



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
MADRID**

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ICAI)
Departamento de Electrotecnia y Sistemas**

**MODELADO, SIMULACIÓN
Y CONTROL DE SISTEMAS
FERROVIARIOS**

Tesis para la obtención del doctorado

**Director: Prof. Dr. Fernando de Cuadra García
Dr. Fernando Montes y Ponce de León**

Autor: Lic. Antonio Fernández Cardador

Madrid 1997

Índice

1. Introducción	1
1.1 Parte I. Movimiento de un tren	2
1.1.1 Enfoque propuesto	3
1.1.2 Aplicaciones de la técnica de simulación propuesta	5
1.2 Parte II. Movimiento de trenes en una línea cerrada	6
1.2.1 Trabajos previos	7
1.2.2 Enfoque propuesto	9
1.3 Parte III. Regulación de tráfico de una línea cerrada	11
1.3.1 Trabajos previos	12
1.3.2 Enfoque propuesto	15
1.4 Estructuración en capítulos	18

PARTE I. Movimiento de un tren

2. Modelado	23
2.1 Modelo de las características físicas de la vía	23
2.2 Modelo de línea cerrada	25
2.2.1 Sistemas incluidos en el modelo	26
2.2.2 Modelado de los retornos en estaciones terminales	27
2.3 Modelo de los sistemas de protección	28
2.3.1 Tramos de señalización	29
2.3.2 Sistema ATP por circuitos de vía	30
2.3.3 Sistema mixto circuitos de vía y señales	31
2.3.4 Sistema <i>moving-block</i>	32
2.3.5 Modelado de las protecciones en los cambios de sentido	33
2.4 Modelo de tracción y de consumo	34
2.4.1 Intensidades y tensiones en la red y el motor	35
2.4.2 Curvas características del motor	36
2.4.3 Modelo de potencia consumida y regenerada	37
2.5 Modelado de la conducción	38
2.5.1 Consignas al equipo de tracción. Conducción continua.	39
2.5.2 Conducción por vectores de deriva (conducción ATO)	40
2.6 Modelado de la dinámica del tren	41

3. Simulación	45
3.1 Solución de la ecuación del movimiento	46
3.2 Modelo de simulación	47
3.2.1 Modelado del problema discreto	47
3.2.2 Solución al problema dinámico continuo	48
3.2.3 Estimación del consumo	49
3.3 Clasificación y determinación de los eventos	51
3.3.1 Eventos de espacio	51
3.3.2 Eventos de velocidad	52
3.3.3 Eventos de tiempo	53
3.3.4 Eventos { <i>velocidad-espacio</i> }: curva de frenado	54
3.4 Diseño del simulador	56
3.4.1 Determinación del próximo evento	57
3.4.2 Determinación del próximo estado	60
3.4.3 Algoritmo de simulación	61
3.5 Simulación de tráfico en una línea equilibrada	61
4. Análisis de la explotación	65
4.1 Explotación nominal de una línea cerrada	65
4.2 Análisis de las protecciones de una línea cerrada	66
4.3 Conducción continua: <i>moving-block</i>	68
4.4 Protecciones por tramos de señalización	71
4.5 Protecciones ATP por circuitos de vía	74
4.6 Protecciones ATP por circuitos y tramos de señalización	76
4.7 Protecciones en los retornos	77
5. Análisis de la conducción óptima	79
5.1 Planteamiento del problema	80
5.2 Soluciones mediante programación matemática	80
5.3 Métodos de búsqueda directa	81
5.4 Optimización de la conducción por vectores de deriva	84
5.4.1 Variables independientes	84
5.4.2 Función objetivo	85
5.4.3 Diseño de la optimización	87
5.4.4 Rastreo	88
5.4.5 Desaturación	89
5.4.6 Búsqueda local	90
5.5 Optimización de la conducción continua	90
5.5.1 Módulo de evaluación y variables independientes	92

5.5.2 Función objetivo	95
5.5.3 Búsqueda en árbol	95
5.5.4 Control de la búsqueda mediante heurísticos	98
5.5.5 Algoritmo de búsqueda	100
5.5.6 Fases de la optimización	102

6. Resultados **105**

6.1 Simulación del movimiento de un tren	105
6.1.1 Simulación de marcha tendida	106
6.1.2 Simulación de marcha mediante vectores de deriva	108
6.2 Análisis de la señalización	110
6.2.1 <i>Moving-block</i>	111
6.2.2 Tramos de señalización	113
6.2.3 Protección automática ATP por circuitos de vía	113
6.2.4 Protección automática ATP por circuitos más señales	116
6.2.5 Cambio de sentido en estaciones cabecera	116
6.2.6 Herramienta PACA de ayuda al diseño de la señalización	119
6.2.7 Conclusiones	121
6.3 Optimización de la conducción continua	122
6.3.1 Perfil llano y límite de velocidad constante	122
6.3.2 Perfil no llano y límites de velocidad variables	125
6.3.3 Conclusiones	129
6.4 Optimización de la conducción por vectores de deriva	130
6.4.1 Perfil llano y límite de velocidad constante	131
6.4.2 Perfil no llano y límites de velocidad variables	133
6.4.3 Conclusiones	138

PARTE II. Movimiento de trenes en una línea cerrada

7. Modelado	141
7.1 Descripción en variables de estado	141
7.1.1 Variables de estado	142
7.1.2 Acciones de control: vector de mandos	143
7.2 Ecuaciones de estado	143
7.2.1 Ecuación dinámica de un tren	144
7.2.2 Ecuación de masa de pasaje en un tren	145
7.2.3 Ecuación de masa de pasaje en una estación	145
7.3 Modelo de afluencia de viajeros	146
7.4 Modelo del proceso de carga/descarga de un tren	147
7.5 Escenarios de explotación	148

8. Simulación	149
8.1 Objetivos de simulación	150
8.2 Definición del problema.	150
8.3 Estructura del simulador	151
8.4 Nivel de simulación de línea	152
8.4.1 Lógica de simulación	153
8.4.2 Modelado como simulador por eventos discretos.	155
8.4.3 Algoritmo de simulación	156
8.5 Nivel de simulación de tren	158
8.5.1 Simulación del movimiento	159
8.5.2 Simulación de la parada en estación	161
9. Resultados	165
9.1 Ejemplos de simulación de tráfico	165
9.1.1 Ejemplo 1. Situación inicial equilibrada y escenario regular	167
9.1.2 Ejemplo 2. Situación inicial equilibrada y escenario no regular	169
9.1.3 Ejemplo 3. Situación inicial no equilibrada y escenario regular	169
9.1.4 Ejemplo 4. Situación inicial no equilibrada y escenario no regular	171
9.2 La herramienta PACO	174
9.3 Conclusiones	175

PARTE III. Regulación de tráfico de líneas cerradas

10. Planteamiento del problema de control	177
10.1 Explotación de líneas ferroviarias cerradas	177
10.1.1 Actuación sobre el sistema: mandos	178
10.1.2 Medidas del sistema	180
10.1.3 Explotación por intervalo	181
10.1.4 Explotación por horario	184
10.1.5 Explotación por intervalo y horario en cabeceras	184
10.2 Fuentes de perturbación	185
10.2.1 Perturbaciones sobre el tiempo de recorrido	185
10.2.2 Perturbaciones sobre el tiempo de parada nominal	186
10.3 Consumo de energía	187
10.4 Comportamiento del sistema sin regulación	188
10.5 Objetivos del regulador automático	190

11. Enfoque del regulador	193
11.1 Control óptimo basado en simulación	193
11.2 Estructura jerárquica del regulador	195
11.2.1 El control a corto plazo	196
11.2.2 El control a medio plazo	197
11.2.3 Jerarquización vs. distribución del control	197
11.3 Adaptación de parámetros	199
11.4 Criterios de optimización	200
11.4.1 Regularidad de la línea.	201
11.4.2 Molestia al viajero	204
11.4.3 Consumo de energía	205
12. Modelado y diseño del sistema de control	207
12.1 Medidas y mandos	207
12.2 Modelo simplificado basado en eventos	209
12.2.1 Definición de las variables de estado	210
12.2.2 Función de estado	212
12.2.3 Cálculo del tiempo de recorrido de una etapa	213
12.2.4 Parámetros del modelo	218
12.3 Control a medio plazo	220
12.3.1 Planteamiento del problema de control óptimo	220
12.3.2 Ciclo de recálculo de trayectorias. Adelanto de medidas.	222
12.3.3 Horizonte de optimización	223
12.4 Control a corto plazo	224
12.4.1 Tiempos de recorrido alcanzables en una etapa	225
12.4.2 Selección de mando por el control a corto plazo	226
12.5 Algoritmo de estimación de parámetros	227
12.5.1 Experimentos asociados a cada parámetro	229
12.5.2 Ajuste de los factores de olvido	233
13. Optimización de trayectorias	235
13.1 Planteamiento del problema de optimización	235
13.2 Función objetivo	236
13.2.1 Curva de penalización	238
13.2.2 Cálculo de los atributos	240
13.3 Generación de trayectorias posibles	246
13.4 Algoritmo de optimización	248
13.4.1 Cálculo de la corrección inicial de cada tren	249
13.4.2 Variables independientes	252
13.4.3 Fases de la optimización	254

13.4.4 Tratamiento de las saturaciones _____	257
14. Modelo estocástico del error de seguimiento _____	261
14.1 Modelado sin control a corto plazo con tiempo de parada en estación cte. __	261
14.2 Modelado con control a corto plazo y tiempo de parada en estación variable	264
14.2.1 Efecto del control a corto plazo _____	264
14.2.2 Propagación de la distribución de probabilidad de error _____	267
14.2.3 Propagación de las desviaciones típicas de error _____	272
14.3 Estudio del error de seguimiento _____	272
14.4 Tratamiento de la incertidumbre con mandos saturados _____	276
15. Resultados _____	279
15.1 Optimización de trayectorias de referencia _____	279
15.1.1 Características de la línea de pruebas _____	280
15.1.2 Pesos de la función objetivo _____	281
15.1.3 Parámetros de la función de penalización _____	283
15.1.4 Caso 1. Retraso ligero de un tren _____	284
15.1.5 Caso 2. Retraso severo de un tren _____	298
15.1.6 Caso 3. Múltiples retrasos _____	305
15.2 Pruebas de regulación frente al simulador detallado _____	312
15.3 El regulador automático SIRO _____	317
15.4 Conclusiones _____	319
16. Conclusiones, aportaciones y futuros desarrollos _____	321
16.1 Conclusiones _____	321
16.1.1 Modelo de simulación del movimiento de un tren _____	321
16.1.2 Diseño de la conducción del tren _____	322
16.1.3 Simulación del tráfico de trenes en una línea cerrada _____	323
16.1.4 Regulación de tráfico de líneas cerradas _____	324
16.2 Aportaciones _____	326
16.3 Futuros desarrollos _____	329
<i>Apéndice A. Soluciones de la ecuación de movimiento de un tren _____</i>	<i>331</i>
<i>Apéndice B. Algoritmo de Hooke & Jeeves _____</i>	<i>335</i>
<i>Apéndice C. Características de la línea de pruebas empleada _____</i>	<i>339</i>
<i>Apéndice D. Características del tren utilizado en las pruebas _____</i>	<i>351</i>

Apéndice E. Características de las marchas de ATO utilizadas en las pruebas _ 355

Referencias _____ 359

1. Introducción

El ferrocarril es uno de los medios de transporte más utilizados. Los usuarios exigen una calidad del servicio cada vez mayor, que se concreta en seguridad, rapidez y puntualidad. El empleo de herramientas informáticas cada vez más complejas ayudan a mejorar distintos aspectos de la explotación de estos sistemas, como el diseño de los sistemas de señalización, la planificación de horarios y la regulación del tráfico. La mayoría de estas herramientas están basadas en modelos de simulación, que sirven para evaluar diseños alternativos o predecir el resultado de aplicación de estrategias de regulación. Muchas de ellas incluyen además procesos de optimización, que simplifican y mejoran el trabajo de los diseñadores y de los operadores.

Este trabajo se centra en la mejora de los métodos de diseño y de la explotación de líneas ferroviarias modelables como cerradas, típicamente líneas metropolitanas. Se propone en primer lugar un modelo detallado y una técnica de simulación del movimiento de un tren apropiado para ser utilizados en herramientas de diseño. A continuación se emplean estos resultados en el desarrollo de herramientas CAD de ayuda al diseño de la señalización y de la conducción de trenes, y en la construcción de un simulador de tráfico para el estudio de distintos tipos de perturbaciones. Como resultado final de este trabajo se presenta un regulador automático del tráfico de trenes, que tiene como objetivo el mantenimiento de las condiciones nominales de explotación al menor coste.

Los resultados obtenidos en modelado y simulación del movimiento de un tren y en el diseño de la explotación son válidos, aunque no completos, para la mayor parte de sistemas ferroviarios. La simulación del tráfico de trenes bajo perturbaciones y la regulación automática están centradas en líneas de topología cerrada, en las que todos los trenes realizan el mismo servicio recorriendo periódicamente la línea. Actualmente se trabaja en la generalización y adaptación a cualquier topología de las técnicas de simulación y regulación desarrolladas.

Este documento se estructura en tres partes:

- En la Parte I se tratan los modelos, técnicas de simulación, análisis de sistemas y herramientas de diseño relacionadas con el movimiento de un tren libre de perturbaciones.

- En la Parte II se describe el simulador detallado del tráfico de trenes en una línea cerrada, que incluye las interacciones entre los trenes ejercidas a través de los sistemas de protección y las perturbaciones debidas a la acumulación de viajeros.
- En la Parte III se describe el regulador automático de tráfico en líneas cerradas. Se emplea un modelo simplificado de simulación del tráfico y un esquema jerárquico de control basado en simulación de futuros alternativos.

En este capítulo se plantea brevemente el problema que se aborda en cada parte, así como los posibles enfoques, trabajos previos y las soluciones que se proponen en esta tesis.

1.1 Parte I. Movimiento de un tren

El problema del modelado y simulación del movimiento de un tren en una línea ferroviaria comprende los siguientes aspectos:

- El problema dinámico, que ha de tener en cuenta las características físicas de la vía (gradientes, curvas, resistencias al avance) y del equipo de tracción del tren (curvas de par).
- El control de la conducción, que decide la consigna de tracción a aplicar al tren en cada instante. Incluye el tratamiento de las restricciones por velocidad máxima, la decisión del instante de aplicación del freno para detener al tren en estación, la lógica propia del tipo de conducción empleada y la respuesta del tren ante restricciones impuestas por los sistemas de protección. Estos sistemas imponen habitualmente restricciones de velocidad máxima en ciertos tramos o de velocidad objetivo cuando el tren alcance un determinado espacio.
- Cálculo del consumo de energía del tren. Exige un modelo del motor y, dependiendo del nivel de detalle requerido, modelos del equipo de control de tracción del motor y de la alimentación eléctrica.

Existen dos enfoques para resolver el problema dinámico. El primero resuelve la ecuación diferencial del movimiento, conocida la fuerza de tracción del tren en todo instante. Se emplea en simuladores precisos, y suele ir unido a un modelo de conducción detallado. El segundo enfoque aproxima tiempos de recorrido en tramos de la vía mediante consideraciones cinemáticas sencillas. Estos simuladores no modelan en detalle el sistema de tracción ni la lógica de conducción, que es sustituida por consignas de velocidad máxima y velocidad objetivo. Este enfoque es utilizado

en los cálculos de tiempo de recorrido de simuladores de tráfico por eventos discretos, como en [Casalino et al, 89], [Boccalatte et al, 93] y [Minciardi et al, 94].

En este trabajo interesa un modelo detallado, utilizado en simuladores precisos empleados en el diseño de la explotación. Estos simuladores están basados en simulación a tiempo discreto. En cada paso de simulación se integra la ecuación del movimiento y se resuelven las ecuaciones que definen el modelo de consumo del motor, actualizando los estados dinámico y eléctrico. Este es el enfoque empleado en [Mellit et al, 78] y [Chang et al, 93].

El control de la conducción en simuladores a tiempo discreto se modela como un conjunto de reglas que se comprueban en cada paso de simulación. Estas reglas deciden el cambio de la consigna de tracción del tren. La complejidad de la lógica resultante hace que en algunos simuladores se empleen sistemas expertos para tomar la decisión del cambio de consigna. En [Chang & Thia, 95] se emplean estas técnicas para simular una conducción manual.

1.1.1 Enfoque propuesto

La técnica de tiempo discreto empleada por los simuladores detallados del movimiento de un tren presenta varios inconvenientes para su uso en herramientas de análisis y diseño:

- Son simuladores lentos, cuando emplean pasos de simulación pequeños. Su utilización en herramientas de diseño CAD interactivas se encuentra a menudo limitada. En herramientas que incluyen búsqueda automática es necesario evaluar en general un número elevado de soluciones, siendo necesario modelos de simulación rápidos para encontrar soluciones en tiempos razonables.
- El almacenamiento del resultado de la simulación para análisis posteriores o representaciones gráficas es poco eficiente, al ser necesario guardar cada punto (*tiempo, espacio, velocidad, consumo*) obtenido de las curvas de movimiento.
- La representación del movimiento como listas de puntos no facilita su tratamiento en cálculos donde se realizan continuas evaluaciones, intersecciones entre curvas, traslaciones, etc. Por ejemplo en herramientas de análisis de la capacidad de la línea es importante que estos cálculos se realicen con rapidez.

Se presenta en este trabajo un modelo de simulación y representación del movimiento de un tren adecuado para aplicaciones donde se precisa rapidez en las simulaciones y su tratamiento. La técnica de simulación propuesta descompone el problema en dos niveles. El nivel superior se modela por eventos discretos, definiendo un vector de estado discreto del tren y los eventos que provocan los cambios de estado. El nivel

inferior resuelve el problema dinámico continuo entre dos eventos consecutivos, a partir del valor de las variables de estado discreto definidas en el nivel superior.

Todas las curvas que definen el problema de simulación, gradientes de la vía, curvas de par, curvas de intensidad, etc., se modelan a tramos lineales o cuadráticos. Los eventos del nivel de simulación superior se producen en los cambios de tramo de cualquier característica, y en los cambios de consigna de tracción provocados por el control de la conducción. Entre dos eventos consecutivos se resuelve analíticamente la ecuación diferencial del movimiento, parametrizada en función de las constantes que definen las características de la vía y de tracción. Cada estado discreto se compone de estos parámetros, que determina la solución analítica del movimiento hasta el siguiente evento.

La simulación a nivel superior se define por una sucesión de estados discretos. Cada uno de estos estados es de la forma (v,s,t,A,B,C) , donde las tres primeras variables son el estado cinemático cuando se produce el evento y A,B,C son las constantes que parametrizan la solución de la ecuación diferencial del movimiento hasta el siguiente evento.

El nivel inferior permite calcular el valor de las variables cinemáticas del tren entre dos eventos. Está compuesto por las expresiones analíticas de cada variable cinemática en función de las otras dos, parametrizadas en función del estado discreto inicial. Existen 10 tipos de expresiones analíticas, para distintos rangos de variación de las variables del estado discreto. Cada una de estas curvas es monótona, lo que facilita su tratamiento para calcular puntos de intersección.

Se modela así el movimiento de un tren como concatenación de curvas de movimiento monótonas. El almacenamiento de las simulaciones es muy eficiente, ya que sólo hay que conservar la sucesión de estados discretos. La recuperación de los datos, por ejemplo para representaciones gráficas, consiste en evaluar la expresión analítica correspondiente. Tiene además la ventaja de que la resolución de las representaciones gráficas no está limitada, ya que no existe un incremento mínimo de simulación.

La velocidad de simulación es elevada, debido a que sólo se realizan cálculos en los instantes de cambio de estado discreto, en lugar de a intervalos regulares de tiempo. Estos cálculos consisten fundamentalmente en determinar cuál es el próximo evento que se producirá, y en qué instante de tiempo. Para ello se calcula el instante en que se produciría, con la curva de movimiento actual, el próximo evento de espacio (por cambio de características de la vía), el próximo evento de velocidad (debido a cambio de tramo en la curva de par o por la lógica de conducción) y el próximo evento de curva de frenado límite (para respetar una futura restricción de velocidad o el espacio de parada en estación). El próximo evento será el de menor tiempo asociado. Los cálculos necesarios se efectúan rápidamente debido a que se dispone de las expresiones explícitas del movimiento actual del tren.

El cálculo del consumo del tren se realiza utilizando la misma técnica de modelado y simulación. Dados dos estados discretos consecutivos, el consumo empleado en este tramo se calcula a partir de estimaciones del rendimiento del sistema de tracción en dichos instantes, distinguiendo si el motor trabaja a par constante o a potencia constante. Estos rendimientos se estiman mediante un modelo simplificado del sistema de tracción. Se calcula previamente la curva del rendimiento del motor en función del cociente *par/velocidad* en puntos de par máximo. En cada estado discreto se estima el rendimiento mediante interpolación en esta curva.

El método empleado tiene varias ventajas. En primer lugar permite calcular el consumo cuando el motor trabaja a pares menores que el máximo, debido a que para estos puntos se interpola el valor del rendimiento. Esta característica es especialmente útil, pues los fabricantes suelen proporcionar las curvas características de los motores sólo para par máximo. En segundo lugar no depende del tipo de motor empleado (de continua o alterna), ya que el modelo simplificado emplea expresiones generales válidas para cualquier motor. Por último, el método se integra en el modelo de simulación por eventos discretos que se propone. Para poder realizar cálculos de consumo entre dos estados discretos es suficiente que dichos estados almacenen dos constantes más, que definen la recta de par del motor en este tramo.

El modelo de consumo que se propone no es suficientemente detallado para ser empleado en estudios eléctricos del sistema. Considera constante la tensión de red, y no modela el comportamiento interno del equipo de control de tracción ni de las subestaciones. Sin embargo es suficiente para el tipo de aplicaciones consideradas, donde el consumo interviene como un atributo que ayuda en la selección de buenos diseños o estrategias de control.

Nota bibliográfica:

En [Mellit et al, 78] se describe un simulador de tráfico detallado del sistema eléctrico completo de sistemas ferroviarios de corriente continua, empleado para estudios de ampliación de la red. En [Chang et al, 93] se describe un simulador de tráfico que modela con detalle la red y las subestaciones, que se utiliza para generar estrategias de regulación en caso de faltas mediante técnicas de control borroso.

1.1.2 Aplicaciones de la técnica de simulación propuesta

En la Parte I se presentan tres herramientas CAD de ayuda al diseño de la explotación basadas en simulación del movimiento de un tren.

La herramienta PACA calcula el movimiento nominal y el consumo de un tren considerando el sistema de conducción automática (ATO, *Automatic Train Operation*) más común. Se utiliza un modelo de línea cerrada, donde los trenes cambian de sentido en las estaciones cabecera. Los sistemas de protección que se

contemplan son los distintos tipos de señalización basados en circuitos de circuitos de vía y señales, y el sistema *moving-block*.

El diseñador propone las características del sistema de protección y las consignas de conducción ATO para cada interestación, y la herramienta evalúa el diseño calculando el intervalo mínimo de circulación y otros datos de interés para el diseñador. Se presentan estos datos en un interfaz gráfico, junto con las curvas de movimiento del tren.

Se presentan dos herramientas CAD para diseñar la conducción en una interestación. La primera considera los parámetros que definen la conducción automática ATO utilizada típicamente en ferrocarriles metropolitanos. La segunda es una conducción continua sin restringir. El diseñador propone un tiempo objetivo y otros parámetros relacionados con la conducción, como el tiempo mínimo de duración de cada consigna de tracción. La herramienta realiza una búsqueda automática, devolviendo una o varias soluciones. El criterio fundamental en esta optimización es el de mínimo consumo. El método de optimización empleado es la Optimización Estructurada Multiatributo propuesta en [Cuadra, 90]. Esta metodología es muy apropiada por las características del problema y requisitos de tiempo de cálculo.

1.2 Parte II. Movimiento de trenes en una línea cerrada

El uso de modelos analíticos y de simulación del tráfico de trenes está ampliamente extendido en aplicaciones ferroviarias. Los simuladores son utilizados en el diseño de los horarios, como bancos de prueba de estrategias de regulación y formando parte de sistemas de regulación en tiempo real. Algunos simuladores incluyen la parte eléctrica del sistema, resultando especialmente útiles en estudios de ampliación de líneas. Los modelos analíticos del tráfico de trenes son utilizados para la obtención de algoritmos de control y en programas de optimización de horarios.

El problema de simulación de tráfico ferroviario se puede jerarquizar en dos niveles. El primer nivel lo constituye el problema del movimiento de un sólo tren conocidas las características físicas de la vía, las características de tracción del tren y el estado de la señalización que afecta a su movimiento. El segundo nivel gestiona la evolución del sistema completo, incluyendo a todos los trenes que circulan en la línea, la señalización y las consignas de regulación. También debe tener en cuenta la influencia que los viajeros ejercen en el sistema, modificando los tiempos de parada de los trenes en las estaciones.

En la Parte I de este trabajo se propone un modelo y una técnica de simulación para el problema del movimiento de un tren para los tipos de protección más habituales. La Parte II se centra en la construcción de un simulador detallado de tráfico en una

línea cerrada para ser utilizado como banco de pruebas de estrategias de regulación. Este simulador utiliza las técnicas de simulación de un tren y el modelo de representación del movimiento obtenidos en la Parte I. En la Parte III se presenta un modelo de simulación de tráfico simplificado, que forma parte del regulador automático para generar y evaluar en tiempo real el resultado de aplicar estrategias alternativas de regulación.

1.2.1 Trabajos previos

Se distinguen dos tipos de modelos de tráfico de trenes en sistemas ferroviarios, los analíticos y los modelos de simulación. Los modelos analíticos tienen la ventaja de que permiten el uso de determinadas técnicas de optimización y control. Los modelos de simulación son necesarios cuando se precisa un nivel de detalle mayor, para tener en cuenta por ejemplo los sistemas de protección.

Los modelos analíticos de la evolución del tráfico en una línea se pueden clasificar en continuos y basados en eventos. En [Levine & Athans, 66] y [Peppard & Gourishankar, 70] se proponen modelos continuos integrando la ecuación del movimiento de los trenes. Fueron empleados en control óptimo, pero su aplicación práctica es muy limitada al no tener en cuenta las paradas en estación. En [Cury et al, 80] se propone un modelo por eventos discretos que sólo considera los instantes de salida de estación, que fue utilizado para generar horarios óptimos. En [Campion et al, 85, 86] se presenta un modelo lineal basado en eventos de la evolución del tráfico en una línea cerrada, considerando también sólo instantes de salida de estación. Campion propone una representación en variables de estado del sistema apropiada para control óptimo.

Los modelos de simulación pueden ser por tiempo discreto o por eventos discretos ([Banks & Carson, 84]). En los primeros el estado del sistema se actualiza a intervalos fijos de tiempo. En los segundos el estado sólo se actualiza cuando se produce un evento que provoque el cambio de alguna variable de estado. Los modelos por eventos discretos son muy apropiados cuando sólo interesan los tiempos de paso de los trenes por determinados puntos de la vía, como las estaciones o los cruces. Los modelos por tiempo discreto son empleados en general en los simuladores más detallados.

La mayoría de los modelos de simulación detallados modelan el sistema de protección automática (ATP, *Automatic Train Protection*) basada en circuitos de vía de señalización. La vía se divide en segmentos, cada uno de los cuales posee una velocidad máxima de circulación en función de la posición de los trenes y del estado de la señalización. Cada vez que un circuito de vía es ocupado o liberado pueden cambiar las velocidades máximas de varios circuitos. Un diseño habitualmente empleado en estos simuladores se basa en un modelo por eventos discretos que sólo

considera los instantes de ocupación y liberación de circuitos y las paradas en estación. Los tiempos de recorrido entre estos instantes son calculados por distintos métodos según el nivel de detalle.

En [Lidén, 93] se emplea el diseño anterior, utilizando un simulador detallado a tiempo discreto para calcular *off-line* los tiempos de recorrido. El simulador se emplea para estudios de ampliación en los ferrocarriles suecos.

En [Casalino et al, 89] y [Boccalatte et al, 93] se emplea el mismo esquema, calculando los tiempos de recorrido por consideraciones cinemáticas sencillas. El primer trabajo se emplea para ensayar estrategias de control y para la simulación de fallos. El segundo se emplea para planificación de la explotación. En [Minciardi et al, 94] se presenta un simulador de movimiento similar, que modela además distintos tipos de perturbaciones puntuales o sistemáticas.

En [Ho, 94] se presenta un modelo de simulación por eventos discretos donde los tiempos de recorrido de cada circuito se tienen precalculados para todos los estados posibles de la señalización. Si antes de que un tren recorra completamente un circuito se produce un cambio de estado que afecta al circuito que ocupa, se interpola el tiempo de recorrido a partir de los tiempos de recorrido anterior y posterior al cambio. Este método, junto a una representación adecuada en variables de estado, permite emplear el modelo en algoritmos de control en tiempo real.

En planificación de la explotación, donde la velocidad de simulación no es decisiva, se emplean simuladores construidos por completo a tiempo discreto ([Brunner, 94], [Mc Guire & Linder, 94]). A cada paso de simulación se actualizan la posición de los trenes y el estado de la señalización. Los simuladores que modelan con detalle el comportamiento de la red eléctrica y las subestaciones están habitualmente diseñados a tiempo discreto ([Mellit et al, 78], [Chang et al, 93]), actualizando a cada paso también las variables eléctricas.

En [Ho et al, 89] se propone integrar en el simulador un sistema experto que gestione las reglas que definen el comportamiento del sistema de protección empleado. De esta forma se pretende simular fácilmente distintos tipos de sistemas de protección, generando las reglas de cada sistema de protección en particular. Este simulador está basado en el propuesto en [Mellit et al, 78].

En [Komaya, 91] se presenta un simulador de tráfico por eventos discretos que aprovecha las estrategias que usan los expertos para generar y evaluar horarios. Se trata de generar un conjunto de reglas que guíen la simulación para evitar cálculos innecesarios para evaluar horarios, aumentando así la velocidad de simulación. Este simulador se utiliza para asistir al operador cuando es necesario crear nuevos horarios en tiempo real debido a incidencias en el servicio.

En cuanto a simulación de las paradas en estación, existen básicamente dos enfoques. El primero trata explícitamente el número de viajeros presentes en la estación y en el

tren durante el proceso de carga y descarga. El tiempo de parada se supone proporcional al total de este pasaje, más un tiempo fijo. Este modelo fue el utilizado en estudios en el metro de París ([Guieysse, 70]) y en los simuladores que modelan el pasaje ([Chang & Thia, 95]). El segundo enfoque supone el tiempo de parada proporcional al intervalo de circulación entre trenes más un tiempo fijo. Este modelo fue propuesto en [Welding & Day, 65] y reformulado en [Sasama & Okhawa, 83], identificando el tiempo fijo como el tiempo mínimo de parada en ausencia de pasaje. Este último es el modelo de parada utilizado en la mayoría de los simuladores.

1.2.2 Enfoque propuesto

El objetivo es desarrollar un simulador de tráfico de líneas cerradas que refleje fielmente el efecto de los sistemas de protección, para estudiar el comportamiento del sistema en situaciones muy desequilibradas. Se consideran los sistemas de protección basados en circuitos de vía, con distintas variantes.

Por otro lado, es necesario simular con detalle los tiempos de parada en estación, modelando explícitamente el número de viajeros en cada estación y a bordo de los trenes. Se definirán escenarios alternativos de viajeros, que determinan el ritmo de afluencia de viajeros a cada estación y su distribución por estaciones en función del tiempo. Permiten estudiar el comportamiento del sistema ante escenarios típicos de hora punta y de hora valle, o de líneas con estaciones céntricas con más viajeros que el resto. También permiten simular perturbaciones debidas al pasaje, producidas por flujos de viajeros anormalmente altos en determinadas estaciones mantenidos durante un cierto tiempo.

Se requiere una velocidad de simulación elevada y variable. Con ello se facilita la realización de las pruebas de regulación, y el estudio de los límites de respuesta de los algoritmos.

Los simuladores construidos por completo a tiempo discreto son en general suficientemente precisos, pero demasiado lentos. Los simuladores que gestionan las interacciones entre trenes por eventos discretos son más rápidos, y su precisión depende del método de cálculo de los tiempos de recorrido de cada tren. Estos simuladores almacenan explícitamente el estado de las protecciones, que se actualiza cada vez que un tren ocupa o libera un circuito de vía. Sin embargo esta técnica presenta algunos inconvenientes:

- En cada ciclo del bucle de eventos, la simulación del movimiento de un tren se extiende como máximo hasta que el tren ocupa o libera un circuito de vía, momento en que se genera un nuevo evento. En líneas en que el número de trenes es alto y el tamaño de los circuitos de vía es pequeño, el número de eventos

generados es considerable, y la longitud del tramo simulado de un tren en cada ciclo es muy corto.

- El método exige en principio actualizar el estado completo de las protecciones (códigos de velocidad de los circuitos de vía, estado de las señales) tras cada evento, aunque no lleguen a afectar al movimiento de ningún tren.
- La gestión de eventos se complica si se simula con detalle el comportamiento de un tren ante cambios en la señalización que afectan al circuito de vía que está siendo recorrido. Es necesario recurrir a eventos condicionados que reconsideren la conducción del tren si el cambio de estado de la señalización afecta a un tiempo de recorrido ya calculado. Estas situaciones son frecuentes cuando el sistema está desequilibrado, sobre todo en líneas metropolitanas donde el intervalo de circulación está cerca del intervalo mínimo que imponen las protecciones.

Se propone aquí un método de simulación para mejorar la rapidez de los simuladores clásicos de tráfico por eventos discretos. Las ideas básicas son dos. La primera es no almacenar el estado de las protecciones explícitamente, sino a través de las simulaciones de los trenes que las disparan. La segunda es simular en cada ciclo el movimiento de un tren hasta donde la incertidumbre del estado de las protecciones que le afectan lo permite. Si es posible simular a un tren durante un período de tiempo amplio, provoca que el tren que le sigue también pueda ser simulado otro período al menos igual de amplio. Se genera así una cadena circular que permite descomponer el problema en simulaciones de un solo tren durante largos períodos de tiempo. El simulador se estructura en dos niveles:

- El simulador de línea resuelve el problema de las interacciones entre los trenes, decidiendo qué tren debe ser simulado en cada ciclo de simulación y hasta cuándo.
- El simulador de tren se encarga de calcular el movimiento de un tren durante un período de tiempo, conocido el estado de los sistemas de protección que le afectan durante este tiempo. Este simulador es fundamentalmente el descrito en la Parte I.

Para gestionar de manera eficiente la historia de un tren, y obtener rápidamente el estado de las protecciones que afectan al tren que le sigue, se emplean los modelos de simulación y técnicas desarrolladas en la Parte I.

El método propuesto aprovecha el tipo de dependencias circulares que existen entre los trenes en líneas cerradas. Queda para futuros desarrollos extender la aplicación de estas técnicas a sistemas ferroviarios con distintas topologías.

1.3 Parte III. Regulación de tráfico de una línea cerrada

Los sistemas ferroviarios se pueden dividir en dos tipos, aquellos cuya vía puede ser modelada topológicamente como una línea cerrada y los que poseen una topología compleja. Los primeros son habitualmente líneas metropolitanas, donde los trenes recorren periódicamente la línea como un carrusel. No existen por tanto problemas de cruces con trenes que realizan otros servicios, y los sistemas de seguridad se limitan a evitar que un tren alcance al que le precede. Los sistemas ferroviarios que poseen una topología compleja se describen en general como una red cuyos nudos son cruces de vía. Sobre esta red circulan trenes de diferentes servicios, cuya seguridad en los nodos se asegura mediante los sistemas de protección.

Control en redes de topología compleja

En redes ferroviarias de topología compleja el tráfico de trenes viene determinado en general por un horario de paso de cada tren por cada estación y cada nodo de la red. Cuando se produce una perturbación, por ejemplo el retraso de un tren, puede generar conflictos con otros trenes al atravesar los próximos nodos de la red. Como resultado, el tren retrasado puede aumentar su retraso, o perturbar a otros trenes que de nuevo pueden crear nuevos conflictos. Si un tren se retrasa lo suficiente puede además perturbar el movimiento del tren que le sigue, al tener que frenar por seguridad. Muchos sistemas ferroviarios incorporan sistemas de enrutamiento automático o semi-automático ARS (*Automatic Route Setting*) que deciden el orden de paso de trenes en los nodos ([British Rail, 84], [Beadle, 1990]). Estos sistemas utilizan reglas sencillas, que no son suficientes para solucionar conflictos importantes. Para resolver estos problemas se han propuesto distintos sistemas de control y ayuda a la decisión, basados en algoritmos de optimización de los retrasos ([Al-Khalili, 85], [Kashani & Saridis, 83], [Ho, 94]), basados en reglas ([Lagana, 87], [Clymer et al, 92]), o en lógica borrosa ([Chang & Thia, 95]). Sin embargo, el gran número de factores que intervienen en determinados conflictos hacen difícil la automatización completa de la decisión. La mayoría de las herramientas de ayuda a la regulación de uso comercial integran distintos módulos de optimización y simulación, que ante una perturbación severa proponen un nuevo horario de circulación, o predicen el resultado de estrategias propuestas por el operador ([Bienfait & Franckart, 91]).

Control en líneas de topología cerrada

En líneas de topología cerrada el objetivo es respetar un horario de paso de trenes por estaciones o un intervalo de circulación. Debido a que en este tipo de sistemas los trenes circulan a un intervalo pequeño, el retraso de un tren se transmite con facilidad al que le sigue, al hacerle frenar por seguridad. Por otro lado, los trenes retrasados tienden a aumentar su retraso, debido a que encuentran más viajeros en la siguiente estación obligando a aumentar el tiempo de parada en estación. El resultado de una

perturbación si no se aplican medidas de control es que los trenes circulan a intervalos irregulares, abriéndose un hueco delante de los trenes retrasados, que son seguidos por otros trenes a corta distancia. Además de retrasos, se produce un reparto desigual de viajeros tanto en trenes como en estaciones, que dificulta la normalización del servicio y disminuye la velocidad comercial de la línea.

Existen ferrocarriles de topología compleja que por su densidad de tráfico poseen, además del problema de control de tráfico en los nodos, problemas de regularidad de horario o intervalo para cada tipo de servicio que recorre la red. Este es el caso por ejemplo del metro de Londres y de otras ciudades ([Taskin et al, 94]), o de muchos ferrocarriles de cercanías.

Las acciones de control habituales en líneas cerradas consisten en retener a los trenes en estación o modificar su velocidad. Si la perturbación es severa otras medidas son incorporar o retirar trenes, o realizar un cambio de sentido de circulación de ciertos trenes antes de alcanzar las estaciones terminales. Las líneas metropolitanas de alta ocupación se pueden considerar sistemas continuamente perturbados, que precisan de frecuentes acciones correctoras para evitar que el tráfico se degrade. En estas líneas se tiende hacia una automatización completa de estas labores, dejando al operador la supervisión de los programas de regulación de tráfico. En caso de incidencia grave en el servicio es el operador quien decide maniobras como la incorporación o retirada de trenes, utilizando o no programas de ayuda a la decisión. En [Benoit & Wajsbro, 89] se propone un entorno abierto basado en simulación donde integrar herramientas de análisis, regulación automática de intervalo u horario y programas de ayuda a la decisión.

Los objetivos de control de este trabajo se centran en la regulación automática del tráfico en líneas cerradas. Las acciones de control que se consideran son retenciones en estación y modificación de la marcha de los trenes.

1.3.1 Trabajos previos

Existen dos enfoques básicos en la construcción de reguladores de tráfico en líneas cerradas. El primero está basado en la detección y análisis del tipo de perturbación producida, para aplicar una estrategia correctora prediseñada cuando la perturbación supera cierto umbral. Se pueden considerar reguladores en lazo abierto. El segundo enfoque considera que la línea se encuentra continuamente perturbada, y es necesario un regulador en lazo cerrado que mantenga la línea en equilibrio o la lleve de manera adecuada a este estado.

Reguladores en lazo abierto

Tratan básicamente el problema de la recuperación de un retraso puntual, considerando el resto de la línea en equilibrio. En [Tiercin, 64] se propone que si el retraso supera cierto umbral es necesario retener a los trenes anteriores al retrasado, alcanzando un nuevo intervalo de circulación mayor que el nominal. Posteriormente los trenes deben aumentar su velocidad para recuperar este intervalo. De esta forma se evita que el tren retrasado empeore su situación al encontrar más viajeros en las estaciones.

En [Mapey & Paulignan, 76] se propone un regulador basado en este principio, que se ocupa además de retrasar a los trenes que siguen al retrasado para evitar que se disparen los sistemas de protección.

En [Gill, 86] se estudia con detalle la propagación de un retraso puntual al resto de los trenes, mostrando que el sistema es más inestable cuanto más cercano está el intervalo de circulación al mínimo que marcan los sistemas de protección. En [Chua, 86] se continúan estos estudios, proponiendo un sistema de control basado en zonas de regulación. En una primera zona se retrasan trenes para permitir el reparto adecuado de viajeros en los distintos trenes, en una segunda zona se evita que se disparen los sistemas de protección de los trenes que siguen al retrasado, y en una tercera zona se recupera el tiempo perdido.

En [Casalino et al, 89] se distingue entre tres tipos de perturbaciones, que llevan a tres tipos de estrategias de control. Los retrasos ligeros pueden ser recuperados simplemente aumentando la velocidad del tren implicado. Cuando el retraso supera cierto umbral es necesario regular por intervalo a los trenes alrededor del implicado, como se estudia en [Chua, 86]. Si el retraso es tal que no puede ser recuperado con estas estrategias, es necesario crear un nuevo horario de circulación de trenes compatible con la nueva situación.

Este tipo de reguladores presenta claros inconvenientes:

- No resuelven de manera satisfactoria el problema de múltiples retrasos. Además es posible la aparición de nuevas perturbaciones que afecten a los trenes que están siendo regulados.
- Sólo disparan sus algoritmos de regulación cuando la perturbación alcanza cierto umbral. Si los retrasos pequeños fueran también corregidos se podría evitar que aumentaran, evitando medidas más severas.
- No llevan el sistema a un punto de equilibrio de intervalos desde cualquier situación inicial. En regulación por horario no es posible recuperar los retrasos del sistema si éstos son elevados, pero en ferrocarriles donde se realiza explotación por intervalo siempre es posible alcanzar un punto de equilibrio. Por ejemplo

cuando cambia el número de trenes en línea es necesario regular a los trenes para encontrar un nuevo estado estacionario.

Estrategias en lazo cerrado

Los trabajos realizados dentro del segundo enfoque están basados en teoría de control óptimo. En [Levine & Athans, 66], [Melzer & Kuo, 71], [Chu, 74] y [Yoshikawa et al, 83] se emplean modelos continuos del movimiento de trenes, que no tienen en cuenta las paradas de los trenes en las estaciones. Estos reguladores necesitan además conocer la posición y velocidad del tren en todo instante.

Los resultados más interesantes desde el punto de vista de su aplicación práctica han sido obtenidos por G. Campion, V. Van Breusegen y G. Bastin, en trabajos realizados para el metro de Bruselas ([Campion et al, 85, 86], [Breusegem et al, 87, 88, 89, 91]). Este grupo ha desarrollado un modelo lineal basado en eventos de la evolución del tráfico en una línea cerrada, que sólo tiene en cuenta los instantes de salida de los trenes de estaciones. A partir de este modelo han demostrado la inestabilidad del sistema, y encontrado algoritmos sencillos de regulación aplicando control óptimo cuadrático. A diferencia de los modelos de movimiento en lazo abierto, el modelo propuesto en [Campion et al, 85] no tiene en cuenta las no linealidades del sistema, principalmente las actuaciones de los sistemas de protección y la saturación de las acciones de control. Demuestran la estabilidad y robustez del control ensayándolo frente a simuladores que sí tienen en cuenta estas no linealidades. En [Campion et al, 86] se amplía el modelo para tener en cuenta características particulares del cambio de sentido de los trenes en estaciones terminales. En [Breusegem et al, 87] se emplea la misma técnica de control óptimo para resolver el problema de llevar el sistema desde cualquier situación inicial hasta un punto de equilibrio con intervalos regulares.

La principal ventaja del regulador automático propuesto por Campion es la sencillez de aplicación de la ley de control resultante. Calcula la corrección a aplicar a un tren como combinación lineal de retrasos ya medidos o próximos fácilmente estimables. La función objetivo incluye un sumando que penaliza el error de horario, y otro que penaliza el error de intervalo. Mediante la importancia dada a sumando se obtienen distintos tipos de regulación, que permite adaptar el regulador a distintos tipos de explotación o distintos tipos de comportamientos deseados. Este regulador también presenta sin embargo importantes inconvenientes:

- Al no tener en cuenta las capacidades reales de recuperación de tiempo de los trenes (que suelen ser muy limitadas) no encuentra estrategias de regulación realmente óptimas, que calculen cuánto tiempo han de ser retenidos unos trenes conocida la capacidad de recuperación real de los trenes retrasados. Este inconveniente es importante cuando se produce una perturbación severa, o cuando se trata de llevar al sistema a un equilibrio por intervalo desde una situación inicial arbitraria.

- Al no tener en cuenta la actuación de los sistemas de protección puede provocar frecuentes disparos de los mismos, produciendo incomodidad a los viajeros y disminución del nivel de seguridad por aumento de la probabilidad de fallo. Se pueden generar además estrategias de control claramente ineficientes desde el punto de vista del ahorro de energía. Es posible por ejemplo que se aumente la velocidad de un tren que va a ser detenido por la señalización en la estación siguiente.
- No es posible añadir fácilmente a la función objetivo nuevos términos para tener en cuenta otros factores, como por ejemplo el coste energético real de las estrategias de regulación o índices de molestia al pasaje por retenciones en estación.
- El modelo del sistema es lineal, lo que limita las posibilidades de tener en cuenta características particulares de cada sistema que pudieran mejorar la calidad de la regulación. Por ejemplo no puede distinguir y valorar de forma diferente consignas de regulación que hacen perder tiempo a los trenes disminuyendo su velocidad o reteniendo a los trenes en las estaciones.

1.3.2 Enfoque propuesto

Se propone un regulador automático del tráfico de trenes en una línea cerrada válido para los distintos tipos de explotación: por horario, por intervalo o mixto (intervalo más horario en determinadas estaciones). Las consignas de control consideradas son retener a los trenes en las estaciones y modificar la velocidad de los trenes. Ante incidencias graves en el servicio es responsabilidad del operador tomar otras medidas, como incorporar o retirar trenes. Los objetivos del regulador son los siguientes:

- Control de pequeña perturbación. Pretende mantener a la línea en equilibrio, eliminando los retrasos o adelantos que se producen continuamente.
- Control de gran perturbación. Dada cualquier distribución inicial de trenes en línea, se pretende llevar el sistema a las condiciones de equilibrio de manera adecuada. En explotación por horario sólo es posible alcanzar este equilibrio si los retrasos no son muy grandes.
- Minimizar la molestia a los viajeros. Se trata de que las molestias ocasionadas por las estrategias de regulación repercutan lo menos posible sobre los viajeros. Estas molestias se deben a falta de regularidad durante la regulación y sobre todo a retener a los trenes en las estaciones.

- Minimizar el consumo de energía. Cada estrategia de regulación lleva asociada unos costes energéticos, que deben ser valorados frente a los beneficios en regularidad que provoca. Distintas estrategias pueden llevar a un grado de regularidad similar. Uno de los criterios de elección en este caso es el de mínimo consumo.

En el recorrido entre cada dos estaciones se dispone de un conjunto de marchas alternativas, cada una de ellas con un tiempo y un consumo asociados. Estas marchas son aplicadas por el equipo de conducción automática del tren (ATO), y son diseñadas *off-line* con criterios de optimalidad del consumo y comodidad del pasaje.

Cada vez que un tren sale de una estación recibe del regulador a través de una baliza la marcha seleccionada. Si el regulador decide retener al tren en una estación, indica al conductor mediante un cartel el instante concreto de salida. La conducción de los trenes es automática excepto el arranque del tren, que lo decide el conductor a la vista de las indicaciones del cartel y del estado del proceso de carga y descarga de pasaje. Este es el mecanismo de actuación del regulador desarrollado en la línea metropolitana en que ha sido instalado. En otros ferrocarriles pueden cambiar los instantes de envío de consignas de conducción o la forma de indicar al conductor la salida de estación.

El sistema de regulación propuesto se basa en un modelo de simulación simplificado que incluye las principales no linealidades del sistema. Este simulador permite la evaluación de diferentes estrategias de regulación, a partir del estado actual del sistema y su evolución estimada. Para evaluar y comparar las distintas estrategias se emplea una función objetivo, que tiene en cuenta el grado de regularidad alcanzado y el transitorio, en términos de molestia al pasaje y consumo de energía.

Dado el estado actual del sistema y un horizonte de tiempo, se plantea una optimización en tiempo real de las consignas de conducción hasta dicho horizonte temporal. El principal problema que presenta esta técnica es el tiempo de cálculo que precisa el algoritmo de optimización, especialmente por utilizar un modelo de simulación como evaluador. Este problema ha sido resuelto mediante el uso de las siguientes técnicas:

- Diseño jerárquico del sistema de control en tres niveles: el corto, el medio y el largo plazo. El control a medio plazo optimiza los horarios de paso de trenes para las próximas estaciones. El control a corto plazo de respuesta rápida calcula las consignas concretas de conducción adecuadas para seguir el horario del medio plazo. El control a largo plazo lo constituye el operador del sistema, que elige el modo de regulación y distintos parámetros.
- Diseño estructurado por etapas del algoritmo de optimización. Se emplea el mismo enfoque por búsqueda directa que el utilizado para optimización de diseño de la explotación en la Parte I ([Cuadra, 90]). La estructuración en etapas y la

selección de variables independientes es ahora decisiva para encontrar soluciones buenas en tiempos cortos, en general menores de un minuto.

- Adaptación de parámetros del modelo de simulación. Algunos de los parámetros del modelo de simulación son estimados en tiempo real a partir de medidas. Este mecanismo permite una precisión aceptable del simulador sin necesidad de utilizar un modelo más complicado y lento que tuviera en cuenta las causas de la variación de los parámetros.

El modelo de simulación está basado en eventos discretos, considerando sólo los instantes de entrada y salida de cada tren por cada estación. Es sencillo y rápido, y además tiene en cuenta las principales no linealidades del sistema: los sistemas de protección, la saturación del mando y la saturación de los tiempos de parada en estación.

- Los sistemas de protección se simulan imponiendo un intervalo mínimo de circulación entre dos salidas o entradas consecutivas a la misma estación, dependiendo del tipo de señalización empleada.
- Cuando el mando ordena una pérdida de tiempo en una estación el simulador la ejecuta mediante una marcha lenta. Si no es suficiente se aplica una retención en estación, que se satura en un límite máximo fijado por el operador. Cuando el mando ordena recuperar tiempo el límite lo determina la marcha más rápida.
- El modelo empleado para calcular el tiempo de parada para carga y descarga de pasaje es el propuesto en [Sasama & Okhawa, 83] (ver apartado 1.2.1). Se considera además un tiempo de parada máximo, que depende de la capacidad de carga de los trenes.

La ventaja principal del enfoque propuesto frente a los basados en control óptimo cuadrático es que permite incluir en el modelo características no lineales, que pueden determinar la calidad de las estrategias de regulación cuando los retrasos son apreciables. Además permite adaptar fácilmente el regulador a modos particulares de explotación de un sistema ferroviario en concreto, incluyendo estas características en el modelo de simulación.

Para modificar o ampliar los criterios de optimalidad es suficiente con redefinir la función objetivo. El resto del regulador no se ve alterado. Por ejemplo resulta útil fijar un intervalo objetivo entre dos trenes mayor que el resto si se tiene previsto incluir un nuevo tren entre ellos. El cambio de función objetivo correspondiente lo puede ordenar el operador para facilitar este tipo de maniobras. Otro criterio todavía no ensayado en sistemas reales es el de penalizar que los trenes arranquen de estación simultáneamente, y favorecer que coincidan frenados con arranques. De esta forma la energía que un tren regenera durante su frenado puede ser aprovechada por otro tren en su arranque.

1.4 Estructuración en capítulos

En este apartado se detalla la estructura de cada parte, describiendo brevemente el contenido de los capítulos que las componen. Quedan aparte el capítulo introductorio y el capítulo 16 (conclusiones, aportaciones y futuros desarrollos).

Parte I. Movimiento de un tren

Capítulo 2. Modelado

Se modelan los distintos elementos que intervienen en el movimiento de un tren: características físicas de la vía, sistemas de protección más habituales y equipo de tracción. Se propone un modelo para calcular el consumo de energía, se describen los dos tipos de conducción que se consideran en este trabajo (continua y por vectores de deriva) y, por último, se plantea la ecuación diferencial que rige el movimiento de un tren.

Capítulo 3. Simulación

Se resuelve la ecuación diferencial del movimiento de un tren y se propone la técnica de simulación basada en concatenación de estas soluciones. Se formaliza la simulación mediante un modelo discreto que gestiona los eventos de cambios de características y lógica de conducción y un modelo continuo entre cada dos eventos. Por último, se presenta el diseño completo del simulador de movimiento de un tren, y se resuelve el problema de la simulación de tráfico nominal en una línea cerrada.

Capítulo 4. Análisis de la explotación

En este capítulo se describen las técnicas empleadas para el análisis de los sistemas de protección basadas en la simulación del movimiento de un tren. Se detalla el cálculo del intervalo de mínimo de circulación entre trenes y de los márgenes de tiempo para los distintos tipos de sistemas de protección y en las maniobras de cambio de sentido.

Capítulo 5. Análisis de la conducción óptima

Se proponen dos algoritmos de optimización de la conducción de un tren entre dos estaciones dado un tiempo de recorrido objetivo. El criterio básico es minimizar el consumo de energía del tren. El primer algoritmo es por búsqueda local, y trata el problema de la conducción automática ATO por vectores de deriva. El segundo algoritmo es por búsqueda en árbol, y considera conducción continua.

Capítulo 6. Resultados

Se presentan resultados obtenidos de aplicar las técnicas de simulación y análisis propuestas a una línea real. Se describen las herramientas CAD desarrolladas de ayuda al diseño de la señalización (PACA) y de ayuda al diseño de la conducción (CAT y ALEHOPT). Los gráficos presentados han sido obtenidos con estas herramientas.

Parte II. Movimiento de trenes en una línea cerrada

Capítulo 7. Modelado

Se propone un modelo de evolución del tráfico de trenes en una línea cerrada, que incluye las interacciones entre los trenes debidas a los sistemas de protección y modela los flujos de pasaje. Se definen los escenarios de viajeros, que determinan los flujos de viajeros a las estaciones y su comportamiento a lo largo de una simulación. Estos escenarios se utilizan para simular distintos tipos de perturbaciones.

Capítulo 8. Simulación

Se presenta la técnica de simulación de tráfico de trenes en una línea cerrada. Se formaliza en tres niveles jerárquicos, donde los dos primeros son el nivel de simulación continuo y el discreto del movimiento de un tren descritos en la Parte I. El tercer nivel gestiona las dependencias entre los trenes a través de los sistemas de protección. Se describe con detalle el diseño completo del simulador.

Capítulo 9. Resultados

En este capítulo se presentan resultados de simulación de tráfico de trenes, obtenidos modelando las características de una línea real. Se analizan cuatro casos, correspondientes a dos situaciones iniciales distintas (perturbada y no perturbada) y a dos escenarios de viajeros (equilibrado y no equilibrado). Por último, se describen brevemente las características de la herramienta de simulación PACO, con la que se han obtenido los resultados que se presentan.

Parte III. Regulación de tráfico en una línea cerrada

Capítulo 10. Planteamiento del problema de control

Se describen en primer lugar los distintos tipos de explotación en una línea cerrada (por horario, intervalo o mixta) y las medidas y mandos del sistema. A continuación se describen las fuentes de perturbación, factores a tener en cuenta en el consumo de

energía y el comportamiento del sistema sin regulación. Por último, se detallan los objetivos del sistema de regulación automática que se propone en esta parte.

Capítulo 11. Enfoque del regulador

En este capítulo se describen las ideas básicas del sistema de regulación propuesto: control óptimo basado en simulación, jerarquización en dos lazos de control y adaptación de parámetros. Por último se describen los criterios de optimización que se consideran y su medida. Estos criterios son regularidad de la línea, molestia al viajero y consumo de energía.

Capítulo 12. Modelado y diseño del sistema de control

Se presenta en primer lugar un modelo discreto de simulación rápida, empleado para simular futuros alternativos. A continuación se describe el diseño del regulador, detallando los dos lazos anidados control, el medio y el corto plazo. Por último, se describe el algoritmo de estimación utilizado para adaptar los parámetros del sistema.

Capítulo 13. Optimización de trayectorias

En este capítulo se describe el algoritmo de optimización utilizado por el control a medio plazo para calcular las trayectorias de tiempos de referencia de cada tren por cada estación. Se detalla la función objetivo, la técnica de generación de soluciones posibles y las fases de optimización en que se descompone la búsqueda.

Capítulo 14. Modelo estocástico del error de seguimiento

Se considera un modelo estocástico del movimiento de un tren a lo largo de un plan de regulación, para estudiar la propagación de errores de seguimiento de la trayectoria de referencia. Se obtendrá una estimación de la desviación típica del error de seguimiento acumulado en un plan como función del ruido típico en cada estación, del parámetro que determina la inestabilidad del intervalo debido al pasaje y de la capacidad de recuperación de errores del control a corto plazo. El análisis de estos resultados proporcionará una cota superior en la elección del horizonte de optimización del medio plazo, por debajo de la cual los errores de predicción son suficientemente pequeños.

Capítulo 15. Resultados

En este capítulo se presenta en primer lugar un estudio sobre el tipo de planes de regulación que genera el control a medio plazo. Para ello se crean tres casos ejemplo básicos, con distintos tipos y magnitudes de retrasos iniciales. Los ensayos se realizan sobre una línea de pruebas compuesta por 10 estaciones de las mismas características, para facilitar el seguimiento de los ejemplos. Para cada caso se consideran distintos tipos de explotación (horario, intervalo, mixta) y distintos tipos

de línea: normal y en hora punta. A continuación se ensaya el comportamiento global del sistema de regulación ante el simulador detallado de tráfico de trenes descrito en la Parte II. Se utiliza la misma línea real, las mismas situaciones iniciales y los mismos escenarios de viajeros empleados en el capítulo de resultados de simulación. Por último, se describen las características del regulador automático SIRO instalado en Metro de Barcelona.

1. Introducción	1
1.1 Parte I. Movimiento de un tren	2
1.1.1 Enfoque propuesto	3
1.1.2 Aplicaciones de la técnica de simulación propuesta	5
1.2 Parte II. Movimiento de trenes en una línea cerrada	6
1.2.1 Trabajos previos	7
1.2.2 Enfoque propuesto	9
1.3 Parte III. Regulación de tráfico de una línea cerrada	11
1.3.1 Trabajos previos	12
1.3.2 Enfoque propuesto	15
1.4 Estructuración en capítulos	18

Parte I. Movimiento de un tren

2. Modelado

En este capítulo se propone un modelo de la vía, de la topología de línea circular, de los sistemas de protección, de los sistemas de tracción y de la conducción de un tren. A continuación se plantea la ecuación diferencial que rige la dinámica de un tren bajo dicho modelo.

2.1 Modelo de las características físicas de la vía

Las características que se van a asociar a la vía son las siguientes: pendientes, curvas, resistencia del aire y límites civiles de velocidad. El modelo que se propone realiza una división de la vía en tramos para cada característica, tal que en un tramo la característica se describe mediante una constante.

Cada característica es, pues, una función constante a trozos, que se describe en el modelo como una lista de elementos, cada uno de los cuales lleva asociado:

- El espacio de comienzo del tramo, referido al origen del segmento descrito.
- El valor de las constantes que parametrizan la función en el tramo, válida hasta el espacio de comienzo del siguiente tramo.

Pendientes

La vía se divide en tramos tal que en cada uno se aproxima la pendiente por un valor constante (Figura 2.1).

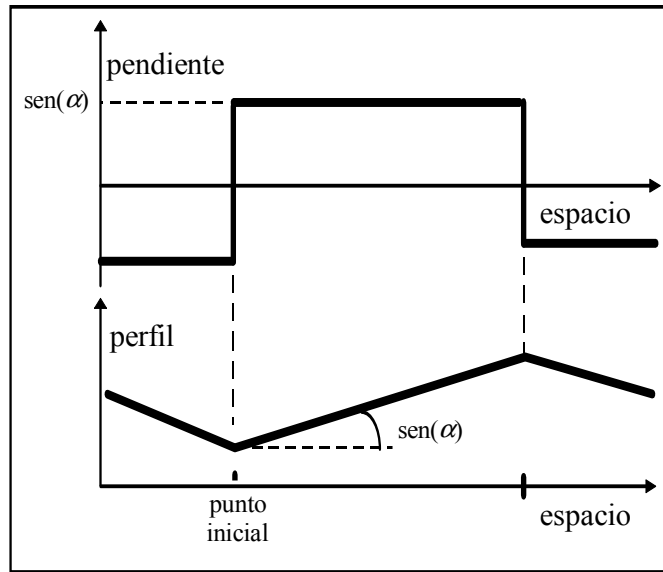


Figura 2.1. Modelado de las pendientes

La pendiente se describe mediante el valor de su seno.

