>								
IM1	Track Geometry	LL	10%	5%	25%	100	30%	100
		TL	10	0	50		-	-
		BR	1	0	6		-	-
		GR	100%	70%	100%		50%	20
IM2	Catenary Quality	CW	10%	5%	25%	30	30%	30
		ST	10	0	50		-	-
		RC	1	0	5		-	-
		IM3	Possession Times (in minutes per 100 possessions)	5	0		10	20
Customer Experience								
CA1	Waiting Times (in minutes) (1)	10	5	15	20	-	-	
CA2	Delays of answer to claims (in days) (1)	5	4	10	10	-	-	
CA3	Quality of Service of the Staff (1)	95%	85%	98%	100	70%	40	
CA4	Global Customer Satisfaction	85%	75%	95%	100	60%	50	