Curvas

Se divide la vía en tramos donde se aproxima la curvatura de la vía por un valor constante. La influencia de esta característica sobre el movimiento del tren es una fuerza de resistencia debido a la fricción rail-rueda, mayor cuanto mayor es la curvatura de la vía y la masa del tren. Para simulación, esta fuerza se modelará como si fuera debida a una pendiente equivalente, mediante la fórmula empírica utilizada en [Hill, 94.a]:

$$p = \frac{D}{1000 \times r}$$

[2.1]

donde:

r : radio en metros

p : pendiente equivalente (seno del ángulo).

D : constante empírica. Se suele tomar igual a 302.54 m

Resistencia al avance

La resistencia al avance se modela en función de la velocidad del tren mediante la fórmula de Lomonosoff:

$$f_r = a + bv + cv^2$$

[2.2]

donde:

- f_r : fuerza resistente
- a, b, c : constantes asociadas al tren
- v : velocidad del tren

Cuando el tren circula por un túnel la resistencia al avance se incrementa. Para modelar este efecto, se divide la vía en tramos de igual característica resistente, y se asocia a cada uno un factor k que multiplica la expresión anterior de la fuerza. Este factor de efecto túnel valdrá la unidad en los tramos en que la vía está al aire libre.

Nota bibliográfica:

En [Hill, 94.a] se describen con detalle las distintas resistencias que se modelan en la fórmula de Lomonosoff.

Límites civiles de velocidad

Se divide la vía en tramos donde es constante el límite de velocidad del tren debido a la obra civil, por motivos de seguridad.

Estos límites de velocidad se tendrán en cuenta en estudios donde el movimiento del tren no está restringido por los sistemas de protección, que introducirían unos límites de velocidad siempre por debajo de los civiles.

2.2 Modelo de línea cerrada

La línea se modela como un segmento de vía cerrado sobre sí mismo, transitable en un sólo sentido. Cada estación está asociada a un punto de la vía, correspondiente al punto espacial de parada de la cabeza del tren en estación. En la Figura 2.2 está representada una línea cerrada de M estaciones.

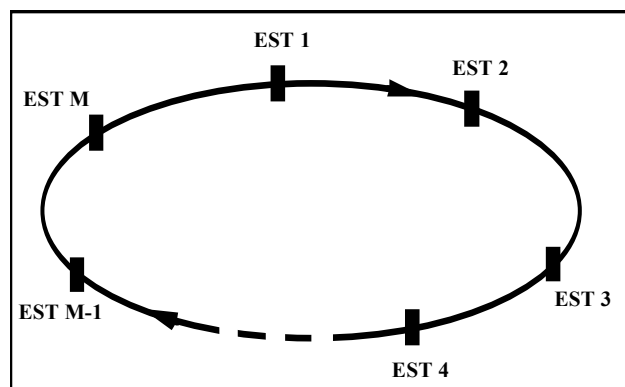


Figura 2.2. Modelo de línea cerrada

El origen de espacios (comienzo del segmento) se puede situar en cualquier punto de la línea, y los espacios crecientes corresponden al sentido de circulación de los trenes.

2.2.1 Sistemas incluidos en el modelo

Los sistemas ferroviarios que se adaptan de manera natural a este modelo son aquellos en que la vía realmente se cierra sobre sí misma; son líneas metropolitanas constituidas por dos vías paralelas independientes, donde cada una proporciona servicio en un sentido. Este sistema se modela como dos líneas distintas, una por cada sentido.

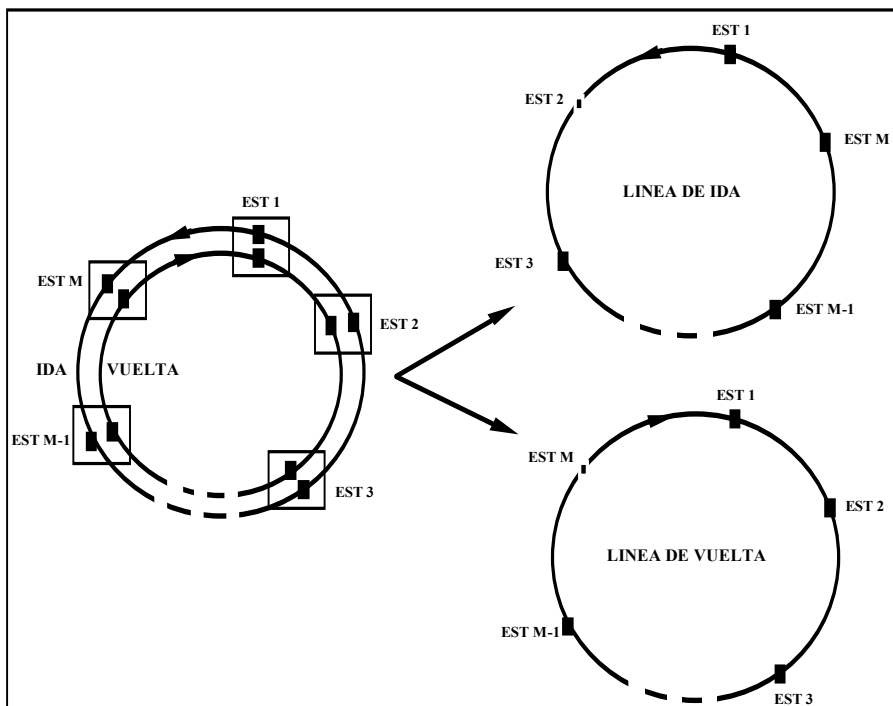


Figura 2.3. Modelado de líneas realmente circulares

En la Figura 2.3, el esquema de la izquierda representa el sistema real, donde los rectángulos agrupan andenes de una misma estación; a la derecha se representan las dos líneas cerradas a que da lugar en el modelo.

La Figura 2.4 representa una línea que da servicio entre dos estaciones terminales. La ida y la vuelta se realizan por vías distintas, cambiando los trenes de sentido de circulación en las estaciones terminales. En esta maniobra se recorre un tramo de vía común a ambos sentidos, debido a la longitud del tren y a las maniobras propias del cambio de sentido.

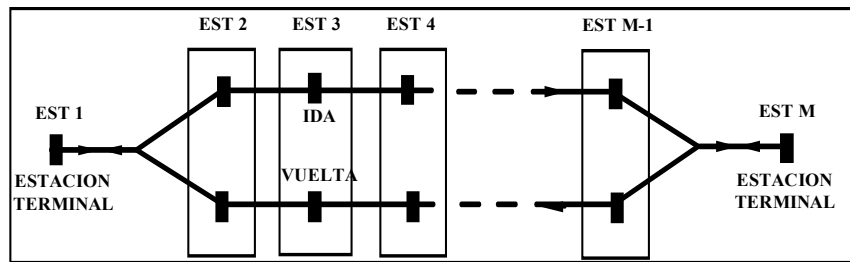


Figura 2.4. Línea entre estaciones terminales

Este sistema también se modela como línea cerrada. Para ello, es necesario desdoblar cada estación intermedia en dos, una por cada sentido. Si en el sistema real hay M estaciones, en el modelo aparecerán $2M-2$. Los segmentos de vía común a ambos sentidos aparecen desdoblados en el modelo (ver Figura 2.5).

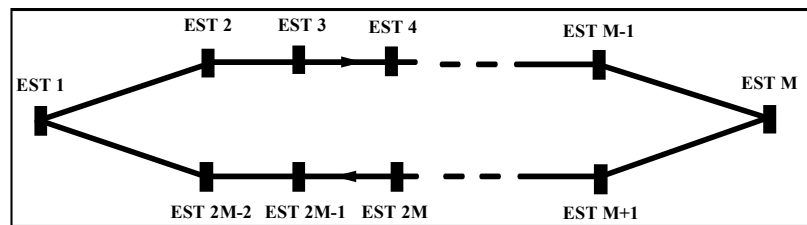


Figura 2.5. Modelado de línea entre estaciones terminales

2.2.2 Modelado de los retornos en estaciones terminales

La maniobra de cambio de sentido de circulación en las estaciones terminales se puede realizar de dos formas:

- Con vuelta por delante; tras efectuar el tren la parada en la estación terminal, efectúa la salida en sentido contrario, cambiando de vía a continuación mediante un cambio de agujas (ver Figura 2.6).

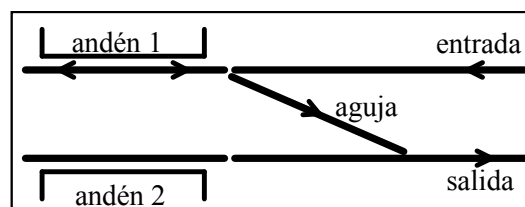


Figura 2.6. Retorno en cabecera con vuelta por delante

- Con vuelta por detrás; tras efectuar el tren la parada en la estación terminal, avanza hacia una prolongación de la línea llamada 'saco'. En este punto el tren se detiene, y avanza en sentido contrario cambiando de vía a continuación. El tren vuelve a parar en la estación terminal, pero en el andén de vuelta (ver Figura 2.7).

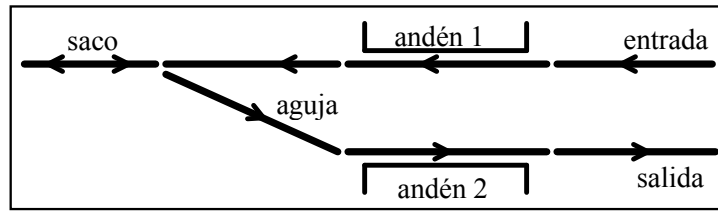


Figura 2.7. Retorno en cabecera con vuelta por detrás

La Figura 2.4 y la Figura 2.5 esquematizan el modelado de una línea cerrada con vuelta por delante. El modelado de una línea con vuelta por detrás se resuelve incluyendo en el modelo una estación ficticia (estación retorno) en cada extremo de línea, que juegan el mismo papel que las estaciones terminales en vuelta por delante. El número de estaciones que aparecen ahora en el modelo es de $2M+2$ (ver Figura 2.8).

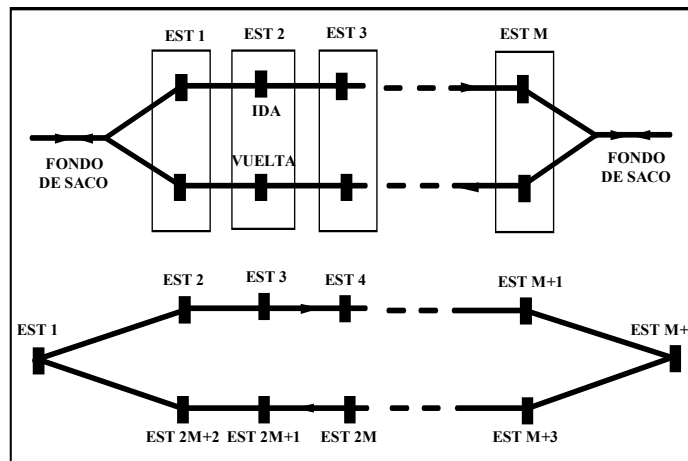


Figura 2.8. Modelado de línea cerrada con vuelta por detrás

2.3 Modelo de los sistemas de protección

El movimiento de un tren por una vía está condicionado por los sistemas de protección, que evitan que el tren dé alcance al que le precede en la línea. Se han modelado cuatro sistemas utilizados en líneas de explotación circular: protección por tramos de señalización, protección mediante el sistema ATP (*Automatic Train Protection*) por circuitos de vía, sistema mixto circuitos de vía - tramos de señalización y el sistema denominado *moving-block*.

El modelado y simulación de estos sistemas se utilizará para dos fines:

- Para el análisis de la explotación de una línea. Se trata de establecer las condiciones óptimas de explotación, determinando el número de trenes, perfiles de

marcha e intervalos nominales entre trenes restringido a que no se disparen los sistemas de protección en funcionamiento. Se definirá para cada sistema de protección este margen de disparo por proximidad de dos trenes.

- b) Para la construcción de un simulador del tráfico real, donde los trenes no circulan en condiciones nominales, y por tanto pueden actuar los sistemas de protección. En este caso no es suficiente con definir el margen de disparo de los sistemas; hay que modelar el comportamiento de los trenes cuando las protecciones están actuando, y definir el instante en que dejan de actuar.

A continuación se describe el modelado de cada tipo de sistema de protección. En las explicaciones, se utiliza la expresión ‘un tren *A* detecta la presencia de un tren *B*’ para indicar que el tren *B* influye en el comportamiento del tren *A*.

2.3.1 Tramos de señalización

En este sistema de protección la vía está dividida en tramos separados por señales luminosas. La misión de estas señales es impedir que circule más de un tren simultáneamente por el mismo tramo, por lo que cuando un tramo está ya ocupado por un tren la señal de entrada a dicho tramo se pone en rojo. Cuando un tren se encuentra con una señal en rojo debe comenzar un proceso de frenado con la suficiente antelación como para no rebasar la señal. Se define una distancia de seguridad D_{seg} que simula el margen que se toma el conductor en el frenado.

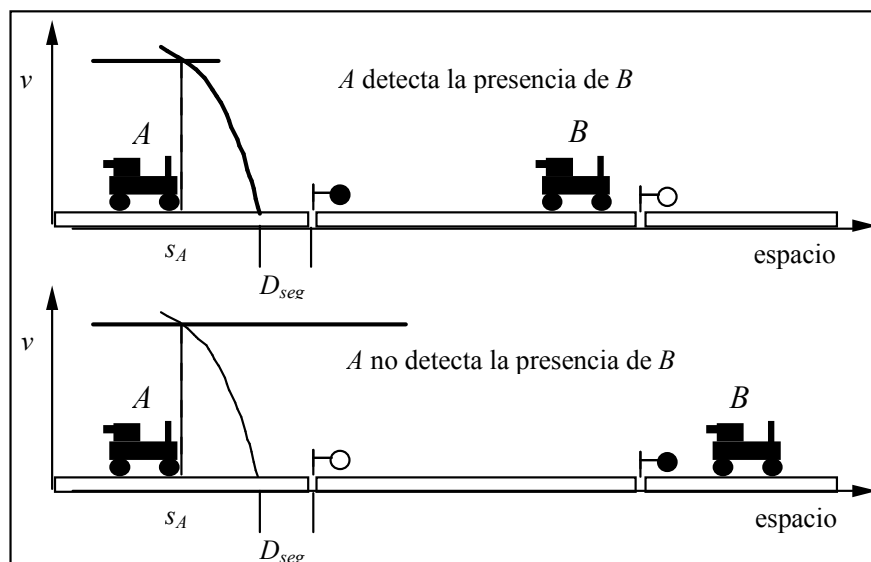


Figura 2.9. Protección por señales

La Figura 2.9 muestra dos tramos de señalización y el efecto de la distancia de seguridad sobre el frenado. En este sistema se considera que un tren *A* no detecta la presencia de un tren anterior *B* cuando para el punto espacial s_A en que *A* debería

comenzar el proceso de frenado, la señal correspondiente a dicho frenado está en verde.

Si llegado el instante de salida de estación existe una señal en rojo a la salida de la misma, el conductor no arrancará hasta que esté verde, y por tanto el instante de detección del tren de delante coincidirá con el instante de salida de estación. Esta diferencia obliga a distinguir entre señales de salida de estación o intermedias.

En el modelo propuesto, el sistema de protección por señales se describe en un segmento vía por la distancia de seguridad y por una lista de tramos, cada uno de los cuales lleva asociado el espacio de comienzo del tramo y el tipo de señal a su entrada (señal tipo *salida* o *intermedia*). La distancia de seguridad se supone igual para todas las señales.

2.3.2 Sistema ATP por circuitos de vía

En este sistema de protección automática la vía se encuentra dividida en tramos de señalización llamados circuitos de vía (*track circuits*). Cada circuito lleva asociado una lista de códigos de velocidad. Cada código consta de dos valores: el primero es la velocidad máxima de circulación del tren en el circuito de vía, y el segundo es la velocidad máxima de salida del circuito. Un ejemplo de un circuito de vía con cuatro códigos de velocidad es:

- 1) 60/60 $V_{\text{máx}} = 60 \text{ km/h}$
- 2) 60/30 $V_{\text{máx}} = 60 \text{ km/h}; \quad V_{\text{máx de salida}} = 30 \text{ km/h}$
- 3) 30/0 $V_{\text{máx}} = 30 \text{ km/h}; \quad \text{No se permite la salida.}$
- 4) 0/0 $\text{No se permite la entrada.}$

En cada circuito de vía el código de velocidad vigente depende del número de circuitos de vía desocupados que haya por delante de él. En el ejemplo anterior, con 0 circuitos desocupados estaría vigente el código 0/0, con 1 circuito desocupado estaría el 30/0, etc. El resultado es que por detrás de un tren determinado aparecen códigos de velocidad cada vez menos restrictivos en los circuitos de vía anteriores.

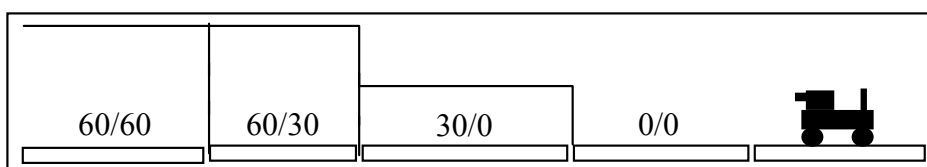


Figura 2.10. Escalera de códigos de velocidad restrictivos

La Figura 2.10 muestra el mecanismo de protección para un conjunto de circuitos de vía en el caso particular en que todos los circuitos tienen asociados los códigos del ejemplo (60/60, 60/30, 30/0, 0/0).

Se considera que un tren *A* en un determinado circuito de vía no detecta la presencia del tren anterior *B* cuando al entrar *A* en dicho circuito el código vigente es el máximo posible (en el caso del ejemplo, 60/60). Es fácil comprobar que si un circuito de vía *C* tiene *N* códigos de velocidad, la condición de “no detección” se reduce a que al entrar un tren *A* en dicho circuito estén desocupados los *N* circuitos por delante del tren *A* (incluido *C*). La Figura 2.11 muestra un caso de no detección y otro en el que sí hay detección.

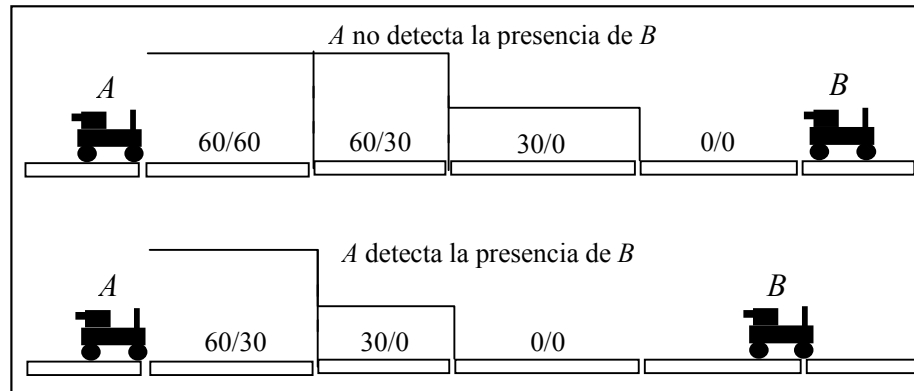


Figura 2.11. Ejemplos de detección ATP por circuitos

En el modelo propuesto, el sistema de protección ATP en un segmento de vía se modela como una lista de tramos (circuitos), cada uno de los cuales se describe mediante su espacio de comienzo y su lista de códigos de velocidad excluyendo el 0/0 (común a todos).

2.3.3 Sistema mixto circuitos de vía y señales

En este sistema de protección la vía se encuentra dividida en circuitos de vía de ATP, a la que se superpone una división por tramos de señalización tal que cada tramo comienza y acaba coincidiendo con circuitos de vía. El sistema mixto es funcionalmente la superposición del sistema ATP por circuitos y el de tramos de señalización, con la particularidad de que en este último sistema el frenado del tren ante una señal en rojo se fuerza mediante una escalera descendente de códigos de velocidad, escalera que permanece vigente todo el tiempo que el tramo señalizado está ocupado.

La Figura 2.12 ilustra cómo un tren va dejando tras de sí unos códigos de velocidad restrictivos, tomando siempre el código más bajo entre el impuesto por el ATP y el impuesto por la ocupación del tramo entre señales. En esta figura también se ha supuesto que todos los circuitos de vía tienen los mismos códigos de velocidad (60/60, 60/30, 30/0, 0/0).

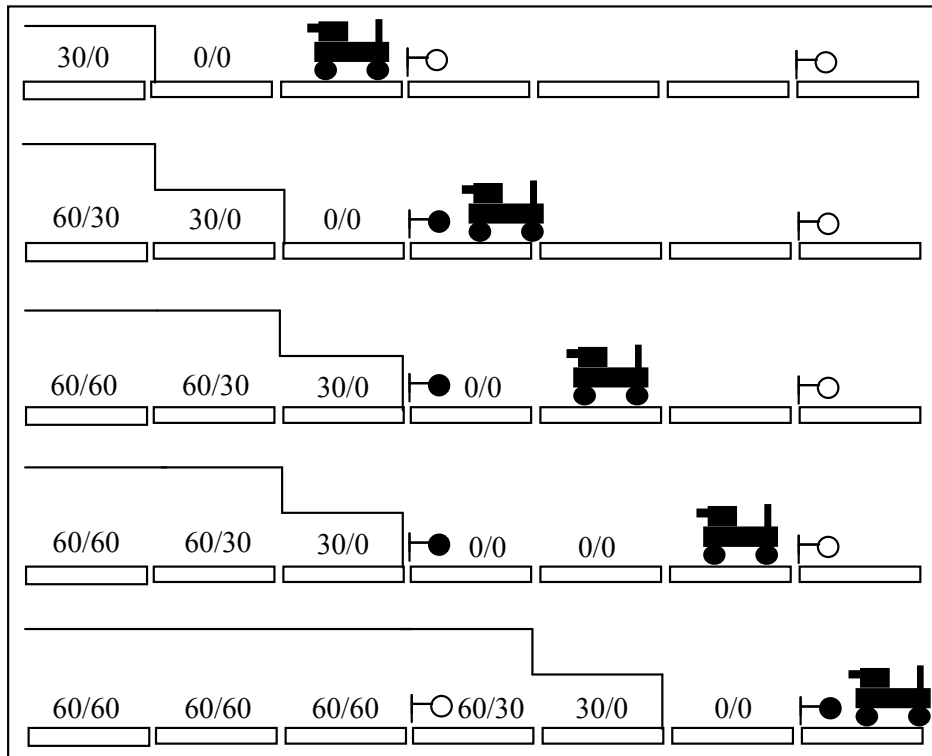


Figura 2.12. Ejemplo de sistema mixto por circuitos y señales

Como en el caso de ATP por circuitos, se considera que un tren A en un determinado circuito de vía no detecta la presencia del tren anterior B cuando al entrar A en dicho circuito el código vigente es el máximo posible (en el caso de la figura, $60/60$).

El sistema mixto ATP por circuitos más tramos de señalización se modela describiendo por separado la partición ATP de la vía (apartado 2.3.2) y la partición por señales (apartado 2.3.1).

2.3.4 Sistema *moving-block*

En este sistema de protección se supone que para cada tren A se conoce de forma continua tanto la posición del tren anterior B como la distancia de frenado de A , es decir, el espacio que A necesita para detenerse por completo.

Se considera que para un punto espacio/tiempo $\{s_A, t\}$ el sistema de protección de A detecta la presencia del tren B cuando (ver Figura 2.13):

$$(s_A + d_A) > (s_B - lon_B - D_{seg})$$

siendo:

- s_A : posición espacial del tren A en el instante t
- d_A : distancia de frenado del tren A en el instante t
- s_B : posición espacial del tren B en el instante t
- lon_B : longitud del tren B
- D_{seg} : distancia de seguridad

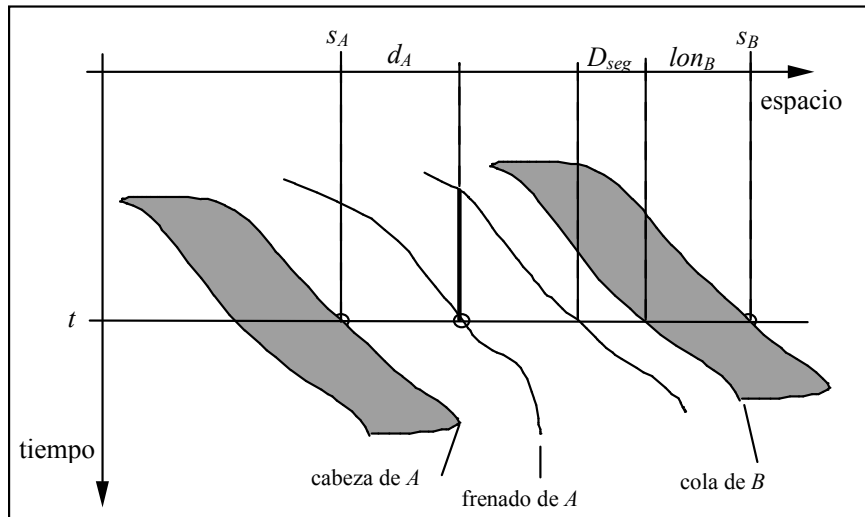


Figura 2.13. Detección por moving-block

Cuando un tren detecta la presencia del tren anterior existe un retraso de los equipos en la aplicación del freno, durante el cual, en el peor de los casos, el tren está acelerando. El efecto es que se incrementa la distancia de frenado de la gráfica anterior con el espacio que recorre el tren acelerando durante este tiempo.

El modelo del sistema de protección *moving-block* queda parametrizado por dos constantes, la distancia de seguridad y el tiempo de retraso en la aplicación del freno.

2.3.5 Modelado de las protecciones en los cambios de sentido

La Figura 2.14 esquematiza la maniobra de cambio de sentido en una estación terminal. El tren avanza desde la estación *EST1* hasta detenerse en la estación *TERMINAL*. A continuación el tren cambia de sentido, y se dirige hacia la estación *EST2* a través del cambio de agujas. La estación *TERMINAL* es una estación real en vueltas por delante, o una estación ficticia introducida en el modelo en vueltas por detrás (ver apartado 2.2.2).

En la Figura 2.15 el cambio de agujas aparece en la vía dos veces, correspondiente a cuando el tren lo cruza a la ida y a la vuelta. El comportamiento del sistema es análogo a la protección por tramos de señalización, definiendo un único tramo acotado por los dos cambios de aguja. Se dispararán las protecciones si al arrancar el

tren *A* el tren *B* está recorriendo dicho tramo, y el instante de detección del tren *B* será cuando el tren *A* arranque de *EST1*.

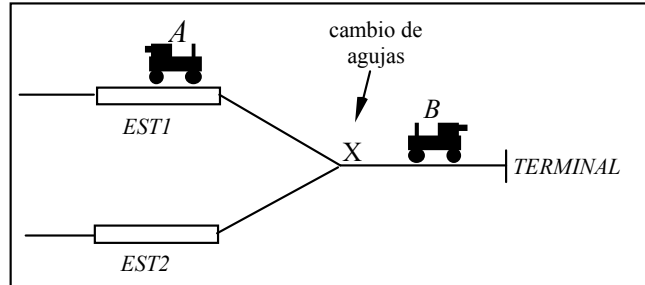


Figura 2.14. Maniobra de cambio de sentido

Para describir el sistema de protección de los retornos en el modelo propuesto, hay que especificar los puntos espaciales en que aparecen los dos cambios de aguja en el modelo desplegado de la vía.

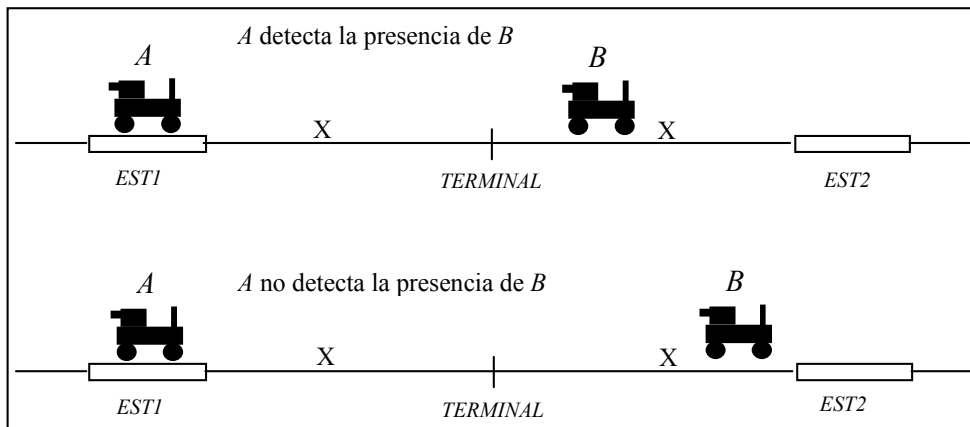


Figura 2.15. Protecciones en cambio de sentido

Otras configuraciones de agujas pueden también modelarse mediante los dos puntos espaciales mencionados: entrada en zona conflictiva y salida de zona conflictiva.

Nota bibliográfica:

En [Howard, 88] se describen aspectos técnicos de la implantación del sistema de protección automática ATP basado en circuitos de vía y su relación con el resto de elementos del sistema.

2.4 Modelo de tracción y de consumo

El sistema de tracción de un tren está compuesto por un conjunto de motores repartidos de forma desigual por los distintos coches. El sistema se modela como un

sólo motor equivalente. En este apartado se presenta el modelo de relación con la red, las curvas características del motor y el modelo de consumo.

2.4.1 Intensidades y tensiones en la red y el motor

Se supone que la red mantiene constante su tensión V_{red} . Al alimentar un tren, circulará una intensidad de red I_{red} ; la potencia consumida será entonces:

$$P = V_{red} \times I_{red}$$

[2.4]

La tensión con que se alimenta el motor está controlada por un dispositivo alimentado por la tensión de red. Es este dispositivo el encargado de guiar el proceso de arranque y de proporcionar la tensión que requiere el motor para mantener el par objetivo (dentro de los límites de potencia del motor).

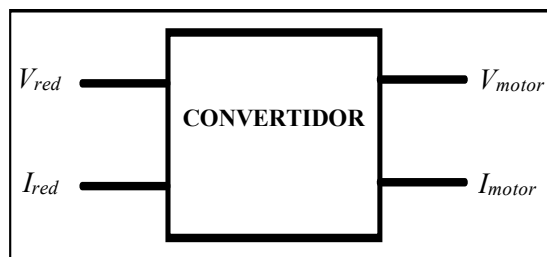


Figura 2.16. Transformación eléctrica red-motor

Nota bibliográfica:

En [Hill, 94.a] se describen los convertidores más comunes empleados para controlar la alimentación de motores de continua. Se detallan distintas configuraciones para tracción, frenado y frenado regenerativo. En [Hill, 94.b] se realiza un estudio similar para motores trifásicos.

Este modelo es válido independientemente del tipo de motor (alterna/continua; síncrono/asíncrono), ya que desde el lado de la red se vería el sistema siempre igual, tomando la tensión e intensidad de la fórmula [2.4] en valores continuos o eficaces según corresponda.

Nota bibliográfica:

En [Rambukwella & Mellit, 87] se describe un modelo de consumo para trenes con motores de corriente continua. Incluye modelado de la red y un modelo simplificado de los *chopper* que controlan los motores. Estos modelos forman parte de un simulador de tráfico ferroviario por tiempo discreto orientado a estudios eléctricos.

2.4.2 Curvas características del motor

Las curvas características que utiliza el modelo de tracción y consumo propuesto son las siguientes:

- Curva {fuerza máxima-velocidad} traccionando.
- Curva {intensidad de red-velocidad} para par máximo traccionando.
- Curva {fuerza máxima-velocidad} frenando.
- Curva {intensidad de red-velocidad} para par máximo frenando.

Cada curva se representa en el modelo por una lista de puntos ordenados según velocidades crecientes. Los puntos intermedios se obtienen por interpolación lineal. El número de puntos que describen cada curva depende de la precisión deseada en los cálculos de fuerzas y consumos, y afectará también a la velocidad de simulación y a los recursos de memoria empleados.

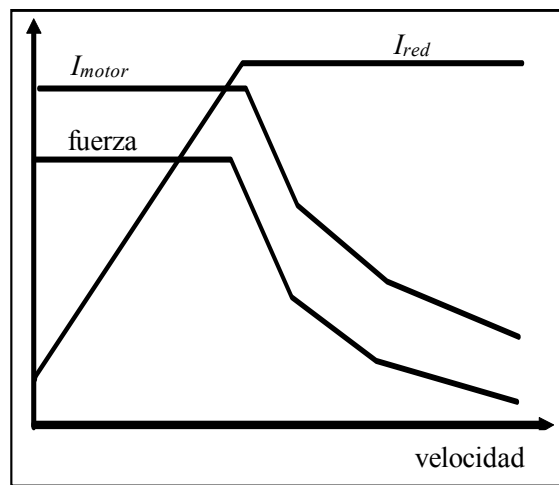


Figura 2.17. Curvas características del motor

Las formas típicas de las curvas anteriores para un tren traccionando, junto con la curva {intensidad de motor-velocidad}, se muestran en la Figura 2.17.

Cuando el motor arranca la intensidad de red toma un valor pequeño, que multiplicada por la tensión de red (constante) nos da la potencia. En el motor, sin embargo, la intensidad es máxima, pero ahora quien toma un valor reducido es la tensión de motor, que compensa el valor alto de la intensidad de motor de cara al balance energético a ambos lados del convertidor.

2.4.3 Modelo de potencia consumida y regenerada

Sólo se conocen las curvas de intensidad del motor para fuerza máxima y tensión nominal. Sin embargo, el motor no siempre trabaja a fuerza máxima, y por tanto hay que estimar la intensidad consumida en estas situaciones.

La idea es encontrar el rendimiento del motor para algunos puntos de trabajo interesantes, a partir de las curvas disponibles, e interpolar el rendimiento para el resto de los puntos de trabajo. Para que la interpolación lineal sea una buena aproximación, el objetivo ahora es encontrar una variable con respecto a la cual el rendimiento del motor sea aproximadamente lineal.

Sea F la fuerza máxima del motor para tensión nominal de red V , que le corresponde una intensidad de red I_R . Suponiendo que las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la intensidad en el motor, I , y que la fuerza es proporcional a dicha intensidad, se puede expresar la inversa del rendimiento como:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{Fv + kI^2}{Fv} = \frac{Fv + k'F^2}{Fv} = 1 + k' \frac{F}{v}$$

[2.5]

donde:

- η : rendimiento del motor
- F : fuerza de tracción
- I : intensidad en el motor
- v : velocidad del tren
- k, k' : constantes de proporcionalidad

Luego la variable buscada es F/v , ya que la inversa del rendimiento es lineal respecto a ella. Para hallar un conjunto de puntos de rendimiento a partir de las curvas características conocidas, se compara la potencia suministrada en la red (tensión nominal multiplicada por intensidad de red) con la potencia mecánica:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{VI_R}{Fv}$$

[2.6]

siendo I_R la intensidad de red y V la tensión de red.

El procedimiento para calcular la potencia consumida en puntos de trabajo del motor distintos a fuerza máxima es el siguiente: a partir de las curvas conocidas para fuerza máxima $\{F, v\}$ y $\{I_R, v\}$ se construye una lista de puntos de la curva $\{I/\eta, F/v\}$; para cualquier punto de trabajo definido por su fuerza y velocidad (F^*, v^*) se interpola linealmente en la curva anterior, obteniendo el rendimiento en dicho punto (η^*) con

una buena aproximación según la fórmula [2.5]. La potencia consumida (W^*) en ese punto se calcula a partir del rendimiento estimado:

$$W^* = \frac{1}{\eta^*} (F^* v^*)$$

[2.7]

Cuando el tren está frenando, el cálculo de la potencia devuelta a la red se realiza por un procedimiento análogo. Se estima el rendimiento como generador η_G suponiendo que la energía devuelta a la red es la energía mecánica menos las pérdidas en el motor:

$$\eta_G = \frac{VI_R}{Fv} = \frac{Fv - kI^2}{Fv} = \frac{Fv - k'F^2}{Fv} = 1 - k' \frac{F}{v}$$

[2.8]

Ahora es η_G lineal respecto a F/v , y se construye la curva $\{\eta_G, F/v\}$ a partir de las curvas características $\{F, v\}$ y $\{I_R, v\}$ del motor frenando con fuerza máxima. Dado un punto de trabajo del motor (F^*, v^*) cualquiera, se estima el rendimiento como generador interpolando linealmente en la primera curva. La potencia devuelta a la red se expresa de nuevo en función de la energía mecánica como:

$$W^* = \eta_G^* (F^* v^*)$$

[2.9]

La integración de la potencia para obtener valores de consumo de un tren a lo largo de un recorrido se estudiará en el capítulo 3, una vez se defina el método de simulación.

El modelo de estimación de consumo presentado es independiente del tipo de motor empleado en la tracción; sólo precisa las curvas características mencionadas del motor empleado.

2.5 Modelado de la conducción

En este apartado se describen en primer lugar las consignas que puede recibir el equipo de tracción del tren, y cómo se traducen estas consignas a puntos de trabajo concretos en las curvas características del motor. A continuación se describe el funcionamiento de un tipo de conductor automático ATO (*Automatic Train Operation*); a partir de unos parámetros definidos para todo el recorrido entre dos

estaciones, este sistema se encarga de dar las consignas concretas al equipo de tracción a lo largo del recorrido siguiendo una lógica de conducción.

2.5.1 Consignas al equipo de tracción. Conducción continua.

El equipo de tracción recibe consignas de aceleración objetivo, que traduce a fuerza objetivo multiplicando por la masa del tren. Si esta fuerza es menor o igual que la fuerza máxima para la velocidad actual del tren, el equipo de tracción fija el punto de trabajo en esta fuerza objetivo, de lo contrario se satura y da la fuerza máxima a esa velocidad.

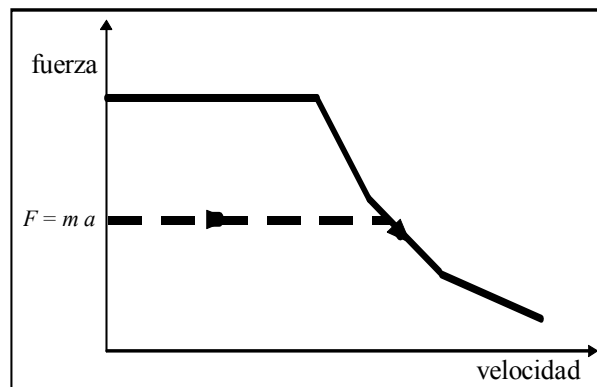


Figura 2.18. Ejemplo de seguimiento de curva fuerza-velocidad

En la Figura 2.18 el tren fija la fuerza de arranque objetivo F a partir de la consigna de aceleración objetivo a y su masa m . Si se mantiene esta consigna, el tren aumentará su velocidad hasta que la fuerza resistente (por rozamiento del aire y pendientes en la vía) iguale la fuerza de tracción. El tren primero aplica la fuerza objetivo, pero si llega a los límites de potencia del motor, aplicará la fuerza que marca la curva de fuerza máxima en función de la velocidad.

Algunos equipos de tracción admiten como consigna regulación de velocidad. La elección de la fuerza objetivo se realiza ahora para compensar justo la fuerza resistente, bajo la misma restricción de fuerza máxima. Esto simula el lazo de control propio de la regulación de velocidad del motor.

Una clasificación de las consignas al equipo de tracción es la siguiente:

- a) Aceleración: aceleración objetivo positiva
- b) Frenado: aceleración objetivo negativa
- c) Regulación: aceleración objetivo nula
- d) Deriva: no hay tracción

Estas cuatro consignas definen los cuatro modos de funcionamiento. La conducción de un tren entre dos estaciones viene determinada por una sucesión de modos. En la Figura 2.19 se muestra un ejemplo de conducción entre dos estaciones donde el tren recibe consignas sucesivas de aceleración, regulación, deriva y frenado.

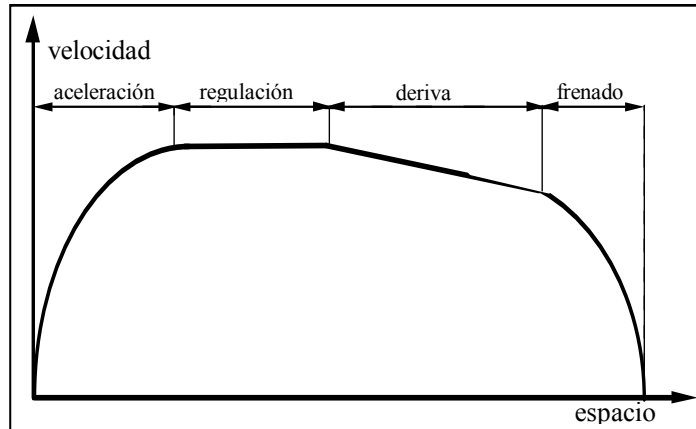


Figura 2.19. Ejemplo de conducción por consignas

Este tipo de conducción se denominará conducción continua o libre, en el sentido de que en cualquier momento del recorrido puede llegar al equipo de tracción un cambio de consigna. En conducción por vectores de deriva cambia la consigna sólo cuando se cumplen ciertas condiciones, como se describe en el siguiente apartado.

La conducción manual es una conducción continua, donde el conductor dispone típicamente de dos o tres consignas de aceleración y una o dos consignas de deceleración.

En el modelo de conducción propuesto, la fuerza de tracción del tren en función de la velocidad es siempre lineal a tramos. En caso de que la fuerza objetivo esté por debajo del máximo, la fuerza es constante, y en caso de que el motor se encuentre al límite de potencia el motor sigue la curva característica $\{fuerza\ máxima-velocidad\}$, que ha sido modelada como una lista de puntos e interpolación lineal (ver Figura 2.18).

2.5.2 Conducción por vectores de deriva (conducción ATO)

El sistema ATO (*Automatic Train Operation*) descrito aquí ejecuta una conducción de forma automática entre dos estaciones, encargándose de dar al equipo de tracción las consignas de marcha a lo largo del recorrido. Los parámetros que definen en este sistema una conducción entre dos estaciones son los vectores de deriva, compuestos por dos valores de velocidad, (V_d, V_r) . El primero es la velocidad de deriva, y fija la velocidad a la que se produce el cambio de modo aceleración-deriva; el segundo es la

velocidad de remotor, y fija la velocidad a la que el tren vuelve a acelerar (ver Figura 2.20)

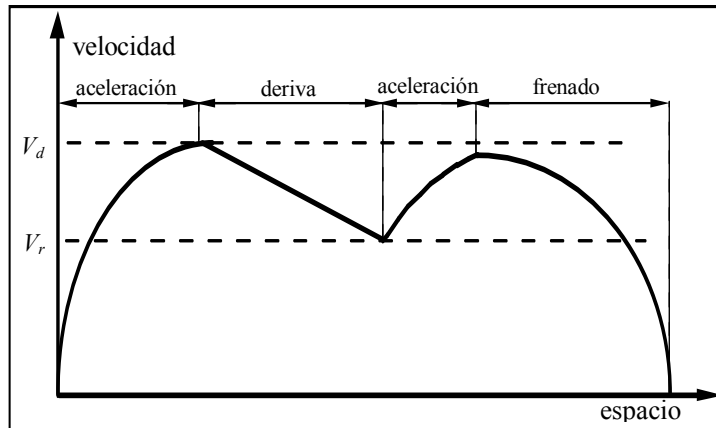


Figura 2.20. Conducción mediante vectores de deriva

El frenado final lo ejecuta el sistema en el instante adecuado para que el tren se detenga justo en el punto deseado; para ello el sistema ATO calcula la distancia de frenado, y estima en todo momento la situación del tren en la vía.

En los ferrocarriles metropolitanos está muy extendida la conducción automática ATO por derivas, disponiendo de varias conducciones diseñadas alternativas (marchas) para cada interestación. El diseño de estas marchas es clave de cara a la calidad del servicio, costes de explotación y posibilidades de regulación del tráfico. En el capítulo 5 se trata el problema del diseño óptimo de estas marchas. La función principal del regulador automático de tráfico propuesto en la parte III es precisamente elegir la marcha ATO que recibe cada tren en cada recorrido entre dos estaciones con objeto de regular el servicio con el mínimo coste.

2.6 Modelado de la dinámica del tren

La ecuación que rige la dinámica del tren se expresa como:

$$M \frac{dv}{dt} = F - F_g - F_c - F_r$$

[2.10]

donde:

- v : velocidad del tren
- t : tiempo
- M : masa del tren

- F : fuerza motora, positiva si tracciona o negativa si frena
 F_g : fuerza de gravedad debida a la pendiente de la vía
 F_c : fuerza resistente al avance por la curvatura de la vía
 F_r : fuerza resistente al avance por la resistencia del aire

Teniendo en cuenta el modelo de tracción propuesto, la fuerza motora es función lineal de la velocidad del tren:

$$F = mv + n \quad [2.11]$$

donde m , n parametrizan esta relación, que es válida hasta que llegue una nueva consigna al equipo de tracción, o se cambie de tramo en el modelo de curva característica {fuerza máxima-velocidad} (ver apartado 2.5.1).

Según el modelo de pendientes físicas de la vía, el tren siente una fuerza gravitatoria que depende del valor de la pendiente que tiene asociado el tramo de vía en que se encuentra (ver apartado 2.1). Si la pendiente en dicho tramo vale p_g (seno del ángulo), la fuerza gravitatoria valdrá:

$$F_g = M \cdot p_g \quad [2.12]$$

Según el modelo de resistencia al avance por la curvatura de la vía, la fuerza resistente se modela como una pendiente equivalente (ver apartado 2.1). Si la pendiente equivalente en el tramo donde se encuentra el tren vale p_c , la fuerza resistente valdrá:

$$F_c = M \cdot p_c \quad [2.13]$$

Según el modelo de resistencia al avance por el aire, la fuerza resistente es función de la velocidad. Fijadas las constantes k , a , b , c para el tramo donde se encuentra el tren (ver apartado 2.1) se expresa como:

$$F_r = k(av^2 + bv + c) \quad [2.14]$$

Sustituyendo las fórmulas anteriores en la ecuación [2.10]:

$$M \frac{dv}{dt} = mv + n - M(p_g + p_c) - k(av^2 + bv + c) \quad [2.15]$$

Definiendo las constantes A, B, C como:

$$\begin{aligned}A &= \frac{-ka}{M} \\B &= \frac{m - kb}{M} \\C &= \frac{n - M(p_g + p_c) - kc}{M}\end{aligned}$$

[2.16]

Se obtiene la ecuación diferencial:

$$\frac{dv}{dt} = Av^2 + Bv + C$$

[2.17]

Esta ecuación será la base del método de simulación empleado, que se desarrolla en el capítulo siguiente.

2. Modelado	23
2.1 Modelo de las características físicas de la vía	23
2.2 Modelo de línea cerrada	25
2.2.1 Sistemas incluidos en el modelo	26
2.2.2 Modelado de los retornos en estaciones terminales	27
2.3 Modelo de los sistemas de protección	28
2.3.1 Tramos de señalización	29
2.3.2 Sistema ATP por circuitos de vía	30
2.3.3 Sistema mixto circuitos de vía y señales	31
2.3.4 Sistema <i>moving-block</i>	32
2.3.5 Modelado de las protecciones en los cambios de sentido	33
2.4 Modelo de tracción y de consumo	34
2.4.1 Intensidades y tensiones en la red y el motor	35
2.4.2 Curvas características del motor	36
2.4.3 Modelo de potencia consumida y regenerada	37
2.5 Modelado de la conducción	38
2.5.1 Consignas al equipo de tracción. Conducción continua.	39
2.5.2 Conducción por vectores de deriva (conducción ATO)	40
2.6 Modelado de la dinámica del tren	41

3. Simulación

En este capítulo se presenta el método de simulación empleado para el movimiento nominal de un tren y el tráfico en una línea equilibrada, a partir de los modelos propuestos en el capítulo anterior. Línea equilibrada supone que el tren anterior al simulado circula a intervalo nominal, y por lo tanto los sistemas de protección no se disparan, y no afectan al movimiento.

El método de simulación que se propone persigue dos objetivos básicos: rapidez de cálculo y representación eficiente.

Rapidez

La técnica de simulación será utilizada como base en varias aplicaciones que necesitan que la velocidad de simulación sea elevada:

- En la herramienta CAD de análisis y diseño de las protecciones y la explotación nominal de líneas cerradas (herramienta PACA). El diseñador requiere de la herramienta un ‘diálogo’ fluido, con peticiones continuas de resultados y análisis basados en simulación.
- En las herramienta para el diseño óptimo de las consignas de conducción de un tren entre dos estaciones (herramientas CAT y ALEHOPT); cada evaluación del algoritmo de optimización supone una simulación del movimiento y estimación del consumo acumulado en el recorrido.
- En el simulador del tráfico de trenes bajo condiciones no nominales (simulador PACO). En este caso la velocidad de simulación de un tren es decisiva, pues la herramienta ha de ser capaz de simular un gran número de trenes en situaciones

perturbadas con diferentes conducciones y acciones de control en un tiempo razonable, como por ejemplo de 10 a 20 veces la velocidad real del sistema.

Representación de resultados

Se requiere una buena representación y almacenamiento de los resultados de simulación, de cara a su análisis posterior. Estos análisis requieren dibujar con precisión, componer, trasladar e intersecar continuamente curvas de movimiento.

3.1 Solución de la ecuación del movimiento

En el capítulo anterior se obtuvo la ecuación dinámica de un tren acorde con el modelo de vía y de tracción propuesto:

$$\frac{dv}{dt} = Av^2 + Bv + C$$

[3.1]

donde v es la velocidad, t es el tiempo y $\{A, B, C\}$ son los parámetros del modelo, que dependen del punto de la vía en que se encuentra situado el tren (pendientes de la vía, curvatura de la vía, resistencia del aire) y de la velocidad y consigna de tracción al motor (recta *{fuerza-velocidad}* que sigue el motor).

Sean $\{t_0, s_0, v_0\}$ las condiciones iniciales del movimiento, que han de cumplir que entre t_0 y t permanecen efectivamente constantes $\{A, B, C\}$. Entonces la ecuación diferencial anterior se resuelve separando variables e integrando:

$$\int_{v_0}^v \frac{dv}{Av^2 + Bv + C} = \int_{t_0}^t dt$$

[3.2]

Al resolver se obtienen diez expresiones analíticas de $v(t)$ para distintos rangos de variación de $\{A, B, C, v_0\}$, que se denominarán a lo largo del capítulo ‘tipos de leyes de movimiento’. En el Apéndice A se muestran algunas de estas expresiones.

Si se integra la velocidad se obtiene la expresión de la variación temporal del espacio:

$$s = s_0 + \int_{t_0}^t v(t) dt$$

[3.3]

La integración de esta ecuación lleva a expresiones analíticas de $s(t)$ para cada tipo de ley de movimiento. Algunas de ellas se encuentran en el Apéndice A.

A partir de las expresiones de $v(t)$, $s(t)$ se obtienen expresiones analíticas para las funciones $t(v)$, $s(v)$ para todos los tipos de leyes, y expresiones de $t(s)$, $v(s)$ en ocho de los diez tipos. Para los dos tipos restantes se han codificado algoritmos iterativos a partir de las expresiones analíticas conocidas.

En conclusión, dadas unas condiciones iniciales $\{v_0, s_0, t_0\}$ y el valor en ese instante de los parámetros del modelo $\{A, B, C\}$, se puede clasificar la solución de la ecuación dinámica en función de $\{A, B, C, v_0\}$ en uno de los diez tipos de leyes, y conocer por tanto sus curvas de movimiento como expresiones analíticas parametrizadas de $\{A, B, C, v_0, s_0, t_0\}$. Estas expresiones serán válidas mientras permanezcan constantes los parámetros del modelo.

El hecho de contar con expresiones analíticas explícitas para casi todas las relaciones entre $\{v, s, t\}$ es lo que permite simular con gran rapidez y almacenar los resultados con gran economía de memoria.

3.2 Modelo de simulación

El modelo propuesto descompone el problema de simulación en dos niveles. El primero se modela como un problema de simulación por eventos discretos, definiendo un vector de estado discreto del tren y los eventos que cambian de valor dicho estado. El segundo nivel resuelve el problema dinámico continuo del tren entre dos eventos consecutivos, a partir del valor de las variables de estado definidas en el nivel superior.

3.2.1 Modelado del problema discreto

Se define el estado discreto de un tren en un instante k por el vector $(v, s, t, A, B, C)_k$, donde v , s , t son la velocidad, la posición del tren en la vía y el tiempo en el instante k , y A , B , C son los parámetros que definen el modelo de vía y estado de tracción del

motor. Cuando se produzca un evento que modifique el valor de alguno de los parámetros del modelo, las variables de estado cambiarán de valor en función de su valor actual y de la naturaleza del evento, pasando al estado $(v,s,t,A,B,C)_{k+1}$.

La simulación discreta de un tren entre dos puntos de la vía se describe mediante una lista de las N sucesivas transiciones de sus variables de estado, es decir, N leyes de movimiento:

$$\{ (v,s,t,A,B,C)_0, (v,s,t,A,B,C)_1 \dots (v,s,t,A,B,C)_N \}$$

[3.4]

El vector de variables de estado se ha definido tal que contiene información suficiente para simular en un segundo nivel la dinámica continua del tren, pues contiene las condiciones iniciales de este problema y los parámetros que definen el modelo de vía y de tracción del motor (constantes entre dos eventos consecutivos). Gráficamente, cada estado discreto corresponde a un período de tiempo en el que las curvas de movimiento del tren responden a la misma ley de movimiento parametrizada. Cada evento (por ejemplo cambio de recta de par vigente) provoca un cambio de ley (ver Figura 3.1).

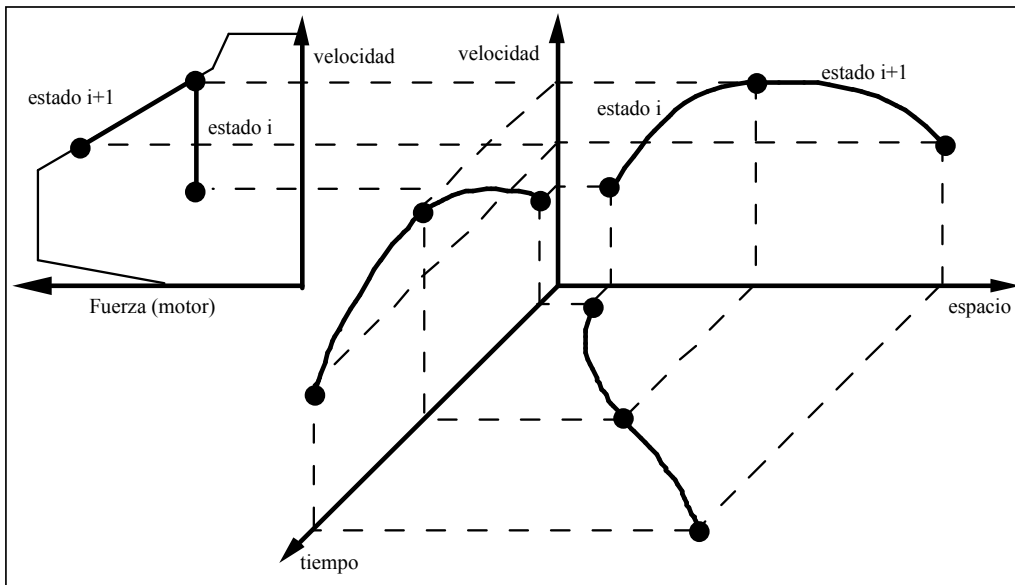


Figura 3.1. Movimiento continuo como sucesión de estados discretos

3.2.2 Solución al problema dinámico continuo

El problema dinámico continuo consiste en calcular cualquier punto $\{v,s,t\}$ que cumple para t que $t_k \leq t \leq t_{k+1}$. Dados dos estados discretos consecutivos, $(v,t,s,A,B,C)_k$ y $(v,t,s,A,B,C)_{k+1}$, la solución a este problema se encuentra resolviendo la ecuación diferencial del apartado 3.1, que corresponde a uno de los diez tipos de

leyes de movimiento parametrizadas en función de los valores del estado discreto en k . La solución es válida hasta el instante $k+1$. A partir de este instante comienza otro problema continuo, resuelto de forma análoga con los valores del estado discreto en $k+1$.

Las curvas de movimiento correspondientes a cada ley parametrizada son monótonas, ya que la aceleración nunca cambia de signo en una ley. Esta propiedad permite obtener las funciones inversas, que han resultado muy útiles en la construcción del simulador de movimiento y en los estudios posteriores.

3.2.3 Estimación del consumo

Dados dos estados discretos consecutivos, k y $k+1$, se obtiene el consumo de energía entre ellos a partir de estimaciones del rendimiento del sistema de tracción en dichos instantes. En el capítulo 2 se detalla esta estimación del rendimiento a partir del modelo de tracción del motor; en él se aproxima el rendimiento por interpolación lineal en la curva de rendimientos del motor en función del cociente F/v , donde F es la fuerza que proporciona el motor en el instante de interés y v su velocidad

En el capítulo 2 se modeló la curva $\{fuerza-velocidad\}$ que sigue el motor como una sucesión de rectas parametrizadas por m y n :

$$F = mv + n \quad [3.5]$$

Los parámetros m , n son constantes entre los estados k y $k+1$. A partir de ellos se conoce la fuerza del motor en dichos instantes:

$$\begin{aligned} F_k &= mv_k + n \\ F_{k+1} &= mv_{k+1} + n \end{aligned} \quad [3.6]$$

Interpolando linealmente en la curva de rendimiento F_k/v_k , F_{k+1}/v_{k+1} se obtienen respectivamente las estimaciones de η_k , η_{k+1} .

Para estimar ahora el consumo se aproxima el rendimiento del motor por un rendimiento medio:

$$\eta = \frac{\eta_k + \eta_{k+1}}{2} \quad [3.7]$$

La energía consumida en caso motor (en caso generador es análogo) se expresa en función de la energía mecánica suministrada (E_M) como:

$$E = \frac{E_M}{\eta} \quad [3.8]$$

La energía mecánica se aproxima distinguiendo si el motor trabaja o no a fuerza constante:

a) Si $n=0$ (fuerza constante):

$$E_M = F_k (s_{k+1} - s_k) \quad [3.9]$$

donde:

$s_{k+1} - s_k$: distancia recorrida entre k y $k+1$.

b) Si $n \neq 0$, se calcula previamente una potencia media consumida, P :

$$P = \frac{F_k v_k + F_{k+1} v_{k+1}}{2}$$

$$E_M = P(t_{k+1} - t_k) \quad [3.10]$$

donde:

$t_{k+1} - t_k$: tiempo transcurrido entre k , $k+1$.

Para que el modelo de simulación discreta incluya el consumo, se amplía el vector de variables de estado, incluyendo el consumo acumulado c en el instante k y los parámetros m , n , que permitirán el cálculo del consumo en el instante $k+1$ como el consumo acumulado en el k más el estimado entre ambos instantes según el método propuesto:

$$\mathbf{X}_k = (v, s, t, c, A, B, C, m, n)_k \quad [3.11]$$

donde \mathbf{X}_k es el vector de estado discreto incluyendo al consumo.

Si hay mucha diferencia entre t_k y t_{k+1} es conveniente hacer una partición más fina de la ley parametrizada, para no cometer errores importantes. Esto se puede comprobar comparando η_k con η_{k+1} .

3.3 Clasificación y determinación de los eventos

Atendiendo al origen de los eventos, se pueden clasificar en

- a) Eventos de vía, provocados por cambios en las características físicas de la vía.
- b) Eventos de motor, provocados por cambios en la recta vigente $\{fuerza-velocidad\}$ del motor al aumentar o disminuir la velocidad del mismo.
- d) Eventos de control de la conducción, provocados por la lógica de conducción (conducción ATO o continua), que cambia las consignas de tracción del motor.
- e) Eventos debidos a los sistemas de protección. Se producen cuando el tren se encuentra con el comienzo o alteración de una restricción de velocidad debido a la proximidad con el tren que le precede. En la simulación de un tren en condiciones nominales no se tienen en cuenta estos eventos, pues se supone movimiento no perturbado. En el capítulo 8 se estudian los eventos que generan las protecciones, en el diseño del simulador de tráfico real.
- f) Eventos de control propios del algoritmo de simulación. Estos eventos los genera el algoritmo de simulación como parte de la estrategia de resolución de restricciones del problema. Por ejemplo, para que el tren se detenga justo en el punto de parada de estación es necesario calcular en qué instante el tren ha de empezar a frenar, y generar en ese instante el evento que cambie la consigna de tracción (ver apartado 3.3.4).

Esta clasificación de eventos nos proporciona además una estructura en capas del modelo de simulación: modelos básicos de la vía y el motor, sobre éste último se define la lógica de conducción de un tren individual, y a continuación se definen las relaciones entre trenes mediante los sistemas de protección. Por último, el algoritmo de control introduce eventos propios de su estrategia de simulación.

Atendiendo a la variable que dispara el evento, se pueden clasificar en eventos de espacio, de velocidad, de tiempo y de curva $\{velocidad-espacio\}$. A continuación se estudia con detalle cada uno de estos tipos.

3.3.1 Eventos de espacio

Se producen cuando el tren alcanza un espacio en el que cambia alguna cualidad de la vía: pendientes, curvatura de la vía, resistencia al avance por el aire. El tratamiento de estos eventos se agiliza definiendo una partición en tramos de la vía tal que en

cada tramo permanecen constantes todas las cualidades de la vía. Cuando el tren alcanza el comienzo de cada uno de estos tramos, se genera un evento. En la Figura 3.2 se esquematiza la construcción de esta lista de incidencias en la vía:

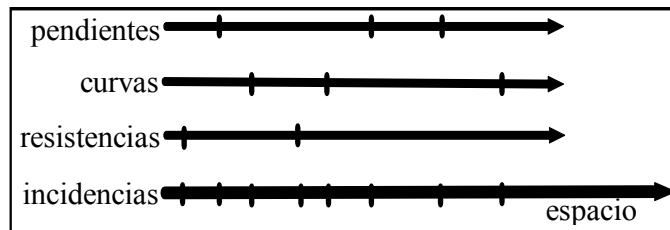


Figura 3.2. Eventos espaciales por incidencias en la vía

Los límites de velocidad también provocan eventos de espacio, en los puntos de cambio de valor. No se incluye en la lista de incidencias definida anteriormente por depender estos límites del tipo de protección empleado en la simulación.

Se generan eventos de espacio en los puntos de cambio de valor de los vectores de deriva en conducción automática ATO, y también por cambio de consigna en conducción continua.

3.3.2 Eventos de velocidad

Se producen cuando el tren alcanza una velocidad determinada. Según la naturaleza de esta velocidad se clasifican en eventos de velocidad máxima, de cambio de recta *{fuerza-velocidad}* y de cambio de consigna de tracción.

Eventos de velocidad máxima

Se producen cuando el tren alcanza la velocidad máxima permitida en el tramo de vía por el que circula, que es función del tipo de protección vigente; en protección por moving-block o por tramos de señalización, la partición de límites de velocidad en la vía la marcan los límites civiles de velocidad, mientras que en protección por circuitos de vía la marcan los comienzos de circuito.

Eventos de cambio de recta *{fuerza-velocidad}*

Se producen cuando se alcanza una velocidad tal que deja de ser válida la recta vigente de *{fuerza-velocidad}* de tracción del motor (ver Figura 3.3). Esto se puede producir por tres causas:

- Por cambio de tramo en el modelo de curva *{fuerza máxima-velocidad}* del motor (Figura 3.3,a).

- Porque no se pueda mantener la fuerza consigna a partir de esa velocidad en un proceso de aceleración (Figura 3.3,b).
- Porque a partir de esa velocidad ya se pueda dar la fuerza consigna en un proceso de deceleración (Figura 3.3,c).

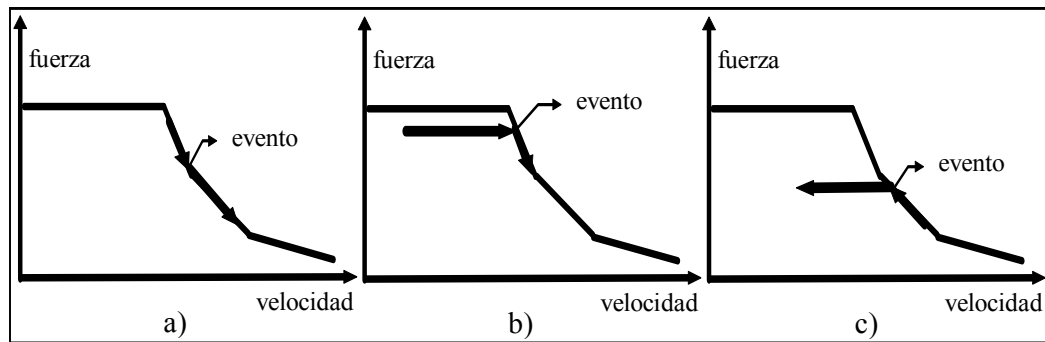


Figura 3.3. Evento por cambio de recta {fuerza-velocidad}

Eventos de cambio de consigna de tracción

Se producen cuando se alcanza una velocidad a la que está prevista un cambio de consigna de tracción. Este es el tipo de eventos que provoca la simulación de la conducción por vectores de deriva ATO, cuando se alcanza la velocidad de deriva (cambio de tracción a deriva) o la de remotor (cambio de deriva a tracción), ver capítulo 2.

3.3.3 Eventos de tiempo

Son eventos que se producen cuando se alcanza cierto instante de tiempo. Estos eventos se emplean por ejemplo en la simulación de la conducción continua en el diseño de marchas óptimas (capítulo 5). En esta conducción, se impone una consigna al sistema de tracción, que se mantiene un tiempo dado. Cumplido este tiempo, se produce un evento, y se decide la nueva consigna y el nuevo período de duración de la misma. Una vez diseñado el perfil de marcha, los eventos de tiempo pueden traducirse a espacio por motivos prácticos (robustez).

Los eventos temporales cobrarán importancia en la simulación de tráfico de línea en condiciones perturbadas (capítulo 8). El movimiento de un tren depende del comportamiento del tren que le precede en la línea, y en general se podrá simular el movimiento de un tren hasta el instante de tiempo en que se conoce el movimiento del tren que le precede, marcando una restricción temporal propia del método de simulación.

3.3.4 Eventos {velocidad-espacio}: curva de frenado

Se producen cuando la curva {velocidad-espacio} del tren alcanza a una curva {velocidad-espacio} límite, tal que alcanzado el punto de intersección de ambas curvas cambia la consigna de tracción del motor. En la práctica esta curva es siempre una curva de frenado límite que el tren no puede superar, pues ello supondría violar un límite de velocidad máxima (ver Figura 3.4).

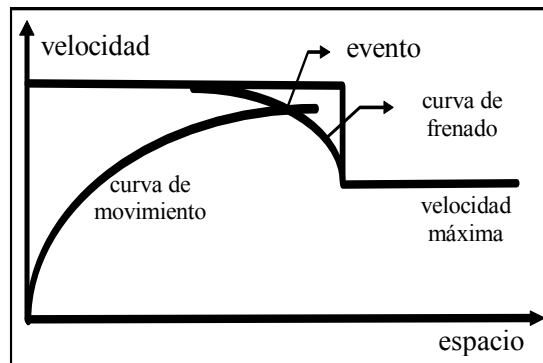


Figura 3.4. Evento de curva de frenado por restricción de velocidad

Este tipo de evento también marca el instante de comienzo del proceso de frenado hasta detenerse en estación, pues garantiza que el tren se detiene justo en el punto de parada si la curva de frenado precalculada acaba en este punto (ver Figura 3.5):

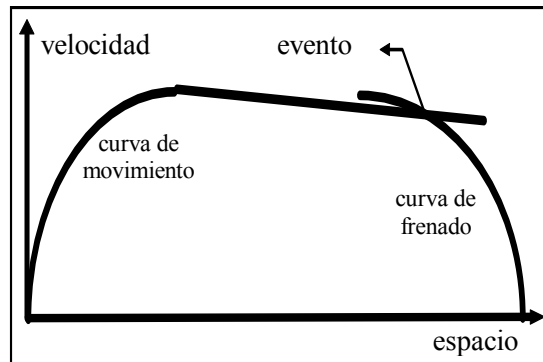


Figura 3.5. Evento de curva de frenado por restricción de espacio

Los eventos de curva de frenado permiten simular la conducción más rápida de un tren entre dos estaciones, manteniendo la consigna de aceleración restringida por las curvas de frenado límite y por los límites de velocidad (ver Figura 3.6). Esta conducción se denomina marcha tendida para una interestación.

Para poder generar el evento de curva de frenado es necesario tener precalculada y almacenada la correspondiente curva de frenado, y poder determinar con precisión suficiente el punto de intersección con la curva de movimiento actual del tren.

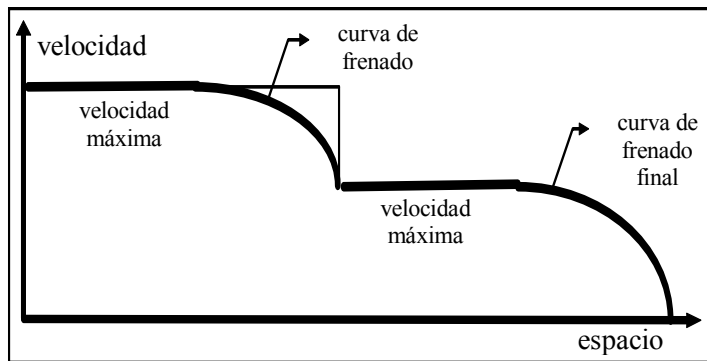


Figura 3.6. Límites de velocidad efectivos en la marcha tendida

Cálculo de la curva de frenado límite

En el modelo de simulación propuesto, una curva de frenado límite que finaliza en valores de velocidad y espacio (v_0, s_0) y se extiende hasta una velocidad límite v_l , se determina simulando el proceso de frenado como un proceso de aceleración equivalente de un tren circulando en sentido contrario desde (v_0, s_0) hasta v_l (Figura 3.7). Para construir el proceso de aceleración equivalente, se construye un segmento de vía para ser recorrido en sentido opuesto, y un motor equivalente cuyas curvas $\{fuerza\ máxima-velocidad\}$ acelerando e $\{intensidad\ de\ red-velocidad\ acelerando\}$ son las curvas de frenado del motor original cambiadas de signo.

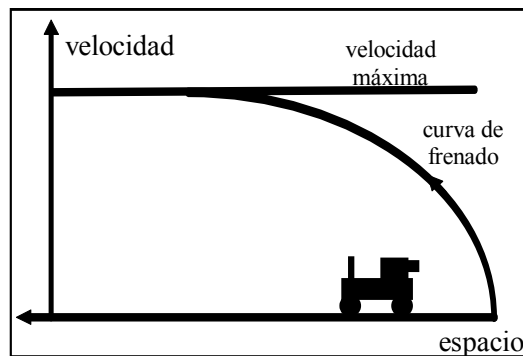


Figura 3.7. Construcción de curva de frenado

A partir de este modelo, el problema de simulación de la curva de frenado queda reducido al de una simulación habitual, con consigna de aceleración y límite de velocidad constante e igual a v_l . El resultado de esta simulación se almacena como una lista de vectores de estado discreto (ver apartado 3.2.1).

Intersección entre dos curvas de movimiento

El problema que se plantea ahora es la determinación del punto de intersección entre la curva de frenado límite y la curva de movimiento actual del tren, definida por el valor del vector de estado discreto actual. Generalizando, el problema que se plantea

es el de la intersección de la curva representada por la lista de estados $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ y la representada por el estado que comienza en Y_1 y tiene validez al menos hasta Y_2 , como se representa en la Figura 3.8.

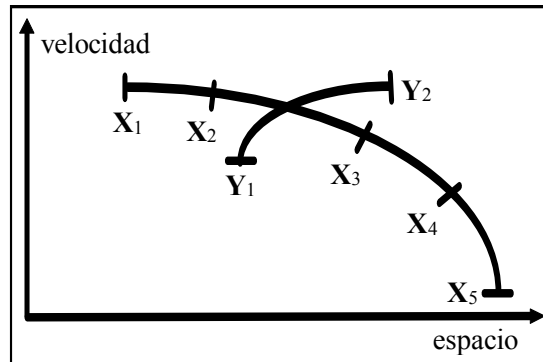


Figura 3.8. Intersección entre curva y estado actual

La solución al problema es sencilla aprovechando las propiedades que tienen las curvas de movimiento entre dos estados consecutivos de continuidad y monotonía: se conoce si hay intersección entre dos arcos de curva definidos respectivamente por (X_k, X_{k+1}) y (Y_1, Y_2) viendo si las diferencias de velocidades entre estados finales tiene signo contrario que la diferencia de velocidades entre estados iniciales.

Por el método anterior se determina el estado k que interseca con (Y_1, Y_2) . El punto concreto de corte se aproxima por iteración, aprovechando que se conocen expresiones analíticas $\{velocidad-espacio\}$ de las dos curvas continuas como parametrizaciones de los valores de los vectores de estado X_k , Y_1 , respectivamente.

3.4 Diseño del simulador

En este apartado se presenta el diseño del simulador de movimiento de un tren libre de perturbaciones entre dos estaciones bajo el modelo de simulación propuesto en los apartados anteriores.

Se trata de obtener la lista de estados discretos $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ del movimiento de un tren entre dos estaciones consecutivas, dados:

- a) Las características físicas de la vía.
- b) Los límites de velocidad vigentes en la vía (civiles o impuestos por el ATP).
- c) Las características del tren: modelo de tracción, masa y longitud del tren.

- d) La lógica de conducción. Se considera la vía dividida en tramos, y en cada uno de ellos está vigente un vector de velocidades de deriva ATO. Si en un tramo no está definido dicho vector, se ejecutará marcha tendida (conducción continua con consigna de mínimo tiempo de recorrido).

El tren parte de la estación origen y ha de llegar al punto de parada en la estación destino con velocidad nula.

La Figura 3.9 representa el esquema básico de transición de un estado al siguiente:

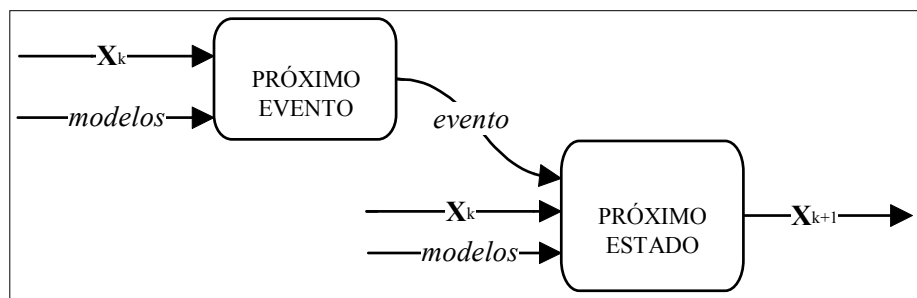


Figura 3.9. Esquema básico de transición de estado

A partir de un estado X_k y de los modelos del sistema citados anteriormente, el primer bloque representa el algoritmo que decide en qué instante ocurrirá el próximo evento y de qué tipo será. Calcula, por tanto, por cuánto tiempo es válido el valor actual de las variables del vector de estado X_k .

El segundo bloque construye el siguiente estado X_{k+1} a partir de la información del evento que lo ha provocado, del estado anterior y de los modelos del sistema.

3.4.1 Determinación del próximo evento

La eficiencia del cálculo del próximo evento determina en gran medida la eficiencia global del simulador. Por ello se ha puesto especial atención en estructurar el problema de forma eficiente y robusta, estableciendo una jerarquía de eventos que facilite su tratamiento.

En primer lugar se estructura el cálculo del próximo evento en dos tareas: determinación de los posibles próximos eventos de cada tipo (próximo evento de espacio, de velocidad, de tiempo y de curva límite {*velocidad-espacio*}) y determinación de cuál de ellos se produce en primer lugar. En la Figura 3.10 se separan estas dos funciones, donde los próximos eventos de espacio, velocidad y tiempo se representan por *lim_stv* y la próxima curva límite {*velocidad-espacio*} (curva de frenado límite) se representa por *frenado*.

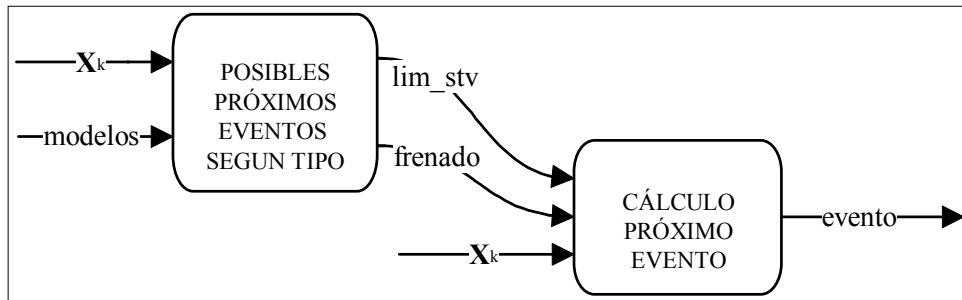


Figura 3.10. Cálculo del próximo evento

Gráficamente, los eventos calculados por el primer bloque representan unos límites para la curva de movimiento definida por X_k ; la tarea del segundo bloque es determinar cuál es la restricción que se alcanza en primer lugar. Prescindiendo de la variable tiempo, este esquema se representa en la Figura 3.11.

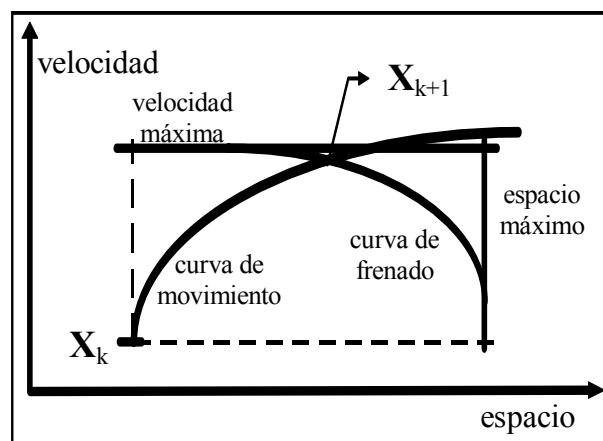


Figura 3.11. Restricción por eventos de un estado discreto

La figura muestra además cómo son necesarios dos valores de velocidad (uno superior y otro inferior) para prever eventos de velocidad por encima o por debajo del valor actual de la velocidad del tren.

Posibles próximos eventos para cada tipo

El cálculo de los próximos eventos en espacio, velocidad y tiempo y la próxima curva límite de frenado se descompone en tres fases, correspondiente a tres niveles de eventos.

- El primer nivel trata con los cambios de velocidad máxima en la vía, y calcula cuál es la restricción de velocidad máxima vigente para el estado x_k y el espacio hasta el que está vigente esta restricción, componiendo con estas restricciones la estructura lim_stv_1 . La restricción de velocidad inferior vale cero, y la restricción temporal será utilizada en simulación en condiciones perturbadas.

En esta fase se determina la curva de frenado que puede restringir el movimiento del tren, almacenándola en *frenado*.

- El segundo nivel trata con los cambios de los parámetros de conducción, en particular con los cambios de vectores de deriva ATO. Como resultado, en *lim_stv_2* se almacenan la velocidad de deriva y de remotor en las restricciones de velocidad superior e inferior, respectivamente, y en la restricción espacial el espacio de validez de dichos parámetros. Pero estas restricciones han de ser compatibles con las restricciones del nivel anterior, modificando los valores de velocidad superior o de espacio límite caso de que las impuestas en *lim_stv_1* sean más restrictivas.
- El tercer nivel trata con los cambios en las características físicas en la vía, calculando el espacio donde se produce el primer cambio a partir del modelo de incidencias de vía descrito en 3.3.1. El espacio de vigencia de *lim_stv_3* será el más restrictivo entre este espacio y el impuesto por el nivel anterior en *lim_stv_2*.

En esta fase también se calcula hasta qué velocidad es válida la recta *{fuerza-velocidad}* vigente según el modelo de tracción del tren. La restricción de velocidad superior de *lim_stv* será esta velocidad caso de que esté comprendida entre la velocidad actual del tren y la velocidad superior del nivel anterior en *lim_stv_2*, pues en este caso es más restrictiva; de otro modo, se mantiene la restricción de velocidad superior del nivel anterior. El valor de la velocidad límite inferior de *lim_stv* se calcula de forma análoga.

Determinación del primer evento a partir de *lim_stv*

Conocidas las restricciones actuales en espacio, velocidad, tiempo y curva límite de frenado del movimiento del tren, el problema ahora se reduce a calcular qué restricción se viola en primer lugar. Para ello, se calcula en qué espacio se produciría la violación de cada restricción. Marcará el siguiente evento aquella que se produzca en el punto espacial más próximo al recorrido del tren.

Para conocer el espacio en que se produciría la violación de una restricción de velocidad, hay que evaluar la curva de movimiento del espacio en función de esa velocidad. Esta expresión se dispone de forma analítica como parametrización del vector de estado actual. Lo mismo ocurre con la restricción temporal; se evalúa esta restricción en la expresión del espacio en función del tiempo.

Para conocer el espacio en que el movimiento del tren se vería limitado por la restricción por curva de frenado límite, hay que calcular el punto de intersección de dicha curva con la curva de movimiento actual del tren (determinado por su estado). La solución de este problema se apoya en el modelo de representación de una curva de movimiento, y fue estudiado en el apartado 3.3.4.

Conocido el espacio en que se producirá el evento, s_e , se puede calcular en qué tiempo se producirá, t_e , y qué velocidad llevará el tren, v_e , recurriendo de nuevo a las expresiones parametrizadas de las curvas del movimiento. Esta información (s_e, v_e, t_e) , es la que lleva asociada el evento.

3.4.2 Determinación del próximo estado

El problema que se plantea ahora es la construcción del próximo estado \mathbf{X}_{k+1} conocidos (Figura 3.12):

- El estado anterior $\mathbf{X}_k = (v, s, t, c, A, B, C, m, n)_k$
- El evento que provoca la transición, (v_e, s_e, t_e)
- El modelo del sistema



Figura 3.12. Transición de estado discreto

Las variables cinemáticas $(v, s, t)_{k+1}$ son directamente los valores asociados al evento, (v_e, s_e, t_e) .

Los parámetros de la recta *{fuerza-velocidad}*, $(m, n)_{k+1}$, se determinan según el modelo de conducción y el modelo de tracción del motor como función de:

- La velocidad del motor v_{k+1}
- La velocidad máxima en la vía en s_{k+1}
- La consigna de tracción, que a su vez depende del valor de los vectores de deriva ATO vigentes en s_{k+1} y de la velocidad del motor.

Los parámetros del modelo dinámico $(A, B, C)_{k+1}$ son función (capítulo 2), de las características físicas de la vía en s_{k+1} y de los parámetros $(m, n)_{k+1}$ de la recta *{fuerza-velocidad}* vigente.

El consumo acumulado c_{k+1} se calcula como el consumo acumulado hasta el estado anterior c_k más la energía empleada en mover al tren entre s_k y s_{k+1} , como se describió en el apartado 3.2.3.

3.4.3 Algoritmo de simulación

En este apartado se presenta el algoritmo básico de simulación del movimiento de un tren libre de perturbación, diseñado a partir de las consideraciones presentadas en los apartados anteriores.

La Figura 3.13 es la representación ANA ([Cuadra, 90]) del algoritmo que calcula el estado final de simulación a partir de la lista de curvas de frenado, el modo de conducción inicial y el espacio final de simulación.

En el diagrama ANA se representan los módulos que calculan el próximo evento para cada tipo (*simu1*, *simu2* y *simu3*), el módulo que decide qué evento se cumplirá en primer lugar (*simu4*) y el módulo que calcula el estado del sistema en el tiempo de cumplimiento de dicho evento (*simu5*). El algoritmo está compuesto de tres bucles anidados, correspondientes a los tres niveles jerárquicos de tipos de eventos definidos. Cada bucle finaliza cuando se alcanza el tiempo del próximo evento correspondiente al nivel superior. El bucle más externo y la simulación finalizan cuando se recorre completamente la interestación (el espacio recorrido vale *sfin*).

3.5 Simulación de tráfico en una línea equilibrada

A partir de la simulación básica de un tren entre dos estaciones en condiciones nominales (libre de perturbaciones), la simulación de su recorrido a lo largo de la línea se realiza concatenando simulaciones entre las distintas estaciones teniendo en cuenta los tiempos de parada nominales en cada estación.

Si la simulación del movimiento entre las estaciones A y B se representa mediante la lista de estados discretos $\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}$, para tener en cuenta el tiempo de parada en la estación B , se añade a esta lista un vector de estado \mathbf{X}_{N+1} cuyas componentes son iguales a las de \mathbf{X}_N excepto su variable temporal $\mathbf{X}(t)_{N+1}$, que vale:

$$\mathbf{X}(t)_{N+1} = \mathbf{X}(t)_N + e_B$$

[3.12]

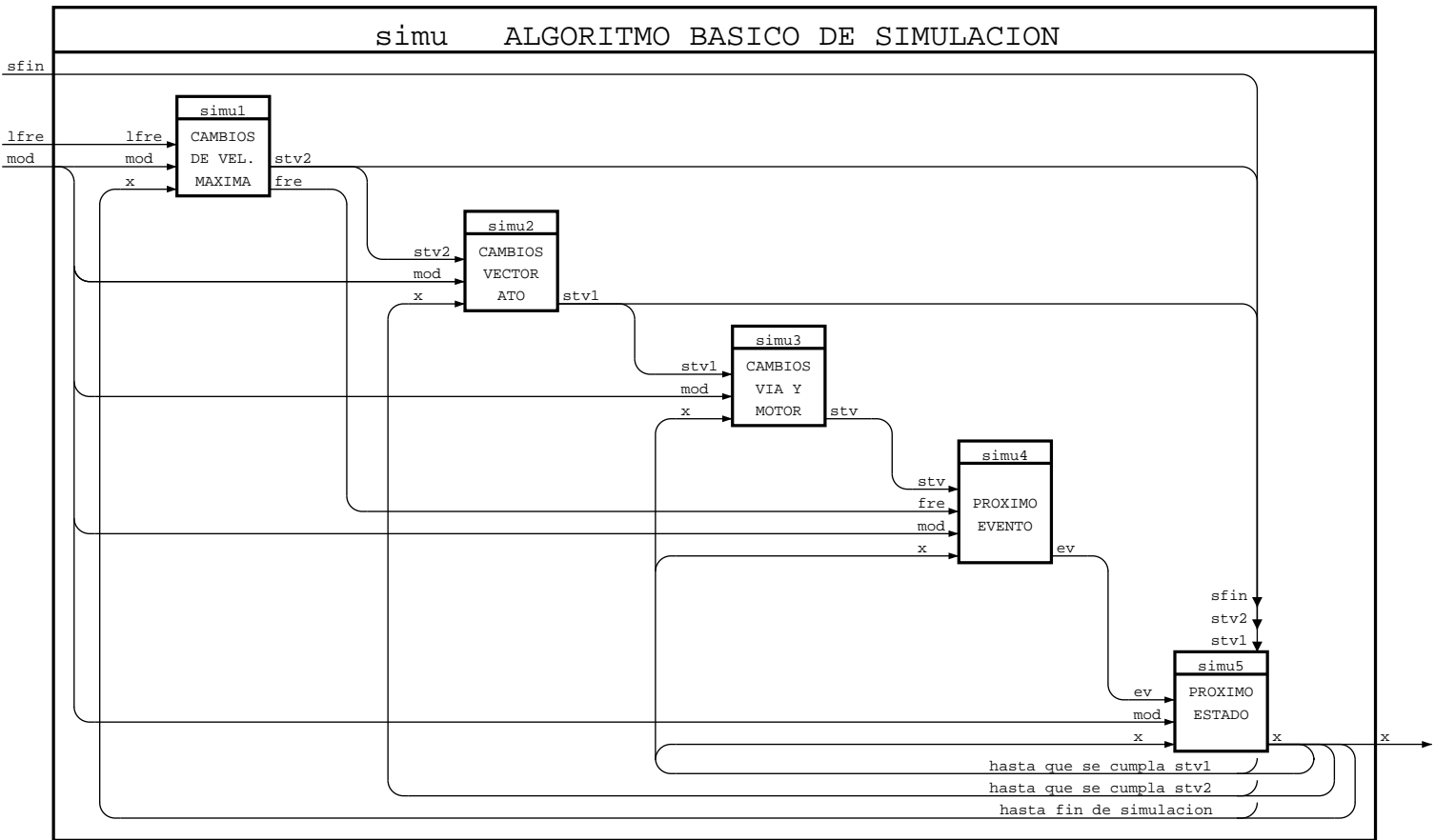


Figura 3.13. Representación ANA del algoritmo de simulación

donde e_B es el tiempo de parada nominal en la estación B .

Si la simulación del mismo tren entre las estaciones B y C se describe por la lista $\{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_{N'+1}\}$, el movimiento entre A y C se representa por la lista:

$$\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{N+1}, \mathbf{Y}'_1, \mathbf{Y}'_2, \dots, \mathbf{Y}'_{N'+1}\}$$

$$\mathbf{Y}'_k(t) = \mathbf{Y}_k(t) + (\mathbf{X}_{N+1}(t) - \mathbf{Y}_1(t))$$

[3.13]

donde se ha desfasado en tiempo el movimiento entre B y C para que el tiempo del último estado entre A y B coincida con el del primero entre B y C .

El movimiento de un tren a lo largo de una línea de explotación circular compuesta por M estaciones se describe a partir de las M simulaciones entre sus estaciones, considerando los tiempos de parada nominales en las estaciones.

El tráfico nominal en una línea de explotación circular compuesta por M estaciones $(1, 2, \dots, M)$ y N trenes $(1, 2, \dots, N)$ e intervalo nominal entre ellos T se describe a partir de la simulación del primer tren. La curva de movimiento del tren k es la curva de movimiento del tren j desfasada en el futuro un tiempo $(k-j)T$.

Esta representación permite estudiar la persecución entre dos trenes consecutivos, obteniendo la distancia que separa a dos trenes en espacio en todo punto de la vía en función del intervalo nominal. El disparo o no de los sistemas de protección y el margen hasta su disparo en el diseño de una conducción nominal es función de esta distancia.

3. Simulación	45
3.1 Solución de la ecuación del movimiento	46
3.2 Modelo de simulación	47
3.2.1 Modelado del problema discreto	47
3.2.2 Solución al problema dinámico continuo	48
3.2.3 Estimación del consumo	49
3.3 Clasificación y determinación de los eventos	51
3.3.1 Eventos de espacio	51
3.3.2 Eventos de velocidad	52
3.3.3 Eventos de tiempo	53
3.3.4 Eventos $\{velocidad-espacio\}$:curva de frenado	54
3.4 Diseño del simulador	56
3.4.1 Determinación del próximo evento	57
3.4.2 Determinación del próximo estado	60
3.4.3 Algoritmo de simulación	61
3.5 Simulación de tráfico en una línea equilibrada	61

4. Análisis de la explotación

En este capítulo se estudia la explotación nominal de líneas ferroviarias cerradas, basándose en los modelos de vía, línea circular, tracción, conducción y sistemas de protección desarrollados en el capítulo 2, y en los modelos y algoritmos de simulación propuestos en el capítulo 3.

4.1 Explotación nominal de una línea cerrada

La explotación nominal de una línea cerrada queda determinada definiendo:

- Trenes en circulación. Se supone un número fijo de trenes, todos con las mismas características de tracción, masa y longitud.
- Sucesión de consignas de conducción para el recorrido entre cada dos estaciones de la línea. Si se emplea conducción automática ATO por derivas estas consignas se determinan a partir de los vectores de deriva descritos en el capítulo 2. En circulación nominal, todos los trenes ejecutan las mismas consignas, realizando el mismo movimiento.
- Sistema de protección. Se ha de definir su tipo y diseño: longitud de cada circuito de vía, códigos de velocidad para cada uno, situación de las señales, etc.
- Tiempo de parada nominal en cada estación. Para todos los trenes se supone la misma.

- Intervalo nominal entre trenes. Ha de ser suficientemente pequeño como para dar un servicio eficiente a los viajeros y suficientemente grande como para que no se disparen los sistemas de protección en conducción nominal. El intervalo nominal es igual al tiempo que tarda un tren en recorrer la línea entre el número de trenes en circulación.

El diseñador de la explotación de la línea trata de satisfacer la demanda de servicio (un intervalo nominal objetivo) con los mínimos costes. Estos costes son los de equipamiento, principalmente material rodante y sistemas de protección, consumo de energía de los equipos de tracción y costes de personal. En líneas sobrecargadas, que es el caso de muchas líneas metropolitanas en horas punta, el criterio prioritario es conseguir un intervalo nominal reducido.

El sistema ha de ser diseñado teniendo en cuenta su comportamiento frente a perturbaciones en el servicio, habitualmente retrasos de trenes por incumplimiento de los tiempos de parada nominales en las estaciones. La robustez de un intervalo nominal se mide a partir del margen de retraso admisible de un tren en un punto de la vía sin que se disparen los sistemas de protección del tren que le sigue. La capacidad de recuperación de retraso de un tren entre dos estaciones es el tiempo de recorrido asociado a la marcha nominal menos el tiempo de recorrido asociado a la marcha tendida (la más rápida).

En los siguientes apartados se analizan distintos aspectos del sistema mediante técnicas basadas en simulación. Estas técnicas han dado lugar a distintas herramientas informáticas de ayuda al diseño de la explotación.

4.2 Análisis de las protecciones de una línea cerrada

Definidos los sistemas de protección en una línea y una conducción, que incluye los tiempos de parada nominales en estación, quedan determinados el valor del intervalo mínimo de circulación sin que se disparen dichos sistemas y una medida de robustez del intervalo asociado a cada punto del recorrido (márgenes de tiempo). A continuación se definen con precisión ambos conceptos.

Intervalo mínimo

El concepto de intervalo mínimo es el siguiente:

Dados dos trenes iguales A y B , tales que A persigue a B en la línea; dada una conducción para estos trenes en un tramo de vía S , y suponiendo que A y B realizan el mismo movimiento desfasados un tiempo T , el intervalo mínimo

asociado al tramo S se define como el mínimo valor de T tal que los sistemas de protección del tren A no detectan la presencia de B durante su recorrido en el tramo S .

La definición anterior asocia el intervalo mínimo a un tramo de vía. Coincidirá con el intervalo mínimo de la línea cuando se tome como tramo de estudio toda ella.

Si se calcula el intervalo mínimo de tramos de vía contiguos (por ejemplo, tramos entre estaciones sucesivas), el intervalo mínimo conjunto es el caso más desfavorable de todos ellos, es decir, el máximo de los intervalos mínimos parciales.

Márgenes de tiempo

El concepto de margen de tiempo estudia las protecciones cuando un tren a intervalo T se retrasa un tiempo t , quedando desfasado su movimiento respecto del que le sigue un tiempo $T-t$:

Dados dos trenes iguales A , B , tales que A persigue a B en la línea; dada una conducción para A en un tramo de vía, y suponiendo que A y B realizan el mismo movimiento desfasados un tiempo $T-t$, el margen de tiempo asociado a un punto espacial s del tramo de vía se define como el máximo valor de t tal que los sistemas de protección del tren A no detectan la presencia de B en s .

El concepto de margen de tiempo es local, pues va asociado un punto espacial dado; es por tanto una función del espacio, y depende del intervalo de circulación. En el caso de que el intervalo de circulación coincida con el intervalo mínimo en el tramo de vía de estudio, existirá por definición un punto en dicho tramo donde el margen de tiempo sea nulo.

El margen de tiempo es útil para el diseñador, calculado respecto al intervalo mínimo o respecto al intervalo nominal:

- Calculado respecto al intervalo nominal actual, proporciona una medida de la robustez del sistema, pues representa el margen de tolerancia ante propagación de retrasos en el funcionamiento nominal de la línea.
- Si el objetivo es reducir el intervalo mínimo de la línea modificando los actuales sistemas de protección y/o la conducción, el margen de tiempo respecto al intervalo mínimo proporciona una medida local de 'holgura'. Los puntos espaciales en los que el margen de tiempo sean pequeños señalan los puntos conflictivos que primero dispararán los sistemas de protección al disminuir el intervalo.

- Si se está ajustando el diseño de los sistemas de protección, una configuración óptima de los mismos se caracterizará por tener márgenes de tiempo similares en toda la línea.

4.3 Conducción continua: *moving-block*

En este tipo de conducción se supone que cada tren A conoce de forma continua tanto la posición del tren B que le precede en línea como la distancia de seguridad de A , como se vio en el capítulo 2.

Nota bibliográfica:

En [Gill & Sadler, 94] se presentan las ventajas del sistema de señalización TBS (*Transmission-Based Signalling*), que considera conducción continua *moving-block*. En este artículo se describen modelos de simulación que se emplean para identificar los problemas básicos de control asociados a este tipo de conducción.

Curva de frenado efectivo

La distancia de frenado efectivo de un tren en un espacio s , se define como la distancia que recorre el tren hasta detenerse por completo si se decide frenar con fuerza máxima en s . Esta distancia depende de la velocidad del tren en s y de las características de la vía y de tracción del motor. Se considera además que entre la decisión y el comienzo efectivo de aplicación del freno transcurre un retraso R . En el peor de los casos, el tren acelera durante este tiempo (ver Figura 4.1).

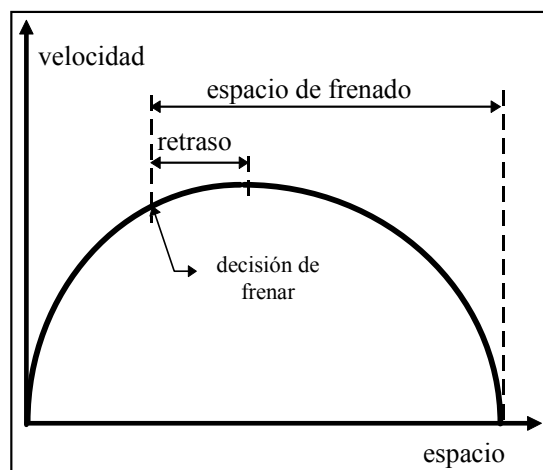


Figura 4.1. Curva de frenado

La curva de frenado efectivo de un tren en un tramo de vía se define como los pares de puntos $\{tiempo-velocidad\}$ (t, s_F) , tales que s_F es el espacio de parada del tren si se decide frenar en el instante de tiempo t .

Se va a calcular la curva de frenado efectivo de un tren utilizando las técnicas de simulación presentadas en el capítulo anterior. Si \mathbf{X}_1 es el vector de estado discreto del tren, cuyas componentes dinámicas son (v_1, s_1, t_1) , la simulación del proceso de frenado a partir de este estado será un conjunto de estados $\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_F\}$. El espacio en que se detiene el tren es la componente espacial del último estado, s_F , y el punto (t_1, s_F) pertenecerá a la curva de seguridad.

La curva de frenado efectivo de un tren en un tramo de vía se representará como una lista de puntos (t, s_F) , cada uno de ellos calculado a partir de la simulación descrita anteriormente. El número de puntos calculados de dicha curva depende de la precisión requerida, y se toman muestreando la curva de movimiento a intervalos de tiempo constante. El estado discreto de comienzo de cada frenado se construye a partir de cada muestreo.

Cálculo de la curva de márgenes de tiempo

Se considera que para un punto espacio/tiempo $\{s_A, t\}$ el sistema de protección de A detecta la presencia del tren B cuando (ver Figura 4.2):

$$(s_A + d_A) > (s_B - lon_B - D_{seg})$$

[4.1]

siendo:

- s_A : posición espacial del tren A en el instante t
- d_A : distancia de frenado efectivo del tren A en el instante t
- s_B : posición espacial del tren B en el instante t
- lon_B : longitud del tren B
- D_{seg} : distancia de seguridad

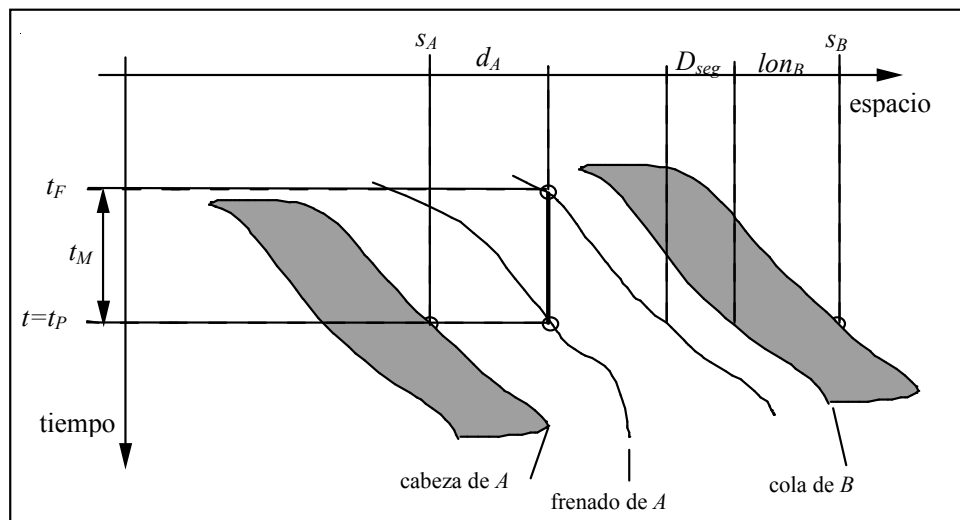


Figura 4.2. Detección y margen de tiempo por moving-block

La curva de frenado del tren A se calcula a partir de la simulación del movimiento de la cabeza del tren A , según el frenado efectivo descrito anteriormente.

La curva de movimiento del tren B se calcula a partir de la curva de movimiento del tren A adelantada el intervalo T .

La curva que marca el límite de proximidad al tren B se construye a partir de la curva de movimiento del tren B trasladada hacia atrás un espacio igual a la suma de la longitud del tren y la distancia de seguridad.

La curva de margen de tiempo se representa por una lista de puntos (s, t_M) , uno por cada punto que describe la curva de seguridad del tren A (s, t_F) , cumpliendo (ver Figura 4.1):

$$t_M = t_P - t_F \quad [4.2]$$

donde t_P es el valor de la curva de proximidad evaluada en s , mediante la ecuación analítica parametrizada en función del estado discreto Y de dicha curva vigente en s .

Cálculo del intervalo mínimo

El intervalo mínimo se va a aproximar a partir de la curva de márgenes. Sea la lista de puntos $\{(s_1, t_1), (s_2, t_2), \dots, (s_N, t_N)\}$ la curva de márgenes en el tramo de vía $[s_1, s_N]$ de dos trenes consecutivos a intervalo T . El intervalo mínimo en dicho tramo se calcula como:

$$\text{intervalo_minimo} = \min(T - t_i); \quad i=1, \dots, N \quad [4.3]$$

Por definición de margen de seguridad, el espacio que tiene asociado un margen menor es el punto que marcará el intervalo mínimo en el tramo. Y este intervalo se produciría si el tren de delante se retrasara el valor del margen en ese punto, quedando los dos trenes a un intervalo igual al nominal menos el margen mínimo.

El error cometido en la aproximación del intervalo anterior es el de discretización de la curva de márgenes, típicamente unos segundos. En el proceso de diseño es habitual comenzar con discretizaciones gruesas (tiempos de cálculo muy pequeños) y afinar cálculos con otras más finas.

Nota bibliográfica:

En [Chua, 86] se obtienen expresiones analíticas del intervalo mínimo de circulación entre dos trenes considerando el sistema de protección ATP por circuitos de vía y *moving-block*. Para ello se utiliza un modelo simplificado del movimiento, mediante el que se calcula la distancia de seguridad entre dos trenes. Se estudia por separado el efecto que produce en el intervalo mínimo la señalización, las pendientes en la vía, los límites civiles de velocidad y los períodos

de parada en estación. En [Gill & Goodman, 92] se describe el cálculo gráfico del intervalo mínimo a partir de las curvas {espacio-tiempo} del movimiento de dos trenes consecutivos.

4.4 Protecciones por tramos de señalización

En este sistema de protección el tramo de vía se divide en tramos separados por señales luminosas. La misión de estas señales es impedir que circule más de un tren simultáneamente por el mismo tramo, por lo que cuando un tramo está ya ocupado por un tren la señal de entrada a dicho tramo se pone en rojo.

Cuando un tren se encuentra con una señal en rojo debe comenzar un proceso de frenado con la suficiente antelación como para no rebasar la señal. Se define una distancia de seguridad D_{seg} que simula el margen que se toma el conductor en el frenado.

La Figura 4.3 muestra dos tramos de señalización y el efecto de la distancia de seguridad sobre el frenado. En este sistema se considera que un tren no detecta la presencia de un tren anterior cuando para el punto espacial s_A en que debería comenzar el proceso de frenado la señal correspondiente a dicho frenado está en verde.

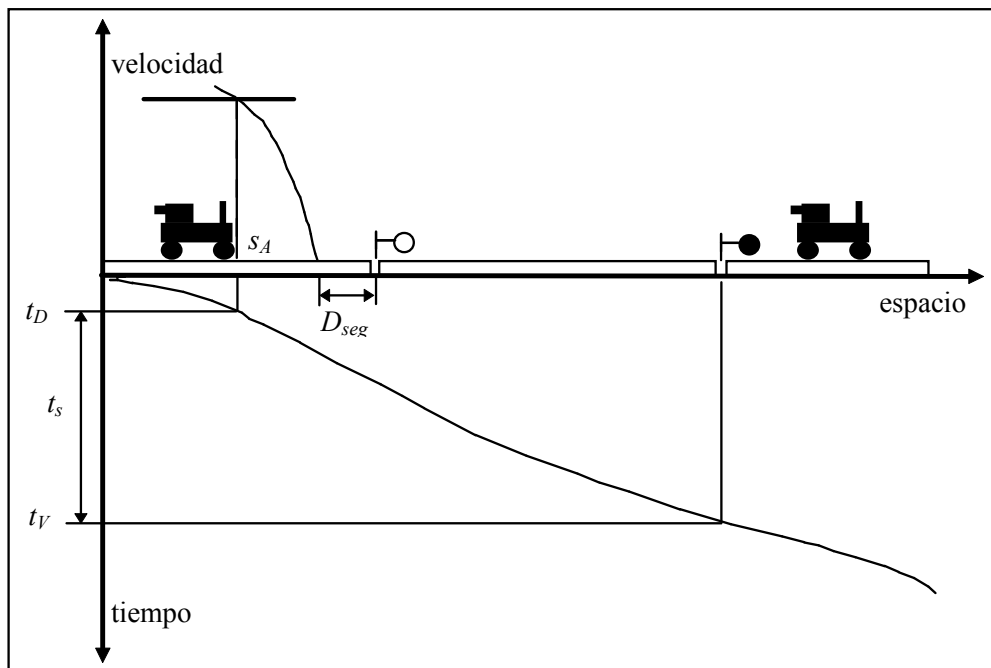


Figura 4.3. Cálculo de intervalo mínimo de un tramo de señalización

Si llegado el instante de salida de estación existe una señal en rojo a la salida de la misma, el maquinista no arrancará hasta que esté verde, y por tanto el instante de detección del tren de delante coincidirá con el instante de salida de estación. En el modelo propuesto, estas señales se etiquetan como tipo *salida*.

Para estudiar este tipo de sistemas de protección, se calcula en primer lugar el intervalo mínimo como el intervalo más restrictivo de los asociados a cada tramo de señalización, y posteriormente se obtendrá un margen de tiempo en cada tramo.

Cálculo del intervalo mínimo

Se puede obtener el intervalo mínimo t_s que impone cada tramo de señalización calculando el tiempo que transcurre desde el instante t_D en que un tren detecta la señal (punto de avistamiento) hasta que el instante t_V en que el mismo tren abandona el tramo, dejando la señal en verde (ver Figura 4.3). Si circulan dos trenes a este intervalo, justo cuando uno detecta la señal, el otro pone la señal en verde.

El instante de avistamiento depende del tipo de señal. En señales de salida este instante coincide con el de salida de estación y para el cálculo del intervalo mínimo de la señal habrá que simular el movimiento desde la salida de estación hasta poner la señal en verde.

En señales que no sean de salida, el instante de avistamiento es la intersección del movimiento del tren y la curva de frenado ante la señal. Esta curva de frenado se obtiene simulando el movimiento de un tren equivalente en sentido contrario a partir del punto de parada, como se vio en el capítulo 3.

Si $\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}$ es la simulación del movimiento del tren, y $\{\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_N\}$ es la simulación del frenado límite ante la señal, su intersección $\{s_D, v_D, t_D\}$ es el punto de avistamiento en el que el tren debe empezar a frenar si la señal está en rojo. Este punto se calcula:

- Determinando el tramo de movimiento, definido por dos estados discretos consecutivos $(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k+1})$ en la curva de movimiento y por $(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_{j+1})$ en la curva de frenado, que contienen la intersección. Para ello se aprovecha la propiedad de monotonía de las curvas de movimiento entre estados consecutivos, como se vio en el capítulo 3.
- Efectuando la intersección (v_D, s_D) entre las expresiones analíticas de las curvas de movimiento $\{velocidad-espacio\}$ obtenidas como parametrizaciones en función de \mathbf{X}_k y \mathbf{F}_j .
- El instante de avistamiento t_D se calcula evaluando la curva $\{tiempo-velocidad\}$ del movimiento del tren en v_D , utilizando la expresión analítica de dicha curva como parametrización de \mathbf{X}_k .

El instante t_V en que el mismo tren dejará la señal en verde al abandonar el tramo señalizado, se obtiene evaluando la curva $\{tiempo-espacio\}$ del movimiento del tren en el espacio $s_2 + lon_B$. Se aumenta el espacio de final de tramo en la longitud del tren teniendo en cuenta que las curvas de movimiento están referidas a la cabeza del tren, y el tramo de señalización queda liberado cuando la cola abandona dicho tramo. Para poder evaluar en la curva de movimiento, hay que recurrir de nuevo a la expresión analítica correspondiente parametrizada en función del estado discreto vigente en $s_2 + lon_B$.

El intervalo mínimo t_s asociado al tramo de señalización s valdrá por tanto:

$$t_s = t_V - t_D \quad [4.4]$$

Y el intervalo mínimo asociado a un tramo de vía compuesto por M tramos de señalización será el máximo de dichos intervalos, pues es el que condiciona el disparo de las protecciones:

$$intervalo_minimo = \max(t_s) \quad s=1,\dots,M \quad [4.5]$$

Cálculo de la curva de márgenes de tiempo

La curva de márgenes de tiempo en conducción *moving-block* es continua, pues en cualquier momento la curva de seguridad de un tren puede alcanzar la curva de proximidad del tren que le precede, disparando los sistemas de protección. Sin embargo, cuando el sistema de protección es discreto (tramos de señalización o protección ATP por señales) el control de proximidad se efectúa en puntos discretos de la vía (a la entrada de cada tramo o cada circuito de vía), y por tanto la curva de márgenes de tiempo también será discreta, obteniendo un valor por cada punto de control.

Si $\{i_1, \dots, i_M\}$ es la lista de intervalos mínimos asociados a cada tramo de señalización en un tramo de vía, $\{s_1, \dots, s_M\}$ los espacios comienzo de cada tramo, y T es el intervalo entre trenes, la curva de márgenes de tiempo en el tramo de vía se representa por la lista de puntos $\{(s_1, t_1), (s_2, t_2), \dots, (s_M, t_M)\}$, tal que:

$$t_k = T - i_k; \quad k=1,\dots,M \quad [4.6]$$

Estos puntos cumplen en cada tramo señalizado k que cuando un tren circula a un intervalo T es necesario restar un adelanto t_k para alcanzar el intervalo mínimo i_k . El intervalo mínimo de línea lo determina el tramo señalizado cuyo margen es mínimo.

Se considera que a lo largo de un tramo de señalización el valor de la curva de márgenes es constante e igual al margen calculado por la restricción de su señal de entrada.

4.5 Protecciones ATP por circuitos de vía

En este sistema de protección la vía se divide en circuitos de vía. Cada uno tiene asociado una lista de códigos de velocidad, y cada código de velocidad consta de dos valores: el primero es la velocidad máxima de entrada por un tren en el circuito de vía, y el segundo es la velocidad máxima de salida del circuito de vía (ver capítulo 2).

Se considera que un tren *A* en un determinado circuito de vía no detecta la presencia del tren anterior *B* cuando al entrar *A* en dicho circuito el código vigente es el máximo posible (en la Figura 4.4, 60/60). Es fácil comprobar que si un circuito de vía *C* tiene *N* códigos de velocidad, la condición de “no detección” se reduce a que al entrar un tren *A* en dicho circuito estén desocupados los *N* circuitos por delante del tren *A* (incluido *C*). La Figura 4.4 muestra un ejemplo de no detección y otro en el que sí hay detección.

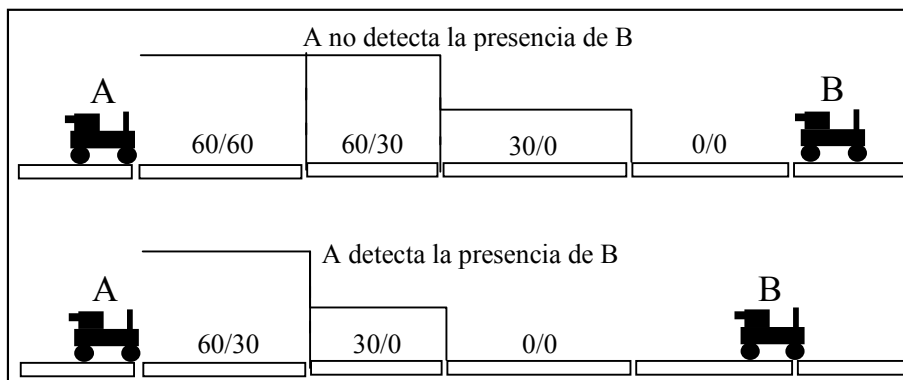


Figura 4.4. Ejemplos de detección ATP por circuitos

El instante de detección del tren de delante se produce siempre cuando el tren pisa un nuevo circuito, caso de que imponga un código de velocidad restrictivo. No es necesario, a diferencia de la protección por tramos de señalización, definir una curva de frenado para determinar el instante de avistamiento de la señal en rojo ni una distancia de seguridad de dicho frenado. Luego los cálculos de intervalo mínimo y márgenes de tiempo tendrán en cuenta tan sólo los instantes de entrada y salida en circuitos de vía.

Cálculo del intervalo mínimo

El intervalo mínimo en un tramo de vía con protección ATP se va a calcular por un mecanismo análogo al utilizado en tramos de señalización, calculando primero el intervalo mínimo que impone cada circuito de vía que compone el tramo.

Si un tren entra en un circuito de vía c , asignará a este circuito un código restrictivo hasta que no abandone el circuito $c+N$, siendo N el número de códigos del circuito c . El tiempo que transcurre entre estos dos eventos (entrada del circuito c , t_E , liberación del circuito $c+N$, t_L) es el intervalo mínimo de circulación (i_c) que impone el circuito c :

$$i_c = t_L - t_E \quad [4.7]$$

A partir de la simulación de un tren en el tramo de estudio, $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, el cálculo de los tiempos t_L y t_E se realiza evaluando las expresiones de las curvas $\{\text{tiempo-espacio}\}$ correspondientes en s_c y $(s_{c+N+I} - lon_B)$, respectivamente, siendo

- s_c : espacio de entrada en circuito c
- s_{c+N+I} : espacio de entrada de circuito $c+N+I$, salida del circuito $c+N$
- lon_B : longitud del tren

El intervalo mínimo asociado a un tramo de M circuitos de vía se determinará como:

$$\text{intervalo_minimo} = \max(t_c); \quad c=1, \dots, M \quad [4.8]$$

Cálculo de márgenes de tiempo

El procedimiento para el cálculo de los márgenes de tiempo también es análogo al de protección por tramos de señalización, a partir de los intervalos mínimos asociados a cada circuito de vía.

Si $\{i_1, \dots, i_M\}$ es la lista de intervalos mínimos asociados a cada circuito en un tramo de vía, $\{s_1, \dots, s_M\}$ los espacios comienzo de cada tramo, y T es el intervalo entre trenes, la curva de márgenes de tiempo en el tramo de vía se representa por la lista de puntos $\{(s_1, t_1), (s_2, t_2), \dots, (s_M, t_M)\}$, tal que:

$$t_k = T - i_k; \quad k=1, \dots, M \quad [4.9]$$

Se considera que a lo largo de un circuito de vía el valor de la curva de márgenes es constante e igual al margen calculado en su entrada.

4.6 Protecciones ATP por circuitos y tramos de señalización

En este sistema de protección la vía se divide en circuitos de ATP, a la que se superpone una división por tramos de señalización. El sistema mixto es funcionalmente la superposición del sistema ATP por circuitos y el de tramos de señalización, con la particularidad de que en este último sistema el frenado del tren ante una señal en rojo se fuerza mediante una escalera descendente de códigos de velocidad, escalera que permanece vigente todo el tiempo que el tramo señalizado está ocupado (ver capítulo 2).

El cálculo del intervalo mínimo y de los márgenes de tiempo en este tipo de protección se va a resolver por superposición:

- Se calcula en primer lugar el intervalo mínimo y los márgenes de tiempo de la protección por circuitos ATP, como se vio en el apartado 4.5.
- Se calcula a continuación el intervalo mínimo y los márgenes de tiempo de la protección por tramos de señalización, por el mismo procedimiento que el sistema de protección único por señales (ver apartado 4.4), excepto en el cálculo de los tiempos de avistamiento de señal, que se estudia en este apartado.
- El intervalo mínimo del sistema de protección global es el máximo de los impuestos por los dos sistemas de protección anteriores. La curva de márgenes es la superposición de las curvas de márgenes impuestas por ambos sistemas, tomando en cada espacio el caso más desfavorable (el menor de las dos).

Es habitual que las señales se encuentren situadas al comienzo de un circuito de vía. Entonces el sistema de protección se podría reducir al de ATP por circuitos, suponiendo que está ocupado el primer circuito de un tramo de señalización cuando un tren ocupa cualquier circuito del tramo. El problema que tiene este enfoque es que no tiene en cuenta el comportamiento especial ante las señales de salida de estación, ya que el conductor no arranca hasta que ve la señal en verde, aunque el código del circuito que pisa el tren le permitiera avanzar hasta la señal. Se ha preferido estudiar el sistema de protección mixto mediante superposición, que es completamente general.

Tiempos de avistamiento de las señales

Cuando el sistema de protección es sólo por señales, el instante de avistamiento lo marca el comienzo de la curva de frenado ante la señal, tomando una distancia de seguridad, ya que es el conductor quien ve la señal y efectúa el frenado. Cuando está en funcionamiento el sistema ATP por circuitos, se restringen las velocidades en los

circuitos de vía por detrás de la señal mientras el tren ocupe el tramo de señalización. El espacio de avistamiento s_A es entonces el de entrada en el primer circuito con código restringido (ver Figura 4.5).

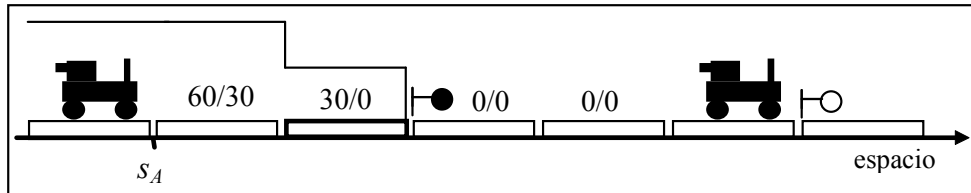


Figura 4.5. Espacio de avistamiento de señal con ATP por circuitos

El cálculo del tiempo de avistamiento dada la simulación del movimiento de un tren $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ se realiza evaluando la curva $\{tiempo-espacio\}$ del movimiento en el espacio s_A de entrada del circuito en el que comienza la restricción de velocidad. Se dispone ya de la expresión analítica de dicha curva parametrizada en función del X_k vigente en s_A .

Superposición de las curvas de márgenes de tiempo

La curva de márgenes del problema completo se obtiene a partir de las curvas de márgenes de los problemas parciales tomando el caso más desfavorable en cada espacio. Como ambas curvas son constantes a tramos de espacio, basta tomar una partición suma de ambas; a cada tramo se le asocia el margen menor de los dos.

4.7 Protecciones en los retornos

En el capítulo 2 se modelaron los cambios de sentido en las estaciones terminales mediante un tramo de señalización ficticio, que comprende las dos apariciones del cambio de aguja en el modelo (cuando el tren lo cruza a la ida y cuando lo cruza a la vuelta), como se indica en la Figura 4.6.

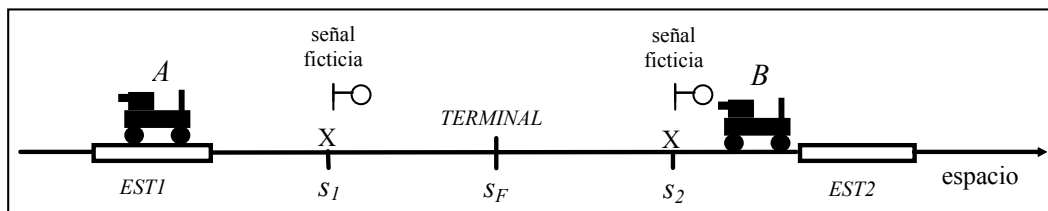


Figura 4.6. Modelado de las protecciones en un retorno

El instante de avistamiento de la señal ficticia situada en s_1 es siempre el instante de arranque de la estación $EST1$, pues el conductor del tren A no arrancará hasta que la cola del tren B no haya superado s_2 . Se comporta, pues, como una señal de salida de estación.

El cálculo del intervalo mínimo y de los márgenes de tiempo de un tramo de vía que contiene el retorno se resuelve dividiendo el tramo de vía en dos: el primero va desde el origen del tramo a final de línea (tramo s_1-s_F en Figura 4.6); el segundo va desde este punto hasta el final del tramo (s_F-s_2). El intervalo mínimo del tramo total es el mayor de los intervalos mínimos parciales, y la curva de márgenes es la concatenación de ambas calculadas respecto a un mismo intervalo de circulación.

El intervalo y márgenes en el tramo s_F-s_2 se resuelve según el tipo de protección vigente en la línea, pues en la salida de la terminal ya no hay ninguna restricción impuesta por el cambio de agujas; es el tren que viene detrás el que se detendrá antes para no ocupar el cambio.

El intervalo y márgenes en el tramo s_1-s_F según el tipo de protección vigente se resuelve:

- En *moving block*, suponiendo que la curva de proximidad al tren B es constante desde el instante en que la cola del tren pasa por el cambio hasta que el tren libera a la vuelta el cambio, teniendo en cuenta la distancia de seguridad.
- En los demás sistemas, añadiendo el tramo de señalización equivalente al modelo de la vía.

4. Análisis de la explotación	65
4.1 Explotación nominal de una línea cerrada	65
4.2 Análisis de las protecciones de una línea cerrada	66
4.3 Conducción continua: <i>moving-block</i>	68
4.4 Protecciones por tramos de señalización	71
4.5 Protecciones ATP por circuitos de vía	74
4.6 Protecciones ATP por circuitos y tramos de señalización	76
4.7 Protecciones en los retornos	77

5. Análisis de la conducción óptima

En este capítulo se aborda el problema del diseño óptimo de la conducción de un tren entre dos estaciones, cumpliendo restricciones de tiempo de recorrido y las propias del sistema, como son las características de la vía, de los sistemas de tracción y de las estrategias de conducción automática empleadas. El criterio de optimización principal es minimizar el consumo de energía.

La solución propuesta parte del modelo detallado del sistema presentado en el capítulo 2, y se resolverá por métodos de búsqueda directa utilizando el simulador descrito en el capítulo 3 para evaluar tiempos de recorrido y consumo de las conducciones.

Se ha estudiado y resuelto el problema para los dos tipos básicos de conducción: conducción por vectores de deriva y conducción continua:

- En conducción por vectores de deriva las variables independientes son las velocidades que definen dichos vectores. La solución de este problema es la más interesante desde un punto de vista práctico, pues es la empleada actualmente en muchos ferrocarriles.
- En conducción continua, la solución al problema es una sucesión de cambios de consigna de tracción en cualquier instante a lo largo del recorrido. Este planteamiento es más general, y el árbol de conducciones alternativas que genera es enorme. El diseño de la búsqueda y los heurísticos jugarán un papel importante para conseguir buenas soluciones en tiempos razonables.

Nota bibliográfica:

En [Juan, 95] y [Herrero, 95] se encuentra información más detallada sobre los algoritmos de optimización desarrollados para conducción por vectores de deriva y conducción continua,

respectivamente. También se describen las herramientas CAD de ayuda al diseño de la conducción construidas a partir de estas técnicas.

5.1 Planteamiento del problema

El problema de optimización que se plantea es encontrar la conducción de un tren entre dos estaciones que minimiza el consumo de energía, dados:

- Las características físicas de la vía.
- El perfil de velocidades máximas.
- La masa y las características de tracción del tren.
- La lógica de conducción empleada (por vectores de deriva o conducción continua).
- Un tiempo de recorrido objetivo en la interestación.

La curva de movimiento resultante ha de cumplir con las restricciones propias del sistema definido a partir de las características anteriores, y que fueron modeladas en el capítulo 2.

El cómputo de la energía consumida por el tren en la interestación tendrá en cuenta la energía devuelta en los frenados, afectada de un factor entre cero y uno que tiene en cuenta el porcentaje estadístico de esta energía que puede ser realmente aprovechada por otro tren.

5.2 Soluciones mediante programación matemática

Las soluciones clásicas del problema se basan en un modelo analítico del sistema sobre el que aplicar algoritmos de programación matemática. El sistema objeto de estudio es fuertemente no lineal, y es necesario simplificarlo para obtener un modelo matemático susceptible de ser utilizado en algoritmos de este tipo.

Nota bibliográfica:

En [Jiaxin & Howlett, 92, 93] se presenta un modelo analítico simplificado del movimiento de un tren. Considera un perfil llano, sin restricciones de velocidad máxima, sin curvas en la vía y un modelo de tracción muy básico. Se demuestra que bajo estas suposiciones la conducción óptima en consumo dado un tiempo objetivo es realizar ciclos de deriva-remotor entre dos velocidades. Mediante técnicas de programación matemática se optimiza el valor de estas velocidades. Estos resultados no son directamente aplicables para el diseño de conducciones reales, debido a las simplificaciones introducidas en el modelo.

La gran ventaja que presentan los métodos de optimización por búsqueda directa es que independizan hasta cierto punto la evaluación de la búsqueda en sí. Por el contrario, la resolución de un problema por programación matemática depende fuertemente del modelo, y complicar el modelo añadiendo una característica nueva puede suponer que ya no sea aplicable el método (por ejemplo al convertir una característica lineal en no lineal).

5.3 Métodos de búsqueda directa

Los métodos de optimización por búsqueda directa se basan en un modelo de la realidad independiente del proceso de búsqueda. Este esquema tiene las siguientes ventajas:

- No es necesario modelar el sistema mediante una expresión analítica; es suficiente con un proceso de evaluación, que puede incluir simulaciones de la realidad.
- El modelo puede ser muy complejo, y por tanto muy fiel a la realidad.
- Se facilita el mantenimiento del modelo, es decir, es posible mejorar o alterar su comportamiento sin necesidad de rediseñar la estrategia de búsqueda.
- Se puede utilizar directamente el conocimiento de los expertos sobre el sistema para guiar el proceso de búsqueda.

La principal desventaja de los métodos de búsqueda directa es que pueden ser lentos, pues cada proceso de evaluación puede requerir cálculos complicados e incluso lanzar una simulación. Este problema se resuelve mediante un diseño adecuado del algoritmo de búsqueda (diseño jerárquico en etapas, heurísticos) y mediante la construcción de modelos de simulación rápidos. El incremento de la capacidad de cálculo de los procesadores actuales también ayuda considerablemente a solucionar este problema.

En métodos de búsqueda locales no se garantiza en general que el óptimo local dado como solución al problema sea el óptimo absoluto. Este problema no suele ser importante en aplicaciones reales; si el algoritmo está bien diseñado, aprovechando el conocimiento heurístico del problema, es en general poco probable perder soluciones mucho mejores que las encontradas por el algoritmo. Por otro lado, en problemas de ingeniería es más importante encontrar soluciones buenas que soluciones óptimas.

Nota bibliográfica:

En [Cuadra, 90] se propone un método sistemático y general para desarrollar herramientas de optimización de diseño por ordenador. Incluye desde el establecimiento teórico y formal del problema de diseño hasta la implantación informática, pasando por la extracción y representación del conocimiento. El proceso de diseño se divide en optimizaciones parciales, cada una de las cuales es una búsqueda sistemática con distintos tipos de variables y espacios de búsqueda. El método de optimización que se propone se denomina Optimización Estructurada Multiatributo. Este enfoque ha sido el utilizado para resolver los problemas de optimización en el presente trabajo.

Sistemas de diseño asistido CAD

Los sistemas CAD tradicionales emplean modelos precisos de la realidad. Utilizan los ordenadores únicamente como procesos de evaluación, dejando el análisis y la proposición de nuevos diseños al usuario. Los métodos de diseño basados en búsqueda directa integran los procesos de evaluación y de proposición de nuevos diseños en el mismo programa de ordenador. El usuario realiza una función de nivel superior, definiendo los parámetros que controlan la búsqueda (precisión de resultados, tiempo máximo de cálculo, bases de datos, etc.) y eligiendo bajo criterios expertos la solución entre los candidatos que le presenta la herramienta. Esto se suele llamar en la literatura técnica ‘CAD inteligente’.

Nota bibliográfica:

En [Cuadra, 90] se revisan los términos empleados en la bibliografía para distinguir las herramientas de diseño que sólo evalúan (CAD tradicional) de aquellas capaces de tomar decisiones. Para estas últimas se han utilizado los términos ‘ICAD’ (*Intelligent CAD*, [Waldron, 89]), ‘IIICAD’ (*Intelligent Integrated Interactive CAD*, [Tomiya & Ten Hagen, 87]), ‘*active design models*’ ([Kalay et al, 87]) y ‘*Automated CAD*’ [(Zhang, 89)].

Metodología de la búsqueda directa

En los métodos de búsqueda directa, el proceso de búsqueda propone sistemáticamente nuevas combinaciones de las variables independientes al proceso de evaluación, que se encarga de calcular el valor de la función objetivo. El proceso termina cuando el algoritmo no es capaz de encontrar una solución mejor. La Figura 5.1 es la representación ANA de este esquema.

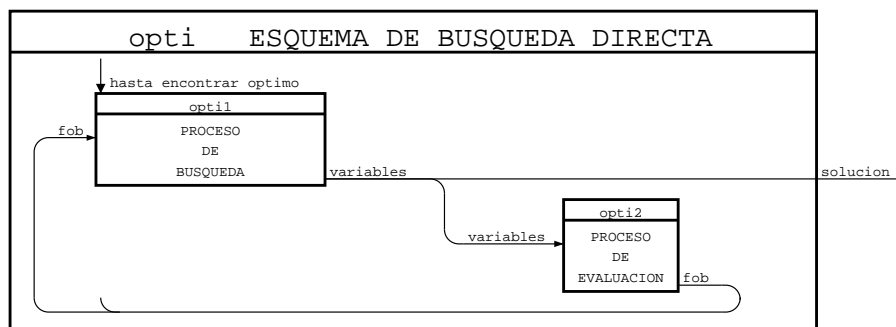


Figura 5.1. Esquema básico de optimización por búsqueda directa

Búsquedas locales y en árbol

El proceso de búsqueda se puede plantear como búsqueda en árbol o como búsqueda local, dependiendo de la naturaleza del problema.

La búsqueda en árbol va evaluando el árbol de combinaciones de las variables independientes. Los heurísticos se encargan aquí de guiar el proceso de búsqueda, dirigiéndolo hacia ramas con probabilidades altas de encontrar el óptimo. Estos métodos se suelen aplicar a problemas con las siguientes características:

- Problemas con variables muy discretas, de mal comportamiento local.
- Problemas con un número variable de variables independientes, debido a que cada solución está formada por un número variable de decisiones consecutivas.
- Problemas cuyas variables independientes se estructuran de manera natural como una secuencia de decisiones; el árbol de posibilidades será reflejo de esta estructura. En estos problemas se deben introducir heurísticos relacionados con determinados niveles de decisión.

Como se estudia en el apartado 5.5, el problema de optimización de la conducción continua reúne las anteriores características.

La búsqueda local se basa en calcular óptimos locales por medio de algoritmos de optimización basados en la posibilidad de interpolar y extrapolar resultados según criterios de distancia. La solución será el mejor de los óptimos locales. En problemas con mínimos locales, es importante una buena selección de los puntos iniciales, que a su vez pueden ser obtenidos como solución de otras búsquedas locales utilizando un modelo menos detallado o pasos de búsqueda más gruesos (optimización en etapas). En este tipo de problemas, el número de variables independientes es fijo, y han de tener un buen comportamiento local.

El problema de optimización de la conducción por vectores de deriva será resuelto por este método.

Nota bibliográfica:

En [Gill et al, 81] se presenta una amplia gama de estrategias de búsqueda local, clasificadas según el tipo de las funciones que proporcionan el estado de las restricciones y el valor de los atributos. Otros criterios de clasificación son según el tipo de las variables (enteras, reales, etc.) y las características de la región factible.

5.4 Optimización de la conducción por vectores de deriva

Se trata de resolver el problema de optimización descrito en el apartado 5.1, siendo las variables independientes del problema los vectores de deriva. El sistema real se modela como se describe en el capítulo 2, y el algoritmo de simulación que evalúa el tiempo y el consumo de cada conducción es el descrito en el capítulo 3.

5.4.1 Variables independientes

Se permitirá hasta un máximo de tres vectores de deriva distintos en la misma interestación, cada uno definido por el conjunto de variables:

$$\{s, vd, vr\}$$

[5.1]

donde:

vd : velocidad de deriva

vr : velocidad de remotor

s : espacio de comienzo de validez de vd , vr

Se incorpora además como variable independiente la consigna de deceleración en el frenado final, f , que puede tomar un número discreto y pequeño de valores. Esta variable es de utilidad para aumentar el rango de tiempos de recorrido alcanzables con conducciones económicas. Si se puede aprovechar eficientemente la energía devuelta en los frenados, la deceleración final (que condiciona la duración del proceso de frenado) puede ser importante en el balance energético total en una interestación.

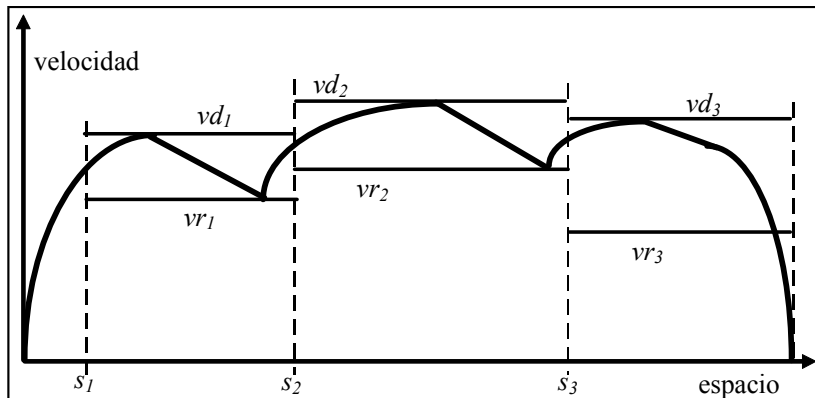


Figura 5.2. Variables independientes en conducción por vectores de deriva

Teniendo en cuenta los tres vectores de deriva y el frenado, el problema tiene diez variables independientes:

$$\{ \{s_1, vd_1, vr_1\}, \{s_2, vd_2, vr_2\}, \{s_3, vd_3, vr_3\}, f \} \quad [5.2]$$

La Figura 5.2 esquematiza un ejemplo de vectores de deriva en una interestación.

El espacio de las variables independientes está restringido por exigencias de diseño de las soluciones, y por la misma definición de las variables:

- La diferencia entre la velocidad de deriva y de remotor ha de ser mayor que una cantidad fija (v_0) determinada por el diseñador:

$$vd - vr > v_0 \quad [5.3]$$

- La velocidad de deriva no podrá superar la velocidad máxima permitida para el tren en el tramo (v_{max}), y la de remotor no podrá ser inferior a una velocidad mínima (v_{min}) fijada por el diseñador para toda la interestación:

$$\begin{aligned} v_{max} &> vd \\ vr &> v_{min} \end{aligned} \quad [5.4]$$

- No se pueden solapar los espacios de vigencia de dos vectores de deriva, y dos derivas consecutivas han de estar separadas al menos un espacio mínimo fijado por el diseñador (s_{min}). Si s_t es la longitud total de la línea, se establecen las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} s_1 &> 0 \\ s_2 &> s_1 + s_{min} \\ s_t &> s_3 > s_2 + s_{min} \end{aligned} \quad [5.5]$$

5.4.2 Función objetivo

Cada conducción se caracteriza por un consumo, pero sólo son válidas aquellas conducciones que además cumplan la restricción de tiempo de recorrido con suficiente precisión.

El proceso de búsqueda no deberá guiarse sólo por criterios de mínimo consumo, sino que deberá buscar soluciones que cumplan el tiempo de recorrido. Para ello, se introducirá esta restricción en la función objetivo, penalizando su incumplimiento. La expresión de la función objetivo es la siguiente:

$$fob(c, t) = \frac{c}{c_{max}} + k \frac{\varepsilon(t)}{t_{obj}}$$

[5.6]

donde:

- c : consumo total
- t : tiempo de recorrido
- c_{max} : consumo máximo en la interestación
- t_{obj} : tiempo de recorrido objetivo
- $\varepsilon(t)$: función de error
- k : constante

El consumo máximo en la etapa se obtiene simulando una conducción a marcha tendida, que es la que emplea un menor tiempo de recorrido (ver capítulo 3).

El consumo aparece en la función objetivo relativo al máximo, y el tiempo de recorrido relativo al tiempo objetivo. Entonces la constante k se interpreta como importancia relativa entre el porcentaje consumido respecto al máximo y el error porcentual de tiempo de recorrido. Esta normalización permite dejar constante k para optimizaciones en interestaciones de distinta longitud, con distintos consumos y tiempos de recorrido.

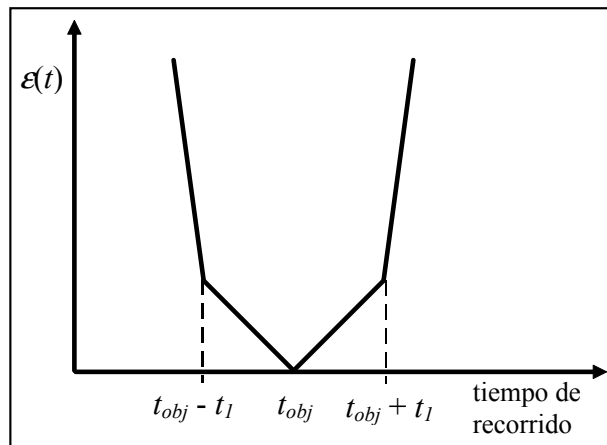


Figura 5.3. Función de error en tiempo de recorrido

En la Figura 5.3 la función $\varepsilon(t)$ penaliza el tiempo de recorrido con dos pendientes, dependiendo de la cercanía al tiempo objetivo. Tiempos que difieren en menos de t_1 del objetivo se penalizan con el valor del error, y tiempos mayores se penalizan

típicamente con 10 veces su error, haciendo que las conducciones asociadas sean rápidamente despreciadas.

La penalización se elige continua y no discreta para mejorar el comportamiento del algoritmo de búsqueda local, guiándola por métodos de máximo gradiente.

5.4.3 Diseño de la optimización

La optimización se va a realizar por etapas. En primer lugar, se resolverá el problema completo de optimización considerando una única deriva en la interestación. A continuación se resolverá el problema considerando dos derivas, y sólo si esta solución mejora apreciablemente la primera, se considerará el problema de tres derivas. Las variables independientes consideradas en cada optimización son:

- Primera optimización: $\{ \{s, vd, vr\}, f \}$
- Segunda optimización: $\{ \{s_1, vd_1, vr_1\}, \{s_2, vd_2, vr_2\}, f \}$
- Tercera optimización: $\{ \{s_1, vd_1, vr_1\}, \{s_2, vd_2, vr_2\}, \{s_3, vd_3, vr_3\}, f \}$

La experiencia de los diseñadores dice que sólo merece la pena introducir más de una deriva en aquellas interestaciones largas y con fuertes variaciones de pendientes o velocidades máximas en su recorrido. El método de resolución busca primero soluciones sencillas, y sólo considera formas más complicadas si el ahorro en consumo es prometedor.

Cada optimización consta a su vez de tres fases:

- a) Rastreo. Se explora el espacio de variables independientes para seleccionar una lista de puntos iniciales prometedores para las búsquedas locales (puntos candidato).
- b) De-saturación. Si los puntos candidato se encuentran en una meseta (zona de función objetivo plana), se llevan al extremo de la misma, para que el algoritmo de búsqueda local sea sensible al explorar a su alrededor.
- c) Búsqueda local. Cada candidato es punto inicial de una optimización, que llevará a un óptimo local.

Al diseñador se le presentan como conducciones candidato un conjunto con los mejores óptimos locales. De ellos elegirá la conducción que mejor se adecue al problema global de explotación de la línea.

En los siguientes apartados se detallan las fases de optimización anteriores.

5.4.4 Rastreo

La función objetivo presenta óptimos locales, debido a que tiempos de recorrido cercanos al objetivo se pueden conseguir con conducciones distintas: rápidas al principio y lentas al final, con distintas combinaciones de deceleraciones de frenado, etc. El número de mínimos locales aumenta cuando las interestaciones son largas y varían en su recorrido los límites de velocidad máxima, ya que aumenta la riqueza de perfiles de marcha.

El objetivo de esta fase es encontrar puntos iniciales representantes de las distintas formas de conseguir tiempos de recorrido aceptables con consumos pequeños, es decir, conseguir representantes de los distintos valles de la función objetivo.

Para cubrir todo el espacio de variables independientes se elige un paso de muestreo en cada variable (excepto la variable de frenado), y se evalúa el consumo de todos los nodos de la red así formada. El paso ha de ser suficientemente grueso para que no lleve esta fase un tiempo excesivo, y suficientemente fino para no saltarse zonas interesantes. El criterio de elección de este paso se describe en el apartado 5.4.6.

El rastreo evalúa cada punto para cada posible valor de la variable de frenado f , ya que es muy discreta (habitualmente tiene dos tres valores posibles), y lleva a conducciones muy distintas para unos mismos vectores de deriva (mal comportamiento local para la siguiente fase).

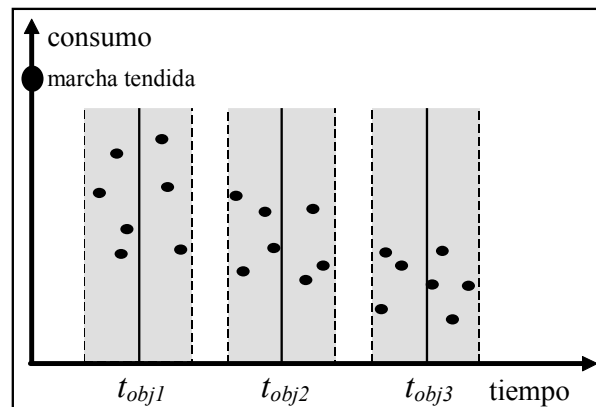


Figura 5.4. Resultado del rastreo para tres tiempos objetivo

La Figura 5.4 representa un ejemplo del resultado del rastreo del movimiento de un tren en una interestación para una deriva. En la interestación se desea construir conducciones para tres tiempos objetivo distintos, y las bandas alrededor de cada uno representan una tolerancia en tiempo. La nube de puntos indica el consumo y tiempo de cada conducción evaluada. El punto que destaca en el eje de consumos representa a la marcha tendida. Los puntos seleccionados para la siguiente fase para cada tiempo objetivo son los N mejores en consumo de cada banda, donde N lo fija el diseñador.

En la construcción de conducciones óptimas en una interestación (típicamente cuatro marchas separadas en tiempo de cinco a diez segundos) la fase de rastreo es común para todos los tiempos objetivo, por lo que puede merecer la pena disminuir el paso de muestreo para mejorar el comportamiento de las siguientes fases.

5.4.5 Desaturación

Los vectores de deriva llevan a un perfil {velocidad-espacio} para una interestación. Sin embargo, es posible que algunas de las variables que definen la conducción no estén activas, es decir, pequeñas variaciones de estas variables llevan al mismo perfil {velocidad-espacio}.

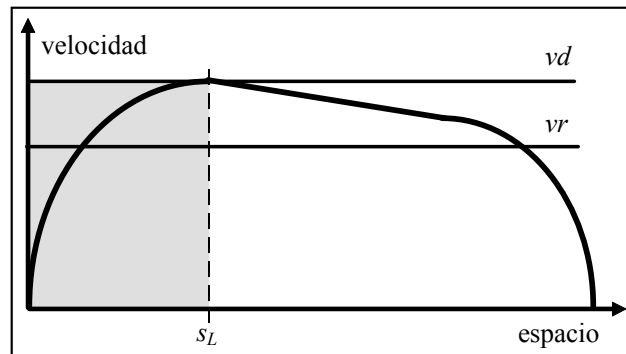


Figura 5.5. Zona insensible de variación de s_1

En la Figura 5.5, cualquier s_1 por debajo de s_L para $\{vd, vr\}$ fijados es indiferente, pues el tren no alcanza vd en espacios menores que s_L .

Con velocidades de deriva y de remotor ocurren casos análogos. Por ejemplo, velocidades de deriva por encima de la velocidad máxima del tren hacen que no esté activa, y velocidades de remotor cuando no se llega a derivar son igualmente insensibles.

Cuando una variable independiente no está activa, la función objetivo es plana en la dirección de esa variable. Si el algoritmo de búsqueda local tiene como punto inicial una variable saturada, es posible que no salga de la meseta, al no encontrar variación de la función objetivo a su alrededor. Para resolver este problema los puntos iniciales elegidos por la fase de rastreo son de-saturados. Sus variables independientes saturadas son llevadas a la zona más cercana donde la función objetivo es sensible. Por ejemplo, en la Figura 5.5 los espacios de comienzo de deriva s_1 menores que s_L son llevados a s_L .

El mecanismo utilizado para de-saturar una variable es por sensibilidad, incrementando o decrementando dicha variable manteniendo fijas el resto hasta

encontrar variación en la *fob*. En general, las variables *s* y *vd* saldrán de saturación al decrementarlas, y las variables *vr* al incrementarlas.

5.4.6 Búsqueda local

En la búsqueda local entrarán como variables independientes las correspondientes a cada optimización excepto la variable discreta de deceleración de frenado, *f*, que permanece constante al valor del punto inicial. La riqueza de soluciones que pudiera proporcionar los distintos valores de esta variable ya ha sido tomada en cuenta por el rastreo, que ha evaluado cada conducción para cada posible valor de esta variable (típicamente dos o tres). Así, el número de variables que manejará el algoritmo de búsqueda será de 3, 6 ó 9, según el número de vectores de deriva.

El algoritmo de optimización empleado ha sido una versión del Hooke & Jeeves [Hooke & Jeeves,69]. Está estructurado en varias etapas de búsqueda, cada una de ellas utilizando un incremento mínimo fijo para cada variable independiente. Cada etapa tiene como punto inicial el óptimo de la etapa anterior, y reduce el incremento mínimo en las variables independientes. La solución es el óptimo de la última etapa, donde el incremento mínimo en cada variable coincide con la precisión requerida.

La estrategia de búsqueda de cada etapa se basa en sucesiones de procesos de evaluación alrededor del óptimo provisional (exploración) y avance en la dirección de máxima variación de la *fob*. El diseño detallado de este algoritmo se describe en el Apéndice B.

Es necesario por tanto especificar el número de etapas, el incremento mínimo de cada variable y el criterio de reducción de incremento mínimo entre dos etapas consecutivas.

Además, hay que especificar en el algoritmo el rango de variación permitido en cada variable independiente. Los movimientos de avance del algoritmo se saturan al salirse de rango, proponiendo puntos siempre dentro de la zona permitida.

5.5 Optimización de la conducción continua

Se trata de resolver el problema de optimización descrito en el apartado 5.1, donde las variables que definen la conducción entre dos estaciones son una sucesión de consignas de tracción y los instantes de tiempo en que se aplica cada consigna. El sistema real se modela como se describió en el capítulo 2, y el algoritmo de

simulación que evalúa el tiempo y el consumo de cada conducción se basa en el descrito en el capítulo 3.

El problema de optimización por vectores de deriva es un caso particular del ahora propuesto, ya que se puede considerar como un problema de conducción continua donde existe una restricción adicional, que la sucesión de consignas de tracción solución respete la lógica de conducción por derivas; o de otra forma, que a partir de la solución del problema continuo se pueda encontrar un conjunto de vectores de deriva que representen dicha solución.

La conducción continua o libre es realmente la conducción más general, que incluye cualquier lógica de conducción. De ahí su interés teórico, pues las soluciones óptimas en consumo por conducción continua establecen el límite de mejora de otras conducciones, y pueden servir de punto de partida en el diseño de conducciones restringidas.

Los métodos de búsqueda directa en árbol son adecuados para problemas como el planteado, donde el número de variables (consignas de tracción y tiempos de aplicación) es variable en cada conducción, muy discretas y de mal comportamiento local.

Para determinar si una consigna de tracción en un instante de recorrido es admisible (si viola o no las restricciones) es necesario conocer la trayectoria hasta la próxima decisión, es decir, hay que simular el movimiento del tren desde el arranque hasta el instante de esta decisión. Esta característica hace que sea adecuada la búsqueda en árbol de soluciones incompletas, que evita volver a simular las mismas secuencias de consignas en un mismo tramo del recorrido.

La dimensión del árbol completo es enorme. Se puede estimar a partir del número medio de consignas posibles que pueden seguir a una dada (coeficiente de ramificación, c), y del número máximo de decisiones hasta completar el recorrido, n ; el número de evaluaciones (nodos) para recorrer completamente el árbol sería:

$$n_{\text{evaluaciones}} = \frac{c(1 - c^n)}{1 - c}$$

[5.7]

En una interestación media, de tiempo de recorrido máximo 100 s, donde se pueden tomar decisiones cada 5 s, se pueden tomar 20 decisiones como máximo. Si en media se puede elegir entre 3 decisiones en cada nodo, hay que simular del orden de 3.500 millones de conducciones alternativas. Es fundamental el uso de heurísticos que corten ramas y guíen la búsqueda.

5.5.1 Módulo de evaluación y variables independientes

Una conducción continua se define por una sucesión de consignas de tracción y tiempos de finalización de cada una:

$$\{ (u_1, t_1), (u_2, t_2), \dots, (u_N, t_N) \}$$

[5.8]

donde u_k es la consigna de tracción aplicada en el instante t_{k-1} , que durará hasta el instante t_k , y N el número de consignas hasta completar el recorrido entre dos estaciones. El instante de aplicación de la primera consigna es el origen de tiempos.

Los valores que puede tomar una consigna son:

- Aceleración (aceleración objetivo positiva)
- Deriva (eliminar tracción)
- Regulación (consigna de mantener la velocidad a su valor actual)
- Frenado (aceleración objetivo negativa)

Estas cuatro consignas aumentan en número si el equipo de tracción permite fijar distintas aceleraciones o deceleraciones objetivo (típicamente se utilizan una fuerza de tracción, la máxima, y una o dos deceleraciones).

Conducciones admisibles

Supongamos una conducción expresada como una secuencia de consignas de la forma [5.8], y sea $\mathbf{X}_k = (s_k, v_k, t_k, c_k)$ el espacio, la velocidad, el tiempo y el consumo acumulado como resultado de aplicar la consigna u_{k-1} . El nuevo estado \mathbf{X}_{k+1} se obtiene tras la aplicación de la consigna u_k . Esta aplicación la realiza un módulo de simulación de consigna esquematizado en la Figura 5.6.

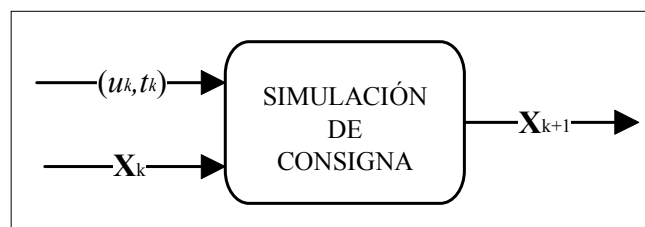


Figura 5.6. Módulo de simulación de consigna

Para simular la conducción completa, obteniendo el consumo y el tiempo asociados, es suficiente aplicar este módulo a la sucesión de consignas de que se compone.

Las restricciones que ha de cumplir una conducción para que sea admisible son las siguientes:

- a) El tren debe alcanzar la estación destino con velocidad nula. Antes de este punto la velocidad nunca debe anularse.
- b) La curva de movimiento que describe el tren no debe violar los límites de velocidad máxima vigentes en ningún punto del recorrido.
- c) El tiempo de recorrido de la interestación debe ser el objetivo, con cierta tolerancia.

La comprobación de que una conducción cumple las restricciones anteriores (utilizando como evaluador el simulador anterior) quedaría a cargo del proceso de búsqueda, complicándolo en exceso. La restricción (a) ofrece problemas especiales, ya que resultaría tedioso preocuparse además de guiar la búsqueda hacia conducciones que acaben con velocidad nula en el destino.

La solución aplicada consiste en integrar las restricciones (a) y (b) en el módulo de evaluación, y dejar en el módulo de búsqueda sólo la restricción (c), que será tratada introduciéndola en la función objetivo como una penalización. La búsqueda entonces no estaría restringida, y cualquier conducción sería admisible. Este diseño requerirá redefinir las consignas de conducción del nuevo simulador.

Diseño del módulo básico de simulación

La restricción de llegar al destino con velocidad nula se convierte en una restricción de curva {*velocidad-espacio*} calculando la curva de frenado límite en estación. Una vez que el movimiento del tren corta a esta curva, el tren debe frenar hasta parar en estación. Esta técnica se puede emplear igualmente para evitar violar restricciones de velocidad máxima cuando ésta disminuye su valor.

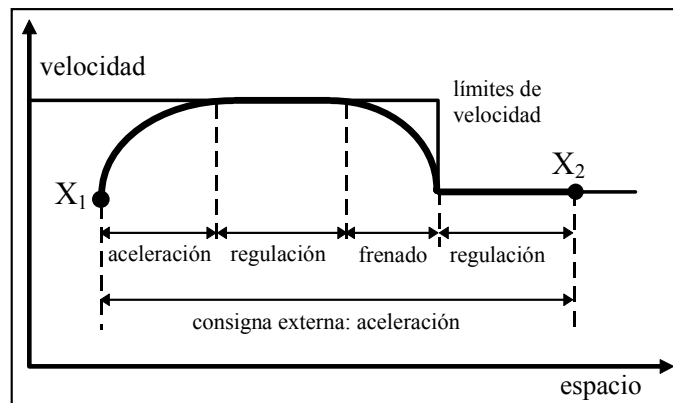


Figura 5.7. Respuesta del simulador ante consigna exterior de aceleración

El módulo de simulación se debe encargar de respetar el perfil de velocidades máximas formado teniendo en cuenta las curvas de frenado. Para ello, incorpora un módulo que traduce una consigna exterior a una sucesión de consignas internas que respetan los límites.

La Figura 5.7 representa la respuesta de este simulador ante una consigna exterior de *acelerar* en el estado \mathbf{X}_1 a mantener entre t_1 y t_2 ; el algoritmo debe dar como solución el estado \mathbf{X}_2 , después de superar la restricción de velocidad con los cambios de consigna adecuados (*acelerar-regular-frenar-regular*). Se distingue, pues, entre la consigna exterior, *acelerar*, que significa que se debe acelerar mientras no se violen los límites de velocidad, y las consignas internas dadas al sistema de tracción para llegar hasta t_2 . El módulo de búsqueda sólo manejará consignas exteriores, simplificando su lógica, y las consignas internas quedarán ocultas en el módulo de evaluación.

La Figura 5.8 representa el módulo básico de simulación de consigna externa. Está formado por el módulo de simulación de consigna elemental *simcon2* y un módulo de elección de dicha consigna *simcon1*, que se aplican hasta que se alcanza el tiempo objetivo de la consigna externa. El módulo *simcon2* se detiene al límite de las restricciones de perfil de velocidad, y el módulo *simcon1* elige la consigna elemental que resuelve la restricción violada.

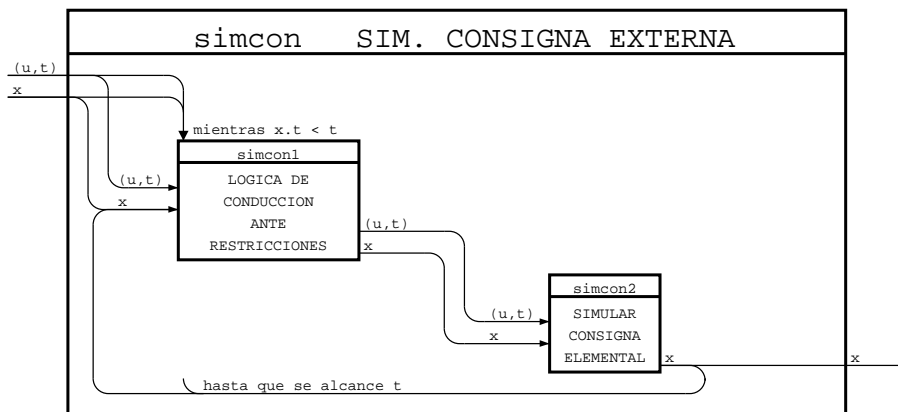


Figura 5.8. Módulo básico de simulación de consigna externa

La consigna externa de frenar deja de tener sentido, ya que la consigna de frenado final y las consignas de frenado para evitar límites de velocidad máximas aparecerán como consignas internas del evaluador. Salvo estos casos, no tiene sentido proponer un frenado, ya que siempre es mejor una estrategia de conducción basada en derivas por problemas de rendimiento.

El módulo de búsqueda ha de proponer conducciones como sucesiones de consignas externas de aceleración, deriva y regulación, en un problema libre de restricciones. Para evaluar una conducción completa, se aplica iterativamente el módulo básico de simulación con la sucesión de consignas, hasta que el estado que obtenga el

simulador coincida con la parada en estación. El tiempo y el consumo asociado a ese último estado son el tiempo y el consumo asociados a la conducción.

No sólo se utilizarán los tiempos y consumos parciales del módulo de simulación para contribuir al cálculo de la función objetivo de una conducción; además guiarán la búsqueda en árbol. El tiempo y el consumo de soluciones incompletas serán la base para decidir cuáles serán las próximas ramas (próximas consignas) del árbol a explorar, con la ayuda de los heurísticos.

El módulo de simulación descrito se ha implementado a partir del simulador por eventos discretos del movimiento de un tren descrito en el capítulo 3. Para ello se elimina el tratamiento de eventos causados por los vectores de deriva de la conducción automática, y se introduce el evento que determina la finalización de la simulación por límite temporal. Es necesario además añadir un módulo que calcula la consigna interna a partir de la externa y del estado del tren.

5.5.2 Función objetivo

La función objetivo empleada en el problema de conducción continua es la misma que la empleada en el problema de conducción por vectores de deriva (ver apartado 5.4.2), donde intervienen el consumo a lo largo de la interestación y el error en tiempo de recorrido como una penalización.

5.5.3 Búsqueda en árbol

Un nodo del árbol de soluciones representa un estado del tren en el recorrido de la interestación (espacio, velocidad, tiempo, consumo acumulado). Una solución completa se compone de una lista de nodos, cuyo nodo terminal tiene como estado el total de la interestación y su velocidad es nula (se ha detenido en estación):

$$solu = \{ nodo_k \} \quad k=1,\dots,N$$

[5.9]

donde *solu* es la lista de nodos, *nodo_k* es el nodo *k*-ésimo y *N* es el número de nodos de que se compone esta lista.

De un nodo se llega al siguiente mediante una única consigna externa, mantenida un tiempo *t_c*. Este tiempo está acotado inferiormente por un tiempo mínimo *t_{min}* de mantenimiento de consigna, que elimina soluciones erráticas en que se cambia continuamente de consigna. El parámetro *t_{min}* limita además el número máximo de

cambios de consigna que se pueden realizar en la conducción, que se calcula como el tiempo de recorrido objetivo dividido entre el valor de dicho parámetro.

El tiempo de mantenimiento de consigna t_c se discretiza a incrementos del parámetro t_{inc} . Este parámetro determina la máxima precisión en tiempo de las consignas de conducción. Cuando se ordena una consigna nueva los posibles tiempos de mantenimiento de la consigna serán:

$$t_c \in \{ t_{min}, (t_{min} + t_{inc}), (t_{min} + 2 t_{inc}), \dots \}$$

[5.10]

El conjunto anterior contiene tiempos a partir del mínimo t_{min} a incrementos de t_{inc} .

Si se aumenta progresivamente el tiempo de mantenimiento de consigna externa ocurrirá, si la consigna es acelerar o regular, que el nodo generado sea un nodo terminal, debido a que la curva de movimiento cortará la curva de frenado límite en estación destino, y el tren finaliza el recorrido. Si la consigna externa es derivar, puede ocurrir lo anterior, o también puede ocurrir que el tren llegue a detenerse antes de alcanzar la estación destino. En este caso, se descarta el nodo que ha llevado a esta situación.

Los dos parámetros definidos anteriormente, t_{min} y t_{inc} , determinan el tamaño del árbol de nodos. Son elegidos por el diseñador, en función de la precisión deseada, teniendo en cuenta que hacer muy pequeño cualquiera de los dos parámetros hace que el árbol y el tiempo de cálculo se incrementen fuertemente. Estos parámetros tienen además un sentido práctico, ya que no se puede cambiar demasiado rápido de consigna por comodidad de los viajeros (impone un t_{min}), y el equipo de conducción ATO tiene una precisión en tiempo determinada (impone un t_{inc}).

Generación del árbol completo de nodos. Expansión de un nodo.

Para generar el árbol completo de todos los estados a los que puede llegar un tren con las restricciones impuestas por los parámetros t_{min} y t_{inc} (fórmula [5.10]), cada nodo (excepto los terminales) se ha de expandir tantas veces como tipos de consigna externa se consideren. Existen como mínimo tres tipos de consigna externa (acelerar, regular y derivar), que aumentan si se consideran distintos valores de la aceleración. Cada consigna se mantiene un tiempo igual al tiempo mínimo de consigna t_{min} o igual al incremento mínimo de esta variable t_{inc} , dependiendo de si se cambia de consigna respecto al nodo anterior o no, respectivamente. De esta forma se genera todo el árbol de nodos sin repetir ninguno, si se comienza acelerando desde la estación de salida. En la Figura 5.9 se muestran ejemplos de cómo se generan nodos del árbol, donde cada nodo está etiquetado con la sucesión de consignas anteriores con las siguientes claves:

- A : aceleración un tiempo t_{min} ; a : aceleración un tiempo t_{inc}

- D : deriva un tiempo t_{min} ; d : deriva un tiempo t_{inc}
- R : regulación un tiempo t_{min} ; r : regulación un tiempo t_{inc}

En el ejemplo, cada nodo al expandirse da lugar a otros tres (sólo se considera un valor de aceleración). Los nuevos nodos se representan en vertical si se acelera, hacia la derecha si se deriva y hacia la izquierda si se regula.

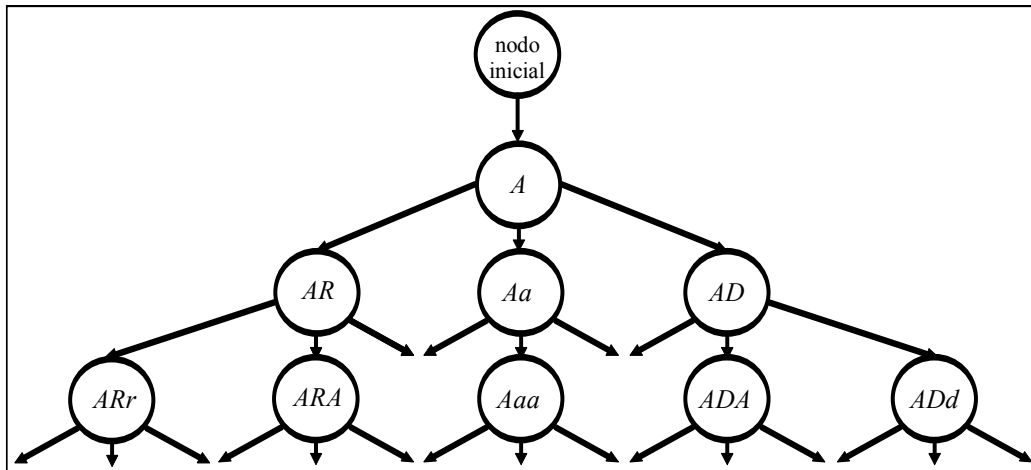


Figura 5.9. Generación del árbol de nodos

Lista de nodos activa

El algoritmo realiza una búsqueda en profundidad. En todo momento se mantiene una lista de nodos activa, que representa una trayectoria dinámica hasta llegar al último nodo de la lista. Cada uno de los nodos de que se compone la lista lleva asociado una lista ordenada con sus consignas de expansión. Cada una de estas consignas de expansión pueden estar pendientes (aún no se ha explorado el árbol en la dirección de esa consigna) o ya explorada.

Estrategia de búsqueda

En cada ciclo de búsqueda se expande el último nodo de la lista. La consigna que se emplea es la primera pendiente de su lista de expansiones. Cuando se alcanza un nodo terminal, se evalúa la solución (ya completa), y se guarda como óptimo en caso de que sea mejor que el óptimo provisional. A continuación se elimina el último nodo de la lista activa. Si el nodo que queda como último en lista tiene alguna consigna pendiente se expande, y si no se borra de la lista y se repite el proceso con el nodo anterior. La búsqueda termina cuando el primer nodo de la lista se termina de expandir.

En la Figura 5.10 se muestra un instante de la búsqueda. La solución incompleta activa está formada por los nodos {1,2,3,8}. En trazo más fino se muestran las consignas aún no expandidas de cada nodo de la lista. En color apagado se muestran

los nodos ya explorados. Los nodos cuadrados son nodos terminales. Las etiquetas de cada nodo indican el orden en que han sido creados.

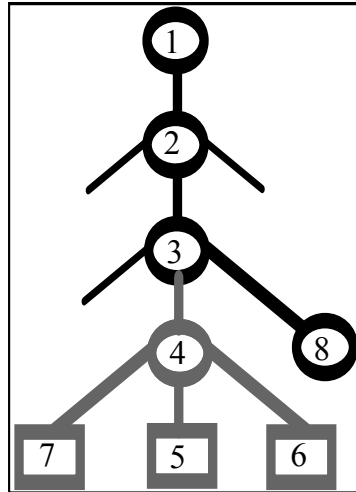


Figura 5.10. Ejemplo de búsqueda en profundidad

5.5.4 Control de la búsqueda mediante heurísticos

No resulta viable por tiempo de cálculo recorrer completamente el árbol de nodos que se genera cuando se eligen valores realistas para los parámetros de tiempo mínimo de consigna (del orden de 10 s) y de su mínimo incremento (del orden de 1 s). Es necesario encontrar criterios que permitan cortar ramas que no llevan a la solución óptima.

El árbol de búsqueda se reduce considerablemente si se tiene en cuenta que una conducción no se considera aceptable si la velocidad del tren disminuye demasiado en el recorrido (excepto en el arranque y frenado final). El diseñador de la marcha fija una velocidad mínima v_{min} para el recorrido tal que si se crea un nodo cuya velocidad es menor, este nodo no se continúa expandiendo, cortando la rama correspondiente. Al introducir la velocidad mínima se añade una restricción adicional, que permite desechar soluciones incompletas.

La utilización de heurísticos también puede disminuir el tamaño del árbol de nodos generado. La búsqueda heurística se basa en general en encontrar un modelo para evaluar nodos que permita descartar soluciones incompletas, podando la rama correspondiente al nodo evaluado. Los heurísticos son estimadores de la calidad de la solución que se espera obtener a partir de un estado intermedio dado, y ayudan también por tanto a guiar la búsqueda, explorando primero zonas más prometedoras.

Tipos de heurísticos empleados

Atendiendo a su mecanismo de actuación, los heurísticos se pueden clasificar en:

- Heurísticos que podan ramas del árbol. El heurístico puede asegurar que el árbol generado a partir de un nodo dado no contiene al óptimo.
- Heurísticos de orden de exploración. Dado un nodo, se establece el orden en que serán explorados sus nodos hijos, comenzando por el más prometedor. Aunque no es un criterio de poda de ramas, colabora a que los heurísticos que sí lo hacen sean más efectivos. El motivo es que los heurísticos de orden hacen que se disponga antes de un buen óptimo provisional, que como se verá aumenta la potencia de los criterios de corte. Si el diseñador limita el tiempo de cálculo de que dispone el algoritmo, convierte los heurísticos de orden en heurísticos de corte, ya que están decidiendo qué ramas no explorar.

Atendiendo a la información que utilizan los heurísticos empleados también se pueden clasificar en absolutos y relativos:

- Los heurísticos absolutos sólo utilizan información del nodo considerado. Su eficacia es independiente de lo avanzado que esté el proceso de búsqueda.
- Los heurísticos relativos comparan el resultado de su estimación con el óptimo provisional hasta el momento. Su potencia aumenta según se mejora el óptimo provisional.

En las fases iniciales de la búsqueda es importante disponer de buenos heurísticos absolutos, que encuentren rápidamente soluciones cuyo tiempo de recorrido se aproximen al tiempo de recorrido objetivo. A partir de este momento empiezan a trabajar de forma eficiente los heurísticos relativos, en general mucho más potentes si el óptimo provisional es bueno.

Heurísticos empleados

A continuación se describen los heurísticos que han demostrado disminuir tiempo de cálculo en el desarrollo del algoritmo de búsqueda:

- Heurístico absoluto de corte de conducciones lentas. Desde el nodo estudiado se realiza la conducción más rápida posible, imponiendo consigna externa de aceleración hasta finalizar el recorrido. Si el tiempo de recorrido es demasiado lento el nodo es desechado. Ninguna conducción a partir del nodo cumplirá con el tiempo objetivo.

- Heurístico absoluto de corte de conducciones rápidas. Desde el nodo estudiado se considera una conducción a la velocidad mínima v_{min} hasta el final del recorrido. Si el tiempo de recorrido es demasiado rápido, más allá de un umbral fijado por la frontera de penalización severa, el nodo es desechado. Ninguna conducción a partir del nodo cumplirá con el tiempo objetivo. El heurístico sería más eficiente si se simulara el frenado hasta alcanzar la velocidad mínima; sin embargo, esta estrategia también emplea más tiempo de cálculo.
- Heurístico relativo de corte de conducciones lentas. Se considera de nuevo el recorrido más rápido desde el nodo hasta el final de etapa. Si el tiempo t así calculado es mayor que el objetivo, todas las conducciones que parten del nodo son peores en tiempo que t , ya que serán aún más lentas. Si al evaluar la función objetivo con el tiempo t y el mejor consumo posible a partir del nodo se obtiene un valor peor que el del óptimo provisional, es seguro que a partir del nodo no se podrá mejorar la función objetivo, ya que en tiempo sólo se puede empeorar. El mejor consumo posible a partir del nodo se calcula suponiendo que la energía mecánica del tren en el nodo (cinética y potencial) se devuelve a la red, teniendo en cuenta el factor estadístico de regeneración.
- Heurístico relativo de corte por consumo excesivo. Este heurístico es el complementario del anterior. Se supone esta vez que el tiempo objetivo se cumplirá sin error, y se calcula el mejor consumo posible a partir del nodo como en el heurístico anterior. Si al evaluar la función objetivo con el tiempo objetivo y el mejor consumo el resultado es peor que el óptimo provisional, el nodo es despreciado, ya que lleva a conducciones que serán descartadas por consumo excesivo.
- Heurístico de orden de exploración de nodos hijos. Para decidir el orden en que se exploran las ramas de un nodo, se considera el tiempo de recorrido que se obtiene manteniendo la consigna del nodo hijo hasta el final del recorrido. Se explorarán primero los nodos con menor error respecto al tiempo objetivo. Este heurístico es más efectivo conforme los nodos están más cercanos del final del recorrido, y habrá por tanto menos cambios de consigna.

5.5.5 Algoritmo de búsqueda

La Figura 5.11 es la representación ANA del algoritmo de búsqueda empleado. Inicialmente la lista de nodos activa (*lnod*) contiene al nodo de partida, con el tren detenido en la estación origen; el número de nodos de esta lista (n) vale por tanto inicialmente 1. Finalizada la búsqueda, el algoritmo devuelve la lista de nodos óptima (*opti*).

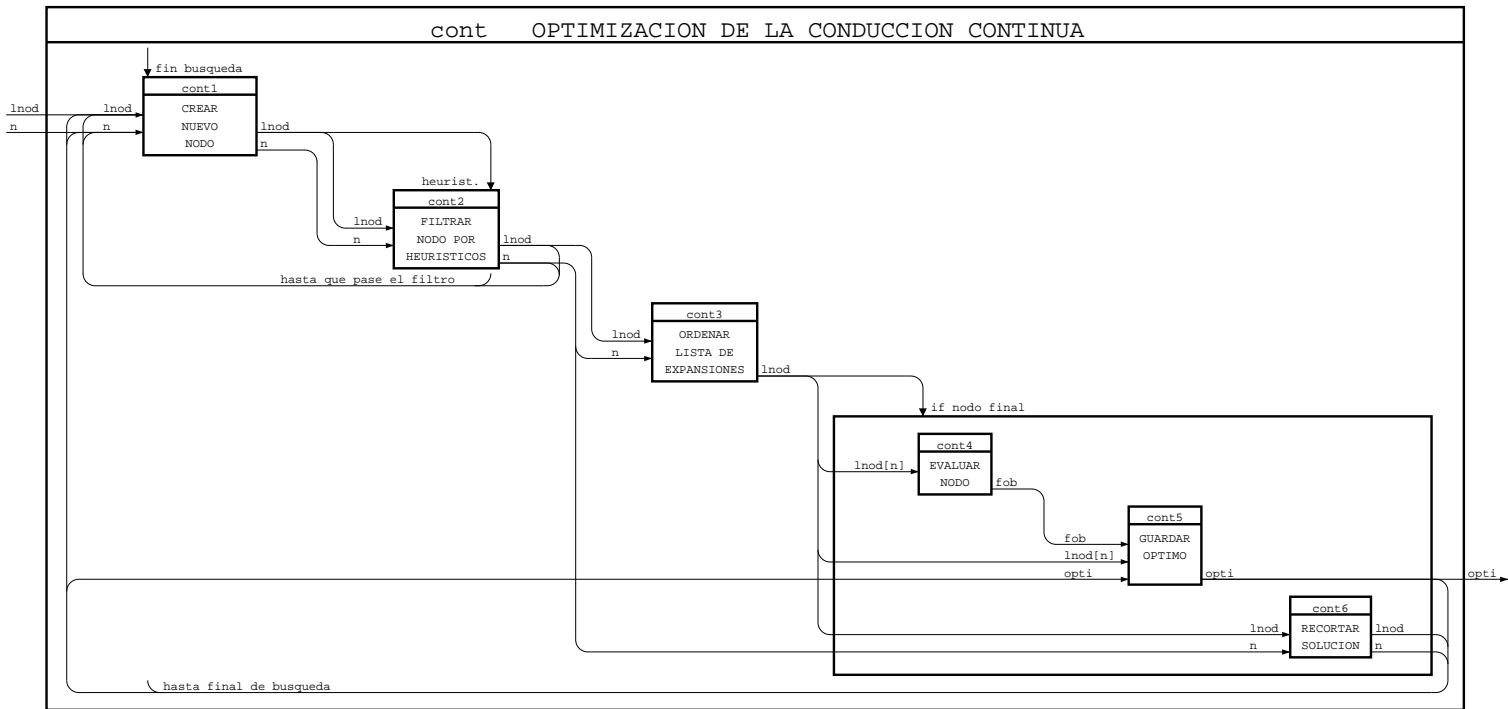


Figura 5.11. Algoritmo de optimización de la conducción continua

Comienza un ciclo de búsqueda creando un nuevo nodo a partir del último de la lista de nodos activa, con la primera consigna de la lista de consignas de expansión correspondiente al último nodo (módulo *cont1*). A continuación el nodo es evaluado por los heurísticos de corte (módulo *cont2*). Si el nodo no pasa el filtro que imponen los heurísticos, se desecha y se crea un nuevo nodo. Cuando el nodo creado pase el filtro, se añade a la lista de nodos activa y se ordenan sus consignas (módulo *cont3*), según los criterios heurísticos del apartado anterior. Si el nodo es terminal, se evalúa (módulo *cont4*), y se compara con el óptimo provisional, sustituyéndole si es mejor (módulo *cont5*). Si es nodo terminal, es necesario además eliminarlo de la lista de nodos activos (módulo *cont6*), y eliminar los nodos anteriores de esta lista hasta encontrar el primero con consignas de expansión no exploradas.

El ciclo de búsqueda anterior se repite hasta que hayan sido exploradas completamente las consignas de expansión de los nodos creados (y que no han sido desechados), o hasta que el diseñador de la conducción decide el final de la búsqueda, quedándose con el óptimo provisional.

5.5.6 Fases de la optimización

Con objeto de disminuir el tiempo de cálculo el algoritmo de optimización se divide en fases. Cada una es una búsqueda en árbol, que se caracteriza por sus parámetros de tiempo mínimo de mantenimiento de consigna t_{min} y el mínimo incremento de tiempo t_{inc} definidos en los apartados anteriores. En la primera fase se utilizan valores altos de t_{min} y t_{inc} , obteniendo una solución que servirá de punto inicial en la segunda fase, en la que se disminuye el valor de los parámetros, aumentando la precisión. Este proceso se repite hasta la última fase, en la que se utilizan los valores definitivos de los parámetros.

El objetivo es disponer rápidamente de buenas soluciones, y refinarlas en fases sucesivas. De esta forma los heurísticos relativos al óptimo provisional aumentan su eficacia, evitando explorar zonas del árbol que con una sola fase sí serían exploradas. Por otro lado, tiene ventajas prácticas para el diseñador, ya que le permite ir aumentando progresivamente la precisión hasta quedarse con una solución que considere suficientemente buena, en lugar de esperar a que finalice completamente el proceso de búsqueda.

Restricción de la búsqueda por bandas óptimas

Para disminuir el tiempo de cálculo se ha ensayado una técnica basada en restringir en cada fase de optimización el espacio de búsqueda alrededor del óptimo obtenido en la fase anterior. Cuando el proceso de búsqueda expande el árbol fuera de los límites definidos por una banda definida alrededor del óptimo anterior, dicha rama es cortada

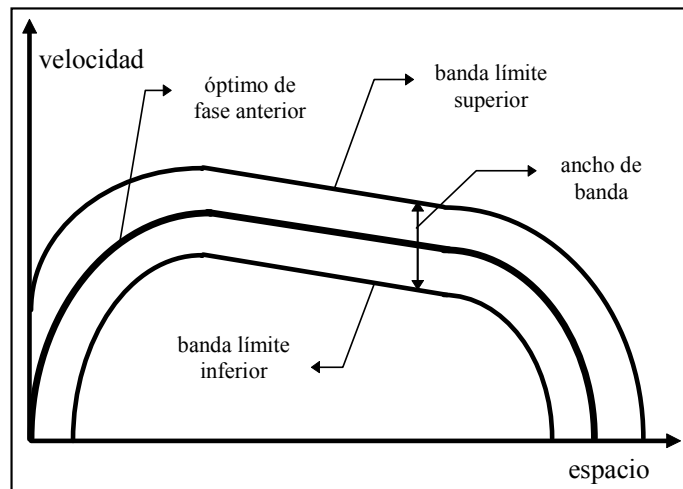


Figura 5.12. Restricción de la búsqueda por bandas óptimas

El ancho de la banda óptima disminuye progresivamente en las sucesivas fases de la optimización. Las fases iniciales, que parten de un punto inicial peor, están poco restringidas, mientras que las fases finales se restringen más duramente, ya que se dispone de un mejor punto inicial. Con ello se consigue además que no sean muy diferentes los tiempos de cálculo de cada fase, ya que fases con valores pequeños de t_{min} y t_{mod} (y un árbol de nodos muy grande) están más restringidas, y viceversa.

En el diseño de la optimización en fases restringidas se aprovecha el buen comportamiento local que tiene el problema, ya que perfiles de velocidad cercanos a uno dado poseen un tiempo de recorrido y un consumo también cercanos. Ello permite que el algoritmo avance, mejorando el óptimo provisional al modificarlo suavemente.

El número de fases de optimización, los valores de los parámetros t_{min} y t_{inc} y el ancho de la banda de cada fase son parámetros que elige el diseñador de la marcha. Para interestaciones de aproximadamente un kilómetro de distancia se han ensayado con buenos resultados búsquedas con cuatro fases, partiendo de unos valores de t_{min} y t_{inc} en la primera fase diez veces mayores que los definitivos en la última fase. En la primera fase las bandas coinciden con las velocidades máxima y mínima, es decir, no está restringida. Se han obtenido buenos resultados en las otras tres fases con anchos de banda de 50, 30 y 20 km/h, respectivamente.

5. Análisis de la conducción óptima	79
5.1 Planteamiento del problema	80
5.2 Soluciones mediante programación matemática	80
5.3 Métodos de búsqueda directa	81
5.4 Optimización de la conducción por vectores de deriva	84
5.4.1 Variables independientes	84
5.4.2 Función objetivo	85
5.4.3 Diseño de la optimización	87
5.4.4 Rastreo	88
5.4.5 Desaturación	89
5.4.6 Búsqueda local	90
5.5 Optimización de la conducción continua	90
5.5.1 Módulo de evaluación y variables independientes	92
5.5.2 Función objetivo	95
5.5.3 Búsqueda en árbol	95
5.5.4 Control de la búsqueda mediante heurísticos	98
5.5.5 Algoritmo de búsqueda	100
5.5.6 Fases de la optimización	102

6. Resultados

En este capítulo se presentan en primer lugar resultados de simulación del movimiento de un tren libre de perturbaciones obtenidos mediante las técnicas descritas en el capítulo 3. A continuación se presentan y discuten ejemplos de análisis de los distintos sistemas de protección modelados en el capítulo 4. Por último, se presentan algunos ejemplos de optimización de la conducción de un tren mediante las técnicas de búsqueda directa descritas en el capítulo 5.

También se describen brevemente las herramientas informáticas desarrolladas a partir de los modelos y técnicas descritas: herramienta PACA de ayuda al diseño de la señalización y conducción, herramienta CAT para la optimización automática de la conducción ATO por vectores de deriva y la herramienta ALEHOPT para la optimización automática de la conducción continua.

6.1 Simulación del movimiento de un tren

En este apartado se va a presentar el resultado de la simulación del movimiento de un tren a lo largo de dos interestaciones consecutivas. Las características de la vía corresponden al recorrido entre las estaciones de Argüelles y Plaza de España de la Línea 3 de Metro de Madrid, cuya descripción completa según el modelo propuesto en el capítulo 2 se encuentra en el Apéndice C. Las características de tracción del tren empleado en la simulación se encuentran descritas en el Apéndice D, y se corresponden con un tren real de la serie 2000 de Metro de Madrid compuesto de dos coches motores y dos remolques.

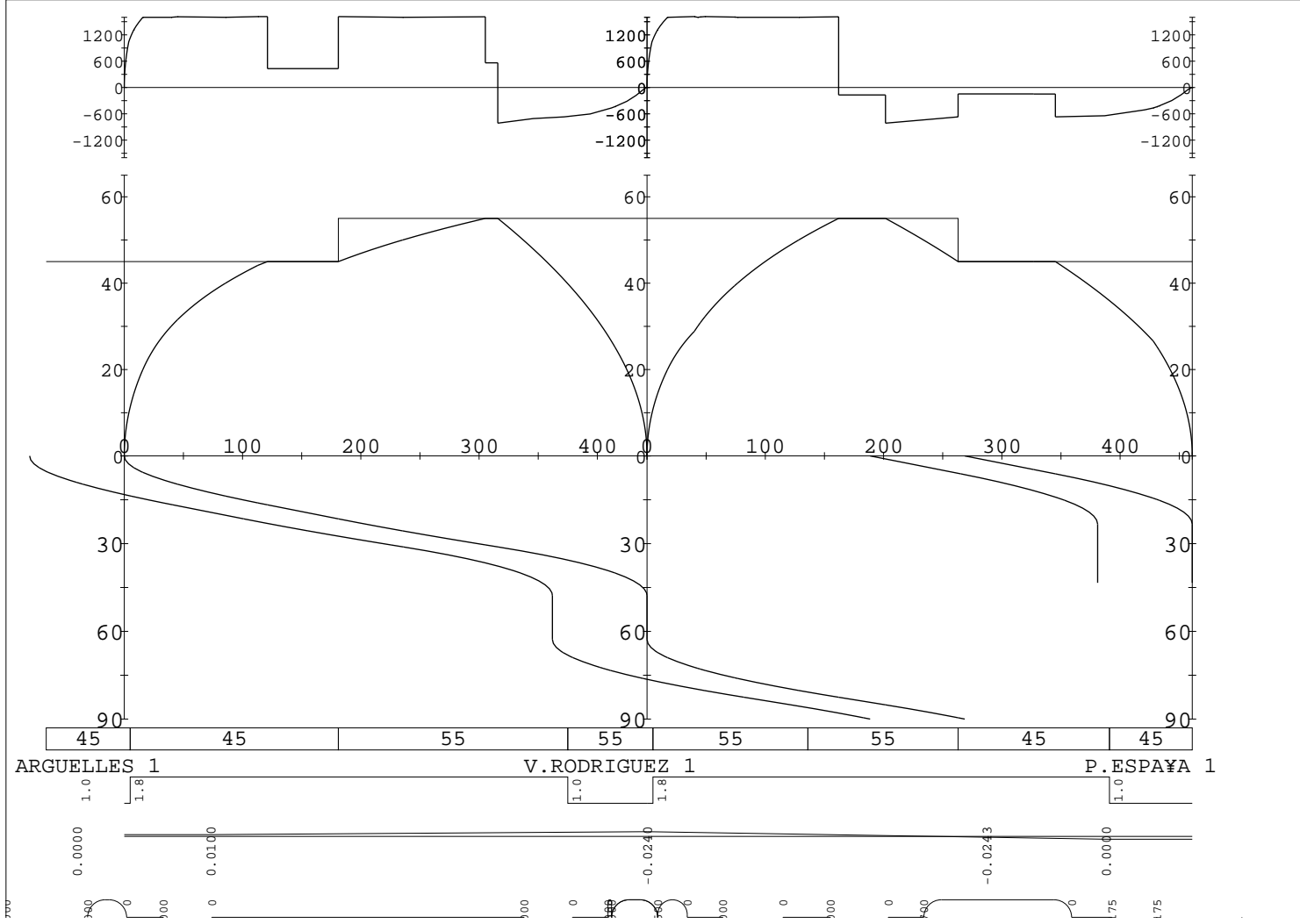
Se presenta en primer lugar la simulación del movimiento del tren cuando circula a la velocidad máxima que permite la seguridad del tren (marcha tendida). A continuación se presenta una conducción por vectores de deriva ATO.

6.1.1 Simulación de marcha tendida

En la Figura 6.1 se muestra el resultado de la simulación del movimiento de un tren a lo largo de dos interestaciones circulando a marcha tendida. En el eje horizontal se representa el espacio, con el cero situado en el espacio de arranque de cada estación. En el eje vertical se representan, de arriba a abajo, las siguientes magnitudes:

- Intensidad consumida por el sistema de tracción en Amperios.
- Velocidad del tren en km/h. Se representan también los límites de velocidad vigentes, correspondientes a la velocidad máxima de cada circuito de vía.
- Tiempo de recorrido. El tiempo crece hacia abajo, y se vuelve a cero cíclicamente cada 90 s (intervalo de circulación entre trenes). Con ello se consigue, además de permitir representar en una banda de tiempo fija recorridos largos, simular la persecución de trenes consecutivos. Por ejemplo, si en la gráfica se considera el tiempo $t=30$, un tren se encuentra situado aproximadamente en el espacio $s=300$, y el tren que le precede en línea se encuentra en ese momento detenido en la estación de Plaza de España. Las dos curvas en la gráfica de tiempos corresponden a la cabeza y a la cola del tren.
- Circuitos de vía. Cada rectángulo representa un circuito de vía, etiquetado con la velocidad máxima permitida en su recorrido.
- Factor de resistencia del aire. Se representa el factor de resistencia por efecto túnel modelado en el capítulo 2. En el recorrido existen dos valores diferentes, el correspondiente a las estaciones (factor=1), donde se considera igual resistencia que al aire libre, y el correspondiente al túnel (factor=1.8).
- Pendientes en la vía. Se representa el perfil de pendientes, y el valor del seno del ángulo en cada cambio. En la primera interestación la mayor parte es cuesta arriba, y en la segunda cuesta abajo. Se ha modificado el perfil de pendientes respecto al real de la Línea 3 para dar mayor variedad al ejemplo.
- Curvas en la vía. Se representan las curvas a la derecha mediante un arco hacia abajo, y las curvas a la izquierda mediante un arco hacia arriba. En cada curva se indica el valor del radio en metros. El 0 indica que comienza un tramo recto, y el signo del radio corresponde a curvas a la derecha (positivos) y curvas a la izquierda (negativos).

Figura 6.1. Simulación de marcha tendida



El eje de espacios inferior es absoluto desde el origen de la línea, situado en la estación cabecera origen (Moncloa).

El tren arranca en Argüelles, aumentando su velocidad hasta el límite de 45 km/h. El consumo también crece, hasta saturarse al entrar el motor en zona de potencia constante. Alcanzada la velocidad máxima, el tren regula su velocidad eligiendo una fuerza constante cuyo consumo se representa en la curva superior. Cuando desaparece la restricción de velocidad, el tren acelera nuevamente, y vuelve a regular al alcanzar el límite de velocidad (55 km/h). A los pocos metros de regular el tren comienza el frenado final que le lleva a detenerse en la estación de Ventura Rodríguez. La curva de intensidad consumida por el motor es negativa durante el frenado.

El tiempo de parada en estación es el nominal en la línea, que se ha tomado de 15 s. A continuación el tren acelera hasta la velocidad máxima, momento en que comienza a regular. Nótese que esta regulación supone un consumo negativo del motor, es decir, el tren está frenando. Esto es debido a que la vía presenta una pendiente descendente pronunciada, y se ha de frenar suavemente para mantener la velocidad. A continuación el tren frena para bajar a la nueva velocidad límite de 45 km/h justo al comienzo de la restricción. El tren regula a esta velocidad y frena para detenerse en la estación de Plaza de España.

A continuación se presentan los datos de tiempo de recorrido y consumo empleado en cada interestación. En el cálculo del consumo no se ha considerado la potencia que podría devolverse a la red en los frenados, ajustando a cero el factor estadístico de regeneración de energía.

	tiempo (s)	espacio (m)	consumo (kWh)
1ª interestación	50	442	6.5
2ª interestación	64	461	4.0

Tabla 6.1. Tiempos de recorrido y consumos a marcha tendida

A pesar de que la segunda interestación es más larga, es necesaria menos energía para recorrerla, debido a que es cuesta abajo.

6.1.2 Simulación de marcha mediante vectores de deriva

Se considera ahora conducción automática ATO mediante vectores de deriva. En las dos interestaciones se impone un sólo vector de deriva, válido para todo el recorrido, que vale:

$s_0 = 0$ espacio de comienzo de validez
 $v_d = 40$ km/h velocidad de deriva
 $v_r = 30$ km/h velocidad de remotor

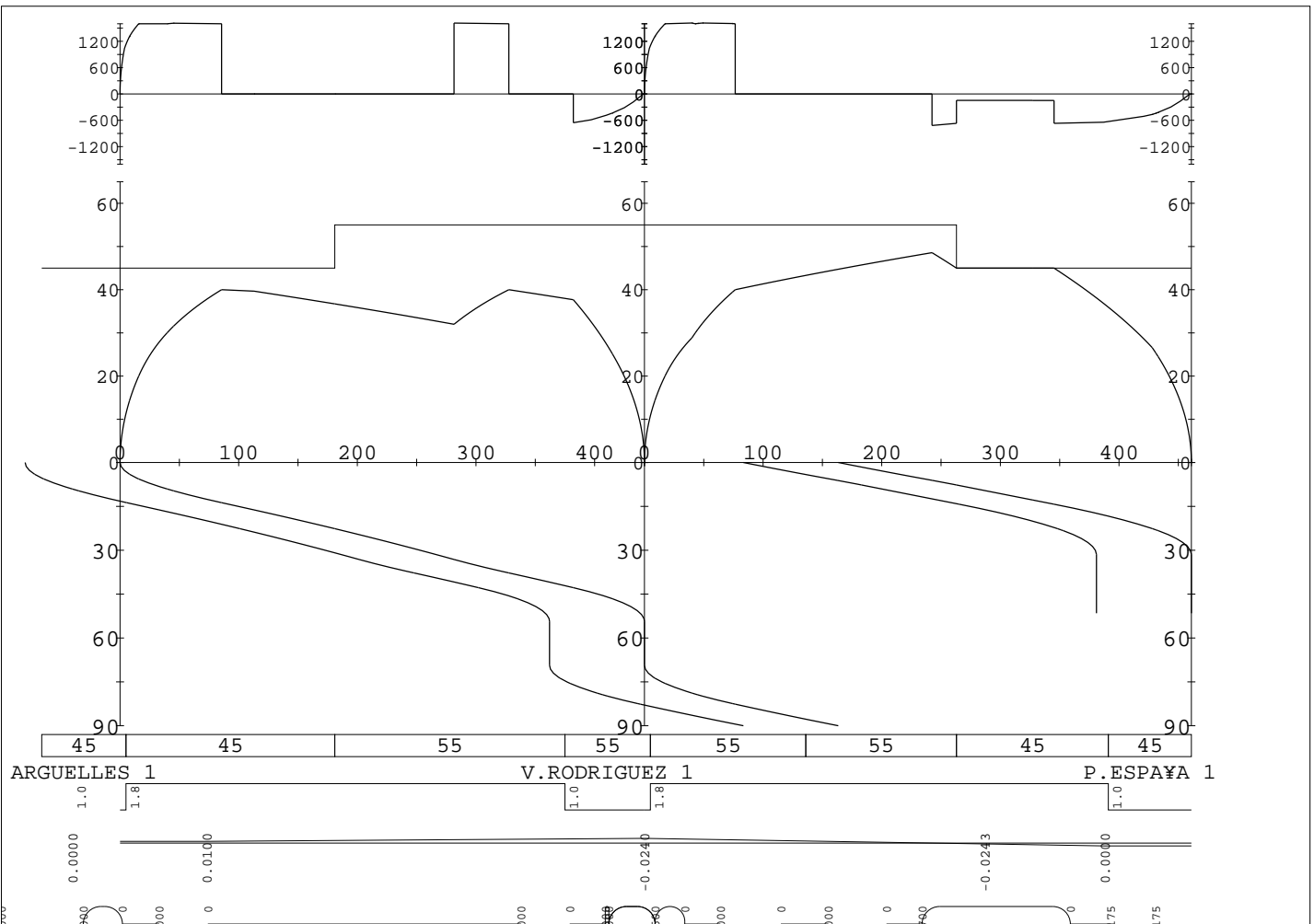


Figura 6.2. Simulación de recorrido por vectores de deriva ATO

Es decir, el tren debe eliminar tracción al alcanzar los 40 km/h, y vuelve a traccionar al bajar a 30 km/h, siempre y cuando se respeten los límites de velocidad.

En la Figura 6.2 se representa la simulación del movimiento con estos vectores de deriva. En la primera interestación el tren elimina tracción al alcanzar los 40 km/h, y la velocidad del tren disminuye hasta alcanzar los 30 km/h, volviendo a traccionar. De nuevo se elimina tracción al alcanzar la velocidad de deriva, y a continuación se frena para detener al tren en su parada en Ventura Rodríguez. Nótese que en los ciclos de deriva el consumo del tren es nulo.

En la segunda interestación se elimina tracción al alcanzar los 40 km/h, pero la velocidad del tren aumenta debido a la pendiente de la vía. A continuación es preciso efectuar un frenado para respetar la próxima restricción de límite de velocidad de 45 km/h. Alcanzada esta velocidad, es preciso seguir frenado suavemente para evitar que el tren aumente su velocidad, regulando a la velocidad máxima. Por último, el tren efectúa su frenado final. Nótese que la lógica de conducción por vectores de deriva ha de contemplar que al eliminar tracción el tren puede aumentar su velocidad, si la fuerza debida a la pendiente es mayor que la resistencia al avance. En este caso, se aplica el freno necesario para evitar que se violen los límites de velocidad.

Los tiempos de recorrido y consumos en cada interestación son los siguientes:

	tiempo (s)	espacio (m)	consumo (kwh)
1ª interestación	56	442	4.3
2ª interestación	66	461	2.3

Tabla 6.2. Tiempos de recorrido y consumos con conducción por vectores de deriva

Nótese en la segunda interestación que esta conducción por derivas emplea sólo dos segundos más que la marcha tendida, pero consume casi la mitad que esta marcha.

6.2 Análisis de la señalización

En este apartado se van a considerar las dos interestaciones del apartado anterior, Argüelles-Plaza de España. Para este tramo de línea, y considerando conducción a marcha tendida, se van a calcular el intervalo mínimo de circulación, la curva de frenado y los márgenes de tiempo definidos en el capítulo 4. Los cálculos se van a realizar utilizando los cuatro tipos de sistemas de protección modelados: *moving-block*, tramos de señalización, protección automática por circuitos y protección automática por circuitos más tramos de señalización.

6.2.1 *Moving-block*

En el sistema de protección *moving-block* un tren se puede aproximar al que le precede hasta que la curva de frenado del tren alcance la cola del tren que le precede en línea (más una distancia de seguridad). En la Figura 6.3 se representan las curvas de movimiento del tren, la curva de frenado (por encima de la gráfica temporal) y la curva de márgenes de tiempo (por debajo de la gráfica temporal en la primera interestación). Se ha tomado un intervalo de circulación entre trenes de 90 s (período para dibujar la curva de tiempos).

Cuando la cabeza del tren se encuentra en el espacio s en el tiempo t la curva de frenado representa el espacio donde se detendría el tren si aplicase el freno de emergencia en el instante t . En su cálculo se ha considerado un retraso de 1 s en la aplicación del freno, tiempo durante el que se supone que el tren tracciona (caso más desfavorable). Esto provoca que la curva de frenado correspondiente al frenado final del tren retroceda (ver gráfica).

La curva de márgenes de tiempo representa para cada punto el adelanto respecto al intervalo de circulación que puede tener el tren respetando la seguridad con el tren que le precede. Esto ocurre mientras la curva de frenado quede antes de una distancia de seguridad de la cola del tren precedente. Esta distancia se ha tomado en el ejemplo igual a 25 m. La curva de márgenes disminuye en la segunda mitad de la interestación (en la gráfica, el tiempo crece hacia abajo), debido al aumento de velocidad del tren y a que cuando el tren finaliza la interestación el tren precedente efectúa su parada en estación.

La disminución brusca del margen de tiempo en el espacio 200 m se debe a que el frenado asociado a este espacio llega hasta la cola del tren precedente cuando está detenido en estación (menos la distancia de seguridad). Los dos valores extremos del tiempo de margen en este punto corresponden al cálculo considerando el tiempo en que el tren precedente se detiene en Ventura Rodríguez y al tiempo en que este tren arranca.

En la primera interestación el mínimo de la curva de márgenes se produce justo en el pico de la curva de frenado, momento en el que el tren precedente está detenido en Plaza de España (ver gráfica). En la segunda interestación el mínimo se produce antes del pico, justo antes de realizar el primer frenado. Por ser además el mínimo absoluto en el tramo de línea estudiado es quien impone el intervalo mínimo de circulación sin violar las protecciones. El intervalo mínimo valdrá el intervalo de circulación considerado (90 s) menos el margen mínimo (29 s), resultado un intervalo mínimo de 61 s. Para disminuir el intervalo mínimo en el tramo considerado es necesario disminuir la velocidad del tren en el espacio correspondiente al mínimo de la curva de márgenes.

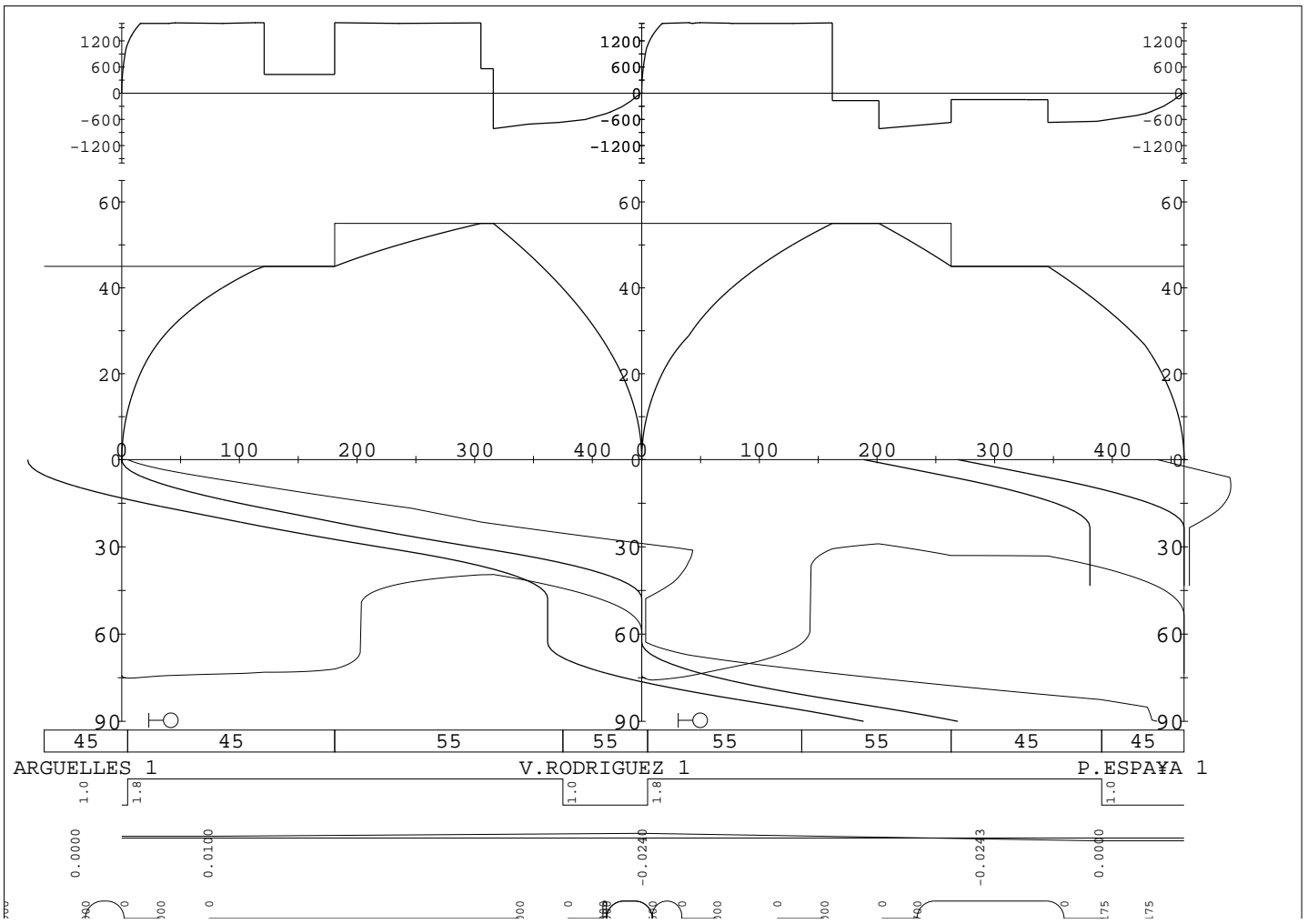


Figura 6.3. Curva de frenado y márgenes de tiempo con moving-block

6.2.2 Tramos de señalización

En este tipo de protección cada señal impone un intervalo mínimo de circulación entre trenes, que es igual al tiempo que transcurre desde que un tren pasa por el punto de avistamiento de la señal de entrada al tramo (definido en el capítulo 4) hasta que sale del tramo, dejando la señal de entrada en verde para el siguiente tren. Dado un intervalo de circulación, el tiempo que un tren puede adelantarse a este intervalo sin ver la señal en rojo (margen de tiempo) es igual al tiempo que transcurre desde que se puso la señal de entrada al tramo en verde hasta el instante en que se avista la señal. A todo el tramo señalizado se le asocia este margen, formando una curva de márgenes de tiempo constante por tramos. Las señales de salida de estación tienen un tratamiento especial, debido a que un tren no arranca de estación hasta que el conductor ve la señal de salida en verde, aunque pudiera avanzar unos metros hasta ella estando en rojo.

En la Figura 6.4 se representa la curva de márgenes de tiempo, formada por el valor del margen asociado a la señal situada a la salida de la estación de Argüelles y al margen asociado a la señal situada a la salida de la estación de Ventura Rodríguez. El margen asociado a una señal se dibuja hacia atrás hasta la señal anterior, debido a que es el tiempo que se puede adelantar el tren en el recorrido entre la señal anterior y la que impone el margen. El margen asociado a la primera señal vale 13 s, y el asociado a la segunda vale 5 s, tomando un intervalo de circulación de 90 s. Por lo tanto, es la segunda señal quien impone el intervalo mínimo en el tramo de vía considerado, que valdrá $90 - 5 = 85$ s.

6.2.3 Protección automática ATP por circuitos de vía

En este sistema de protección se considera que un tren interfiere con el que le precede en línea si al entrar en un circuito recibe un código de velocidad restrictivo, como se vio en el capítulo 4. Cada circuito impone un intervalo mínimo de circulación, que es el tiempo que transcurre desde que el tren entra en el circuito hasta que se aleja lo suficiente para volver a dejar un código de velocidad no restrictivo en el circuito. El número de circuitos de vía que ha de alejarse para ello depende del número de niveles de la escalera de códigos que posee cada circuito que tiene por delante. Dado un intervalo de circulación, el margen de tiempo asociado a un circuito es el tiempo que transcurre entre que el código volvió a su aspecto no restrictivo y que el tren pisa el circuito.

En la Figura 6.5 se representa la curva de márgenes de tiempo para el recorrido entre Argüelles y Ventura Rodríguez. El margen asociado a la entrada de un circuito se pinta hacia atrás, en el circuito anterior, debido a que es el tiempo que el tren puede

adelantarse al intervalo durante este circuito. Se ha tomado esta vez un intervalo de circulación de 120 s.

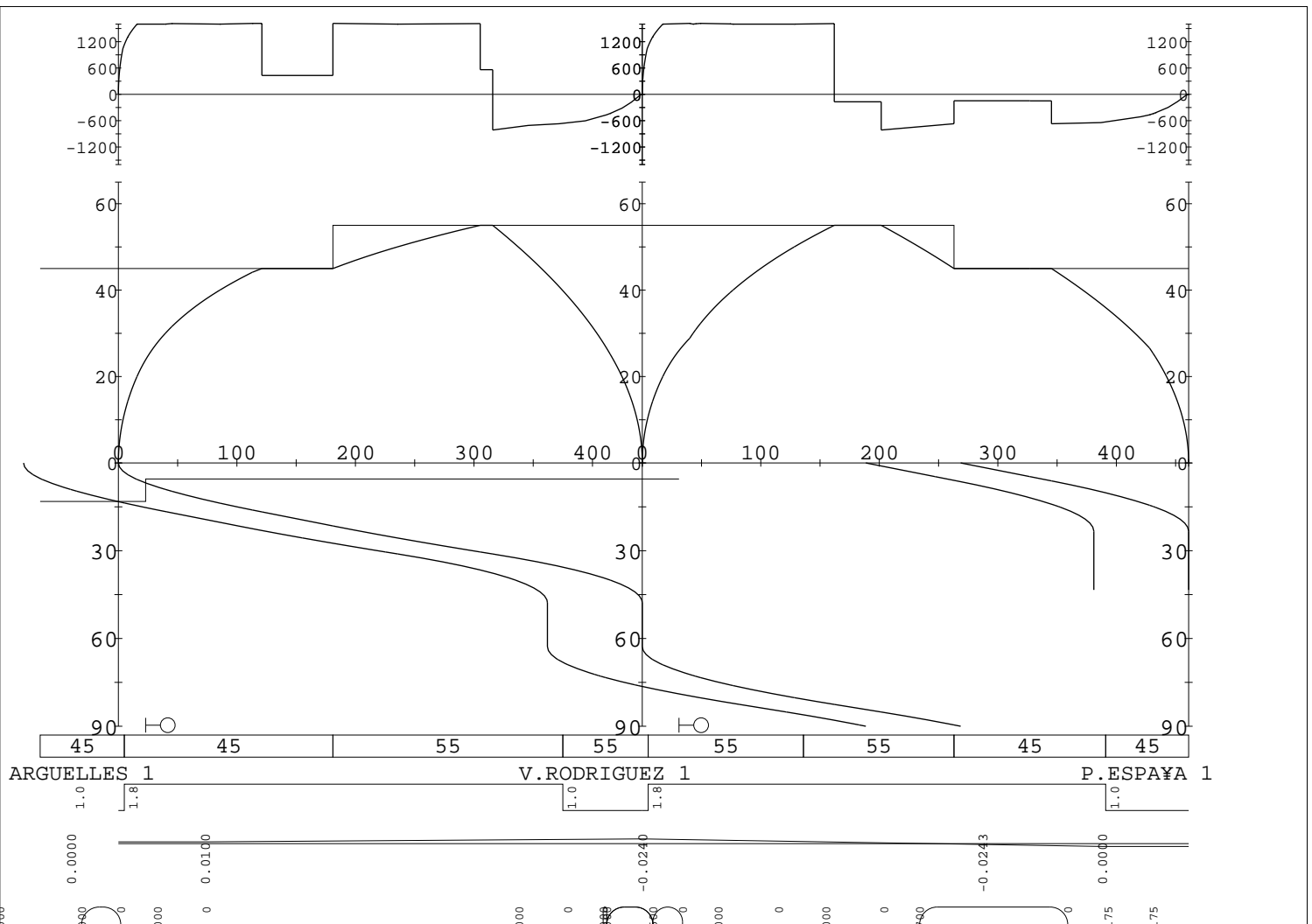


Figura 6.4. Curva de márgenes en protección por señales

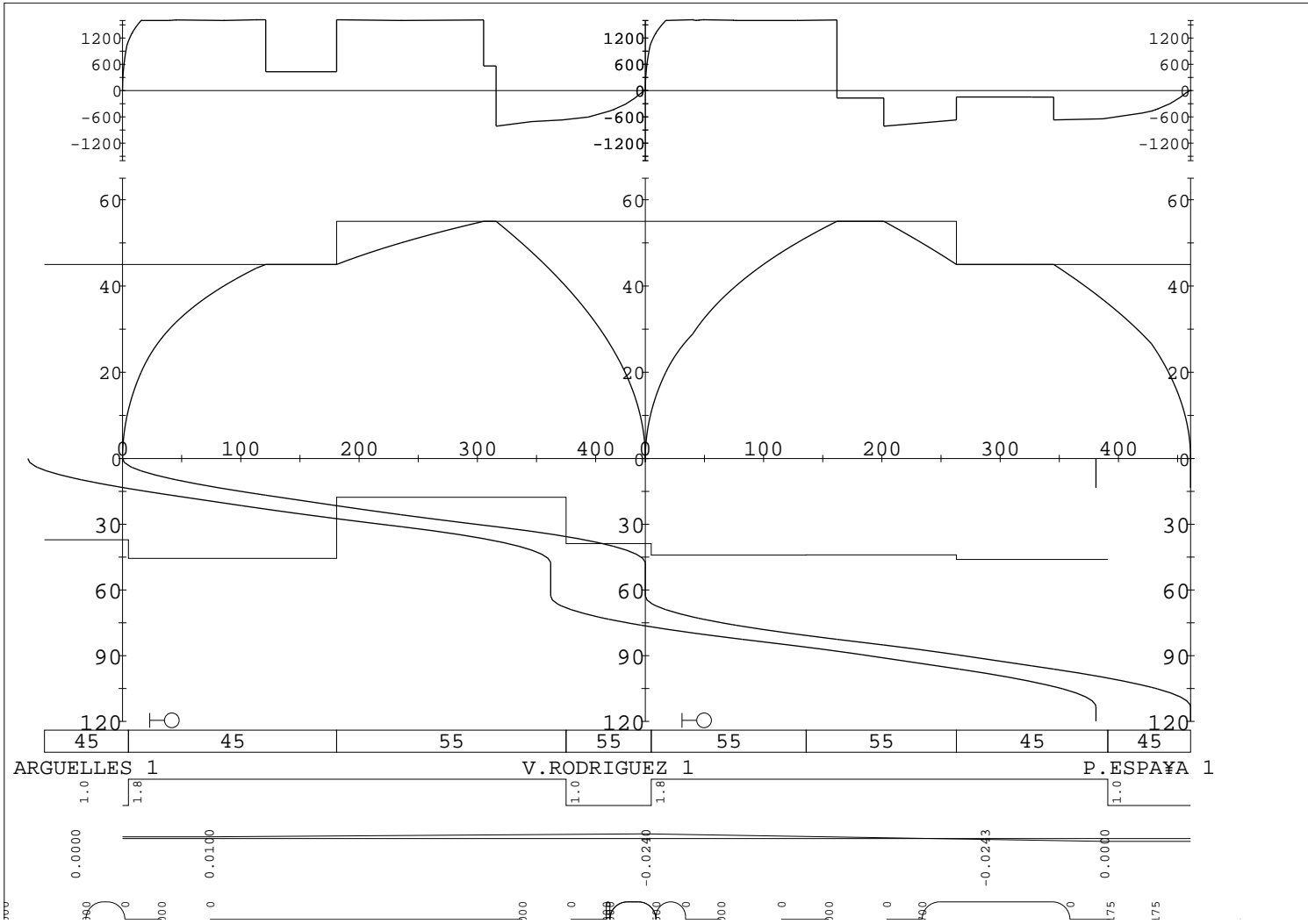


Figura 6.5. Curva de márgenes en protección ATP por circuitos

El margen mínimo corresponde a la entrada en el circuito de vía de estación de Ventura Rodríguez, con un valor de 17 segundos. Este margen impone el intervalo mínimo en el tramo de línea considerado, que valdrá $120 - 17 = 103$ s. Para disminuir el intervalo mínimo es necesario disminuir la velocidad de circulación del tren o rediseñar el número, posición y niveles de códigos de velocidad de los circuitos de vía. Un buen diseño debería hacer que todos los circuitos de vía tuvieran aproximadamente el mismo margen de tiempo.

El intervalo mínimo obtenido ha sido de 103 s, superior a los 61 s obtenido por *moving block* y a los 85 s obtenido por tramos señalizados utilizando puntos de avistamiento. Dependiendo de la separación de las señales y el diseño de los circuitos y sus códigos la protección por circuitos puede conseguir mejores intervalos mínimos que los tramos señalizados, pero nunca podrá superar a la protección continua del *moving-block*.

6.2.4 Protección automática ATP por circuitos más señales

En este tipo de protección se superpone la protección ATP por circuitos del apartado anterior con una partición en tramos señalizados, de forma que cuando un tren ocupa un tramo se supone ocupado el primer circuito de vía del tramo. En el capítulo 4 se resolvió el cálculo de la curva de márgenes por superposición, asociando a cada circuito de vía el margen más restrictivo entre suponer ocupado el circuito real y suponer ocupado el primer circuito del tramo.

En la Figura 6.6 se representa la curva de márgenes resultante. El efecto de introducir los tramos señalizados ha sido disminuir el margen de tiempo en todos los circuitos, excepto en el que tenía un margen menor (17 s). Como este circuito es el que determina el intervalo mínimo, el resultado es que el intervalo mínimo asociado al tramo de vía estudiado no varía (103 s).

6.2.5 Cambio de sentido en estaciones cabecera

Se considera ahora un tramo de línea que comprende el cambio de sentido en una estación cabecera (Moncloa). El tren arranca en la estación de Argüelles, se detiene en la estación de Moncloa (andén 2). A continuación avanza introduciéndose en el fondo de saco, se detiene y arranca de nuevo en sentido contrario deteniéndose en el andén 1 de Moncloa. Las características del tramo de línea considerado se encuentran en el Apéndice C. Los detalles del modelado del cambio de vuelta se encuentran en el capítulo 2.

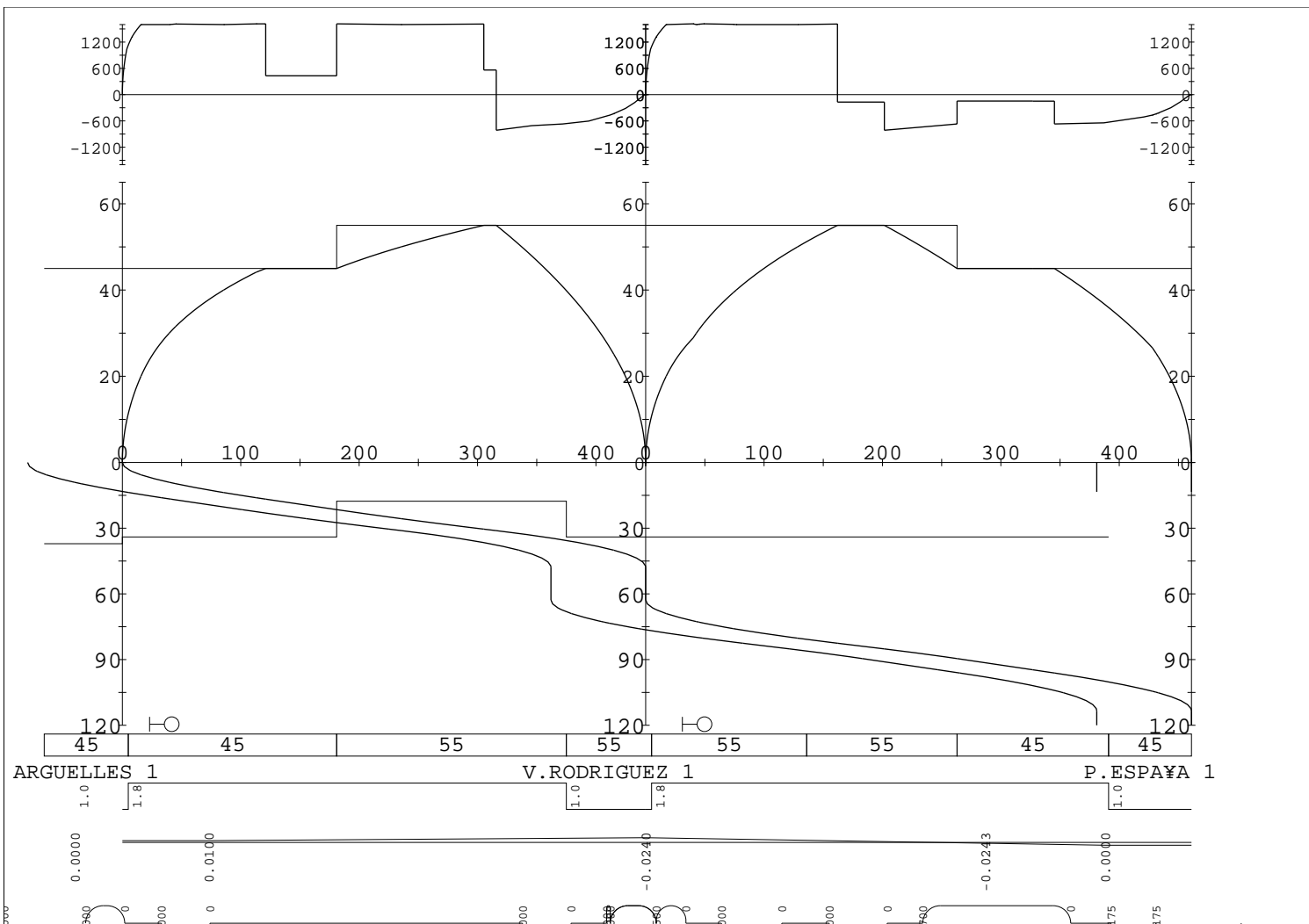


Figura 6.6. Protección automática ATP por circuitos más señales

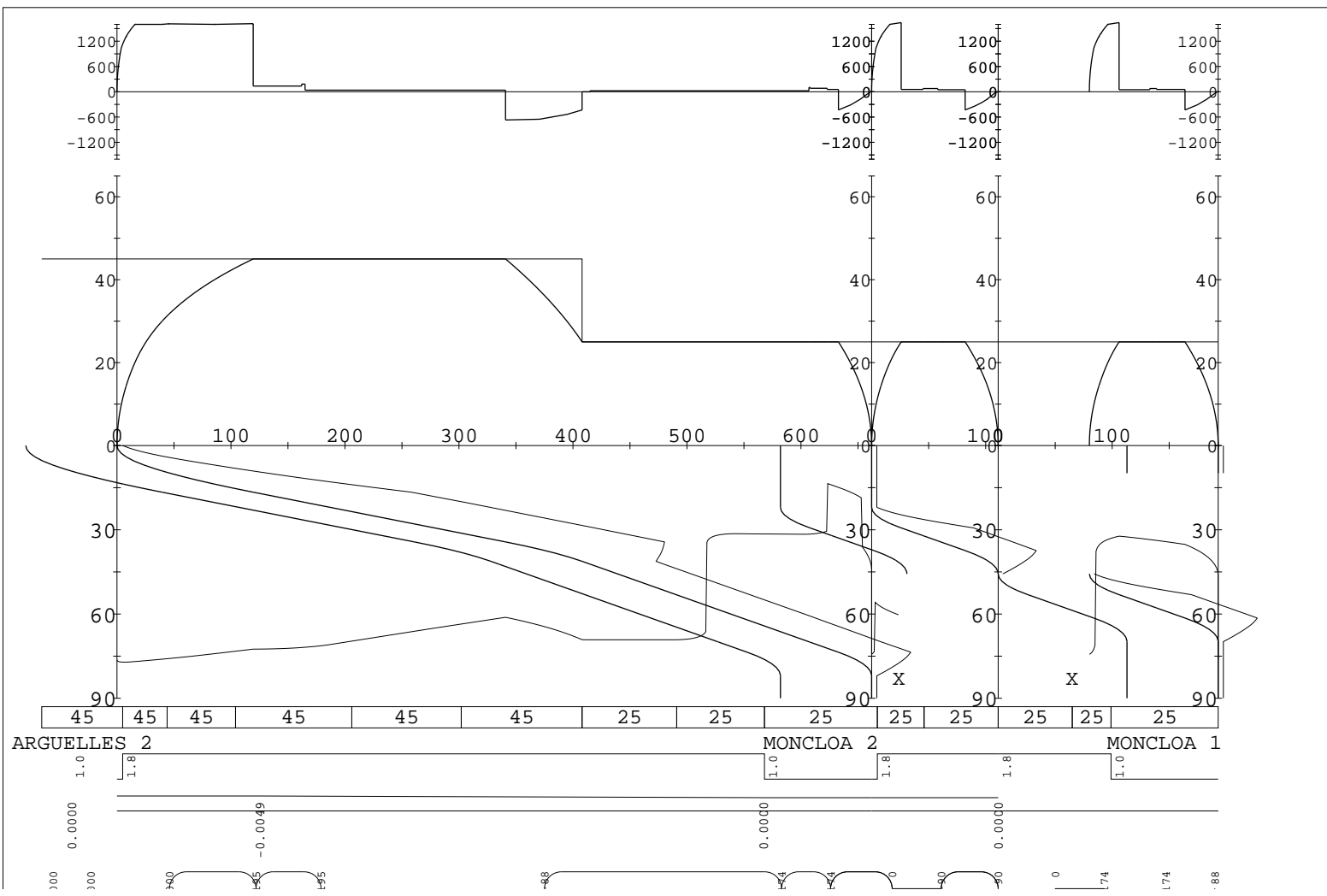


Figura 6.7. Cambio de sentido en una estación cabecera

En la Figura 6.7 se representan las gráficas del movimiento, curva de frenado y márgenes de tiempo *moving-block* de las tres intersecciones consideradas:

Argüelles-Moncloa 2, Moncloa 2-fondo de saco y fondo de saco-Moncloa 1, donde el número hace referencia al andén. Al comienzo de la tercera interestación hay un espacio para el que no existen curvas de movimiento de la cabeza del tren. Esto es debido a que el tren cambia de sentido, pasando la cola a ser cabeza.

La curva de márgenes de tiempo en la primera interestación presenta dos bajadas bruscas. La primera (en $s=515$ m) es debida a que la curva de frenado para este punto llega hasta la cola del tren precedente cuando está detenido en la estación de Ventura Rodríguez, como se describió en el apartado 6.2.1. La segunda bajada (en $s=630$) se debe al modelado de las protecciones en el retorno. La primera 'X' que aparece en la gráfica representa el punto que no puede superar un tren si hay otro realizando la maniobra de cambio de sentido. La segunda 'X' indica el punto de la vía tal que una vez superado por el tren que realiza la maniobra, el que le sigue puede avanzar. Para un tren que se acerca a la primera 'X', este punto supone un límite que no puede superar durante el tiempo que dura la maniobra de cambio de vuelta del tren que le precede.

El punto de bajada brusca en la curva de márgenes corresponde a cuando la curva de frenado del tren toca este límite. Los dos valores extremos del margen de tiempo se calculan considerando el tiempo en que el tren de delante pasa por la primera 'X' y considerando el tiempo en que termina la maniobra, y su cola pasa por la segunda 'X'. El resultado es equivalente a considerar que la cola del tren precedente permanece detenida en la primera 'X' todo el tiempo que dura la maniobra, y avanza bruscamente hasta la segunda 'X' cuando finaliza.

El mínimo de la curva de márgenes en el tramo de línea considerado corresponde precisamente al punto espacial restringido por la maniobra de cambio de sentido del tren precedente. El margen en este punto vale 11 s, y teniendo en cuenta que se ha tomado un intervalo de circulación de 90 s, se obtiene un intervalo mínimo de 79 s. En muchas líneas son los cambios de sentido en los terminales los que limitan el intervalo mínimo absoluto de la línea.

6.2.6 Herramienta PACA de ayuda al diseño de la señalización

Utilizando los modelos de línea, tren y sistemas de protección descritos en el capítulo 2 y las técnicas de simulación descritas en el capítulo 3 se ha desarrollado una herramienta CAD de ayuda al diseño de la conducción y de los sistemas de señalización. La herramienta PACA simula conducción tendida y conducción mediante vectores de deriva ATO de un tren libre de perturbaciones a lo largo de una línea, incluyendo el consumo. Tomando como base esta simulación, calcula las curvas de frenado, márgenes de tiempo y el intervalo mínimo del tramo de línea para cada uno de los cuatro sistemas de protección modelados. Las figuras 6.1 a 6.7 han sido realizadas por esta herramienta.

Nota bibliográfica:

En [Gill & Goodman, 92] se analiza el problema del diseño de la señalización en sistemas ferroviarios con protección ATP basada en circuitos de vía. Se plantea la utilización de herramientas de optimización basadas en modelos de simulación, dada la naturaleza fuertemente no lineal del sistema. En [Gill et al, 92] se plantea una técnica de búsqueda automática para el rediseño de la señalización en el metro de Londres. El problema consiste en determinar los códigos de velocidad ATP que minimizan el tiempo de recorrido manteniendo un determinado intervalo de circulación. El simulador utilizado es el descrito en [Mellit et al, 78].

En [Tsukamoto et al, 94] se plantea el diseño del sistema de señalización por circuitos de nuevas líneas en Japón. El proceso de diseño incluye aquí la elección del tamaño de cada circuito de vía, además del valor de los códigos de velocidad ATP. Se propone una herramienta de ayuda al diseñador basada en simulación, que evalúa tiempos de recorrido e intervalo de circulación para cada configuración.

El diseñador propone los vectores de deriva en cada interestación, y las características de una señalización concreta. La herramienta presenta sus cálculos de forma gráfica y textual en fichero, permitiendo al diseñador el estudio de estos resultados navegando y midiendo sobre el propio dibujo.

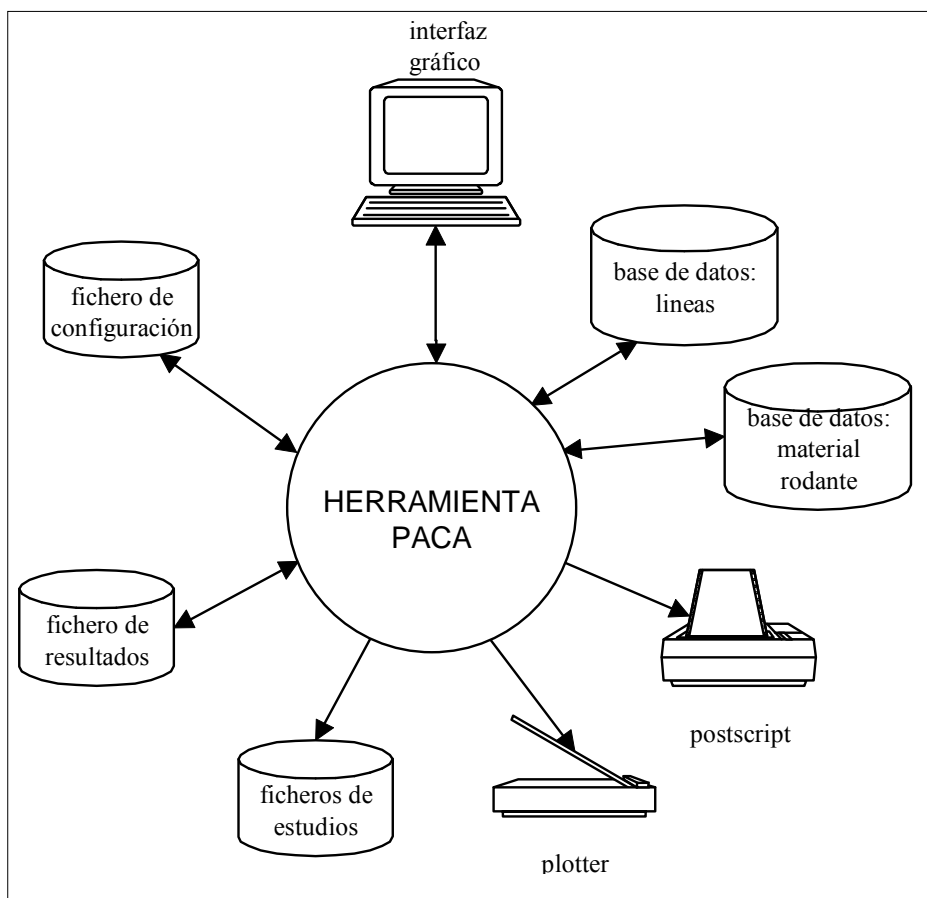


Figura 6.8. La herramienta PACA

La herramienta PACA tiene un acabado comercial, permitiendo imprimir los resultados gráficos en formato *postscript* o en *plotter*, y almacenar en fichero los parámetros que definen un diseño concreto para su recuperación posterior. También integra en el mismo interfaz gráfico el mantenimiento de la base de datos de líneas y del material rodante disponible.

La Figura 6.8 esquematiza las relaciones de la herramienta con el exterior. Mantiene las bases de datos y un fichero de configuración de la herramienta. Acepta ordenes del operador y le presenta los resultados a través del interfaz gráfico. Imprime los resultados gráficos en *plotter* y formato *postscript*, y mantiene ficheros de estudio para almacenar y recuperar diseños.

6.2.7 Conclusiones

Los modelos desarrollados y las técnicas de simulación empleadas han mostrado su eficacia para el diseño de la conducción y de los sistemas de señalización, especialmente en los siguientes aspectos:

- Permite un modelado con un nivel de detalle variable en función de las necesidades del diseñador. Todas las características continuas (características de la vía, curvas de tracción del motor) se modelan a tramos, aumentando su número si es necesario aumentar la precisión de la simulación.
- El modelo de movimiento del tren mediante concatenación de curvas continuas parametrizadas se muestra especialmente útil cuando es necesario tratar matemáticamente las curvas de movimiento para el análisis de los sistemas de protección. Facilita la intersección de curvas, traslación, concatenación, etc.
- La gestión informática de las simulaciones se beneficia de su representación mediante curvas parametrizadas, permitiendo almacenar y tratar simulaciones muy largas utilizando relativamente poca memoria, al guardar sólo los parámetros que definen cada ley de movimiento.
- La velocidad de simulación y de representación gráfica es muy rápida, cualidad fundamental para construir una herramienta de diseño interactiva. La representación gráfica se beneficia también de la eficiencia en el almacenamiento de las simulaciones, ya que se puede tener en memoria toda la simulación a nivel de ley parametrizada, y representar en pantalla las curvas solicitadas dando valores concretos para cada ley de movimiento mediante las fórmulas analíticas asociadas a cada tipo de ley. Esta técnica también permite no perder precisión en las representaciones gráficas aunque se emplee un nivel de detalle grande haciendo uso del 'zoom'. Al disponer de la expresión analítica de cada ley, para

representarla gráficamente se muestrea a intervalos constantes en unidades gráficas absolutas, que se traduce en un intervalo de muestreo variable en unidades físicas (tiempo, velocidad, espacio) dependiendo de la escala empleada.

La herramienta PACA ha sido empleada para el diseño de la conducción mediante vectores de deriva ATO y en el diseño de los sistemas de señalización en líneas ferroviarias reales, mostrando la utilidad de poder evaluar rápidamente diferentes alternativas.

El siguiente paso es automatizar al menos en parte la búsqueda de soluciones al diseño mediante técnicas de optimización. En el caso del diseño de la conducción ya se ha llevado a cabo, y es el trabajo descrito en el capítulo 5, cuyos resultados se presentan en el siguiente apartado. La automatización del diseño de los sistemas de señalización es una tarea más complicada, que queda pendiente para futuros desarrollos.

6.3 Optimización de la conducción continua

En este apartado se presentan resultados de la técnica de diseño de la conducción continua descrita en el capítulo 5. Se van a estudiar cinco casos ejemplo. En el primero se calcula la marcha óptima para una interestación llana y con límite de velocidad constante, y en los otros cuatro se combinan dos tipos de perfiles en la vía, subida-bajada y bajada-subida, y dos tipos de límites de velocidad, alto-bajo-alto y bajo-alto-bajo. En todos los ejemplos la interestación mide 1 km en línea recta, y el tren utilizado es el modelado en el Apéndice D.

6.3.1 Perfil llano y límite de velocidad constante

El problema más sencillo de diseño de la conducción se presenta cuando el perfil es llano y no existen variaciones en las restricciones de velocidad. La secuencia óptima de consignas para un tiempo de recorrido mayor que el correspondiente a marcha tendida es conocido: aceleración-deriva-frenado final. En este tipo de estaciones sería suficiente con calcular el instante de comienzo de la deriva para obtener el tiempo de recorrido deseado.

El tiempo de recorrido con marcha tendida vale 75 s. Se exigirá ahora un tiempo de recorrido 5 s por encima, 80 s. Se han elegido los siguientes valores para las pendientes de penalización de desviaciones temporales respecto al tiempo objetivo (ver la función objetivo en el capítulo 5):

pendiente de penalización ligera: 500.000 Julio/s
 pendiente de penalización severa: 5.000.000 Julio/s

La desviación en tiempo a partir de la cual se penaliza con pendiente severa es de 1 s.

	t_{inc} (s)	t_{min} (s)	b (km/h)
Fase 1	10	15	∞
Fase 2	4	6	5
Fase 3	1	5	1.5

Tabla 6.3. Parámetros que definen cada fase de la búsqueda

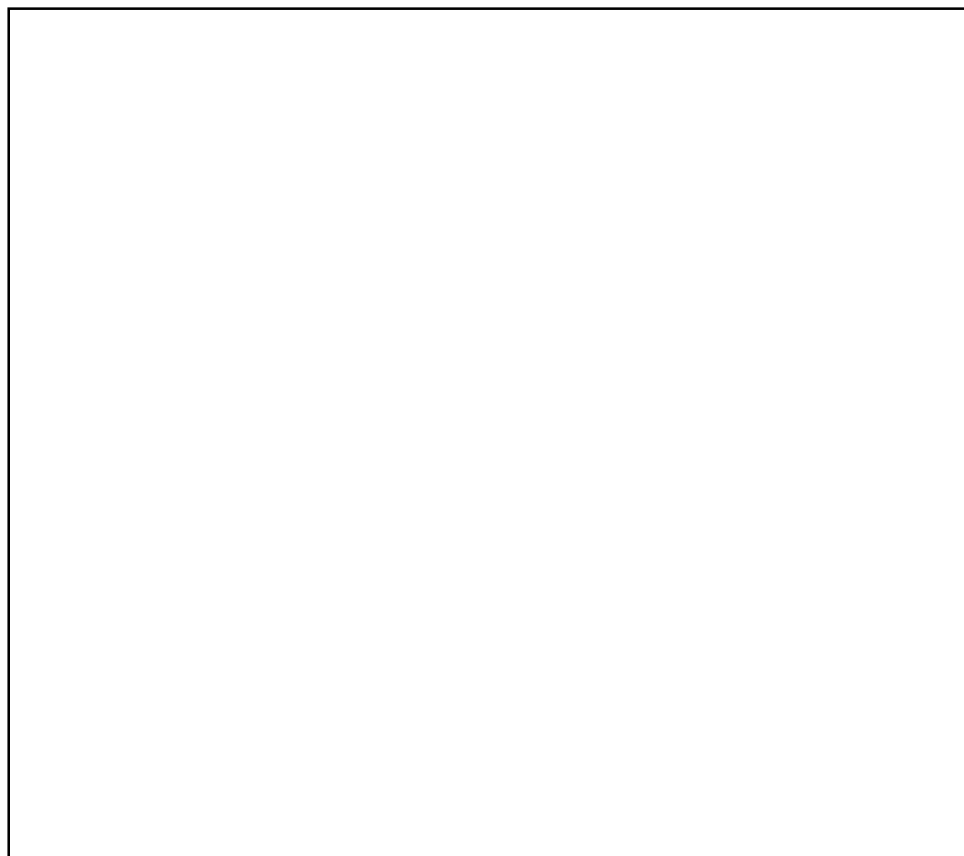


Figura 6.9. Fase 2 de la optimización de la conducción en llano

Se han empleado en la optimización tres fases de búsqueda consecutivas. En la Tabla 6.3 se especifican los parámetros que definen cada fase. El parámetro t_{inc} es el incremento mínimo en tiempos, t_{min} es el tiempo mínimo de duración de una consigna, y b es la anchura de la banda que restringe la búsqueda alrededor del óptimo de la fase anterior.

En la Figura 6.9 se representa la solución de la fase 2, y en la Figura 6.10 la correspondiente a la fase 3. Por sencillez se han representado con tramos rectos las curvas {velocidad-espacio}, donde cada tramo abarca una ley parametrizada en la técnica de simulación por concatenación de leyes descrita en el capítulo 3. Las velocidades se representan en m/s, y la distancia en m.

En las gráficas se representa en trazo más oscuro la solución final, en trazo más claro las bandas que restringen la búsqueda, y en trazo más fino las conducciones probadas y descartadas en el proceso de búsqueda. La solución de la primera fase se puede ver en la gráfica de la segunda, ya que las bandas se han generado a partir de ella.

La primera fase emplea un tiempo de cálculo pequeño (1 s) debido a que considera una precisión en tiempo muy baja, aunque consigue un buen tiempo objetivo. La segunda fase tiene una duración de 28 s, y mejora algo el consumo. La tercera fase, que utiliza la precisión definitiva, emplea 1427 s en encontrar la solución. No mejora apreciablemente el tiempo de recorrido, pero sí el consumo.



Figura 6.10. Fase 3 de la optimización de la conducción en llano

En la Tabla 6.4 los nodos cortados indican aquellos que han sido desestimados por los heurísticos empleados en la búsqueda. En la tercera fase es fundamental su actuación, teniendo en cuenta que cada nodo cortado evita buscar en el árbol de nodos hijos que genera el nodo.

	tiempo de cálculo	nodos creados	nodos cortados	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)
Fase 1	1 s	130	31	79.6	6.95
Fase 2	28	2741	895	80.4	6.25
Fase 3	1427	115662	21510	80.4	5.94

Tabla 6.4. Resultados de la optimización de la conducción en llano

La solución encontrada coincide con la esperada para una etapa en llano y con límites de velocidad constantes, esto es, una sucesión de consignas aceleración-derivación-frenado final.

6.3.2 Perfil no llano y límites de velocidad variables

Se presentan a continuación cuatro ejemplos de optimización, correspondientes a una interestación de 1 km donde se combinan dos perfiles de la vía distintos (bajada-subida y subida-bajada) y dos curvas de límites de velocidad (alto-bajo-alto y bajo-alto-bajo). La forma concreta de perfiles y límites de velocidad se representa en la gráfica solución de cada ejemplo. El seno de las pendientes de la vía valen 0.01 tanto para la bajada como para la subida. El límite de velocidad bajo vale 14 m/s, y el alto 20 m/s.

Se han utilizado de nuevo tres fases consecutivas de búsqueda. Los parámetros que definen la función objetivo y los parámetros t_{inc} y t_{min} de cada fase son los mismos que en el ejemplo en llano, mientras que el parámetro b de anchura de banda es particular de cada ejemplo.

Ejemplo1: perfil bajada-subida y límites de velocidad alto-bajo-alto.

La Figura 6.11 representa la solución encontrada y la zona explorada en la segunda fase de la optimización. El tiempo objetivo de recorrido es de 90 s. El ancho de banda b considerado en esta segunda fase de 4 s.

El resultado global de la optimización es el siguiente:

tiempo de cálculo	nodos creados	nodos cortados	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)
2188	186663	83012	90.4	4.90

Tabla 6.5. Resultados del Ejemplo 1 para conducción continua

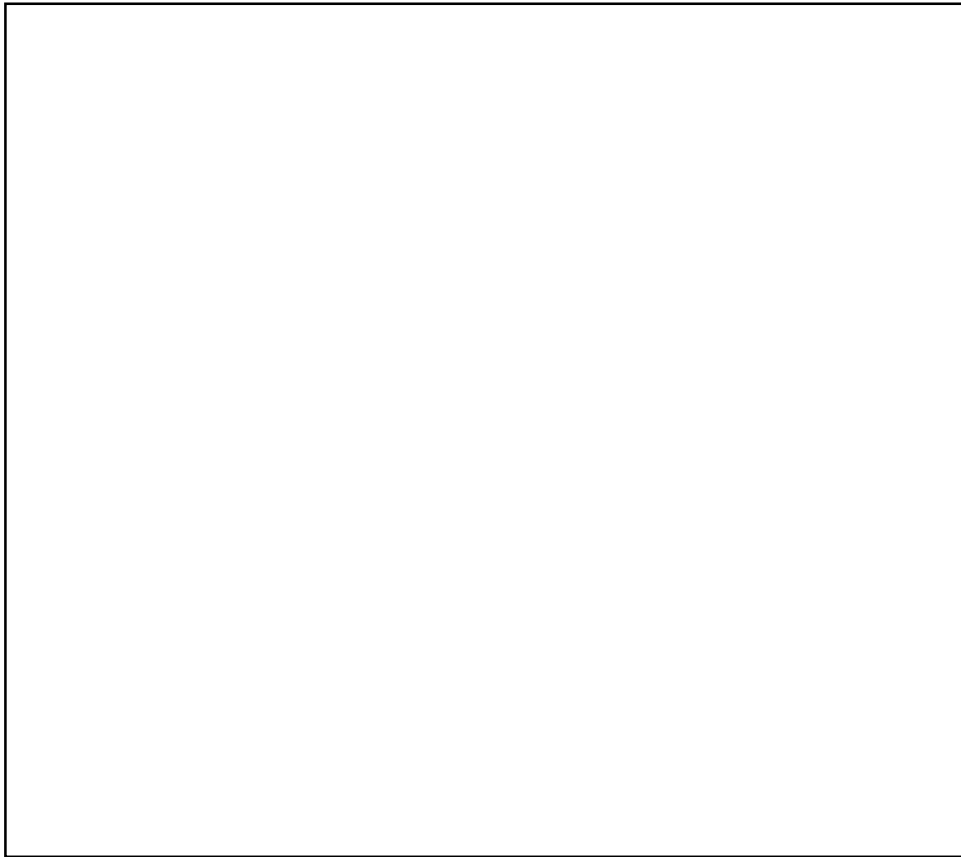


Figura 6.11. Ejemplo 1 para conducción continua

Para este ejemplo no se considera una tercera fase, ya que no ha mejorado apreciablemente la solución encontrada por la segunda.

Ejemplo 2: perfil bajada-subida y límites de velocidad bajo-alto-bajo.

La Figura 6.12 representa la solución y la zona explorada en la tercera fase de la optimización. Los valores de límites de velocidad y pendientes son iguales al ejemplo anterior, pero cambiada la secuencia. El tiempo objetivo de recorrido es de 100 s.

En este ejemplo se ha llegado hasta la tercera fase de la búsqueda. La anchura de las bandas de las fases 2 y 3 son 10 s y 3 s, respectivamente. Los resultados han sido los siguientes:

tiempo de cálculo	nodos creados	nodos cortados	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)
6542	610618	400417	99.9	0.87

Tabla 6.6. Resultados del Ejemplo 2 para conducción continua

La forma particular que tienen las pendientes de la vía en esta interestación hace que lo óptimo sea acelerar al principio el tren y dejarlo derivar hasta la estación destino.

El consumo es muy bajo, debido a que se aprovecha la pendiente descendente al principio para acelerar al tren y la pendientes ascendente al final para frenarlo. Este perfil es el energéticamente más apropiado para interestaciones de longitud corta.



Figura 6.12. Ejemplo 2 variando perfiles y límites de velocidad

Ejemplo 3: perfil subida-bajada y límites de velocidad alto-bajo-alto.

La Figura 6.13 representa la solución y la zona explorada en la tercera fase de la optimización. El tiempo objetivo de recorrido es de 100 s.

En este ejemplo se ha llegado hasta la tercera fase de la búsqueda. La anchura de las bandas de las fases 2 y 3 son 5 s y 1.5 s, respectivamente.

Los resultados han sido los siguientes:

tiempo de cálculo	nodos creados	nodos cortados	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)
4125	229019	8315	100.4	9.61

Tabla 6.7. Resultados del Ejemplo 3.

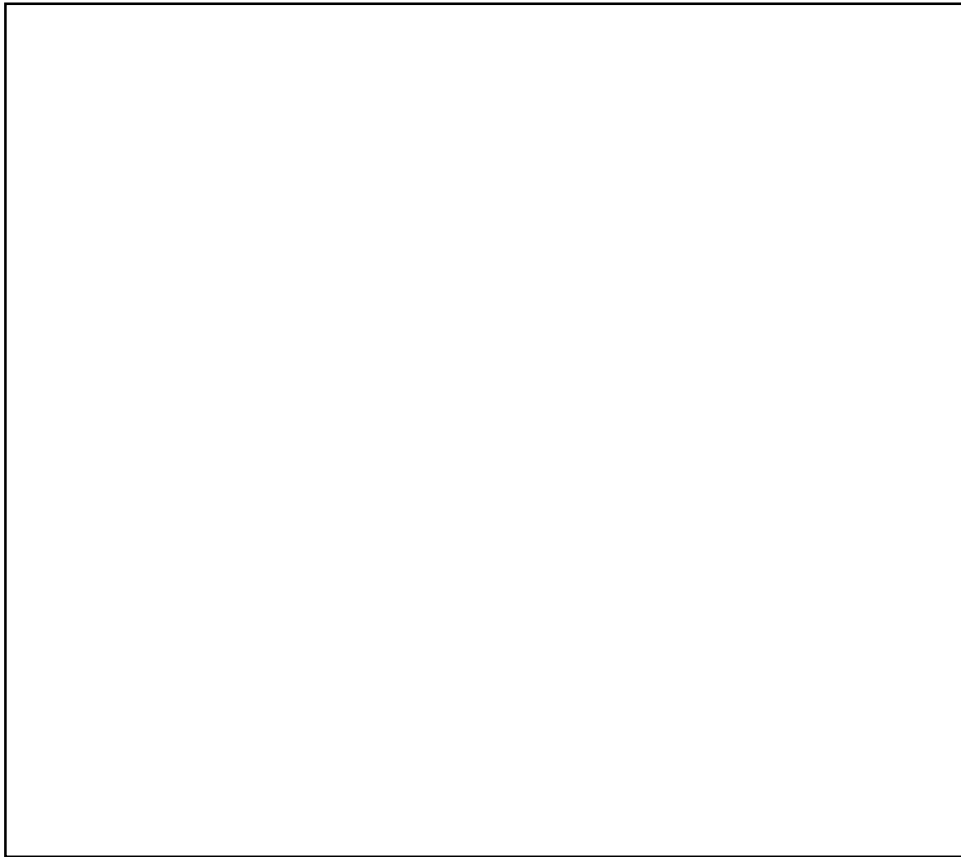


Figura 6.13. Ejemplo 3 para conducción continua

En la parte central del recorrido la disminución de velocidad se debe a una deriva. Cuando se pasa a la zona de pendiente descendente, esta deriva hace aumentar la velocidad del tren, hasta que se toma el frenado final.

Ejemplo 4: perfil subida-bajada y límites de velocidad bajo-alto-bajo.

La Figura 6.14 representa la solución y la zona explorada en la tercera fase de la optimización. El tiempo objetivo de recorrido es de 100 s.

En este ejemplo también se ha llegado hasta la tercera fase de la búsqueda. Se ha tomado una anchura de bandas en las fases 2 y 3 de 10 s y 3 s, respectivamente.

Los resultados han sido los siguientes:

tiempo de cálculo	nodos creados	nodos cortados	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)
4677	305019	114780	100.3	9.65

Tabla 6.8. Resultados del Ejemplo 4 para conducción continua

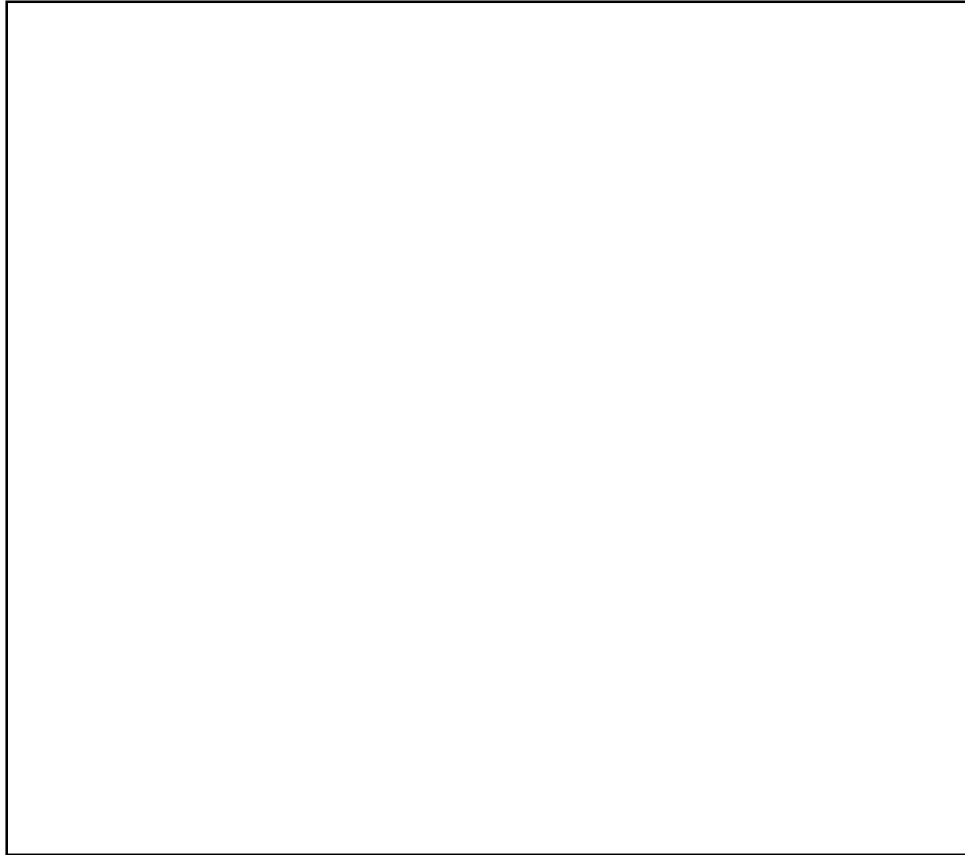


Figura 6.14. Ejemplo 4 para conducción continua

La forma de la solución es muy parecida a la del ejemplo anterior, con una deriva a mitad de recorrido que alcanza hasta el instante del frenado final.

6.3.3 Conclusiones

La técnica de búsqueda en árbol empleada, el uso de fases sucesivas de optimización con restricciones en bandas y la utilización de heurísticos han permitido obtener conducciones óptimas con tiempos de cálculo razonables.

Las soluciones óptimas del problema de la conducción libre analizado pueden servir de base al diseño de conducciones restringidas por las características particulares del equipo de conducción automática ATO utilizado. Por ejemplo, en los casos estudiados en el apartado anterior, las conducciones solución pueden ser en general aproximadas por una sucesión de vectores de deriva.

La gran ventaja del enfoque por búsqueda directa empleado es que el método es independiente del simulador empleado para evaluar cada conducción. Si cambia el modelo de simulación, para introducir nuevas características o alterar el nivel de

detalle, no se altera el comportamiento del algoritmo, sólo el tiempo de cálculo dependiendo de la rapidez del simulador.

Los ejemplos presentados en el apartado anterior han sido obtenidos con la herramienta de ayuda al diseño de la conducción continua ALEHOPT ([Herrero 95]). Este programa maneja la misma base de datos de líneas y material rodante que utiliza la herramienta PACA. El diseñador configura los parámetros de la función objetivo, el tiempo de recorrido objetivo y las características de las distintas fases en función para cada optimización, y el programa representa gráficamente las conducciones que está explorando y la conducción solución.

A la vista de los resultados obtenidos, podría estructurarse la optimización de forma diferente, determinando en una primera fase la sucesión de consignas de tracción a efectuar en el recorrido de la etapa y en una segunda fase la duración concreta de cada consigna. La primera fase puede consistir en una búsqueda en árbol igual a la propuesta, pero con poca precisión en tiempo, con lo que se reduce considerablemente el tiempo de cálculo. La segunda fase es más sencilla, pues existen tantas variables como cambios de consigna, que en general en una etapa es un número reducido.

6.4 Optimización de la conducción por vectores de deriva

Se presentan en este apartado resultados del algoritmo de optimización de conducciones por vectores de deriva ATO descrito en el capítulo 5. Se emplearán los mismos ejemplos que en la optimización de la conducción continua del apartado anterior: primero una interestación de 1 km llana y con límites de velocidad constantes, y a continuación cuatro ejemplos combinando dos tipos de perfil de la vía y dos tipos de límites de velocidad. Las características del tren utilizado se encuentran modeladas en el Apéndice D.

A lo largo de este apartado se van a comparar los resultados obtenidos optimizando vectores de deriva con los resultados de optimización continua obtenidos en apartados anteriores. Para ello hay que tener en cuenta que la conducción libre permite consignas de regulación de velocidad, mientras que la conducción por vectores de deriva considerada no contempla esta consigna.

Las constantes que definen la función objetivo son las mismas que las consideradas en el apartado anterior:

pendiente de penalización ligera:	500.000	Julio/s
pendiente de penalización severa:	5.000.000	Julio/s

La desviación en tiempo a partir de la cual se penaliza con pendiente severa es de 1 s.

6.4.1 Perfil llano y límite de velocidad constante

Se estudia en este apartado el caso de perfil llano y límite de velocidad constante. En este primer ejemplo se van a describir las dos fases de la optimización: rastreo para selección de buenos puntos iniciales y búsqueda local a partir de estos puntos.

Fase de rastreo

En la Figura 6.15 se representa la fase de rastreo considerando una deriva, y en la Figura 6.16 la fase de rastreo considerando dos vectores de deriva. El rastreo para una deriva se ha efectuado tomando incrementos de velocidad de 0.5 km/h, e incrementos de espacio de 3 m. El rastreo para dos derivas se ha efectuado con incrementos de velocidad de 0.6 km/h e incrementos de espacio de 5 m.

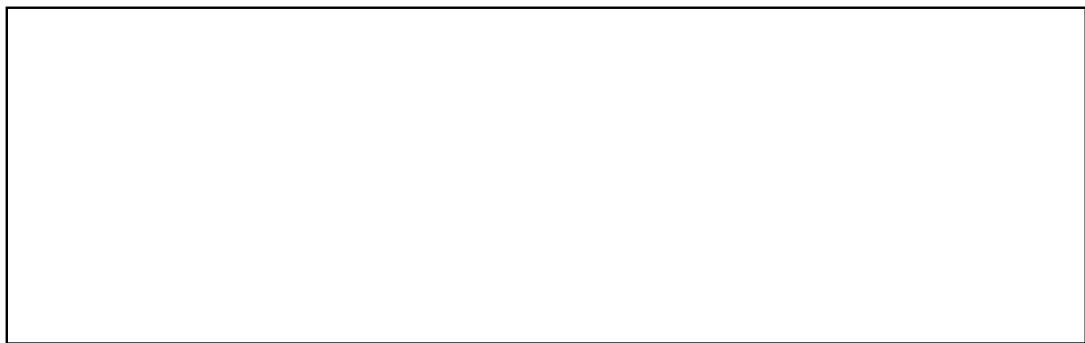


Figura 6.15. Fase de rastreo con una deriva

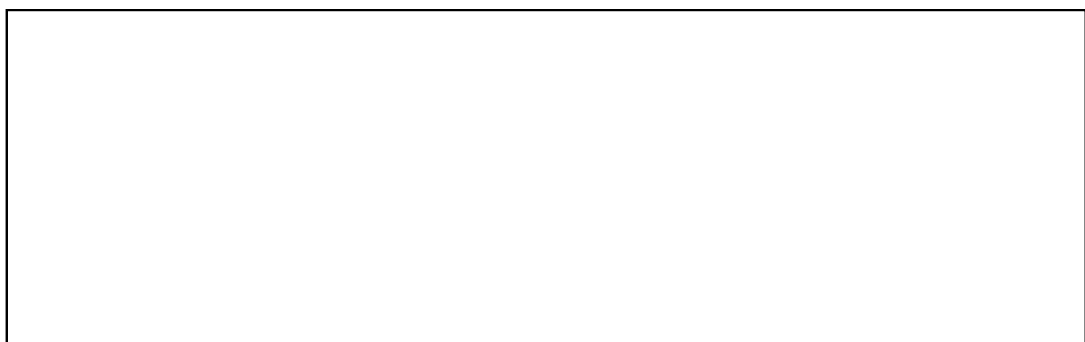


Figura 6.16. Fase de rastreo con dos derivas

En el eje vertical se representa el consumo en kWh, y en el eje horizontal el tiempo de recorrido en la etapa. Los tiempos de recorrido marcados en el eje horizontal son los tiempos objetivo que se pretenden conseguir para distintas marchas a diseñar. La nube de puntos son las conducciones rastreadas. Las bandas alrededor de cada tiempo

objetivo de 2 s son los límites temporales para admitir un candidato a un tiempo objetivo. Estos candidatos se representan con un punto más oscuro.

Combinando dos derivas en la interestación se consigue una riqueza de tiempos mucho mayor. En este ejemplo en particular no se consiguen mejores consumos en esta fase considerando dos derivas en lugar de una, debido a que las características de la vía y los límites de velocidad son constantes en todo el recorrido.

Fase de búsqueda local

Se considera ahora la optimización por búsqueda local del tiempo objetivo más bajo, 80 s. Se realiza una búsqueda partiendo de cada uno de los 3 puntos con mejor función objetivo de la fase de rastreo para una deriva, obteniendo otras tantas soluciones. La conducción resultado del proceso de optimización con una deriva es la mejor de estas soluciones.

En el ejemplo estudiado con perfil llano y límites de velocidad constantes, los tres puntos iniciales han llevado a la misma conducción solución, debido a que no se presentan problemas de mínimos locales. La solución se representa en la Figura 6.17.



Figura 6.17. Conducción solución para perfil llano y límites de velocidad constantes

Los resultados numéricos de esta solución se detallan en la Tabla 6.9.

tiempo de cálculo (s)	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)	s (m)	v_d (km/h)	v_r (km/h)
2	80.6	6.0	255	60	54

Tabla 6.9. Solución de la fase de búsqueda local

La fase de búsqueda da como resultado un espacio de comienzo de vigencia de la deriva coincidiendo con el espacio en que la velocidad del tren alcanza la velocidad de deriva, debido al proceso de desaturación introducido en el algoritmo que ajusta las variables independientes hasta su límite de sensibilidad. Esta conducción sería implementada en un equipo de ATO real considerando que la deriva está vigente desde el comienzo de la interestación, para evitar que los errores en la ejecución de la marcha afecten a la velocidad a la que se comienza a aplicar la deriva.

La búsqueda local a partir de las mejores soluciones con dos derivas no mejoran en este ejemplo el resultado obtenido. En otras interestaciones donde el perfil de la vía y los límites de velocidad varían sí se obtendrán mejores consumos utilizando dos vectores de deriva.

El perfil de conducción solución encontrado por vectores de deriva es el mismo que el encontrado en la optimización de la conducción continua en el apartado 6.4.1 para la misma interestación y tiempo objetivo. En los ejemplos de apartado siguiente veremos que la conducción continua obtiene mejores soluciones que la basada en vectores de deriva cuando los perfiles y límites de velocidad son más variados.

6.4.2 Perfil no llano y límites de velocidad variables

Se presentan a continuación los resultados del proceso de optimización con conducción por vectores de deriva para las cuatro interestaciones consideradas en el apartado 6.3.2 con conducción continua. Los parámetros que definen el proceso de búsqueda son los mismo que en el apartado anterior. Se mostrará para los cuatro casos el resultado final de la optimización, tras el proceso de búsqueda local.

Ejemplo1: perfil bajada-subida y límites de velocidad alto-bajo-alto.

En la Figura 6.18 se representa la conducción solución para un tiempo objetivo de 90 s. Está compuesta por dos vectores de deriva. El primero empieza a actuar cuando el tren alcanza los 30 km/h, y el tren aumenta su velocidad debido a la pendiente hasta tocar con la velocidad límite. En ese momento tiene que actuar el freno, para evitar que se viole el límite de velocidad, regulando a la velocidad máxima. La velocidad de deriva v_{d1} vale 30 km/h, mientras que la velocidad de remotor v_{r1} es indiferente, ya que el tren no ‘remotora’ debido a que su velocidad aumenta. La segunda deriva comienza en el espacio $s_1 = 540$, justo en el instante en que el centro de masas del tren (supuesto en el centro) cambia de pendiente. La nueva velocidad de deriva vale $v_{d2} = 52$ km/h, y la velocidad de remotor $v_{r2} = 42$ km/h. Como la pendiente de la vía es ascendente, el tren pierde velocidad, vuelve a traccionar al llegar a la velocidad de remotor, y todavía vuelve a derivar una vez más antes de realizar el frenado final.

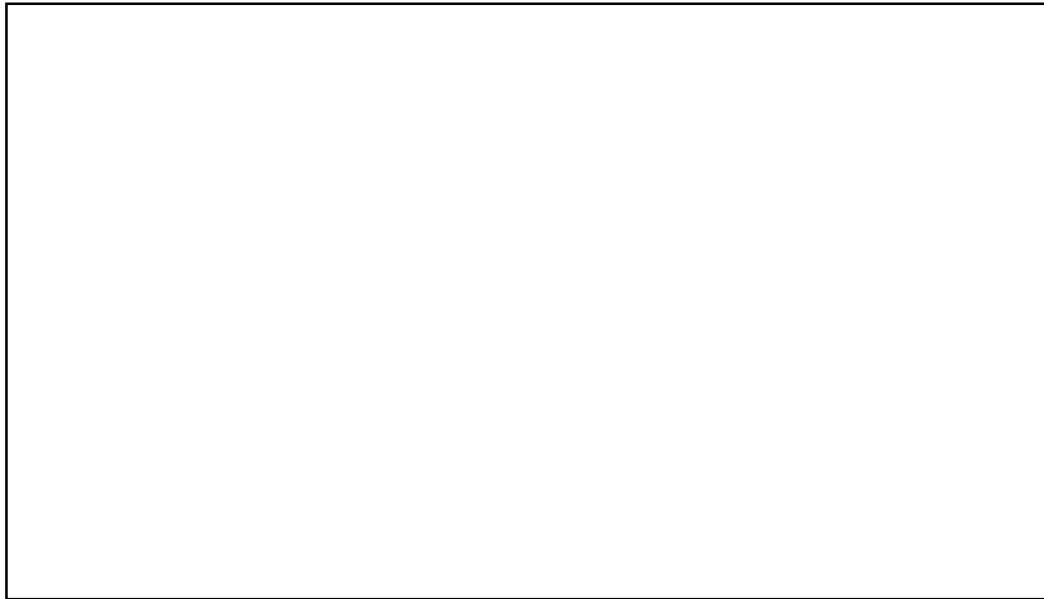


Figura 6.18. Ejemplo 1 para conducción por derivas

En la Tabla 6.10 se detallan los resultados de la solución.

tiempo de cálculo (s)	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)	s_1 (m)	v_{d1} (km/h)	v_{r1} (km/h)	s_2 (m)	v_{d2} (km/h)	v_{r2} (km/h)
538	90.1	5.78	32	30	-	540	52	42

Tabla 6.10. Resultados del Ejemplo 1 para conducción por derivas

En el apartado 6.3.2 para conducción continua en la misma interestación se encontró una solución distinta y mejor en consumo que la obtenida ahora con derivas. El motivo es que en conducción continua se permite regular al tren, en este ejemplo en un tramo en la segunda mitad de la etapa a velocidad máxima, resultando en conjunto energéticamente más eficiente. En conducción por derivas no se permite la consigna de regulación, y cuando se entra en zona de pendiente ascendente ha sido necesario introducir de inmediato ciclos de deriva.

El diseño de la conducción óptima por vectores de deriva en esta interestación, con variaciones de pendiente en la vía, ya no es sencilla sin la ayuda de una herramienta informática adecuada. Es difícil encontrar por simple tanteo la conducción que cumpla el tiempo objetivo y sea óptima en consumo.

Ejemplo 2: perfil bajada-subida y límites de velocidad bajo-alto-bajo.

En la Figura 6.19 se representa la solución obtenida para un tiempo objetivo de 100 s. El tren acelera hasta la velocidad de 17 km/h, momento en el que comienza a derivar.

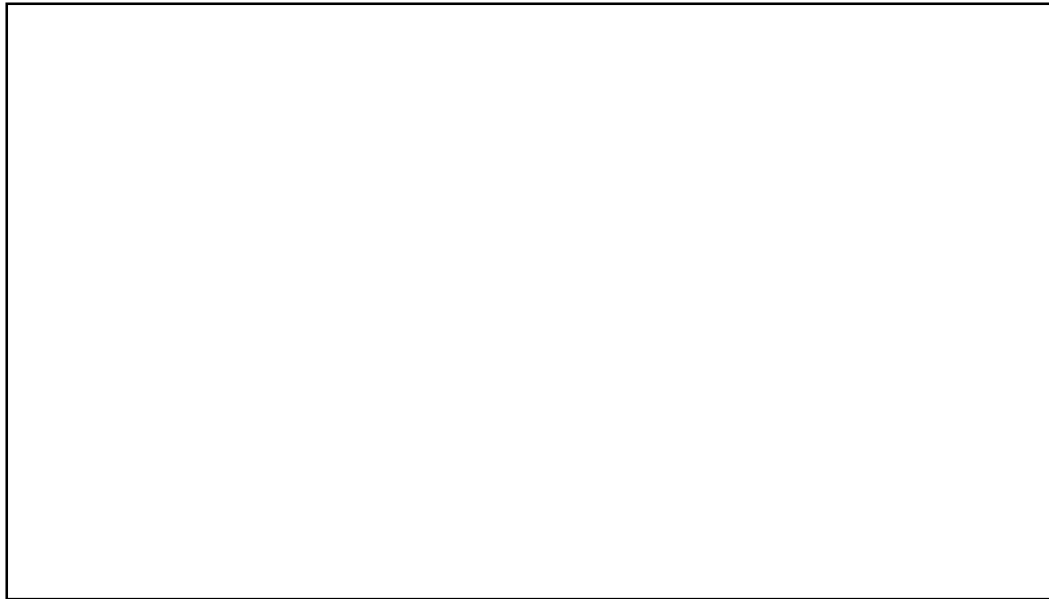


Figura 6.19. Ejemplo 3 para conducción por derivas

Durante la primera mitad de la interestación el tren aumenta su velocidad, debido a la pendiente descendente, y a partir de la segunda mitad disminuye debido al cambio de signo de la pendiente, hasta el frenado final. La velocidad de deriva v_d vale 17 km/h, y la velocidad de remotor v_r es indiferente, ya que el tren no llega a bajar de v_d durante la deriva.

En la Tabla 6.11 se detallan los resultados de la solución.

tiempo de cálculo (s)	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)	s (m)	v_d (km/h)	v_r (km/h)
7	99.9	0.48	6	17	-

Tabla 6.11. Resultados del Ejemplo 3 para conducción por derivas

En este ejemplo se ha obtenido mediante conducción por derivas la misma solución que se obtuvo en el apartado 6.3.2 con conducción continua. Se aprovecha la forma particular de la pendiente de la vía a lo largo de la interestación para conseguir un consumo de energía muy reducido.

Ejemplo 3: perfil subida-bajada y límites de velocidad alto-bajo-alto.

En la Figura 6.20 se representa la solución del proceso completo de optimización, para un tiempo objetivo de 100 s. Existe un sólo vector de deriva, cuya validez comienza en el espacio $s = 398$ m, la velocidad de deriva es $v_d = 44$ km/h, y la velocidad de remotor $v_r = 34$ km/h. El parámetro importante en este caso es el espacio de comienzo de la deriva, ya que desde que da comienzo el tren deriva y sólo cambia de consigna (por no alcanzar la velocidad de remotor) hasta el frenado final. Por lo

tanto, se llega a la misma conducción para cualquier valor de la velocidad de deriva por debajo de la velocidad máxima en el tramo central (para que el tren derive en s) y para cualquier velocidad de remotor por debajo de la velocidad mínima que alcanza el tren cuando deriva (para que no llegue a efectuar remotor).

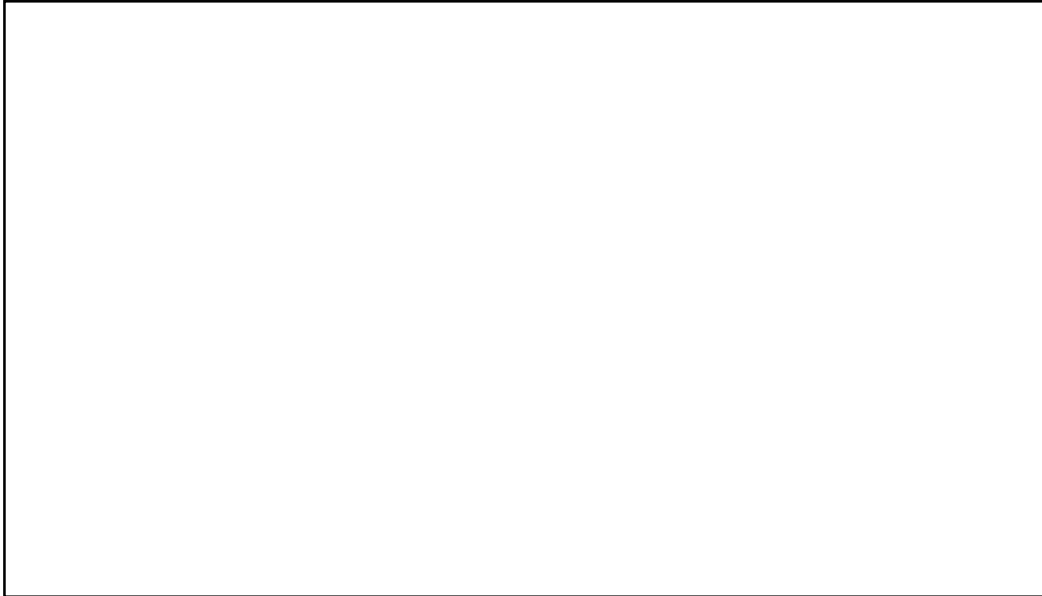


Figura 6.20. Ejemplo 3 para conducción por derivas

En el tramo desde el comienzo de la etapa hasta s , por no estar vigente ninguna deriva, el tren realiza marcha tendida. Este es el motivo por el que el tren regula antes de comenzar la deriva, debido a que el tren apura al máximo el límite de velocidad.

En la Tabla 6.12 se detallan los resultados de la solución.

tiempo de cálculo (s)	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)	s (m)	v_d (km/h)	v_r (km/h)
8	100.3	9.63	398	94	34

Tabla 6.12. Resultados del Ejemplo 3 para conducción por derivas

En este ejemplo se ha obtenido mediante conducción por derivas la misma solución que se obtuvo en el apartado 6.3.2 con conducción continua. Ha sido posible debido a que se ha aprovechado el tramo inicial sin definir deriva para realizar una marcha tendida, que ha llevado a la regulación de velocidad apropiada a la velocidad máxima en el tramo central.

Ejemplo 4: perfil subida-bajada y límites de velocidad bajo-alto-bajo.

En la Figura 6.21 se representa la solución del proceso completo de optimización para un tiempo de recorrido de 100 s, compuesto de una única deriva que comienza

en el espacio $s = 350$, tiene una velocidad de deriva $v_d = 42$ km/h y una velocidad de remotor $v_r = 38$ km/h.



Figura 6.21. Ejemplo 4 para conducción por derivas

Al llegar el tren al espacio s comienza a derivar, debido a que su velocidad está por encima de la v_d . La velocidad del tren desciende hasta que alcanza la velocidad de remotor, y acelera hasta que vuelve a derivar cuando alcanza v_r . Esta deriva comienza disminuyendo la velocidad, pero a continuación el centro de masas del tren pasa por el cambio de pendiente de la vía (cuando la cabeza está en el espacio 540 m), y a partir de entonces el tren aumenta de velocidad. Al acercarse al último límite de velocidad, el tren ha de frenar para no violarlo, regulando a continuación a velocidad máxima hasta el frenado final.

En la Tabla 6.13 se detallan los resultados de la solución.

tiempo de cálculo (s)	tiempo de recorrido (s)	consumo (kWh)	s (m)	v_d (km/h)	v_r (km/h)
7	100.1	9.99	350	42	38

Tabla 6.13. Resultados del Ejemplo 4 para conducción por derivas

En este caso la solución proporcionada por la conducción continua en el apartado 6.3.2 es más eficiente en consumo, debido a que la regulación que ejecuta al principio del recorrido no puede realizarse con la conducción por vectores de deriva contemplada, ya que no existe la consigna de regulación.

6.4.3 Conclusiones

Se han estudiado ejemplos de optimización de la conducción considerando el comportamiento basado en vectores de deriva de un sistema concreto de conductor automático ATO. De su análisis y de la comparación con las soluciones obtenidas en el apartado 6.3 para la conducción continua se llega a las siguientes conclusiones:

- Las técnicas de optimización descritas en el capítulo 5 para conducción por derivas han demostrado su eficiencia, al encontrar soluciones óptimas en tiempos razonables.
- Cuando las características de la interestación son variadas, con pendientes considerables y límites de velocidad variables, la solución óptima en consumo para un tiempo de recorrido objetivo no es trivial. Para un diseño eficiente de las conducciones en estas etapas es muy conveniente la utilización de herramientas informáticas de ayuda al diseño que evalúen y propongan soluciones automáticamente.
- El proceso de optimización empleado contempla hasta tres vectores de deriva distintos en una interestación. Se ha comprobado que para muchas interestaciones de longitud tipo metro (1 km) la solución óptima se alcanza con un sólo vector de deriva. Sólo en las interestaciones que presentan unas características especialmente complicadas es necesario acudir a una segunda deriva. No se ha encontrado ningún caso en que hayan sido necesarias tres derivas. En interestaciones más largas, por ejemplo en recorridos de trenes de cercanías, probablemente sí sería útil emplear más de una deriva.
- Mediante el conductor automático ATO por derivas considerado se han obtenido conducciones muy cercanas a las conseguidas por la conducción continua, a pesar que ésta última tiene muchas más posibilidades al no estar restringida. Esto indica que los vectores de deriva que definen la conducción ATO proporcionan suficiente riqueza de buenas conducciones. Por otro lado, se confirma que es buena estrategia en el diseño de la conducción óptima en una interestación comenzar el estudio mediante conducción continua, y a partir de ella estudiar su parametrización para el equipo de ATO concreto.

Otros equipos de conducción automática ATO pueden tener características distintas al ATO considerado, como restricciones en el número de velocidades de deriva posibles o capacidad de regulación a cualquier velocidad. Resulta sencillo emplear las técnicas desarrolladas a estos sistemas, pues es suficiente con adaptar el módulo de simulación de movimiento del tren ante consignas externas. El método de búsqueda no se ve alterado. También se podrían incorporar a la función objetivo otros términos que tuvieran en cuenta, por ejemplo, la comodidad de la conducción de cara al pasaje, o que penalizara conducciones que hace trabajar en exceso al sistema de tracción.

Los ejemplos de optimización y las gráficas mostradas en los ejemplos anteriores han sido obtenidos mediante la herramienta de ayuda al diseño de conducción por vectores de deriva CAT ([Juan 95]). Este programa optimiza a la vez hasta cuatro marchas en una interestación, para tiempos objetivo fijados por el diseñador. Para los cuatro problemas realiza un rastreo común, seleccionando en una sola fase candidatos para todos los tiempos objetivo. A continuación realiza una búsqueda local para cada problema.

La herramienta CAT maneja la misma base de datos de línea y material rodante que la herramienta PACA, y permite una configuración de la búsqueda adecuada para el diseñador a través de un interfaz gráfico integrado.

6. Resultados	105
6.1 Simulación del movimiento de un tren	105
6.1.1 Simulación de marcha tendida	106
6.1.2 Simulación de marcha mediante vectores de deriva	108
6.2 Análisis de la señalización	110
6.2.1 <i>Moving-block</i>	111
6.2.2 Tramos de señalización	113
6.2.3 Protección automática ATP por circuitos de vía	113
6.2.4 Protección automática ATP por circuitos más señales	116
6.2.5 Cambio de sentido en estaciones cabecera	116
6.2.6 Herramienta PACA de ayuda al diseño de la señalización	119
6.2.7 Conclusiones	121
6.3 Optimización de la conducción continua	122
6.3.1 Perfil llano y límite de velocidad constante	122
6.3.2 Perfil no llano y límites de velocidad variables	125
6.3.3 Conclusiones	129
6.4 Optimización de la conducción por vectores de deriva	130
6.4.1 Perfil llano y límite de velocidad constante	131
6.4.2 Perfil no llano y límites de velocidad variables	133
6.4.3 Conclusiones	138

Parte II. Movimiento de trenes en una línea cerrada

7. Modelado

En el capítulo 2 se describieron los modelos necesarios para simular el tráfico de trenes en una línea ferroviaria de explotación circular en condiciones nominales. En este capítulo se modelan nuevos aspectos del sistema, que permitirán describir y simular el tráfico de trenes en condiciones perturbadas. Estos aspectos son las interacciones entre los trenes a través de los sistemas de protección y la influencia del pasaje sobre los tiempos de parada en estación. El nivel de ocupación de los trenes también puede influir en los tiempos de recorrido.

En el capítulo 8 se presenta un simulador detallado de tráfico por eventos discretos que se basa en los modelos que se estudian en el presente capítulo. Este simulador se ha utilizado como banco de pruebas, sustituyendo al sistema real en los ensayos realizados con los algoritmos de control de tráfico.

7.1 Descripción en variables de estado

El comportamiento de un tren en una línea desequilibrada se diferencia del estudiado en el capítulo 3 para condiciones nominales en cuatro aspectos:

- Pueden actuar los sistemas de protección sobre el movimiento de un tren, si el tren que le precede en la línea se encuentra suficientemente cerca. En condiciones nominales se podía considerar que el movimiento de cada tren no dependía del resto de los trenes. Si no se cumplen estas condiciones, cada tren depende del

movimiento del tren anterior, formando una cadena circular de dependencias a lo largo de la línea.

- El tiempo de parada en estación no es constante. Cuando crece el intervalo de paso de trenes por una estación, aumenta el número de viajeros a cargar, y aumenta el tiempo de parada del tren. En este capítulo se describe un modelo del proceso de carga y descarga de viajeros que tiene en cuenta este fenómeno. El modelo también incluye las variaciones en el flujo de afluencia de viajeros a las estaciones y en sus destinos, definiendo escenarios deterministas.
- La masa del tren debida al pasaje no es constante. Cuando los trenes circulan por tramos de mayor afluencia de viajeros pueden ver alterado su comportamiento dinámico, debido al incremento de masa de viajeros. Lo mismo ocurre cuando un tren lleva un intervalo anormalmente alto con respecto al tren precedente, y encuentra un número mayor de viajeros. Este fenómeno es tenido en cuenta definiendo un estado de carga del tren, que tiene en cuenta la masa total y el número de viajeros que bajarán en cada estación.
- Los trenes se pueden ver sometidos a acciones de control, con el objeto de llevar y mantener al sistema cerca de las condiciones nominales de explotación.

7.1.1 Variables de estado

Según el modelo propuesto, las variables de estado que describen el sistema para un instante dado son las siguientes:

- Velocidad y posición en la vía de cada tren. Para el tren i , v_i y s_i , respectivamente.
- Masa de viajeros en cada tren i que tienen como destino cada estación d (m_{Tid}).
- Masa de viajeros en cada estación j que tienen como destino cada estación d (m_{Ejd}).

En una línea de M estaciones por la que circulan N trenes se define el vector de estados \mathbf{x} como:

$$\mathbf{x} = [[v_i], [s_i], [m_{Tid}], [m_{Ejd}]] \quad i=1,\dots,N; \quad j=1,\dots,M; \quad d=1,\dots,M$$

[7.1]

El modelo propuesto introduce la masa de viajeros en trenes y andenes como variable de estado (y no como perturbaciones) por varios motivos:

- Para poder establecer escenarios de prueba con gran nivel de detalle

- Para simular con precisión la dinámica del tren, especialmente cuando el tráfico se encuentra muy desequilibrado, y los trenes más cargados aceleran y frenan más lentamente.
- Para conocer la masa de viajeros que se descarga en cada estación destino, simulando mejor dicho proceso.
- Para saturar el proceso de carga de viajeros si se alcanza el límite de capacidad del tren.

7.1.2 Acciones de control: vector de mandos

La evolución de un tren a lo largo de la línea se divide en etapas. Una etapa comprende el período de tiempo entre dos salidas de estación consecutivas de un tren. Cada etapa se compone a su vez de un período de movimiento (recorrido de la interestación) y un período de parada en estación para carga y descarga de viajeros.

Durante el período de movimiento actúa sobre cada tren una variable de mando que afecta a su movimiento, u_R , que indica el nivel de marcha entre un conjunto discreto. Cada marcha tiene asociada el conjunto de consignas de conducción necesarias para recorrer la interestación (ver capítulo 5).

Durante el período de parada, actúa la variable de mando u_P , que puede hacer que el tren retrase su salida de estación.

Las dos variables de mando (u_R, u_P) se envían al tren una sola vez para una etapa (a su comienzo), por lo que, vistas como funciones del tiempo, son constantes durante el período de tiempo en que el tren recorre la etapa. El vector de mandos $\mathbf{u}(t)$ del sistema está compuesto por las variables de mando de cada tren:

$$\mathbf{u}(t) = [[u_{Ri}], [u_{Pi}]] \quad i=1, \dots, N$$

[7.2]

7.2 Ecuaciones de estado

Teniendo en cuenta la definición del vector de estados \mathbf{x} en [7.1] y del vector de mandos \mathbf{u} en [7.2], la evolución temporal de las variables de estado se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{dv_i}{dt} &= F_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + w1_i(t) & (a) & \text{ ec. dinámica} \\ \frac{ds_i}{dt} &= v_i & (b) & \text{ ec. dinámica} \\ \frac{dm_{Tid}}{dt} &= L_{id}(\mathbf{x}) - V_{id}(\mathbf{x}) + w2_{id}(t) & (c) & \text{ ec. de pasaje de un tren} \\ \frac{dm_{Ejd}}{dt} &= A_{jd}(t) - D_{jd}(\mathbf{x}) + w3_{jd}(t) & (d) & \text{ ec. de pasaje en una estación} \end{aligned}$$

[7.3]

A continuación se describe cada una de las ecuaciones anteriores.

7.2.1 Ecuación dinámica de un tren

La ecuación [7.1]-a describe la dinámica de un tren. La función F_i es la fuerza neta que actúa sobre el tren por unidad de masa, y $w1_i(t)$ es un término de perturbaciones. Durante los períodos de movimiento, la fuerza neta unitaria depende de:

- La masa del tren, como suma de su masa en vacío más la masa del pasaje. Esta se calcula a partir de las variables de estado sumando las variables m_{Tid} del tren i para todos los destinos d .
- Su posición en la vía (s_i) y su velocidad (v_i), debido a las características físicas de la vía, el sistema de tracción del tren y la lógica de conducción a lo largo de la interestación.
- La posición del tren que le precede (s_{i-1}), debido a que los sistemas de protección frenan al tren si se aproxima lo suficiente al tren anterior.
- Su variable de mando en movimiento, u_{Ri} .
- El tiempo, si se supone que la respuesta del sistema de tracción varía con el tiempo (por ejemplo, por bajadas de tensión de catenaria).

Durante los períodos de parada, F_i es nula. El período de parada del tren i en la estación j finaliza cuando la variable de mando u_{Ej} lo permite y las variables de estado cumplen ciertas condiciones:

- La masa de viajeros del tren con destino a la estación, m_{Tjd} , se hace cero, es decir, el tren ha descargado todo el pasaje.

- La masa total de viajeros en la estación j de parada (suma de m_{Ejd} para todos los destinos d) se hace cero, es decir, el tren ha cargado todo el pasaje. Esta condición es válida mientras la masa total de viajeros en el tren esté por debajo de la capacidad de transporte del tren. Si no, cuando el tren se llena por completo.
- La posición del tren anterior, s_{i-1} es tal que está suficientemente alejado para que no dispare los sistemas de protección, y por tanto la señal de salida de estación está verde.

7.2.2 Ecuación de masa de pasaje en un tren

La ecuación [7.1]-c describe la evolución de la masa de viajeros en un tren i con destino a una estación d .

La función L_{id} es el ritmo de llenado del tren i con viajeros con destino a la estación d , que vale distinto de cero cuando el tren está detenido en una estación (j) y en ella hay viajeros con destino d (m_{Ejd} distinto de cero).

La función V_{id} es el ritmo de vaciado del tren i de viajeros con destino a la estación d . Vale distinto de cero cuando el tren está detenido en una estación (j) y en el tren quedan viajeros con destino d (m_{Tjd} distinto de cero).

La función $w_{2, id}(t)$ es un término de perturbaciones.

7.2.3 Ecuación de masa de pasaje en una estación

La ecuación [7.1]-d describe la evolución de la masa de viajeros en la estación j con destino a la estación d .

La función A_{jd} es el ritmo de afluencia de viajeros a la estación j con destino la estación d . Depende únicamente del tiempo.

La función D_{jd} es el ritmo de desalojo de pasajeros en la estación j con destino d . Vale distinto de cero cuando existe un tren parado en la estación j , quedan pasajeros con destino d en j (m_{Ejd} distinto de cero) y no está saturada la capacidad de transporte del tren detenido en j .

La función $w_{3, jd}(t)$ es un término de perturbaciones.

7.3 Modelo de afluencia de viajeros

La función $A_{jd}(t)$ de la ecuación [7.1]-d es el ritmo de afluencia de viajeros en la estación j con destino a la estación d . La afluencia total de pasaje $A_{Tj}(t)$ a la estación j es la suma de estas funciones para todas las M estaciones destino:

$$A_{Tj}(t) = \sum_{d=1}^M A_{jd}(t) \quad [7.4]$$

Cada función $A_{jd}(t)$ se modela constante a trozos a lo largo del tiempo, esto es, se define una sucesión de tiempos $\{t_k\}$ tal que:

$$A_{jd}(t) = A_{jd}^k \quad \text{para } t \in (t_k, t_{k+1}) \quad [7.5]$$

En la Figura 7.1 se muestra un ejemplo de estas funciones para una estación del centro urbano, donde se han tomado como representantes de destinos una estación periferia (A) y otra estación centro urbano (B).

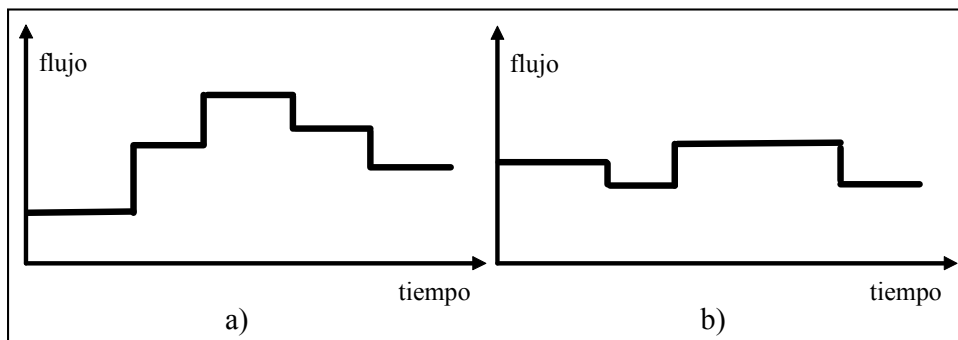


Figura 7.1. Modelo de afluencia de viajeros

La Figura 7.1-a muestra flujos altos por la tarde, típicos del retorno laboral del centro de la ciudad a la periferia.

La Figura 7.1-b muestra flujos con menos variaciones debidos a recorridos de menor distancia dentro del centro urbano.

7.4 Modelo del proceso de carga/descarga de un tren

El proceso de carga de un tren se supone lineal, es decir, es proporcional la masa cargada al tiempo de carga. Este proceso se satura si se alcanza la capacidad máxima del tren. En la Figura 7.2 el eje de ordenadas representa tiempo desde la apertura de puertas y el de abscisas la masa del tren.

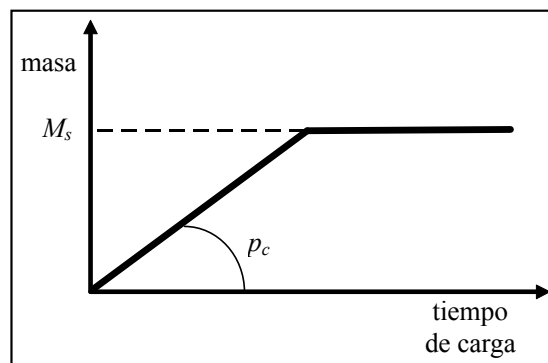


Figura 7.2. Pendiente de carga de un tren

La pendiente de carga p_c y la masa máxima M_s es característica de cada tipo de coche. La pendiente de carga se obtiene en la práctica midiendo el tiempo que se emplea en cargar al máximo el tren.

El proceso de descarga de viajeros se modela análogamente, definiendo una pendiente de descarga p_d . El proceso finaliza cuando se ha descargado completamente el pasaje con destino a la estación correspondiente. En general se utiliza el mismo valor para la pendiente de carga y descarga.

Las funciones $L_i(\mathbf{x})$ (ritmo de llenado del tren i) y $V_i(\mathbf{x})$ (ritmo de vaciado del tren i) de la ecuación [7.1]-c valen precisamente la pendiente de carga y descarga, respectivamente, en los períodos en que son no nulas. Estos períodos son aquellos en los que, estando el tren parado en estación, aun hay pasajeros por cargar/descargar y el tren no está saturado. Para conocer estos períodos es preciso recurrir a las variables de estado del sistema, de ahí la dependencia funcional con el vector de estados \mathbf{x} .

La función $D_j(\mathbf{x})$ (ritmo de desalojo de pasajeros del andén) de la ecuación [7.1]-d coincide con la pendiente de carga en los períodos en que es no nula, guardando la misma dependencia funcional que L_i y V_i .

Nótese que las funciones $L_i(\mathbf{x})$, $V_i(\mathbf{x})$ y $D_j(\mathbf{x})$ anteriores están sumadas para todos los destinos (no aparece el índice d), ya que los tiempos de carga dependen de la cantidad total de viajeros.

El tiempo total de parada en estación debido al pasaje es la suma del tiempo de descarga más el tiempo de carga más un tiempo fijo que depende de la estación, necesario para efectuar las maniobras de abrir y cerrar puertas. Este tiempo fijo se obtiene a partir de medidas de parada en estación en ausencia de pasaje.

Nota bibliográfica:

El enfoque elegido para modelar la parada en estación es el propuesto es [Guiysse, 70], teniendo en cuenta explícitamente el número de viajeros acumulados en la estación y en el tren. Además de ser más preciso que el modelo propuesto en [Sasama & Okhawa, 83], que sólo depende del intervalo de circulación, permite estudiar el nivel de ocupación de estaciones y trenes.

7.5 Escenarios de explotación

Queda definido un escenario de explotación en el intervalo de tiempo (t_1, t_2) en una línea cerrada dadas:

- Las funciones de afluencia de viajeros $\{A_{jd}(t)\}$ en dicho intervalo para toda estación origen i y toda estación destino d , según modelo del apartado 7.3.
- Las masas de viajeros $\{m_{Ejd}\}$ en toda estación j con destino a cada estación d en el instante de tiempo t_1 .
- Las masas de viajeros $\{m_{Tid}\}$ para todo tren i con destino a cada estación d en el instante de tiempo t_1 .

Un escenario de explotación así definido permite programar el comportamiento de los viajeros en una línea a lo largo de, por ejemplo, una jornada. Según estaciones, se van invirtiendo con el tiempo los flujos de viajeros y los destinos con sentido periferia-centro urbano y viceversa.

El regulador automático que se presenta en la parte III ha sido ensayado bajo diferentes escenarios deterministas, con objeto de estudiar su comportamiento ante escenarios fuertemente desequilibrados. Ejemplos de estos escenarios son aquellos en que existen flujos de viajeros muy altos concentrados en ciertas estaciones, debido a la celebración de espectáculos.

7. Modelado	141
7.1 Descripción en variables de estado	141
7.1.1 Variables de estado	142
7.1.2 Acciones de control: vector de mandos	143
7.2 Ecuaciones de estado	143
7.2.1 Ecuación dinámica de un tren	144
7.2.2 Ecuación de masa de pasaje en un tren	145
7.2.3 Ecuación de masa de pasaje en una estación	145
7.3 Modelo de afluencia de viajeros	146
7.4 Modelo del proceso de carga/descarga de un tren	147
7.5 Escenarios de explotación	148

8. Simulación

En este capítulo se propone un simulador del tráfico de trenes en una línea cerrada. Incluye el efecto de las perturbaciones producidas por los sistemas de protección, y una simulación detallada del tiempo de parada en estación en función del número de viajeros acumulados en la estación y a bordo del tren.

El simulador se estructura en dos niveles, el nivel de simulación de línea y el nivel de simulación de tren. El primero resuelve el problema de las restricciones creadas por la acción de los sistemas de protección. El segundo simula el movimiento de cada tren a partir de las técnicas presentadas en el capítulo 3.

La técnica empleada se puede formalizar como una simulación por eventos discretos, donde el estado de la señalización que afecta a cada tren se almacena mediante la historia del tren que las dispara. De esta forma se consigue desacoplar el movimiento de los trenes durante largos períodos de tiempo, permitiendo una velocidad alta de simulación. La gestión de la historia de los trenes es ágil debido al uso de los modelos de simulación desarrollados en la Parte I de este trabajo.

Nota bibliográfica:

Los simuladores de tráfico por eventos discretos que aparecen en la bibliografía ([Casalino et al, 89], [Lidén, 93], [Boccalatte et al, 93], [Chang & Thia, 95]) almacenan el estado de la señalización explícitamente. El nivel de simulación de tren lo resuelven mediante un simulador a tiempo discreto o mediante modelos cinemáticos simplificados.

8.1 Objetivos de simulación

Se pretende obtener un simulador de tráfico para utilizarlo como banco de pruebas de estrategias de regulación. Se requiere que refleje fielmente el comportamiento del sistema en condiciones no equilibradas y el efecto de las acciones de control.

El simulador de tráfico para líneas equilibradas descrito en el capítulo 3 se va a ampliar, introduciendo las siguientes características:

- Simulación precisa de las interacciones entre trenes debido a los sistemas de protección.
- Posibilidad de dar a los trenes consignas de regulación, concretamente órdenes de conducción ATO variables y órdenes de retención en estación.
- Simulación precisa de las paradas de trenes en estación para carga y descarga de viajeros, de acuerdo con los escenarios de viajeros deterministas definidos en el capítulo 7.

Se persigue una velocidad de simulación elevada y variable. Con ello se facilita la realización de numerosas pruebas de regulación, y el estudio de los límites de respuesta de los algoritmos de control al aumentar progresivamente la velocidad de simulación.

Los resultados de simulación serán presentados en un interfaz gráfico de manera síncrona, con velocidad de simulación variable. Por ello es muy importante que el almacenamiento y la recuperación de la información simulada sea eficaz, y su tratamiento rápido y sencillo.

8.2 Definición del problema.

Según el modelo de simulación discreta definido en el capítulo 3, el movimiento del tren i en el intervalo temporal (t_1, t_2) se describe mediante una sucesión de estados $\mathbf{R}_i(t_1, t_2)$:

$$\mathbf{R}_i(t_1, t_2) = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n\}$$

[8.1]

Se definió el vector de estados discreto \mathbf{X}_k asociado al instante k como:

$$\mathbf{X}_k = (v_k, s_k, t_k, c_k, A_k, B_k, C_k, m_k, n_k)$$

[8.2]

donde:

t_k : tiempo asociado al instante k

v_k, s_k : velocidad y posición del tren en el instante k .

c_k : consumo acumulado en el instante k .

A_k, B_k, C_k : variables que parametrizan las curvas de movimiento del tren entre los instantes k y $k+1$.

m_k, n_k : parámetros de la recta de par seguida por la tracción del tren entre los instantes k y $k+1$.

El vector de estado discreto \mathbf{X}_k así definido almacena la información necesaria para poder evaluar fácilmente la velocidad, la posición y el consumo acumulado del tren en cualquier instante de tiempo comprendido entre t_k y t_{k+1} , haciendo uso del modelo del movimiento continuo definido en el capítulo 3.

La simulación \mathbf{S} en el intervalo temporal (t_1, t_2) de un sistema formado por N trenes recorriendo una línea ferroviaria se describe por el conjunto de las simulaciones individuales de cada tren en dicho intervalo:

$$\mathbf{S}(t_1, t_2) = \{ [\mathbf{R}_i(t_1, t_2)] \}_{i=1-N}$$

[8.3]

Se trata de encontrar este conjunto de simulaciones que respeten los modelos de vía, tracción, protecciones, conducción y consumo definidos en el capítulo 2 y los modelos de afluencia de viajeros, carga y descarga de viajeros y consignas de regulación definidos en el capítulo 7.

8.3 Estructura del simulador

El simulador de línea que se propone maneja tres modelos de movimiento:

- El modelo de simulación continua, que representa mediante curvas parametrizadas continuas la dinámica de un tren y su consumo (descrito en el capítulo 3). Este

modelo permite evaluar rápidamente las variables cinemáticas y el consumo acumulado de un tren.

- El modelo discreto a nivel de tren, que representa la evolución temporal de un tren como una sucesión de estados discretos. Cada estado discreto contiene información sobre la dinámica y el consumo del tren hasta el siguiente estado (descrito en el capítulo 3).
- El modelo discreto nivel a de línea, que representa la evolución del tráfico de una línea como una sucesión de estados discretos del mismo tipo que el nivel anterior, pero donde aparecen todos los trenes de la línea. Sin embargo, este modelo no considera todos los estados intermedios por los que pasa un tren; sólo los necesarios para gestionar las relaciones entre los trenes a través de los sistemas de protección.

Los modelos discretos de línea y de tren dan lugar a sendos simuladores por eventos discretos:

- El simulador de línea resuelve el problema de las interacciones entre los trenes, que se resume en que para conocer el comportamiento de un tren en un intervalo de tiempo, es necesario conocer previamente el movimiento del tren que le precede en la línea durante al menos otro cierto intervalo. Se forma así una cadena de dependencias circulares, al depender cada tren del anterior. El simulador decide qué tren debe ser simulado en cada momento, y hasta qué instante de tiempo.
- El simulador de tren se encarga de resolver la simulación de un tren durante un intervalo de tiempo fijado por el simulador de línea, durante el que se conoce el comportamiento de los sistemas de protección que afectan al tren. Este simulador es esclavo del anterior, y la concatenación temporal de sus simulaciones para cada tren conforma la solución al problema de simulación.

8.4 Nivel de simulación de línea

El nivel de simulación de línea se ocupa de resolver el problema de acoplamiento circular en el movimiento de trenes en una línea cerrada, convirtiéndolo en subproblemas de simulación de un solo tren bajo ciertas condiciones.

Este nivel se puede formalizar como un modelo de simulación por eventos discretos, donde se almacena el estado de las protecciones (códigos de velocidad, aspecto de las señales) indirectamente a través de la simulación del tren que las dispara, permitiendo desacoplar el movimiento de cada tren durante largos períodos de tiempo.

Nota bibliográfica:

En [Ho, 94] se presenta un simulador por eventos discretos que sólo considera los instantes de ocupación y desocupación de circuitos. Se almacenan el estado de las protecciones que afectan a un tren a través de los tiempos de ocupación y desocupación de los circuitos por delante de cada tren. En cada ciclo de simulación cada tren avanza un circuito, mientras que en el modelo aquí propuesto en cada ciclo avanza un sólo tren hasta donde encuentra incertidumbre en el estado de las protecciones.

En el apartado siguiente se presenta una idea intuitiva del ciclo básico de funcionamiento de este nivel de simulación, en el apartado 8.4.2 se modela como un simulador por eventos discretos, y en el apartado 8.4.3 se describe el algoritmo empleado.

8.4.1 Lógica de simulación

El simulador de nivel de línea mantiene almacenado en todo momento la simulación de movimiento de cada tren a lo largo de un período de tiempo. En la Figura 8.1, cada línea horizontal representa este período de tiempo para cada tren, que comienzan en el tiempo actual de simulación (t_{sim})

Cada ciclo de simulación da como resultado conocer un intervalo de tiempo más del movimiento de un tren, y avanza el tiempo de simulación global del sistema (el mayor de los tiempos en que se conoce la posición de todos los trenes). Un ciclo de simulación se puede descomponer en cuatro pasos:

- Paso 1: selección del próximo tren a mover. Será aquel del que se conoce su movimiento hasta un tiempo menor (tren B).

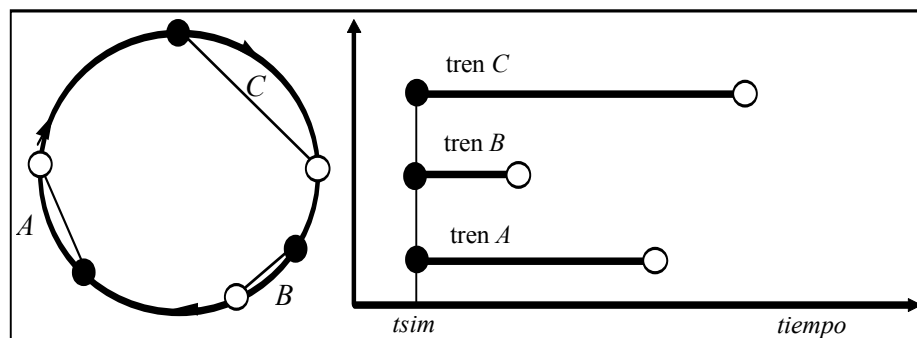


Figura 8.1. Situación inicial-elección de tren a mover

- Paso 2: actualizar el tiempo de simulación. El tiempo actual de simulación salta hasta el máximo tiempo conocido del tren seleccionado (ver Figura 8.2).

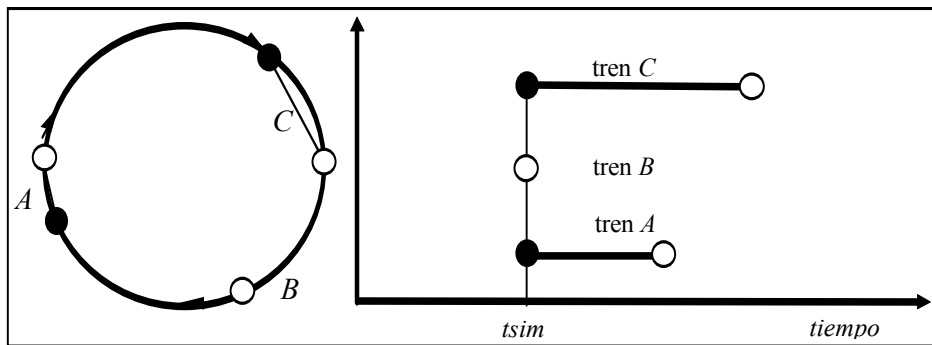


Figura 8.2. Avance de tiempo de simulación

- Paso 3: mover el tren seleccionado por tiempo. El movimiento del tren B puede ser simulado hasta el tiempo en que se conoce el movimiento de su tren anterior (tren A), ya que es el movimiento que condiciona los sistemas de protección. En la Figura 8.3, esta simulación se extiende para el tren B hasta el primer círculo.
- Paso 4: mover el tren seleccionado por espacio. El movimiento del tren B puede ser simulado más allá del límite conocido de su tren anterior, si se tiene la certeza de que el comportamiento de éste no puede afectar durante un tramo al tren B. Para calcular este tramo, se supone el peor de los casos, en que la evolución desconocida del tren A fuera quedarse detenido indefinidamente. Entonces el tren B puede ser simulado hasta el punto en que le afectarían los sistemas de protección. En la Figura 8.3, la simulación del tren B se extiende hasta el segundo círculo.

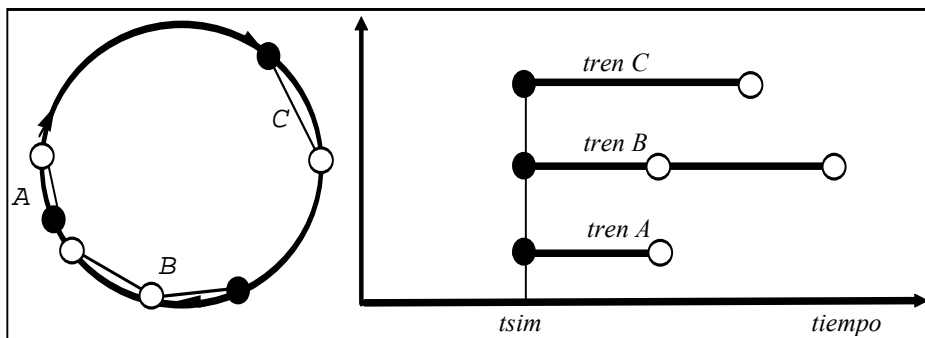


Figura 8.3. Simulación del tren B por tiempo y espacio

El resultado global del ciclo de simulación ha sido aumentar el tiempo de simulación, olvidar el movimiento anterior al nuevo tiempo de simulación de cada tren (pues no volverá a ser necesario), y ampliar el conocimiento del movimiento de un tren (tren B). En el siguiente ciclo de simulación el tren a mover sería el A (ver Figura 8.3).

Si no se realizara el paso de movimiento por espacio, se llegaría a la situación en que se conoce el movimiento de todos los trenes hasta el mismo tiempo, y el simulador no podría avanzar. Pero el movimiento por espacio permite simular a un tren por encima del tiempo máximo del tren que le precede, tiempo extra de simulación que hará más largo el período de simulación del tren que le sigue en su movimiento por

tiempo. Para que el simulador realmente no pudiera avanzar, tendría que ser nulo el movimiento por espacio de todos los trenes; esta situación significaría que se están perturbando por protecciones todos los trenes de la línea, situación imposible si está bien dimensionado el número de trenes.

8.4.2 Modelado como simulador por eventos discretos.

En un instante t_k el estado que define el estado dinámico de cada tren i es el vector \mathbf{X}_{ik} , definido en [8.2]. Se define \mathbf{Z}_k como el conjunto de vectores de estado de cada tren en el instante t_k :

$$\mathbf{Z}_k = \{ [\mathbf{X}_{ik}] \}_{i=1,\dots,N} \quad [8.4]$$

donde N es el número de trenes en línea.

Este nivel de simulación maneja un sólo tipo de evento, que indica el paso de un tren por cierta posición para el tiempo de cumplimiento del evento:

$$\mathbf{v}_i = (t_{Vi}, s_{Vi}) \quad [8.5]$$

donde:

- \mathbf{v}_i : evento asociado al tren i .
- t_{Vi} : tiempo de cumplimiento de evento.
- s_{Vi} : posición del tren i en el tiempo t_{Vi} .

El modelo de simulación por eventos discretos mantiene una lista \mathbf{V} que contiene el próximo evento de este tipo por cada tren posterior al instante t_k :

$$\mathbf{V} = \{ [\mathbf{v}_i] \}_{i=1,\dots,N} \quad [8.6]$$

Además del vector de estados \mathbf{X}_k , cada tren lleva asociado al instante de tiempo t_k la sucesión de estados discretos que describen la simulación del movimiento del tren i en entre los tiempos t_k y t_{Vi} , esto es, $\mathbf{R}_i(t_k, t_{Vi})$. El conjunto \mathbf{S}_k está formado por estas simulaciones para cada tren:

$$\mathbf{S}_k = \{ [\mathbf{R}_i(t_k, t_{Vi})] \}_{i=1,\dots,N} \quad [8.7]$$

Entre dos eventos consecutivos de un tren, S almacena información del movimiento del tren, y por tanto de tiempos de ocupación y liberación de los circuitos de vía que recorre en ese intervalo. Estos instantes son los que determinan el estado de los sistemas de protección que afectan al tren que le sigue. A este nivel de simulación, R_i se debe interpretar como una representación del estado de las protecciones causadas por el tren i entre dos eventos consecutivos, y que afectará al movimiento del tren que le sigue en ese intervalo temporal.

Como se detalla más adelante, las simulaciones del conjunto S_k son elaboradas por el nivel de simulación individual, y su concatenación temporal compone para cada tren la solución al problema de simulación definido en [8.3].

8.4.3 Algoritmo de simulación

La Figura 8.4 representa el diagrama ANA del algoritmo de simulación por eventos discretos del nivel de línea.

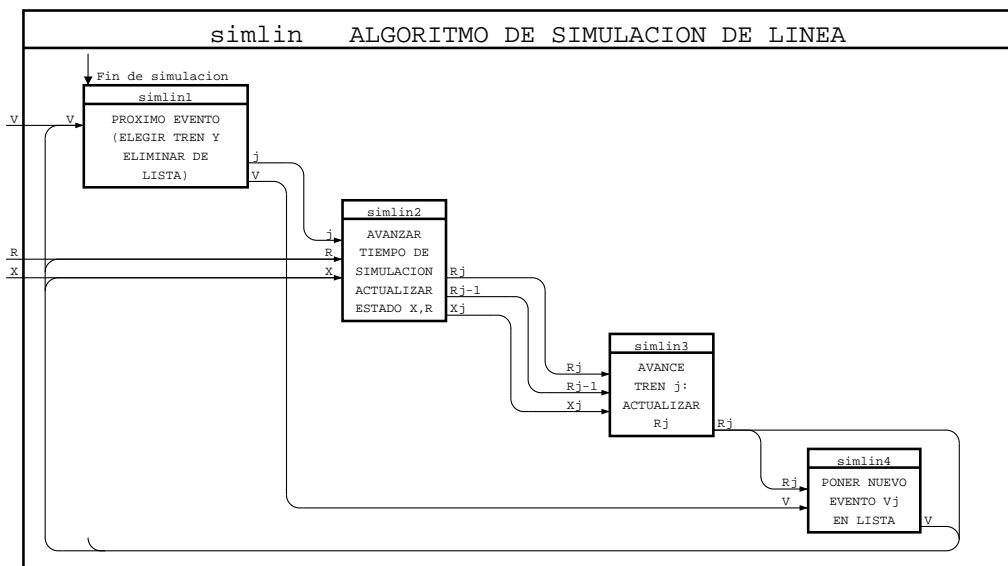


Figura 8.4. Algoritmo de simulación de nivel de línea

A continuación se detalla cada módulo de este algoritmo.

Módulo *simlin1*

El módulo *simlin1* se encarga de elegir de la lista de eventos V el que tiene asociado un tiempo menor t_{Vj} , que corresponde al tren j que será movido. Este evento es eliminado de la lista.

Módulo *simlin2*

El módulo *simlin2* avanza el tiempo de simulación t_k hasta el tiempo del evento ($t_k=t_{Vj}$) seleccionado por *simlin1*. Para ello, elimina del conjunto de estados discretos $\mathbf{R}_i(t_{k-1}, t_{Vi})$ de cada tren i aquellos que tienen asociados un tiempo menor a t_k , generando el nuevo $\mathbf{R}_i(t_k, t_{Vi})$. Nótese que para el tren j que dispara el evento, esta lista contendrá un sólo estado discreto, de la forma $\mathbf{R}_j(t_k, t_k)$.

Este módulo también actualiza los estados \mathbf{X}_{ik} de cada tren, correspondientes al tiempo t_k .

Módulo *simlin3*

El módulo *simlin3* genera un nuevo evento para el tren j asociado al evento tratado. El tiempo de este evento (nuevo t_{Vj}) corresponderá al estado final de una simulación de dicho tren, que se almacena en $\mathbf{R}_j(t_k, t_{Vj})$. Para ello se conoce el estado actual del tren (\mathbf{X}_j) y el estado de las protecciones que pueden afectar al movimiento de dicho tren en el intervalo temporal (t_k, t_{Vj-1}) , información contenida en la sucesión de estados del tren anterior, \mathbf{R}_{j-1} .

La simulación del tren j se realiza hasta el tiempo t_{Vj} frontera de incertidumbre del movimiento debido a posibles actuaciones de los sistemas de protección. Este tiempo frontera se calcula en dos etapas:

- En la primera etapa el tren puede ser simulado hasta el tiempo hasta el que se conoce el movimiento del tren precedente, t_{Vj-1} , ya que hasta él son conocidos sin incertidumbre los sistemas de protección.
- En una segunda etapa el tren puede ser simulado un tramo más, siempre y cuando en este nuevo tramo el tren no se viera afectado por los sistemas de protección. Para calcular el espacio límite de este tramo se supone el caso más desfavorable, en que el tren anterior se quedara detenido en el tiempo t_{Vj-1} indefinidamente.

La Figura 8.5 es la representación ANA del módulo de avance de tren. Los módulos *simlin31* y *simlin32* calculan, respectivamente, las condiciones límite por tiempo y por espacio descritas anteriormente. Para construir la simulación hasta cada límite correspondiente, se utiliza el módulo *simtren*, simulador de movimiento de un tren sin incertidumbre hasta dicho límite. Este módulo es el segundo nivel de simulación esclavo del primero, que se detalla en el apartado 8.5.

Módulo *simlin4*

El módulo *simlin4* pone el nuevo evento generado en la lista de eventos, dejándola preparada para un nuevo ciclo de simulación.

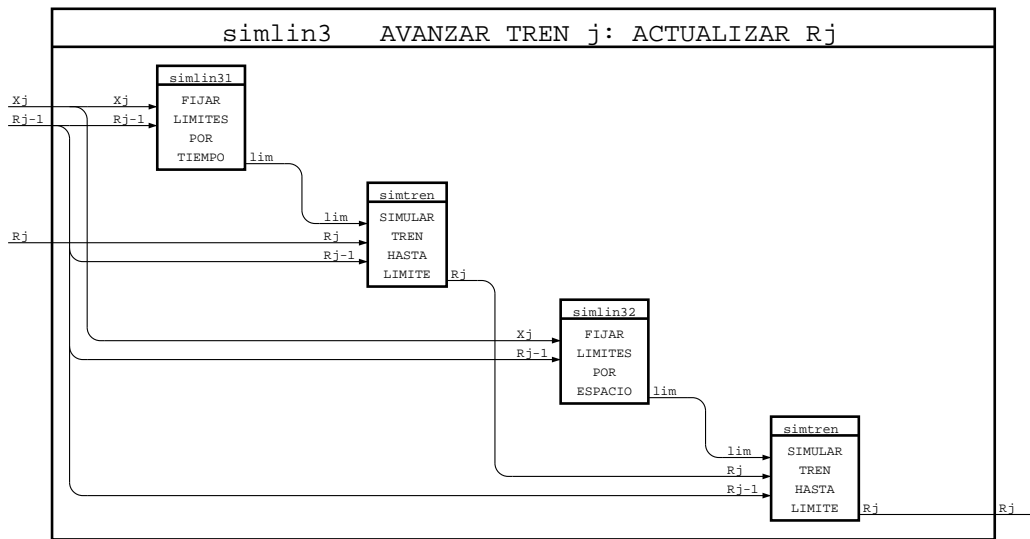


Figura 8.5. Módulo de avance de tren

8.5 Nivel de simulación de tren

En el capítulo 3 se presentó la técnica básica de simulación por evento discreto de un tren a lo largo de una línea ferroviaria en condiciones de explotación nominales. En este apartado se completa el modelo de simulación para un tren incorporando el efecto de los sistemas de protección, a causa de la posible cercanía del tren precedente.

También se presenta un modelo de simulación por eventos discretos para el proceso de parada en estación para carga y descarga de viajeros. Este proceso ha de tener en cuenta ahora los siguientes elementos:

- El escenario de viajeros (ver capítulo 7) en la estación de parada, que influye sobre la duración del proceso de carga.
- El nivel de ocupación del tren, que influye en la posible saturación del proceso de carga y en el proceso de descarga (debido a los viajeros que tienen como destino esa estación).
- Los sistemas de protección, que impiden arrancar al tren hasta que el tren precedente se haya alejado lo suficiente.
- Las órdenes de control, que pueden alargar el tiempo de parada en estación debido a estrategias de regulación.

A continuación se describe la ampliación del modelo de simulación de movimiento de un tren, y en el apartado 8.5.2 el modelo de simulación del proceso de parada en estación.

8.5.1 Simulación del movimiento

En el capítulo 3 se presenta la técnica básica de simulación por eventos empleada para el movimiento de un tren entre dos estaciones consecutivas. Dicha simulación se representa por la lista de estados discretos $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$.

La Figura 8.6 representa el esquema básico de transición de un estado x_k al siguiente x_{k+1} , detallado en el capítulo 3. El primer bloque representa el algoritmo que decide en qué instante ocurrirá el próximo evento y su tipo. El segundo bloque construye el siguiente estado discreto a partir de la información del evento que provoca el cambio y del estado actual.

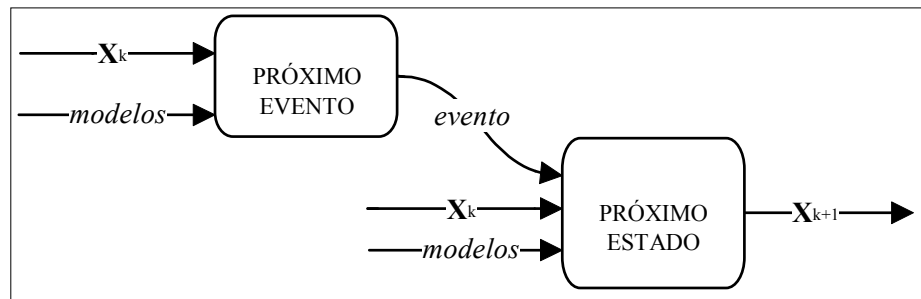


Figura 8.6 Esquema básico de transición de estado

La Figura 8.7 estructura el cálculo del próximo evento en dos tareas: determinación de los posibles próximos eventos de cada tipo (espacio, velocidad, tiempo y curva de frenado) y determinación de cuál de ellos se produce en primer lugar.

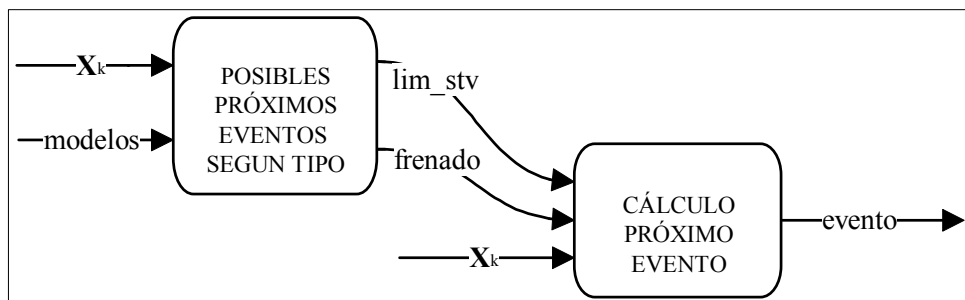


Figura 8.7. Cálculo del próximo evento

En el capítulo 3 se jerarquizan los eventos en tres niveles:

1. Aquellos que provocan restricciones de velocidad máxima, que incluyen eventos de tipo velocidad y de tipo curva de frenado límite {velocidad-espacio}. Este último tipo es el que hace que el tren frene cuando se acerca a un punto espacial en que disminuye el límite de velocidad, o cuando llega a una estación.
2. Eventos propios de la lógica de conducción basada en vectores de deriva.
3. Eventos producidos por cambios en las características físicas de la vía y cambios de comportamiento del sistema de tracción (cambio de curva de par o de consumo).

Nota bibliográfica:

En [Chang & Chan, 93] se presenta un simulador de tráfico ferroviario por tiempo discreto. La lógica de conducción se basa en un sistema de reglas que deciden en cada paso de simulación si necesario cambiar la consigna de tracción dependiendo del estado del sistema. Se define un conjunto de reglas que rigen el comportamiento de una conducción manual.

Los sistemas de protección ATP por circuitos de vía y mixto con señales restringen el movimiento del tren, imponiendo en cada circuito una velocidad máxima y una velocidad máxima de salida del circuito. La Figura 8.8 esquematiza el comportamiento del tren ante unos códigos de ATP restrictivos; el tren comienza a frenar en el instante adecuado tal que abandona del circuito con la velocidad máxima de salida.

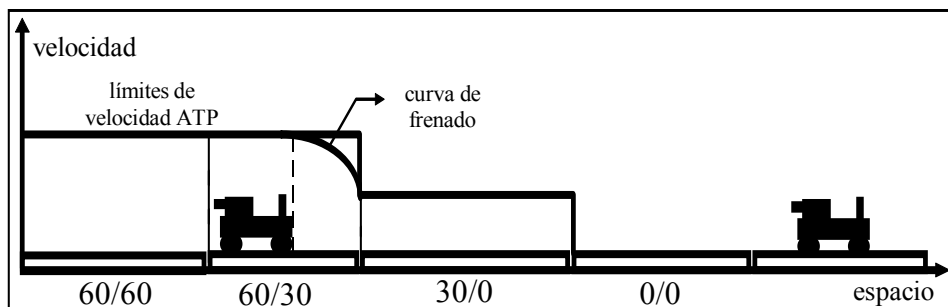


Figura 8.8. Frenado por protecciones ATP

Las restricciones al movimiento por códigos ATP se incorporan al modelo produciendo eventos de nivel 1; la aparición de unos códigos restrictivos en el circuito provocan un evento de velocidad máxima y un evento de curva de frenado límite {velocidad-espacio}. Cuando el tren entre en un nuevo circuito de vía, le llegarán nuevos códigos de ATP, que producirán nuevos eventos que actualicen la velocidad máxima y la curva de frenado límite.

El modelo propuesto trata de igual forma los cambios de códigos ATP mientras se está recorriendo un circuito, que ocurre si el tren precedente abandona su circuito de vía antes de que el tren simulado haga lo propio. En este caso, se generan los eventos de límites de ATP correspondientes etiquetados con los tiempos de abandono de

circuito de vía del tren que los genera. De esta forma se evita el error cometido por suponer constantes los códigos ATP durante todo el circuito.

El tratamiento de los eventos descritos en el algoritmo de simulación es el detallado en el capítulo 3 para eventos del tipo velocidad máxima y curva de frenado límite. La generación de estos eventos se presenta a continuación.

Generación de eventos causados por las protecciones

El modelo de simulación por eventos propuesto no almacena el estado de los sistemas de protección; guarda en su lugar la simulación del movimiento del tren anterior al simulado, que es el que provoca las posibles restricciones en su movimiento. Los tiempos en que el tren ve cambiar el estado de los sistemas de protección (códigos ATP) coincide con los tiempos de abandono de circuito de vía del tren precedente.

Los eventos debidos a las protecciones para el tren simulado se producen en el tiempo de abandono de circuito, y las restricciones de velocidad asociadas se determinan contando el número de circuitos de vía libres entre los dos trenes en ese instante de tiempo.

El módulo de simulación de nivel de tren recibe como dato la simulación del tren anterior ($j-1$) en un intervalo de tiempo (t_1, t_2) (ver módulo *simtren* en la Figura 8.5):

$$\mathbf{R}_{j-1}(t_1, t_2) = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n\}$$

[8.8]

La determinación de los tiempos de paso del tren por cada punto espacial de abandono de circuito de vía se obtiene evaluando en la curva correspondiente $\{\text{tiempo-espacio}\}$ dichos puntos espaciales. Estas curvas son las definidas por cada pareja de estados discretos de la ecuación [8.8], según el modelo de simulación continua descrito en el capítulo 3.

8.5.2 Simulación de la parada en estación

Cuando un tren se detiene en estación comienza el proceso de parada para carga y descarga de viajeros, que finaliza cuando el tren arranca y sale de estación.

La simulación de la parada de un tren en estación incluye:

- Determinar el instante de tiempo de arranque del tren (final de la parada).

- Calcular la masa de viajeros embarcada en el tren en todo instante de tiempo (actualización de las variables de estado m_{Td} para todas las estaciones destino d , ver capítulo 7).
- Calcular la masa de viajeros en andén en todo instante de tiempo (actualización de las variables de estado m_{Ed} para todas las estaciones destino d , ver capítulo 7).

Al detenerse el tren en estación, abre puertas y comienza el proceso de descarga de viajeros. Cuando finaliza, comienza el proceso de carga, que acabará cuando se libere el andén de pasajeros o se alcance la capacidad máxima del tren. A continuación el tren cierra puertas y arranca si los sistemas de protección lo permiten; de lo contrario, el tren espera detenido este momento con las puertas abiertas, prolongando el proceso de carga hasta que se produzca.

A continuación se describe la técnica de simulación de los tres procesos consecutivos anteriores: descarga de viajeros, carga y espera a que los sistemas de protección y los sistemas de control autoricen la salida.

Descarga de viajeros

Según el modelo del proceso de descarga de viajeros (capítulo 7), la masa de viajeros embarcada con destino a la estación de parada actual desciende desde la apertura de puertas linealmente con pendiente de descarga p_d hasta anularse. Este instante es el que determina el final del proceso de descarga. La Figura 8.9 representa la evolución temporal de la masa embarcada m_{Td} con destino a la estación d y la evolución de la masa total embarcada m_T del tren cuando se efectúa una parada en la estación d .

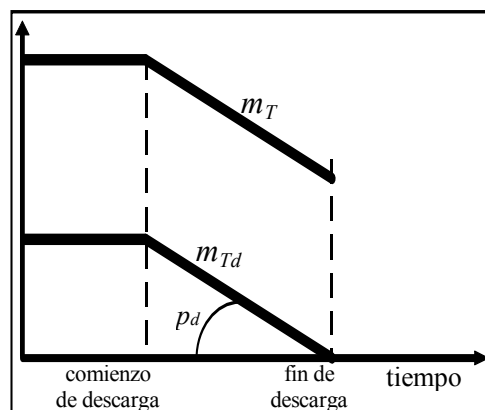


Figura 8.9. Proceso de descarga de viajeros en una estación

El único evento que se genera es el que marca el final del proceso, cuyo tiempo se obtiene al anular la función m_{Td} .

Carga de viajeros

Según el modelo del proceso de carga de viajeros (capítulo 7), la masa de viajeros en estación desciende desde el final del proceso de descarga linealmente hasta anularse, o saturar la capacidad de carga del tren. El ritmo de descenso es la diferencia entre el ritmo de carga del tren, p_c , y el ritmo de afluencia de pasajeros a la estación, a . La masa embarcada del tren se incrementa en la misma cantidad en que disminuye la anterior.

En la Figura 8.10 se representa la evolución temporal de la masa total m_{Ed} en la estación d , y la evolución temporal de la masa total del tren m_T . Estas masas aparecen desglosadas en el modelo por estaciones destino.

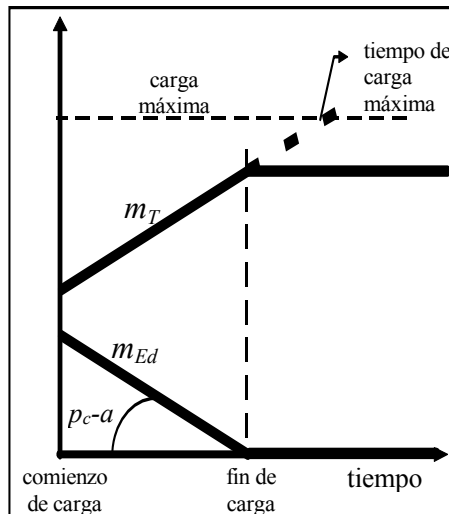


Figura 8.10. Proceso de carga de viajeros en una estación

Los eventos que se generan durante el proceso de carga son los posibles cambios de ritmo de afluencia de viajeros al andén (según el escenario de pasajeros definido en el capítulo 7) y el de finalización del proceso de carga. El tiempo de este último evento es el menor entre el instante en que se anula la función masa en estación m_{Ed} y el instante en que se satura la recta de masa total del tren m_T (ver Figura 8.10).

Espera a autorización de los sistemas de protección y sistemas de control

Si finalizado el proceso de carga del tren existen restricciones del sistema de protección (señal en rojo o código de velocidad máxima ATP nulo), el tren prolonga el proceso de carga. Durante este tiempo el ritmo de carga del tren es igual al ritmo de afluencia de viajeros a la estación (carga residual), salvo saturación de carga del tren.

De igual forma, si finalizado el proceso de carga existen restricciones en la salida impuestas por los sistemas de control (órdenes de regulación de retención en estación), el tren prolonga el proceso de carga.

El evento que marca el arranque del tren será el más restrictivo (mayor tiempo) entre:

- El instante de autorización de salida de los sistemas de protección. Se calcula por la técnica descrita en el apartado 8.5.1 para eventos producidos por las protecciones.
- El instante de autorización de salida por los sistemas de control.
- El instante de finalización de la carga de viajeros residual, en caso de que el ritmo de afluencia de viajeros se haga mayor que el ritmo de llenado del tren (en este caso el proceso de carga finaliza por saturación).

8. Simulación	149
8.1 Objetivos de simulación	150
8.2 Definición del problema.	150
8.3 Estructura del simulador	151
8.4 Nivel de simulación de línea	152
8.4.1 Lógica de simulación	153
8.4.2 Modelado como simulador por eventos discretos.	155
8.4.3 Algoritmo de simulación	156
8.5 Nivel de simulación de tren	158
8.5.1 Simulación del movimiento	159
8.5.2 Simulación de la parada en estación	161

9. Resultados

En este capítulo se presentan resultados de simulación de tráfico de trenes en una línea cerrada, obtenidas según las técnicas descritas en el capítulo 7. La línea que se ha modelado para estos ejemplos es la Línea 3 de Metro de Madrid, cuyas características se detallan en el Apéndice C. En el Apéndice D se describen las características de los trenes empleados en las simulaciones.

Se van a presentar cuatro ejemplos de simulación, resultado de combinar dos situaciones iniciales, perturbada y no perturbada, y dos tipos de escenarios de afluencia de viajeros a las estaciones, equilibrado y no equilibrado. Por escenario equilibrado se entiende que el flujo de viajeros en todas las estaciones es igual, y sus destinos se reparten uniformemente por todas las estaciones de la línea.

Por último, se describe brevemente la herramienta de simulación PACO con la que se han realizado los ejemplos. En particular se detalla su arquitectura informática y cómo se ha combinado la simulación asíncrona por eventos realizada con una presentación gráfica síncrona.

9.1 Ejemplos de simulación de tráfico

Se van a considerar simulaciones del tráfico de 17 trenes en la Línea 3 de Metro de Madrid partiendo de dos situaciones iniciales: equilibrada y no equilibrada. Por situación equilibrada se entiende aquella en que los intervalos temporales de cada tren respecto al que le precede en línea son iguales, con un margen de tolerancia de

10 s. El escenario no equilibrado no cumple esta condición, y corresponde por tanto a una perturbación en el tráfico de línea.

Se consideran igualmente dos escenarios de viajeros, regular y no regular. Por escenario regular se entiende aquel en el que la afluencia de viajeros a todas las estaciones de la línea es igual. Además, el destino de los viajeros que toman el tren en una estación se reparte uniformemente entre las estaciones comprendidas entre la estación origen y la estación final de línea según el sentido de marcha considerado. Un escenario no regular es aquel que no cumple las condiciones anteriores.

Los flujos de viajeros especialmente altos en ciertas estaciones generan perturbaciones en la línea, debido a que provocan retrasos al aumentar el tiempo de parada por la carga de pasaje en estas estaciones. En cuanto al mantenimiento del intervalo de circulación entre trenes, un escenario de viajeros es más perturbador si las estaciones con flujo especialmente alto están repartidas en la línea de forma poco regular. El motivo es que si los retrasos se reparten de manera aproximadamente regular en la línea, los trenes se retrasan a lo largo de la línea también de una forma aproximadamente regular, y por tanto el intervalo relativo de circulación no se vería alterado notablemente.

El escenario regular considerado en los ejemplos toma un ritmo constante de afluencia de viajeros a todas las estaciones de la línea de 50 kg/s. El escenario no regular considerado toma un ritmo de afluencia de viajeros igual al escenario anterior excepto en tres estaciones, en que considera una afluencia tres veces superior, 150 kg/s. Estas estaciones son Ventura Rodríguez 1, Plaza España 1 y Callao 1. Las tres estaciones son consecutivas, y por tanto configuran un escenario claramente no regular. El número detrás de la estación hace referencia al sentido, en este caso Moncloa-Legazpi. Las estaciones del sentido contrario se denotan con un '2' detrás del nombre.

En todos los ejemplos se ha considerado el sistema de protección basado en códigos de velocidad por circuitos de vía, simulándose con detalle el frenado que ha de realizar un tren cuando le llega un código restrictivo, y la aceleración posterior cuando la restricción de velocidad desaparece.

A continuación se van a presentar de forma gráfica resultados de simulación para los cuatro ejemplos considerados. En particular se esquematiza la situación de los trenes en la línea, la distribución de los pasajeros a bordo de los trenes y la distribución de los pasajeros en los andenes en tres instantes para cada ejemplo: situación inicial, para un tiempo de simulación $t=2000$ s y para un tiempo de simulación $t=4000$ s. Los esquemas que se presentan como resultados corresponden a la salida gráfica de la herramienta de simulación de tráfico de trenes PACO, que emplea las técnicas de simulación descritas en el capítulo 8. En el apartado 9.2 se describe brevemente este programa.

9.1.1 Ejemplo 1. Situación inicial equilibrada y escenario regular

En la Figura 9.1 se representa la situación inicial correspondiente al Ejemplo 1. Se representa la vía en forma circular, donde los trenes (representados en blanco) avanzan en sentido de las agujas del reloj. Los rectángulos negros exteriores a la vía representan las estaciones. Las estaciones de la parte inferior son la ida, entre Moncloa y Legazpi, y las de la parte superior la vuelta, entre Legazpi y Moncloa. El cambio de sentido en cada estación cabecera está modelado como una vuelta por detrás, introduciendo una estación ficticia en el fondo de saco (Retorno1 y Retorno 2). En la esquina superior izquierda se representa el tiempo de simulación, y en la inferior derecha el consumo acumulado en kWh. En la parte central se representa el intervalo medio de circulación entre trenes, la desviación máxima positiva de intervalo y la desviación máxima negativa.

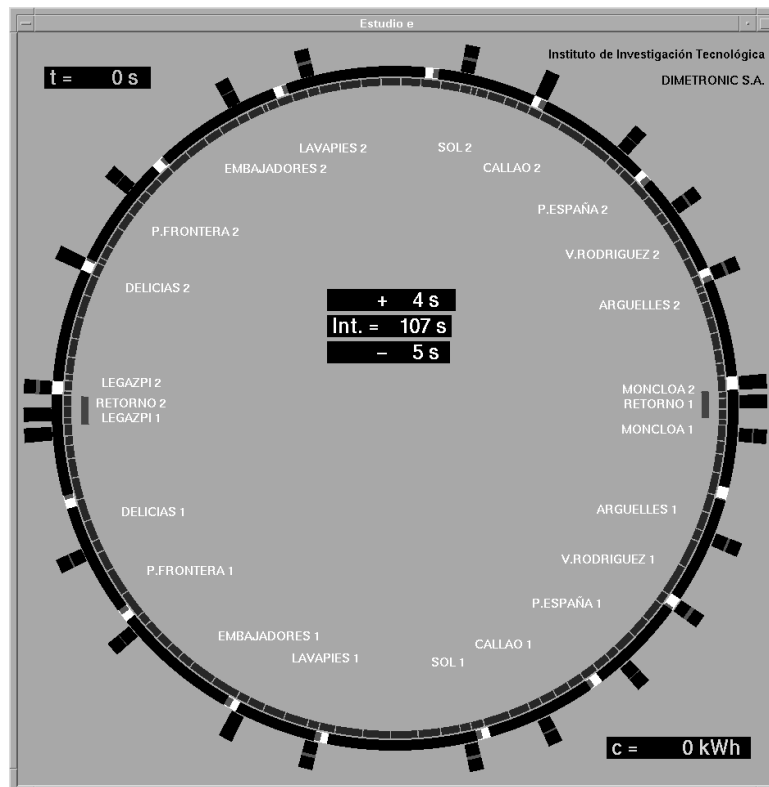


Figura 9.1. Situación inicial del Ejemplo 1

La cantidad de viajeros que transporta cada tren está representado en gris en el interior de cada tren. Cuando el tono gris ocupa la totalidad del rectángulo que representa al tren, éste se encuentra saturado de pasaje. La cantidad de viajeros esperando en andén se representa también en gris en el interior de cada estación. Cuando el tono gris ocupa completamente el rectángulo de estación, se encuentra esperando una cantidad de pasaje equivalente a la capacidad de transporte de un tren.

Los rectángulos concatenados en la parte interior de la circunferencia representan los circuitos de vía.

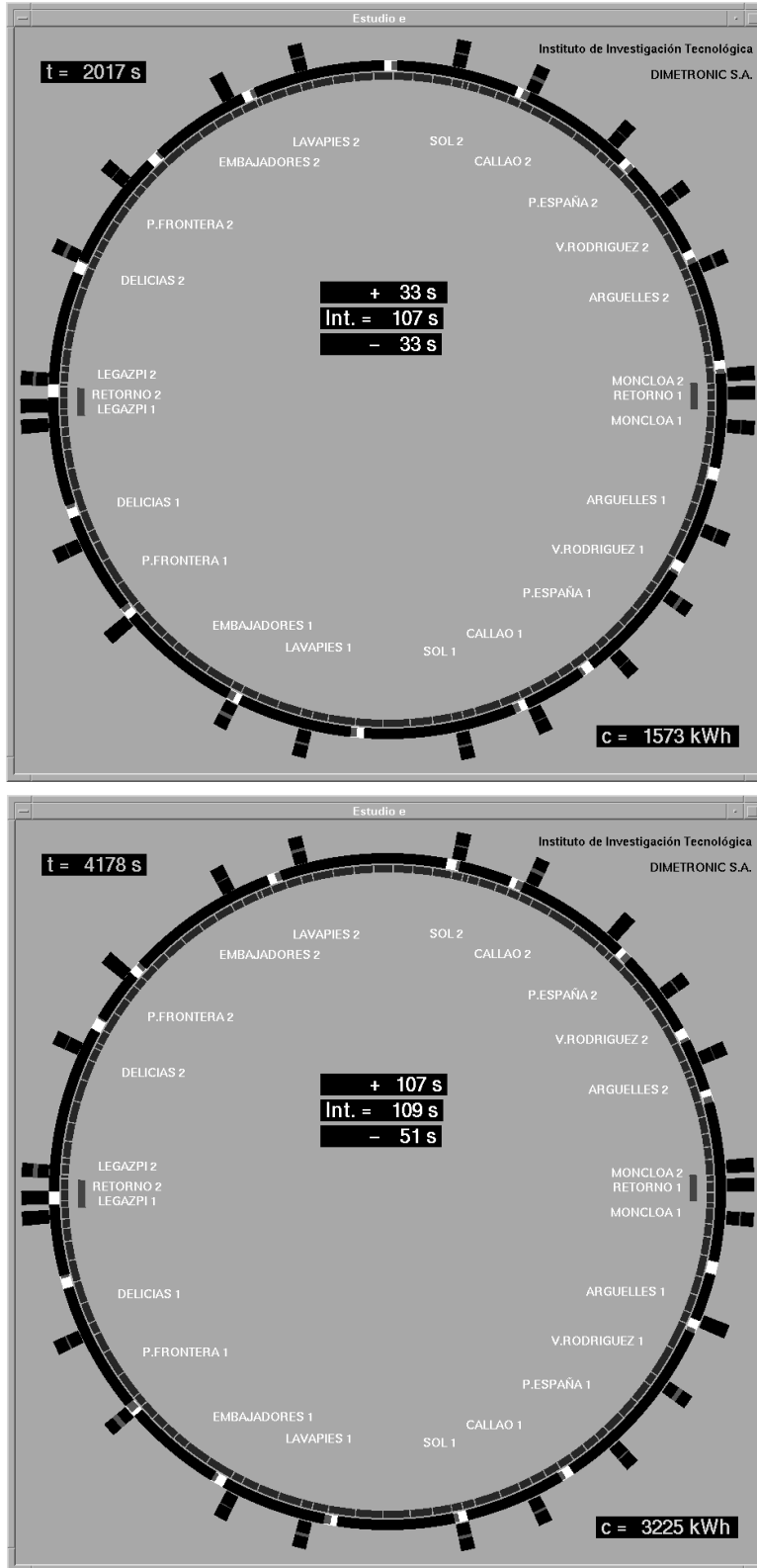


Figura 9.2. Simulaciones correspondiente al Ejemplo 1.

La situación inicial representada es equilibrada, ya que las desviaciones de intervalo respecto del medio son muy pequeñas (máximo 5 s). La distribución de trenes en la línea es por tanto regular en tiempo, aunque no tiene por qué serlo en espacio, debido a que las estaciones no están uniformemente repartidas, y la velocidad del tren a lo largo de la línea es muy variable. En el dibujo, la distancia entre dos estaciones es proporcional a la distancia en espacio real entre ellas.

En la Figura 9.2 se representa la situación del tráfico correspondientes a los instantes 2017 s y 4178 s. En la primera gráfica se observa que el tráfico aún se conserva muy equilibrado, con errores máximos de intervalo pequeños, de 33 s, y repartos regulares de viajeros en trenes y estaciones. En la segunda gráfica el estado de regulación ya ha empeorado apreciablemente, con un error máximo de intervalo de 107 s. Esto quiere decir que hay trenes con un intervalo doble del esperado. Nótese por ejemplo en la estación de P. de la Frontera 1 que el tren detenido está muy cargado, y en el andén se encuentra esperando una cantidad de pasaje muy superior a la media.

9.1.2 Ejemplo 2. Situación inicial equilibrada y escenario no regular

La situación inicial de este ejemplo es la misma que en el ejemplo anterior (Figura 9.1). En la Figura 9.3 se representa el estado de la línea transcurridos 2117 s y 4115 s.

Los trenes que circulan con sentido Moncla-Legazpi se encuentran muy cargados, debido al flujo de pasajeros alto en las estaciones de Ventura Rodríguez 1, Plaza España 1 y Callao 1.

9.1.3 Ejemplo 3. Situación inicial no equilibrada y escenario regular

En la Figura 9.4 se representa la situación inicial correspondiente al Ejemplo 3. Se parte de una situación claramente desequilibrada, con dos huecos claros en línea alrededor de la estación de Delicias 1 y Callao 2, respectivamente. La desviación máxima en el intervalo es de 250 s.

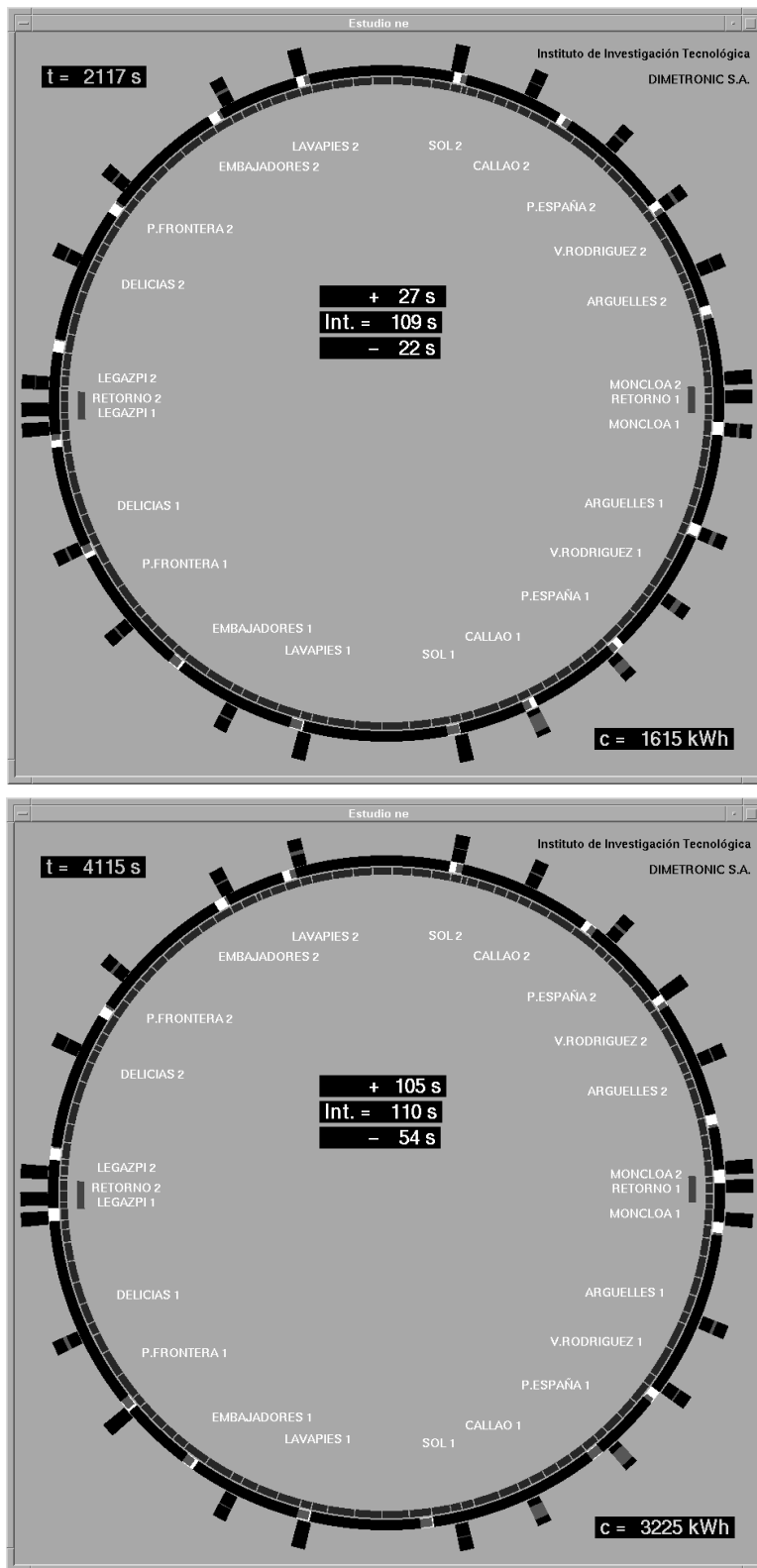


Figura 9.3. Simulaciones correspondiente al Ejemplo 2.

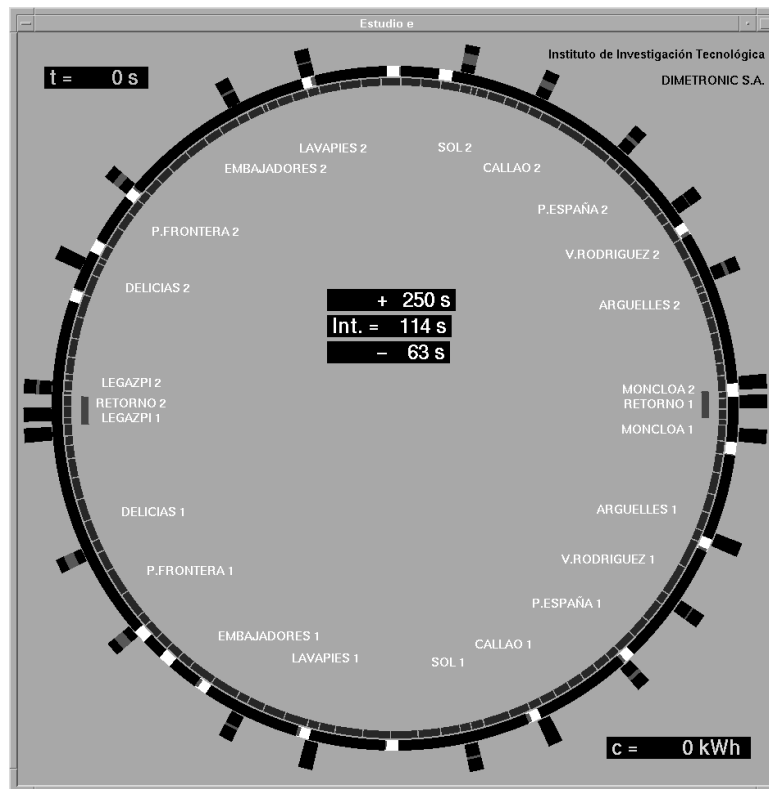


Figura 9.4. Situación inicial correspondiente al Ejemplo 3.

En la Figura 9.5 se representa el estado del sistema transcurridos 2113 s y 4111 s. Los dos huecos iniciales se han abierto considerablemente, formándose dos grupos claros de trenes. Los dos primeros trenes del grupo de la zona de Plaza de España 1 se encuentran saturados de viajeros, siguiéndoles trenes al intervalo mínimo que le permiten los sistemas de protección. Las estaciones situadas en los huecos se encuentran con exceso de viajeros.

9.1.4 Ejemplo 4. Situación inicial no equilibrada y escenario no regular

La situación inicial de este ejemplo es la misma que en el Ejemplo 3, en la Figura 9.4. En la Figura 9.6 se representa el estado de la línea para los instantes 2108 s y 4112 s. Al igual en el Ejemplo 3, los huecos se han abierto considerablemente, llevando a una situación fuertemente desequilibrada. Debido a la alta afluencia de viajeros en las estaciones de Ventura Rodríguez 1, Plaza España 1 y Callao 1, se encuentran saturados en el grupo de trenes inferior derecho cuatro trenes, y el número de viajeros esperando en estaciones es en general mayor.

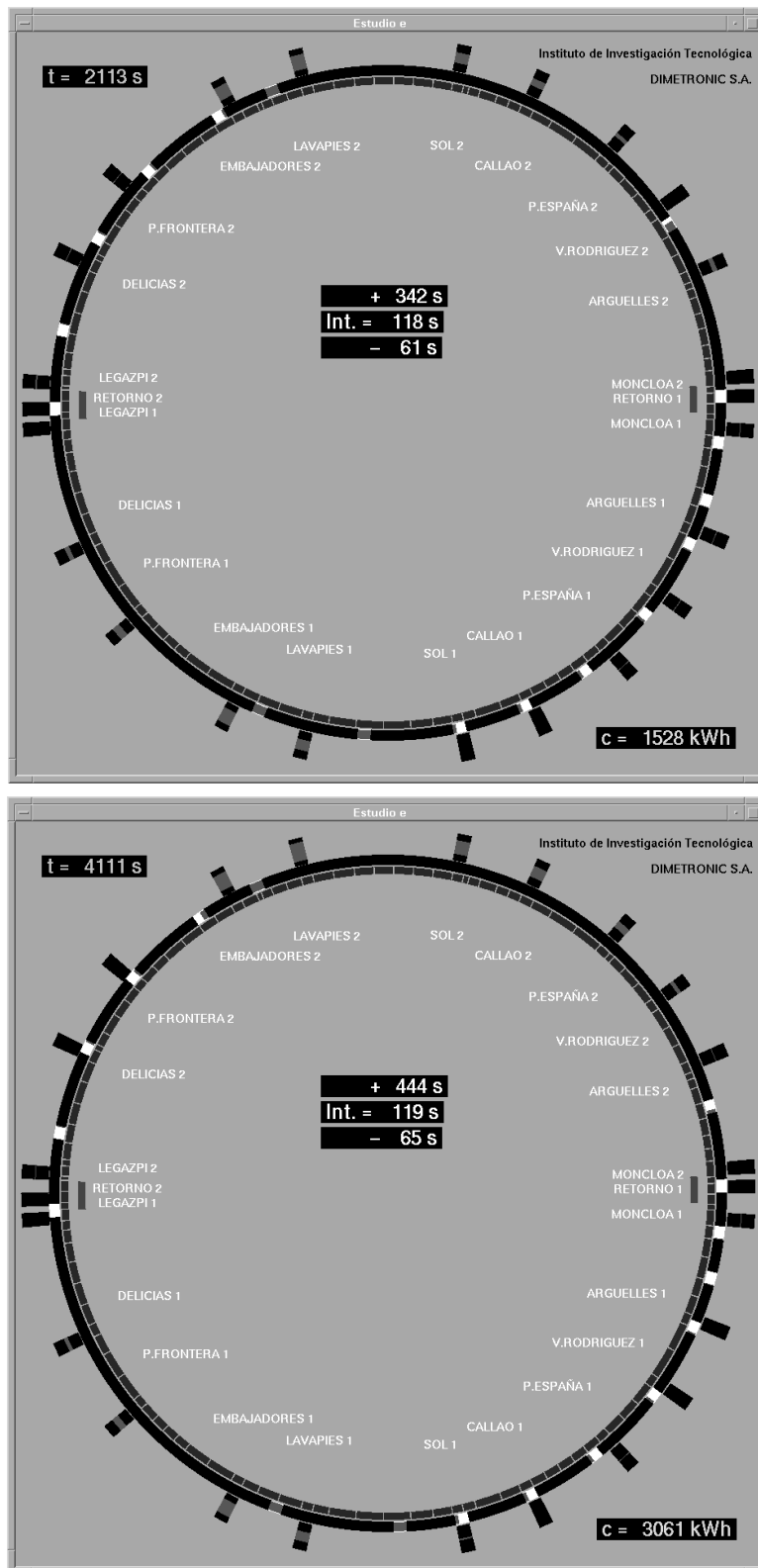


Figura 9.5. Simulaciones correspondiente al Ejemplo 3.

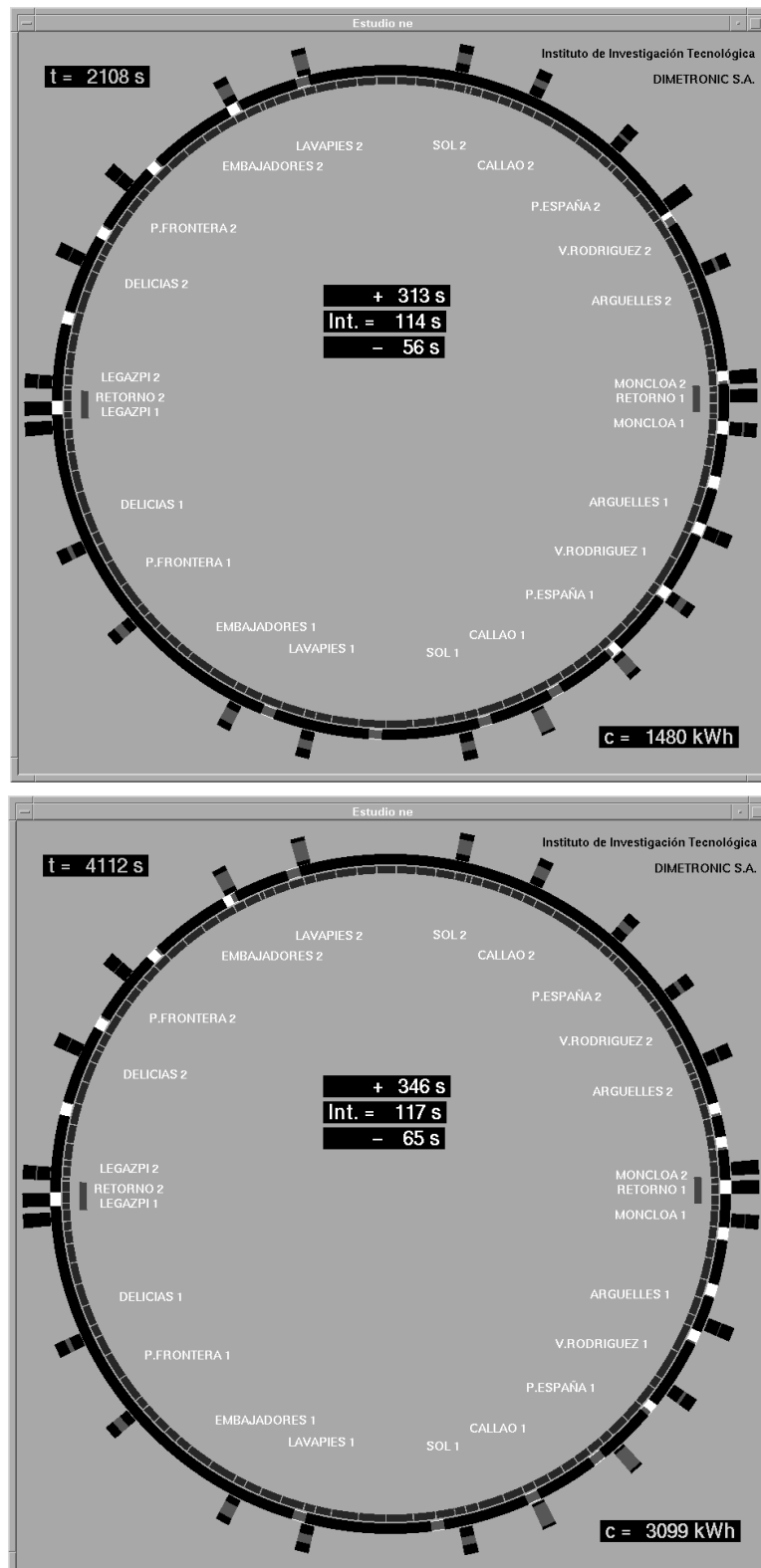


Figura 9.6. Simulaciones correspondiente al Ejemplo 4.

9.2 La herramienta PACO

Se ha desarrollado una herramienta de simulación del tráfico de trenes en una línea cerrada basada en los modelos descritos en el capítulo 7 y las técnicas de simulación presentadas en el capítulo 8. El nivel de detalle en la simulación del movimiento y del consumo del PACO es el mismo que el empleado en la herramienta PACA, al que se le han incorporado características necesarias para el estudio de situaciones desequilibradas:

- Simulación detallada de los sistemas de protección. Cuando un tren pisa un circuito de vía con código de velocidad restrictivo frena hasta la nueva velocidad objetivo. En el instante en que esta restricción desaparece, el tren acelera hasta la nueva velocidad objetivo, aunque el cambio de código se produzca antes de que el tren pise un nuevo circuito.
- Posibilidad de asignar a cada tren un vector de derivas de conducción ATO distinto en el recorrido de cada interestación. Esto permitirá ensayar estrategias de regulación basadas en elección de la marcha de ATO.
- Simulación detallada del tiempo de parada de los trenes en las estaciones, de acuerdo con escenarios deterministas variables con el tiempo de afluencia de viajeros a las estaciones, y sus estaciones destino.
- Incorporación de un ruido gaussiano sobre el tiempo de recorrido de cada interestación.

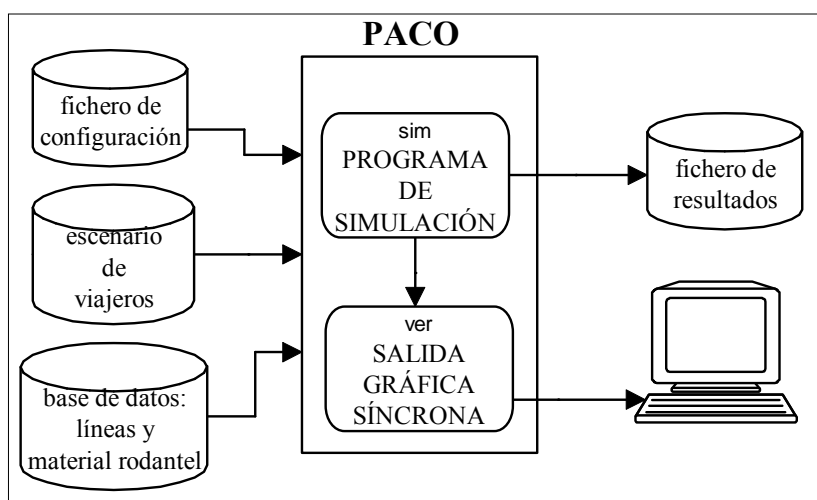


Figura 9.7. La herramienta de simulación de tráfico PACO

La Figura 9.7 esquematiza los procesos de que consta el PACO y sus relaciones con el exterior. El proceso *sim* calcula las simulaciones, mientras que el proceso *ver*

representa gráficamente los resultados en un monitor, de manera síncrona. La herramienta PACO utiliza la misma base de datos de líneas y material rodante utilizada por la herramienta PACA. En el arranque se lee el escenario de viajeros a utilizar, y un fichero de configuración en el que se especifica principalmente el tipo de sistema de protección a emplear, la desviación típica de ruido en el tiempo de recorrido y la velocidad de simulación en la representación gráfica del movimiento de trenes. La herramienta también proporciona en fichero resultados numéricos sobre posición, velocidad y consumo de cada tren a lo largo de la simulación.

El programa *sim* calcula resultados de simulación de cada tren forma asíncrona. El programa *ver* representa estos datos de forma síncrona, con velocidad de simulación variable. Para ello se emplean dos tablas de resultados en memoria compartida, una de lectura y otra de escritura. La tabla de escritura es rellenada por el programa *sim*, al ritmo en que se realizan los cálculos. Cuando la tabla se llena, pasa a ser la tabla de lectura, de la que toma los datos el programa *ver* al ritmo en que es necesario mostrar los datos en pantalla de forma síncrona con la velocidad de simulación elegida. Mientras tanto, el programa *sim* sigue calculando resultados de simulación sobre la otra tabla. Cuando la tabla de lectura se lee completamente, se cambian los papeles ambas tablas. Este tipo de diseño se denomina en *ping-pong*, y facilita el control del acceso a zonas de memoria compartida cuando un proceso sólo escribe y otro sólo lee secuencialmente.

La velocidad de simulación encuentra su límite cuando el ritmo de lectura de una tabla iguala el ritmo de escritura de los cálculos de simulación de la otra. En la práctica, en una estación de trabajo HP 9000 712 se consiguen velocidades de simulación entre 50 y 100 veces la real, dependiendo de la frecuencia de refresco de datos en pantalla y del número de trenes en línea.

9.3 Conclusiones

La técnica de simulación detallada del tráfico de trenes en una línea cerrada propuesta en el capítulo 8 ha demostrado ser eficiente para líneas ferroviarias y escenarios de pasajeros realistas, consiguiendo una velocidad de simulación muy aceptable.

El cálculo asíncrono del movimiento de cada tren no es un problema si se utiliza un interfaz gráfico adecuado, capaz de representar los datos de forma síncrona, a la vez que los temporiza para conseguir una velocidad de simulación variable.

Los ejemplos de simulación mostrados en este capítulo para situaciones iniciales equilibradas y no equilibradas y para escenarios regulares y no regulares muestran la

necesidad de regulación en líneas de topología circular. La situación a la que tiende de manera natural el sistema es a formar grupos de trenes persiguiéndose al mínimo intervalo que le permiten las protecciones, mientras que el reparto del pasaje en trenes y andenes tiende a ser muy irregular. En la Parte III se propone un sistema de regulación automática para corregir estos problemas.

Existen trabajos en curso para generalizar la técnica de simulación utilizada a líneas ferroviarias con topología compleja, donde es necesario modelar cambios de aguja y cómo interactúan distintos tipos de servicios circulando sobre la misma red ferroviaria.

9. Resultados	165
9.1 Ejemplos de simulación de tráfico	165
9.1.1 Ejemplo 1. Situación inicial equilibrada y escenario regular	167
9.1.2 Ejemplo 2. Situación inicial equilibrada y escenario no regular	169
9.1.3 Ejemplo 3. Situación inicial no equilibrada y escenario regular	169
9.1.4 Ejemplo 4. Situación inicial no equilibrada y escenario no regular	171
9.2 La herramienta PACO	174
9.3 Conclusiones	175

Parte III

Regulación de tráfico de líneas cerradas

10. Planteamiento del problema de control

En este capítulo se analiza el problema de la regulación de tráfico en líneas ferroviarias cerradas. Se describe en primer lugar cómo se explotan este tipo de líneas, distinguiendo entre explotación por intervalo, por horario y mixta. A continuación se analizan las diferentes fuentes de perturbación, los factores que intervienen en el consumo de energía y el comportamiento del sistema si no se toman medidas de regulación. Por último, se establecen los objetivos que se marca el regulador automático que se propone los capítulos siguientes.

10.1 Explotación de líneas ferroviarias cerradas

Las líneas ferroviarias objeto de estudio son aquellas modelables como líneas cerradas, según se describen en el capítulo 2.

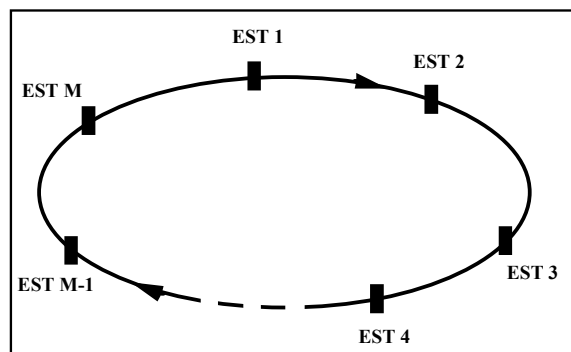


Figura 10.1. Modelo de línea cerrada

La Figura 10.1 representa la vía y las M estaciones de parada de una línea de este tipo.

En los sistemas ferroviarios estudiados todos los trenes realizan el mismo servicio, consistente en recorrer periódicamente la línea realizando paradas en todas las estaciones para carga y descarga de viajeros.

10.1.1 Actuación sobre el sistema: mandos

Cada tren alterna en su recorrido por la línea períodos de movimiento y períodos de parada en estación. La regulación actúa modificando la duración de estos períodos. A continuación se describen las formas de actuación más habituales, que son las que se han aplicado en proyectos reales. La adaptación del regulador propuesto a otros sistemas ferroviarios es sencilla, ya que las consignas de regulación que se optimizan son los tiempos de recorrido, que hay que traducir para cada ferrocarril a sus medios de actuación particulares.

Actuaciones sobre el movimiento del tren

En la mayoría de las líneas metropolitanas modernas los trenes son conducidos automáticamente. El conductor sólo decide el instante de arranque. El sistema de conducción automática (ATO) ejecuta un perfil {*velocidad-espacio*} prefijado para el recorrido entre cada dos estaciones, que lleva asociado un tiempo de recorrido.

Nota bibliográfica:

En [Sujitjorn, 92] se propone un regulador que dispone en cada interestación de un conjunto de marchas ATO precalculadas para distintos tiempos de recorrido y distintas tensiones de red. De esta forma se pretende ahorrar energía, eligiendo la marcha energéticamente más barata que cumple con el tiempo de recorrido objetivo para la tensión actual de la línea.

El sistema de regulación propuesto actúa eligiendo el perfil de velocidad que se ejecuta (marcha de ATO) de entre un conjunto discreto. El regulador sólo conoce de cada marcha su tiempo de recorrido asociado.

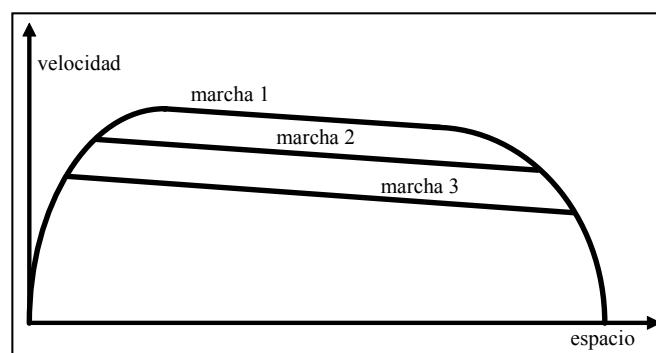


Figura 10.2. Ejemplo de marchas disponibles en una interestación

El equipo de ATO del tren recibe la consigna de marcha segundos después de la salida de estación, leyéndola de una baliza cargada por el sistema de regulación. No existe posibilidad de actuación sobre el tren hasta su llegada a la siguiente estación. El error en tiempo de recorrido que comete el equipo de ATO es pequeño (si el tren no frena por seguridad), por lo que el regulador puede predecir con suficiente precisión los resultados de estas acciones de control.

Todavía existen líneas metropolitanas con conducción manual. En ellas el regulador puede actuar presentando al motorista un cartel en estación que le indique si debe ejecutar conducción nominal, más lenta o más rápida. Este sistema es menos eficiente que el automático, debido a que en general son poco predecibles los tiempos de recorrido. En estas líneas las acciones de control se suelen realizar reteniendo a los trenes en estación.

Actuaciones sobre el tiempo de parada en estación.

La orden de regulación más sencilla sobre un tren es retenerlo en estación un tiempo determinado. Las ventajas de estas medidas son:

- Son aplicables en cualquier línea ferroviaria, de conducción automática o manual. En líneas automatizadas, permite regular trenes que por avería no tienen operativo el equipo de ATO.
- Su resultado se conoce sin incertidumbre: el tren afectado sufre un retraso igual al tiempo que se le retiene en estación, excepto en el caso en que el tiempo de parada debido a carga y descarga de pasaje sea mayor que el tiempo de retención ordenado.
- Vista como variable de control, tiene un margen muy amplio de variación, desde cero a un tiempo máximo de retención que fija el explotador del sistema para cada estación.

Sin embargo, también presentan importantes inconvenientes:

- Sólo permiten retrasar trenes, nunca recuperar tiempo.
- Son medidas incómodas para los viajeros, que prefieren que el tren esté en movimiento, aunque sea a velocidad reducida, a que el tren permanezca retenido en estación.
- Regular sólo con retenciones en estación es ineficiente energéticamente, pues parte del tiempo que el tren pierde en estación se podría perder con marchas lentas, que ahorran energía.

- En líneas donde el intervalo de explotación está cercano al mínimo impuesto por los sistemas de protección, retener al tren en estación puede provocar el disparo de los sistemas de protección del tren que sigue al tren regulado, ya que los puntos de parada en estación son habitualmente los que limitan el intervalo mínimo de línea. Se evita dejando partir al tren de la estación con marcha lenta.

El sistema de regulación propuesto en los capítulos siguientes emplea los dos tipos de acciones de regulación. Las pequeñas perturbaciones que se producen continuamente son absorbidas casi exclusivamente eligiendo las marchas apropiadas. Para corregir grandes perturbaciones, o para llevar el sistema al equilibrio desde situaciones muy alejadas del mismo, el regulador combina marchas con paradas forzadas en estación.

10.1.2 Medidas del sistema

El centro de control de tráfico (CTC) recibe información sobre los instantes en que cada tren pisa o libera un circuito de vía. Cada circuito de vía en una línea metropolitana mide del orden de cien metros, determinando la frecuencia con que se recibe una nueva medida de cada tren.

El sistema de regulación propuesto sólo utiliza los tiempos de entrada en estación (cuando se pisa el circuito de estación) y los de salida de estación (cuando se pisa el circuito de salida de estación).

Los motivos por los que se prescinde de medidas de los trenes en las interestaciones son:

- En ausencia de perturbaciones externas, el conductor automático es preciso, y el tiempo de llegada a estación se estima con muy poco error.
- Las perturbaciones típicas que afectan al movimiento de un tren se pueden detectar e incorporar al modelo empleado por el regulador, minimizando por tanto sus efectos.
- Al considerar sólo instantes de entrada y salida de estación se simplifica notablemente el modelo de simulación rápida en que se apoya el algoritmo de regulación.
- Disminuir la cantidad de información intercambiada en tiempo real con la línea descarga al sistema de regulación, lo que facilita conseguir los tiempos de respuesta que se requieren.

10.1.3 Explotación por intervalo

En una línea ferroviaria cerrada explotada por intervalo el objetivo es mantener constante la frecuencia de paso de trenes por estaciones. Si todos los trenes son equivalentes, en condiciones nominales, realizan el mismo movimiento decalado en tiempo el valor del intervalo (Figura 10.3).

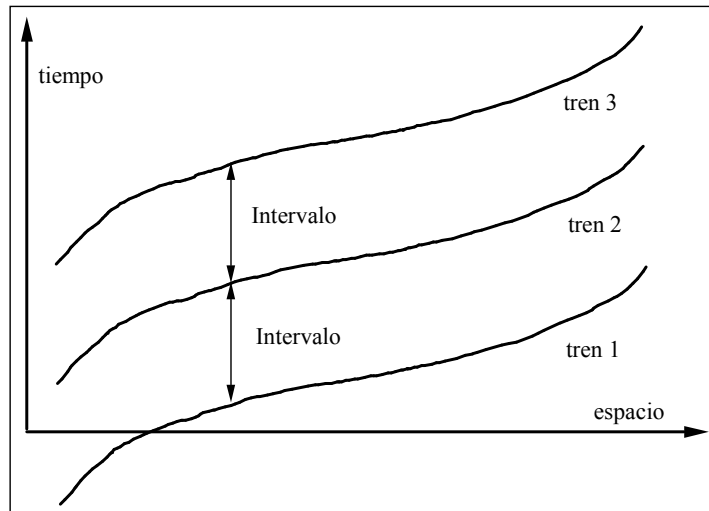


Figura 10.3. Perfiles {velocidad-tiempo} de trenes por intervalo

La periodicidad del sistema hace que el intervalo (I) venga fijado por el cociente entre el tiempo que tarda un tren en recorrer completamente la línea (tiempo de vuelta, t) y el número de trenes en circulación (N):

$$I = \frac{t}{N}$$

[10.1]

A continuación se definen distintos intervalos, según como se calcule el tiempo de vuelta.

Intervalo nominal de explotación

El valor del intervalo nominal de explotación se obtiene a partir del tiempo de vuelta nominal, que es el tiempo que tarda un tren en recorrer la línea tomando marchas de ATO nominales y parando en cada estación un tiempo nominal:

$$I_0 = \frac{\sum_{j=1}^M (m_j + e_j)}{N}$$

[10.2]

donde:

- I_0 : intervalo nominal
- m_j : tiempo de marcha nominal de la estación j a la $j+1$
- e_j : tiempo de parada nominal en la estación j
- M : número de estaciones
- N : número de trenes

En el diseño de la explotación, se ha de tener en cuenta que el intervalo nominal ha de ser mayor que el intervalo mínimo de la línea definido en el capítulo 4. De lo contrario, en los puntos de la línea en que se viole el intervalo mínimo actuarían los sistemas de protección. Esta restricción limita el número máximo de trenes en línea. Cuanto más alejado esté el intervalo de explotación del mínimo, menos actuarán las protecciones cuando el sistema se perturbe, y más fácilmente se podrá mantener en la práctica el intervalo. Bajar la frecuencia de actuación de las protecciones aumenta además la seguridad del sistema, al disminuir la probabilidad de fallo.

Intervalo natural

El intervalo natural I_n tiene en cuenta que el tiempo de parada en estación depende de la cantidad de viajeros que los trenes deben cargar y descargar. Si se aproxima el tiempo de carga y descarga como proporcional al intervalo de circulación entre trenes (ver modelo de parada en el capítulo 12), el tiempo de parada se expresa en este caso como $e_j = \alpha_j I_n$:

$$I_n = \frac{\sum_{j=1}^M (m_j + \alpha_j I_n)}{N} \quad \Rightarrow \quad I_n = \frac{\sum_{j=1}^M m_j}{N - \sum_{j=1}^M \alpha_j}$$

[10.3]

Esta expresión calcula el intervalo natural de explotación I_n en función de los tiempos de marcha nominales (m_j) y las pendientes de espera nominales (α_j).

El intervalo natural determina el punto de equilibrio del sistema. Con afluencia de viajeros a las estaciones constante (distinta en cada una), y los trenes circulando con marchas nominales y distanciados el intervalo natural, la situación se mantiene indefinidamente en ausencia de perturbaciones. El intervalo natural es, por tanto, el intervalo objetivo de la regulación para explotación por intervalo.

A lo largo del día varía el flujo de viajeros a cada estación, y por tanto varía el intervalo natural. El sistema de regulación automática propuesto estima estos flujos y modifica el intervalo objetivo de regulación en función de ellos.

Intervalo actual

El intervalo actual de la línea para un instante de tiempo estima el tiempo actual de vuelta como la suma de los últimos intervalos medidos para cada tren:

$$I_a = \frac{t_a}{N} = \frac{\sum_{j=1}^M I_j}{N}$$

donde:

- I_a intervalo actual
- I_j último intervalo medido del tren i
- t_a tiempo de vuelta actual
- N número de trenes

La Figura 10.4 representa una situación perturbada, donde la longitud de la circunferencia exterior (suma de intervalos actuales) es una estimación del tiempo de vuelta actual, y la longitud de la circunferencia interior (suma de intervalos naturales objetivo) es el tiempo de vuelta natural. Los errores representan diferencias temporales entre la posición real e ideal de cada tren, suponiendo que el tren 1 tiene error nulo.

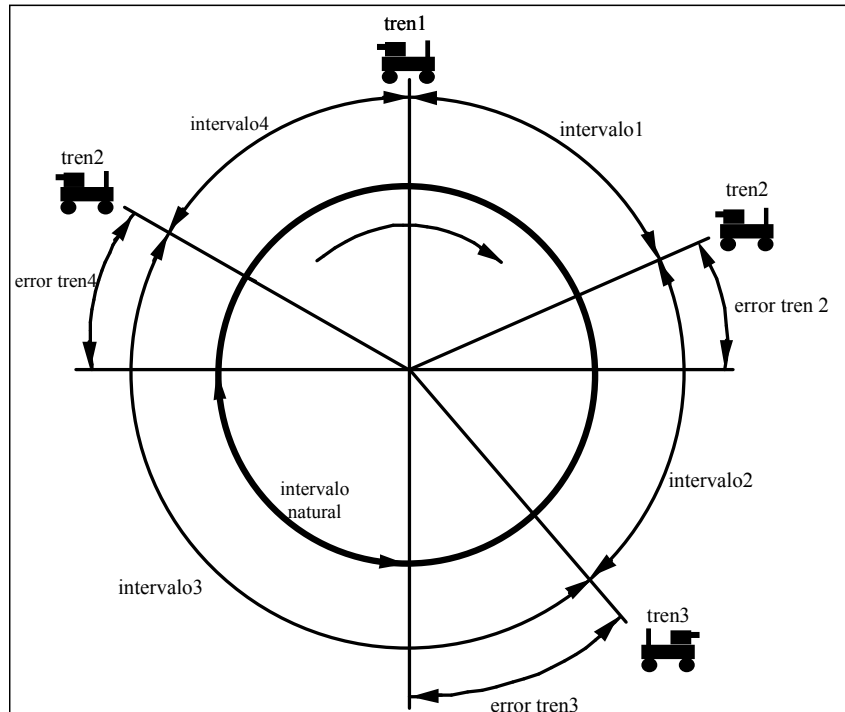


Figura 10.4. Tiempo de vuelta natural, tiempo de vuelta actual y errores de intervalo

La situación representada en la Figura 10.4 está perturbada por dos motivos:

- Los intervalos de los trenes no son regulares
- El tiempo de vuelta actual es mayor que el tiempo de vuelta natural.

El objetivo de la regulación por intervalo es doble: mantener constante el intervalo de circulación y mantener el tiempo de vuelta natural. Las acciones de regulación tendentes a igualar intervalos alteran en general el tiempo de vuelta, haciendo necesarias estrategias de regulación complejas que tengan en cuenta ambos objetivos.

10.1.4 Explotación por horario

En explotación por horario cada tren tiene asignado un horario de salida de cada estación. La diferencia de horarios de salida para un tren entre dos estaciones consecutivas (tiempo de etapa) se emplea en recorrer la interestación y realizar una parada en la estación destino. El explotador del sistema diseña los horarios teniendo en cuenta que el tiempo mínimo de cada etapa es la suma del tiempo de recorrido con la marcha más rápida más un tiempo de parada nominal.

En la práctica, las líneas ferroviarias cerradas se explotan por horario cuando hay pocos trenes en circulación (horas valle), y se suele informar a los viajeros del horario de paso de cada tren por cada estación. Al circular pocos trenes, se amplían los intervalos de circulación, y por tanto se reducen las interferencias entre ellos.

En horas valle es posible disminuir la velocidad media nominal de los trenes en relación a horas punta. Si un tren se retrasa, es entonces mayor el margen de tiempo que puede recuperar incrementando su velocidad. En horas punta (con explotación típicamente por intervalo) este margen de recuperación es pequeño.

En explotación por horario es posible que un tren salga de una estación con retraso. Sin embargo, no se permite en general que un tren salga con adelanto. Este hecho ha de ser tenido en cuenta por la regulación, que debe impedir que un tren realice una marcha rápida para perder posteriormente tiempo en la estación esperando su horario de salida, ya que se derrocharía energía.

10.1.5 Explotación por intervalo y horario en cabeceras

En este tipo de explotación los viajeros no suelen conocer el horario de paso de trenes por las estaciones, debido a que en general la frecuencia de paso de trenes es alta. Sin embargo, al explotador de la línea le interesa que cada tren respete un horario de paso por las estaciones cabecera de línea, en las que se realizan los cambios de turno de conductor. Si un tren pasa por una cabecera retrasado o

adelantado fuera de un umbral, se retrasa el cambio de turno, y puede representar conflictos laborales y unos costes extra de personal.

En esta explotación mixta se define el mismo intervalo nominal que en explotación por intervalo, a partir del cual se calculan los horarios de paso por las estaciones cabecera.

10.2 Fuentes de perturbación

Las perturbaciones alteran el tiempo de recorrido entre dos estaciones y el tiempo de parada en estación. A continuación se describen las fuentes de perturbación habituales, dejando al margen incidencias graves en el servicio que alteran fuertemente la circulación, como averías en los trenes o falta de suministro eléctrico. En estos últimos casos se desconecta la regulación.

10.2.1 Perturbaciones sobre el tiempo de recorrido

Cada marcha del conductor automático ATO tiene asociado un tiempo de recorrido nominal, calculado para un tren nominal, una tensión de red nominal y una masa de viajeros determinada. Las causas que pueden modificar este tiempo son:

- Los sistemas de protección hacen frenar al tren, por proximidad al tren que le precede en línea.
- La masa de viajeros es excesiva. Dependiendo de las curvas de tracción de los motores, del perfil de la línea y del comportamiento del ATO, para masas de viajeros por encima de un umbral el tiempo de marcha puede ser superior al nominal.
- La tensión de red no es la nominal. Dependiendo del comportamiento de los motores, se puede ver alterado el tiempo de recorrido.
- El sistema de tracción no se comporta como se espera. Puede ser por avería o porque el sistema de tracción posea unas características distintas a las nominales.
- El conductor influye sobre la conducción, por ejemplo desconectando el conductor automático ATO y conduciendo manualmente.

- Errores del equipo de conducción automática ATO.

Según el tratamiento que reciben en las estrategias de regulación, las perturbaciones anteriores se dividen en tres grupos:

Las debidas a los sistemas de protección

El regulador propuesto incorpora una estimación del retraso provocado por la señalización y por el sistema ATP, para prever en parte sus efectos.

Las sistemáticas

Son perturbaciones debidas a parámetros cuya variación no ha sido tenida en cuenta en el cálculo del tiempo nominal, pero sus efectos se manifiestan en las medidas produciendo errores sistemáticos en la estimación del tiempo nominal. Son las perturbaciones por la masa de viajeros, la tensión de red y el comportamiento real del motor. Se incluyen en este apartado aquellas fuentes de perturbación que simplemente se mantienen durante cierto período de tiempo: averías del sistema de tracción y operaciones del conductor (por ejemplo, desconectar el ATO).

Todas estas fuentes de perturbación tienen en común que, medidos sus efectos en un período de tiempo, son extrapolables para el futuro cercano. El sistema de regulación propuesto adapta a partir de medidas reales un parámetro asociado a cada tren y otro asociado a cada marcha de ATO para dar una estimación de los efectos de estas perturbaciones en las siguientes medidas.

Las no sistemáticas

Son los fallos no sistemáticos en la conducción ATO o de tracción del tren. En el diseño del regulador estas perturbaciones se modelan como ruido gaussiano.

10.2.2 Perturbaciones sobre el tiempo de parada nominal

El tiempo de parada nominal en estación se puede ver alterado por los siguientes motivos:

- Exceso o defecto de viajeros en estación (frente al esperado). Puede provocar que el tiempo de parada sea mayor o menor que el nominal. El regulador propuesto estima a partir de las últimas medidas de tiempo de parada el flujo de viajeros a la estación, para predecir este tiempo mediante un modelo lineal saturado.
- Retraso por sistemas de protección. El sistema de regulación estima estos retrasos mediante un modelo simplificado del efecto de las señales de salida de estación.

- Retrasos producidos por averías o incidencias en el proceso de cerrado de puertas.
- Factor humano: la maniobra de cierre de puertas y arranque la efectúa manualmente el conductor, y por tanto está sujeta a variaciones.

Las dos primeras fuentes de perturbación son tenidas en cuenta por el modelo del sistema descrito en el capítulo 12; el resto será modelado como ruido gaussiano.

10.3 Consumo de energía

En la explotación de una línea ferroviaria, junto al objetivo básico de ofrecer un buen servicio al viajero, se encuentra el conseguirlo al menor coste. Uno de los costes principales es el consumo de energía de los trenes. Para minimizarlo hay que tener en cuenta distintos aspectos del sistema:

- Diseño *off-line* de las marchas ATO. Se consigue en general un mismo tiempo de recorrido entre dos estaciones con una gran variedad de combinaciones de comandos de conducción automática ATO. Sin embargo, entre la marcha de ATO que más y que menos consume para el mismo tiempo de recorrido puede haber variaciones de hasta un 40% de energía. Es crucial de cara al balance energético de la línea que las marchas utilizadas sean las más baratas de entre las que llevan a un mismo tiempo de recorrido. El capítulo 5 se ocupa de resolver este problema de optimización *off-line*.
- Si un tren ha de perder tiempo por regulación, ha de hacerlo en primer lugar utilizando marchas de ATO lentas y baratas. Si se utilizan marchas rápidas y a continuación se retiene al tren en estación, se está derrochando energía. De igual forma, se han de utilizar marchas lentas si se prevé que a un tren se le va a retener en estación, ya sea debido a los sistemas de protección, por exceso de pasaje o para cumplir un horario de salida.
- Es posible regenerar energía en los frenados en estación, siempre y cuando en el tiempo que dura la frenada otro tren aproveche simultáneamente esta energía (típicamente en el proceso de arranque). Esta restricción se debe a la imposibilidad actual en la mayoría de las líneas de almacenar energía o entregarla a la red exterior. El regulador de tráfico debe valorar la posibilidad de hacer coincidir en el tiempo los períodos de frenado y arranque de trenes circulando por tramos conectados a la misma subestación eléctrica.

- El coste energético total de un plan de regulación válido para los próximos minutos debe tener en cuenta los aspectos anteriores, y elegir de entre los planes alternativos buenos desde el punto de vista de regulación aquel que sea óptimo en consumo.

10.4 Comportamiento del sistema sin regulación

En este apartado se describe cualitativamente la evolución de un retraso puntual de un tren, cómo se transmite al resto de los trenes y las distintas consecuencias que tiene sobre el sistema.

Supongamos que un tren sufre un retraso en su salida de una estación. A la llegada a la estación siguiente encontrará más pasajeros esperando, que en general prolongarán el proceso de carga, y por tanto sumará un nuevo retraso. Si no se toman medidas, el retraso sigue aumentando en las próximas estaciones, y si hay suficientes viajeros en las estaciones el tren puede alcanzar su carga máxima. En este momento el retraso se satura, ya que el tren no puede cargar pasajeros extra que aumenten su retraso.

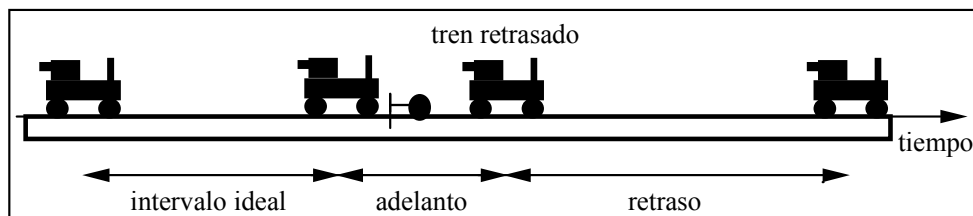


Figura 10.5. Intervalos asociados al retraso de un tren

La Figura 10.5 muestra un tren retrasado y sus intervalos asociados. El tren que sigue al retrasado ve disminuir su intervalo, y encuentra menos pasajeros en las estaciones, y por ello tiende a adelantar sus salidas de estación. Si el intervalo disminuye suficientemente (principalmente por lentitud del tren retrasado), se dispararán los sistemas de protección (señal en rojo), que tienden a mantener el intervalo mínimo de persecución entre los dos trenes. A partir de este momento el tren perseguidor tiende a retrasarse, pues el que le precede frena su avance a través de los sistemas de protección. Si se deja evolucionar el sistema, la situación final es la que muestra la Figura 10.6; el resto de los trenes de la línea tienden a alcanzar al grupo de trenes retrasado, uniéndose a él.

En la Figura 10.6 el grado de ocupación de cada tren se representa mediante tonos grises, mayor cuanto más oscuro. El tren retrasado inicialmente tiende a saturarse.

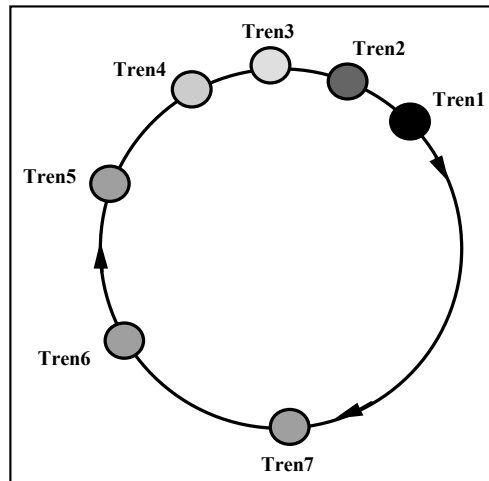


Figura 10.6. Propagación del retraso de un tren

Nota bibliográfica:

En [Breusegen, 91] se presenta un modelo lineal por eventos discretos del tráfico de trenes en un línea cerrada. Mediante el estudio de los autovalores de la matriz de transición de estados asociada se demuestra la inestabilidad de los intervalos de circulación.

Los resultados del retraso inicial sobre la línea sin regulación son:

- Pérdida de la regularidad del intervalo de paso por estaciones.
- Mala distribución de los pasajeros en los trenes; existen trenes muy cargados y trenes que apenas recogen pasajeros.
- Incremento del número de actuaciones de los sistemas de protección, cada vez que un tren retrasado hace frenar al que le sigue. Disminuye por tanto la seguridad del sistema.
- Gasto energético innecesario, al ser más frecuentes las frenadas debidas a los sistemas de protección.
- Pérdida de capacidad de transporte. El tren retrasado inicialmente baja su velocidad media, y marca el ritmo del grupo de trenes que le siguen. Por tanto, baja la capacidad de transporte de línea.

10.5 Objetivos del regulador automático

El regulador automático de tráfico ferroviario que se propone tiene los siguientes objetivos:

- Control de pequeña perturbación. Pretende mantener las condiciones de equilibrio de la línea, evitando la propagación y eliminando los adelantos o retrasos que se pudieran producir.
- Control de gran perturbación. El objetivo es llevar al sistema a las condiciones de equilibrio desde cualquier distribución de trenes en línea, esto es, desde situaciones muy perturbadas. Estos problemas se presentan al conectar la regulación, o cuando se produce un cambio en las condiciones de explotación del sistema (por ejemplo, un cambio en el número de trenes). También se provocan típicamente situaciones muy perturbadas cuando se ha producido una incidencia en línea, como es por ejemplo la avería de un tren.
- Minimizar la molestia a los viajeros. El problema de regulación de intervalo es sencillo si no considera al pasaje; cada vez que se produce el retraso de un tren, es suficiente retrasar el resto de los trenes la misma cantidad. Se pretende que las medidas de regulación repercutan lo menos posible sobre los pasajeros, por lo que es necesario llegar a un compromiso entre rapidez de recuperación de perturbaciones y costes en molestia al pasaje. Estos costes son falta de regularidad durante la regulación (intervalos irregulares, retrasos en las salidas) y retenciones de trenes en estación.
- Mejorar la capacidad de transporte. Las estrategias de regulación no sólo deben evitar la propagación de los retrasos, también deben evitar que disminuya la velocidad media de los trenes. Para ello se deberán administrar adecuadamente las marchas lentas y las paradas en estación, y recuperar los retrasos con marchas rápidas en los momentos oportunos.
- Minimizar el consumo de energía. Cada posible estrategia de regulación puede representar unos costes energéticos, que deben ser valorados frente a los beneficios en regularidad.

En la implantación práctica de un sistema de regulación automática en una línea ferroviaria, tan importantes son los beneficios que se pueden obtener en regularidad como las mejoras en las operaciones de explotación. El sistema de regulación que se propone facilita la tarea del operador en los siguientes aspectos:

- Descarga al operador de detectar perturbaciones y decidir acciones correctivas.

- Monitoriza el estado actual y previsto de la línea: intervalos, cumplimientos de horarios y parámetros relevantes.
- Facilita las labores de retirada e incorporación de trenes en línea, y posterior establecimiento del nuevo punto de equilibrio.
- Mejora los cambios de turno de conductor en las estaciones cabecera; cuando se regula en modo horario o en modo intervalo y restricción horaria en cabeceras, el regulador trata de que cada tren pase por la cabecera a su hora.
- Detecta comportamientos anómalos. El regulador puede identificar, por ejemplo, trenes que no responden normalmente a las consignas de conducción ATO e informar al operador.

10. Planteamiento del problema de control	177
10.1 Explotación de líneas ferroviarias cerradas	177
10.1.1 Actuación sobre el sistema: mandos	178
10.1.2 Medidas del sistema	180
10.1.3 Explotación por intervalo	181
10.1.4 Explotación por horario	184
10.1.5 Explotación por intervalo y horario en cabeceras	184
10.2 Fuentes de perturbación	185
10.2.1 Perturbaciones sobre el tiempo de recorrido	185
10.2.2 Perturbaciones sobre el tiempo de parada nominal	186
10.3 Consumo de energía	187
10.4 Comportamiento del sistema sin regulación	188
10.5 Objetivos del regulador automático	190

11. Enfoque del regulador

En el capítulo 10 se planteó el problema de la regulación del tráfico en líneas de explotación circular, y se establecieron los objetivos de un regulador automático. En este capítulo se describen las técnicas empleadas en el desarrollo de este regulador: control óptimo basado en simulación, jerarquización del control y adaptación de los parámetros relevantes del sistema. Por último, se estudian los criterios de regularidad, molestia al viajero y consumo de energía que serán utilizados para elegir el plan de regulación óptimo. En el capítulo 12 se describirá con detalle el modelado y el diseño del regulador.

11.1 Control óptimo basado en simulación

El sistema de regulación propuesto se basa en un modelo de simulación que incluye las principales no linealidades del sistema. Este simulador permite la evaluación de diferentes estrategias de regulación, a partir del estado actual del sistema y su evolución estimada. Para evaluar y comparar las estrategias son necesarios unos criterios de optimización, que tienen en cuenta el grado de regularidad alcanzado y el transitorio, en términos de molestia al pasaje y consumo de energía.

Nota bibliográfica:

En [Campion, 85] se propone un control óptimo cuadrático para el mismo problema, pero utilizando un modelo lineal. En el capítulo 1 se encuentran comentarios sobre este trabajo.

Las no linealidades que tiene en cuenta el modelo de simulación son:

- Los sistemas de protección. Un tren no se puede acercar al que le precede en la línea más allá del intervalo mínimo de circulación que imponen estos sistemas. El modelo contempla intervalo mínimo impuesto por el sistema ATP del tren e intervalo mínimo impuesto por la señalización de la vía.
- Saturación del tiempo de parada en estación, debido a que el tren puede alcanzar su máxima capacidad. El tiempo que un tren puede estar retenido en estación como estrategia de regulación también está limitado por criterios de explotación.
- El tiempo de marcha en cada interestación está acotado entre un valor mínimo (marcha tendida) y un valor máximo (marcha más lenta).
- Operaciones de control propias de la explotación del sistema ferroviario. Por ejemplo, en algunos sistemas explotados por intervalo los trenes son retenidos en ciertas estaciones hasta que se cumpla un horario de salida, para facilitar la gestión de los turnos de los conductores.

Dado un estado actual del sistema y un horizonte de tiempo, se plantea una optimización en tiempo real de las consignas de conducción (marchas y retenciones en estación) hasta dicho horizonte temporal. El principal problema que presenta esta técnica es el tiempo de cálculo que precisa el algoritmo de optimización, especialmente por utilizar un modelo de simulación como evaluador. Si el tiempo de cálculo es excesivo puede ocurrir que:

- La consigna de regulación llegue tarde, si un tren pasa por una estación antes de disponer de las consignas de mando correspondientes.
- Los retrasos sean inadmisibles. El tiempo de cálculo del plan de regulación determina el período mínimo de actuación del regulador. Si se toma un período demasiado grande, el plan de regulación puede ser ineficiente, debido a nuevas perturbaciones ocurridas durante el tiempo de cálculo.

Existe un compromiso claro en el diseño del modelo de simulación entre precisión y rapidez. Un simulador muy rápido pero poco preciso puede hacer que las predicciones de evolución del sistema sean aceptables hasta un horizonte de tiempo demasiado corto. Un simulador muy preciso pero lento hace demasiado pesado el proceso de optimización.

Las características que se han introducido en el modelado y diseño del sistema de regulación para solucionar los problemas descritos anteriormente son las siguientes:

- Diseño jerárquico del sistema de control. Un control a medio plazo optimiza los horarios de paso de trenes para los próximos minutos. Un control a corto plazo de respuesta rápida calcula las consignas concretas de conducción de cada tren. Su objetivo es mantener el horario de referencia, absorbiendo las pequeñas perturbaciones y forzando a hacer ciertas las previsiones del control a medio

plazo. En el apartado 11.2 se describe con detalle esta estructura jerárquica y sus beneficios.

- Adaptación de los parámetros del modelo de simulación. Se ha desarrollado un modelo por eventos discretos sencillo y rápido, en el que algunos parámetros son estimados en tiempo real a partir de medidas. Este mecanismo permite una precisión aceptable del simulador sin necesidad de utilizar un modelo más complicado y lento que tuviera en cuenta las causas de la variación de los parámetros. En el apartado 11.3 se describe el sistema como un control adaptativo.
- Diseño estructurado por etapas del algoritmo de optimización. La optimización se ha dividido en cuatro etapas, tomando como punto inicial de cada una la solución de la etapa anterior. En cada etapa es clave la elección de las variables independientes, que restringen el espacio de búsqueda lo suficiente para hacerla ágil, pero sin perder soluciones potencialmente interesantes. El capítulo 13 está dedicado a describir el algoritmo de optimización utilizado.
- Compensación del retardo introducido por el tiempo de optimización. El control a medio plazo tarda menos de treinta segundos en optimizar el horario de referencia. Las consignas de conducción que precisan los trenes durante ese tiempo llegarían tarde. Para evitarlo, el control a medio plazo no comienza a elaborar el plan de regulación a partir del estado presente, sino que parte de un estado futuro estimado por el modelo de simulación. Esto equivale a considerar un adelanto en las medidas que compense el retardo que introduce el tiempo de cálculo. En el capítulo 12 se describe el diagrama de bloques detallado del sistema de control, que incluye este módulo de adelanto.

11.2 Estructura jerárquica del regulador

La estructura general del sistema de regulación propuesto se representa en la Figura 11.1. Existen dos lazos de control, el interno o control a corto plazo y el externo o control a medio plazo. El control a corto plazo se ocupa de dar las consignas de conducción a cada tren cuando sale de una estación. El control a medio plazo optimiza la trayectoria de horarios de paso por estaciones sucesivas de todos los trenes. Este horario es la referencia del control a corto plazo.

Nota bibliográfica:

En control de redes ferroviarias, donde el principal problema consiste en decidir el orden de paso de trenes por los cruces de vía, se utilizan habitualmente técnicas de control jerárquico. En [Kashani & Saridis, 83] y [Al-Khalili, 85] el tráfico en cada nodo está controlado por un regulador local. Un regulador central es el encargado de coordinar las consignas que reciben los reguladores locales.

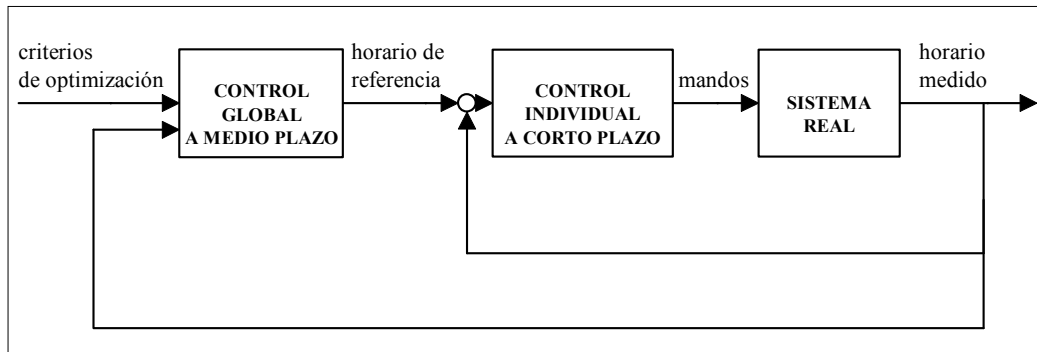


Figura 11.1. Estructura del sistema de control

11.2.1 El control a corto plazo

Los trenes leen la orden de marcha (típicamente rápida, normal, lenta o muy lenta) de una baliza situada a la salida de la estación. Esta orden de marcha está vigente en el tren hasta la lectura de la próxima baliza a la salida de la próxima estación. El control a corto plazo comienza a elaborar la orden de marcha para un tren en el instante en que arranca de la estación, y transcurren unos segundos hasta que el tren alcanza y lee la baliza. En ese tiempo, el control a corto plazo ha de elaborar y enviar a dicha baliza la orden correspondiente. En algunos sistemas el retraso que introducen las comunicaciones hasta las balizas impide que las órdenes lleguen a tiempo. Entonces es necesario enviar las órdenes a las balizas de entrada en estación en el instante en que el tren abandona la estación anterior.

Junto a la orden de marcha, el control a corto plazo envía el tiempo que se retendrá al tren por regulación en la estación destino (si ha lugar). El criterio que utiliza este módulo de control para elegir la combinación de $\{marcha + retención\}$ en estación es sencillo: aquel que más se acerque al horario de referencia impuesto por el control a medio plazo en la estación destino. Si para cumplir dicho horario de salida es necesario retener al tren en estación, entonces la marcha siempre será la más lenta, y energéticamente más barata.

Para realizar su función el control a corto plazo simula el movimiento del tren para cada marcha disponible hasta la estación destino, y la parada en dicha estación. El tiempo de cálculo que lleva este proceso es pequeño, muy inferior al segundo, y despreciable frente al retraso introducido por las comunicaciones hasta la baliza.

El control a corto plazo es de respuesta rápida, y cada vez que actúa sólo tiene en cuenta al tren que requiere mando y a su horario de referencia en la siguiente estación (control individual).

11.2.2 El control a medio plazo

El control a medio plazo calcula una trayectoria óptima de tiempos de paso por las próximas estaciones para cada tren. Esta trayectoria es el horario de referencia o plan de regulación. Cada período de actuación del lazo de control se actualiza el plan de regulación, o antes si se produce algún cambio de condiciones de explotación que invalide el plan en curso.

El control a medio plazo es global, tiene en cuenta la evolución de todos los trenes de la línea incluyendo sus interacciones. El plan de regulación que calcula es un compromiso para alcanzar la regularidad de la línea en su conjunto.

La referencia que se marca el control a medio plazo es minimizar una función objetivo, cuyos pesos dependen de los criterios de explotación. El operador del sistema de regulación es quien decide los cambios de estos criterios (por ejemplo cambiar el tipo de regulación de intervalo a horario). Los cambios de criterio podrían considerarse como un control a largo plazo, realizado por el operador.

Durante el tiempo de cálculo del plan de regulación el control a medio plazo permanece en lazo abierto. La eficacia de la estrategia de regulación depende entonces de que la realidad no se separe demasiado de la evolución prevista. Esta es precisamente la función fundamental del control a corto plazo, tratar de hacer cumplir las predicciones del control a medio plazo, corrigiendo:

- Perturbaciones (nuevos retrasos o adelantos de trenes) producidas durante la aplicación de un plan de regulación.
- Errores del modelo de simulación. El control a corto plazo fuerza a que se cumpla el horario de referencia calculado, aunque para generar este horario se haya utilizado un modelo de simulación con sus correspondientes errores de predicción.

El control a corto plazo no distingue entre estos dos tipos de desviación, simplemente trata de eliminarlas.

11.2.3 Jerarquización vs. distribución del control

La Figura 11.2 esquematiza la estructura del regulador propuesto. Se puede considerar que existen tantos controles a corto plazo como trenes circulando, donde cada uno de ellos sólo conoce el horario de referencia de un tren. Es el control global quien dispone de información completa sobre el estado de la línea, y de los objetivos de regulación. Esta jerarquía queda representada en el esquema verticalmente.

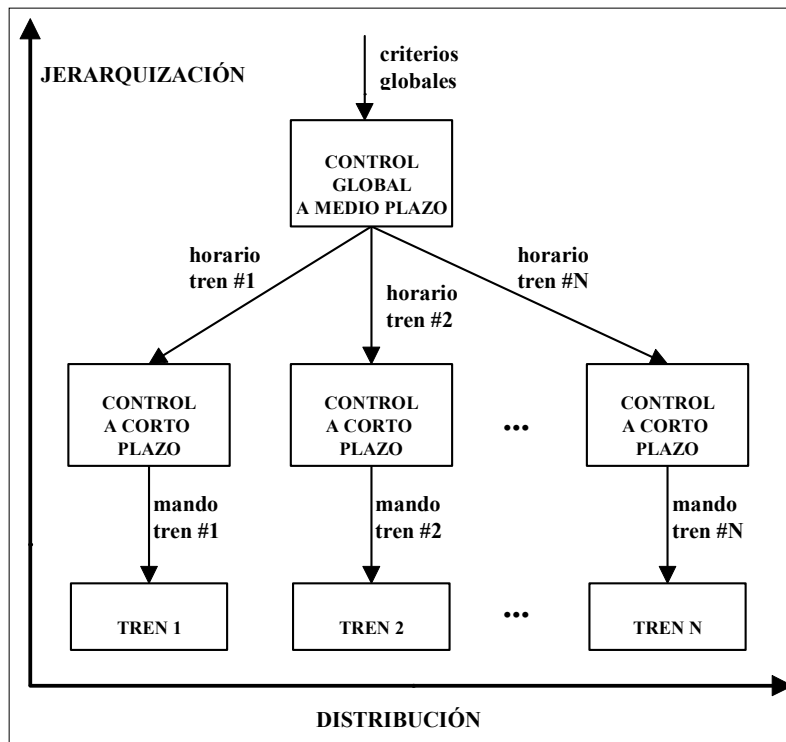


Figura 11.2. Jerarquización vs distribución del control

La estructura del regulador no sólo jerarquiza módulos de control, también realiza una distribución natural, asignando un módulo de control a cada elemento a controlar, o sea a cada tren. El acoplamiento entre las dinámicas de los distintos trenes queda resuelto por el control global, que permite hacer uso de controladores a corto plazo desacoplados. En la Figura 11.2 se representa la distribución del control horizontalmente.

Aunque el desacoplo en cuanto a referencias para cada control a corto plazo es completo, no lo es en cuanto a medidas del sistema. Cada controlador precisa las medidas de entradas y salidas de estación no sólo de su tren, sino también del que le precede en el carrusel. El motivo es que para elegir el mando más adecuado para un tren es necesario conocer el comportamiento del tren que le precede, para simular las protecciones y el tiempo de carga y descarga de pasaje (función del intervalo temporal entre trenes).

11.3 Adaptación de parámetros

En el siguiente capítulo se describe el modelo de simulación por eventos que utiliza el regulador para evaluar las estrategias de regulación. Este modelo está parametrizado por unas constantes, que miden:

- El tiempo de recorrido nominal entre dos estaciones para cada interestación y para cada marcha.
- La desviación respecto al tiempo de recorrido nominal para cada tren y para cada marcha.
- El ritmo de afluencia de viajeros en cada estación.

Durante un período de regulación, que dura como máximo unos minutos, se suponen constantes los parámetros del modelo. A lo largo de una jornada, sin embargo, estos parámetros pueden variar. La afluencia de viajeros aumenta en las horas punta, y disminuye en las horas valle. Los tiempos de recorrido nominales pueden variar con alteraciones en la tensión de red. Las desviaciones de tiempo de recorrido debidas a los trenes pueden ser significativas en caso de avería. Todos estos efectos, de no ser tenidos en cuenta de alguna forma, serían perturbaciones a corregir. El diseño propuesto del sistema de regulación exige que las predicciones de evolución del sistema sean buenas, y es necesario por tanto actualizar estos parámetros.

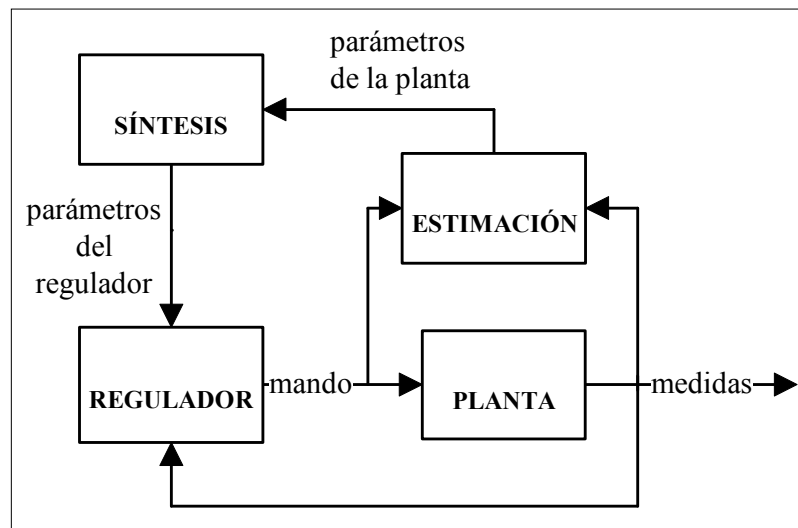


Figura 11.3. Esquema de un regulador auto-ajustable

Uno de los esquemas más comunes utilizados en control adaptativo es el mostrado en la Figura 11.3. Corresponde a un regulador auto-ajustable, en el que los parámetros de la planta son estimados a partir de las medidas del sistema real.

A partir de los parámetros de la planta, se sintetizan los parámetros del regulador, que son actualizados. Estos esquemas de control pueden ser vistos como un doble lazo, donde el externo sigue las variaciones lentas de los parámetros de la planta. Durante el tiempo de actuación del lazo interno se han de poder considerar constantes dichos parámetros.

El regulador de tráfico propuesto se puede considerar un regulador auto-ajustable. La síntesis de los parámetros no tiene aquí sentido, ya que forman parte directamente del regulador a través de su módulo de simulación, y por tanto intervienen en la evaluación de los planes.

Nota bibliográfica:

En [Astrom, 83] se revisan los distintos enfoques y técnicas empleadas en control adaptativo. Se clasifican fundamentalmente en dos tipos de reguladores: los basados en modelo de referencia y los reguladores auto-ajustables. Los dos consideran un lazo de control interno lineal y un lazo externo más lento que ajusta los parámetros del primero. La diferencia entre ambos radica en las técnicas de diseño y de ajuste de parámetros. Astrom considera exclusivamente reguladores cuyo lazo interno es lineal. En el presente trabajo se emplea el término 'auto-ajustable' aunque el lazo interno es no lineal, debido a que se utiliza el mismo esquema básico de control.

Cada vez que un tren llega a una estación son actualizados el parámetro de tiempo de recorrido nominal para la interestación recorrida y el parámetro de desviación de tiempo de recorrido para el tren. Cuando un tren abandona una estación se actualiza el parámetro de afluencia de viajeros de la estación, a partir de la medida de tiempo de parada. Los algoritmos de estimación empleados se describen en el capítulo 12.

11.4 Criterios de optimización

El control a medio plazo debe comparar la evolución de la línea ante distintas estrategias de regulación, y elegir entre ellas la mejor conforme a unos criterios. A cada plan de regulación evaluado se le asocia una serie de atributos: medidas de regularidad de la línea, molestia al pasaje durante la acción correctora y consumo de energía. A partir de estos atributos se construye una función objetivo (descrita con detalle en el capítulo 13), cuyo mínimo corresponderá al plan óptimo. En este apartado se describen los atributos que el regulador tiene en cuenta y la forma de medirlos.

11.4.1 Regularidad de la línea.

La regularidad de la línea se mide sobre la situación alcanzada tras aplicar un plan de regulación. Su medida depende del tipo de explotación que se lleva a cabo: horario, intervalo o mixta. A cada tren se le asocia un error respecto a la situación ideal:

- En explotación por horario, el error asociado a cada tren es su desviación respecto al horario marcado en la última estación de paso.
- En explotación por intervalo, el error asociado a cada tren es la desviación de su intervalo respecto al intervalo deseado.
- En explotación mixta por intervalo y horario en cabeceras se obtienen dos medidas de regularidad independientes, por intervalo y por horario, teniendo en cuenta en esta última el error marcado por cada tren en su último paso por una estación cabecera.

Medición del intervalo de un tren

La medida del intervalo temporal de un tren respecto al que le precede se realiza siempre con retraso, debido a que para realizarla es necesario fijar un punto espacial (normalmente una estación). Dada la situación representada en la Figura 11.4, se mide el intervalo I_2^A del *tren 2* respecto del *tren 1* en la *estación A* como diferencia de tiempos de paso por esta estación del *tren 2* (t_2^A) menos el tiempo de paso del *tren 1* (t_1^A). Esta medida no tiene en cuenta el movimiento que ya ha realizado el *tren 1* entre la *estación A* y su posición actual (más allá de la *estación B*).

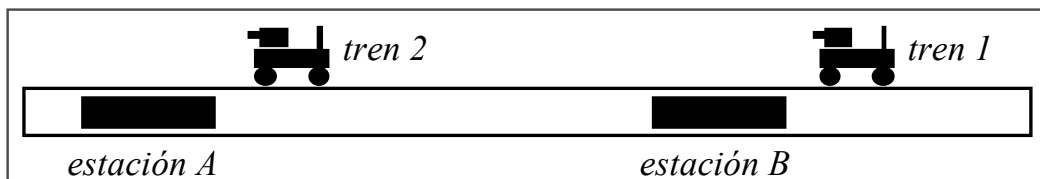


Figura 11.4. Medida de intervalo de un tren

Supongamos que el intervalo I_2^A tiene un error de 20 s, es decir, el *tren 2* va 20 s retrasado en su paso por la *estación A* respecto al paso del *tren 1*. Y supongamos que el *tren 1* se ha retrasado 20 s en su recorrido entre las estaciones *A* y *B*. El objetivo del regulador es que en la *estación B* el error de intervalo del *tren 2*, t_2^B , sea nulo. Para ello, no hay que aplicar ninguna acción correctora al *tren 2* en su recorrido entre *A* y *B*, ya que el error de 20 s medido en *A* ya ha sido compensado por el retraso del *tren 1*. La conclusión es que el error de intervalo medido en *A* no proporciona una estimación correcta de la necesidad de corrección actual del *tren 2*.

Cuando se aplica una acción correctora a un tren en su recorrido entre dos estaciones, no se miden los efectos de dicha acción (modificación del intervalo) hasta que el tren que le sigue no alcanza la estación destino del tren regulado. Esto puede causar que se corrija al tren en exceso. Tampoco se conoce que un tren ha sufrido una perturbación (por ejemplo un retraso considerable) hasta que el tren que le sigue no pasa por la estación del retraso. La consecuencia es ahora un retraso en la aplicación del control.

En general, el problema anterior se puede considerar un retraso en las medidas de intervalo, que no tienen en cuenta el último tiempo marcado por el tren precedente. La solución es adelantar la medida del intervalo que se medirá en la estación destino mediante simulación. Para ello, en la Figura 11.4, es necesario simular el movimiento del *tren 2* hasta la *estación B* con conducción nominal. El intervalo estimado del *tren 2* en esta estación, I_2^B , se calcula como:

$$I_2^B = t_2^A + t_2^{AB} - t_1^B \quad [11.1]$$

donde t_2^{AB} es el tiempo estimado de recorrido con conducción nominal del *tren 2* entre las estaciones *A* y *B*.

En el ejemplo numérico anterior, el error I_2^B respecto al medio (I_m) es efectivamente nulo, debido a que se compensan el retraso medido por el *tren 2* en la *estación A* con el retraso del *tren 1* en su recorrido entre las estaciones *A* y *B*:

$$\begin{aligned} I_2^B - I_m &= t_2^A + t_2^{AB} - t_1^B - I_m = \\ &= (t_2^A - t_1^A) - I_m + t_1^A + t_2^{AB} - t_1^{AB} - t_1^A = \\ &= (I_2^A - I_m) + (t_2^{AB} - t_1^{AB}) = 20 + (-20) = 0 \end{aligned}$$

donde se ha tenido en cuenta que t_1^{AB} es 20 s mayor que t_2^{AB} , ya que el primer tiempo tiene un retraso de 20 s respecto al tiempo de recorrido nominal, que es precisamente el segundo tiempo.

A partir de aquí, y mientras no se especifique lo contrario, se entiende por intervalo asociado a un *tren 2* respecto del que le precede *tren 1* al intervalo medido en la última estación de paso del *tren 1*, para lo que se simula el movimiento del *tren 2* hasta esta estación con conducción nominal.

Medida del error de intervalo

El error de intervalo que posee un tren se mide respecto a la media de los intervalos de todos los trenes. A esta media se la denominó en el capítulo 10 intervalo actual, y representa el intervalo al que se regulariza la línea conservando la suma de los

intervalos de todos los trenes. Consideremos el cálculo del intervalo actual para la situación representada por la Figura 11.5, teniendo en cuenta la expresión del intervalo asociado a cada tren de la fórmula [11.1]:

$$\begin{aligned}
 I_a &= \frac{1}{3} [(t_1^A + t_1^{AB} - t_3^B) + (t_3^B + t_3^{BD} - t_2^D) + (t_2^D + t_2^{DA} - t_1^A)] = \\
 &= \frac{1}{3} (t_1^{AB} + t_3^{BD} + t_2^{DA}) = \frac{1}{3} t_a
 \end{aligned}$$

[11.2]

El intervalo actual I_a se obtiene como el tiempo de vuelta actual de la línea t_a dividido entre el número de trenes, donde el tiempo de vuelta actual se calcula sumando los tiempos que tarda cada tren en alcanzar al que le precede en línea con conducción nominal.

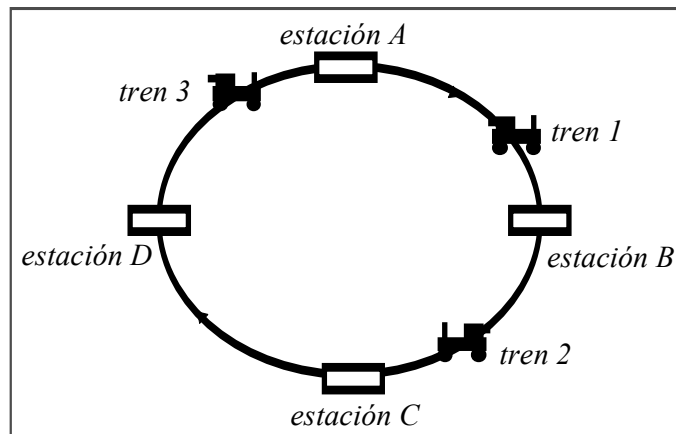


Figura 11.5. Ejemplo de distribución de trenes en línea

El tiempo de vuelta actual depende del estado de la línea, ya que en las simulaciones de parada en estación se tiene en cuenta la cantidad de pasaje para carga y descarga, que a su vez depende del ritmo de afluencia de viajeros a cada estación y del intervalo de circulación de cada tren.

El intervalo actual puede variar significativamente a lo largo del día, principalmente al cambiar el número de trenes circulando en línea. También se altera debido a que en horas punta crece el tiempo de parada en las estaciones, y por tanto el tiempo de vuelta actual. El sistema de regulación propuesto adapta el intervalo actual a estas variaciones, ya que un módulo del regulador se encarga de estimar el ritmo de afluencia de viajeros en cada estación a partir de medidas reales.

Nota bibliográfica:

En [Breusegen, 87] se define el error de intervalo entre dos trenes como diferencia entre los errores de horario de cada uno de ellos. De esta forma se evita introducir en la fórmula un intervalo objetivo. Esta técnica es útil para pequeña perturbación, cerca del intervalo nominal.

Para gran perturbación Breusegen calcula el error de intervalo como diferencia con el intervalo nominal.

Intervalo objetivo individual de cada tren

Al operador del sistema de regulación le puede interesar que uno o varios trenes circulen a un intervalo distinto al resto. Esto ocurre en los siguientes casos:

- Cuando un tren se va a retirar de línea interesa que circule a un intervalo menor que el resto de los trenes. De esta forma, cuando se retire, el hueco creado entre sus trenes anterior y posterior no será tan grande, y se alcanzará el nuevo equilibrio más rápidamente.
- Cuando un tren va a entrar en línea ocurre justo lo contrario. Interesa que previamente se abra un hueco en línea, aumentando el intervalo de circulación entre los dos trenes donde se va a efectuar la entrada.
- Si un tren es más lento que el resto, debido a que es un modelo distinto o a que está averiado, se puede compensar parte de su lentitud disminuyendo el intervalo de circulación respecto al tren que le precede. Con ello se consigue que el tren encuentre menos viajeros en las estaciones, disminuyendo por tanto los tiempos de parada.

Se define intervalo objetivo de cada tren como el producto del intervalo actual calculado anteriormente corregido por un factor que depende del tren:

$$I_i = k_i I_a \quad [11.3]$$

donde I_i es el intervalo objetivo individual del tren i -ésimo, I_a el intervalo actual de línea y k_i el factor corrector que elige el operador del sistema.

Para que la suma de los intervalos individuales siga valiendo el tiempo de vuelta actual, es necesario que la suma de los factores individuales de cada tren valga la unidad, por lo que se normaliza su valor.

11.4.2 Molestia al viajero

Se considera que el viajero no es molestado cuando el tráfico de trenes en línea cumple estrictamente con el horario oficial (en explotación por horario) o con el intervalo ofrecido a los usuarios (en explotación por intervalo).

Se tienen en cuenta las siguientes molestias al pasaje cuando no se dan las condiciones nominales de explotación:

- En explotación por horario, retraso al salir el tren de la estación origen, si el tren parte más tarde de su horario de salida. La medida de esta molestia es el tiempo de retraso.
- En explotación por intervalo, retraso al salir el tren de la estación origen, si el tren parte con un intervalo respecto al tren anterior mayor que el ofrecido a los usuarios. La medida de esta molestia es el error de intervalo. Si el intervalo es menor que el ofrecido, la molestia es nula (la molestia nunca es negativa).
- En cualquier tipo de explotación, se considera que el viajero ya embarcado es molestado por los tiempos extra de parada en las estaciones de paso debido a acciones de regulación. Se mide en tiempo de espera extra.

Estas tres causas de molestia se miden en cada estación de paso de cada tren en un plan de regulación. Están asociadas, por tanto, al período transitorio. Se pueden considerar costes asociados a la mejora de la regularidad, ya que en general las estrategias de regulación exigen que los trenes que han quedado adelantados esperen a los retrasados.

Nota bibliográfica:

En el regulador óptimo cuadrático propuesto en [Campion, 85] no existe un término en la función objetivo que penalice en particular la molestia al viajero. La penalización cuadrática del error de intervalo y horario es el que penaliza indirectamente la molestia al viajero ante retrasos.

En [Chang & Thia, 95] se utilizan variables borrosas para medir el grado de molestia del viajero. Se consideran dos medidas, una que depende del número de viajeros esperando en las estaciones (grado de congestión) y otra que depende del nivel de ocupación de los trenes (grado de confort en el viaje).

La sensación de molestia que siente el viajero no es lineal con el retraso experimentado o con el tiempo de espera extra. A partir de cierto umbral es necesario tener en cuenta un crecimiento más rápido de esta molestia. La función de penalización de molestia de la función objetivo considera una segunda pendiente, mucho mayor que la primera. En el capítulo 13 se detalla la función objetivo y la forma concreta de esta función de penalización.

11.4.3 Consumo de energía

Durante un plan de regulación los trenes consumen energía dependiendo de la marcha ejecutada entre cada dos estaciones. La energía mínima consumida durante un plan se daría si los trenes tomaran siempre la marcha más lenta, y el máximo

consumo si tomaran siempre la más rápida. Para un plan de regulación concreto, se estima la energía consumida sumando el consumo nominal asociado a cada marcha utilizada por cada tren a lo largo del plan.

En la función objetivo entrará el consumo como un coste asociado a la estrategia de regulación. En dicha función se utiliza una medida normalizada del consumo, C :

$$C = 100 \frac{c - c_{min}}{c_{min}}$$

[11.4]

donde c es el consumo durante el plan de regulación y c_{min} es el consumo mínimo durante el mismo.

La medida anterior representa el porcentaje de energía consumido por encima de la mínima. El criterio de ahorro de energía es a menudo opuesto al de regularidad. La función objetivo se encarga de reducir todos los criterios a un sólo número, teniendo en cuenta unos pesos fijados por el administrador del sistema.

11. Enfoque del regulador	193
11.1 Control óptimo basado en simulación	193
11.2 Estructura jerárquica del regulador	195
11.2.1 El control a corto plazo	196
11.2.2 El control a medio plazo	197
11.2.3 Jerarquización vs. distribución del control	197
11.3 Adaptación de parámetros	199
11.4 Criterios de optimización	200
11.4.1 Regularidad de la línea.	201
11.4.2 Molestia al viajero	204
11.4.3 Consumo de energía	205

12. Modelado y diseño del sistema de control

En el capítulo 7 se presentó un modelo detallado en tiempo continuo del movimiento de trenes en una línea ferroviaria de explotación circular. A partir de este modelo se construyó un simulador preciso, que ha servido de banco de pruebas para ensayar estrategias de regulación.

En el presente capítulo se describe un modelo discreto simplificado, que aproxima las medidas del sistema real. Este modelo es utilizado por el módulo de optimización de trayectorias del control a medio plazo como función de evaluación. A continuación se describe el diseño del regulador, detallando los dos lazos anidados de control, el medio y el corto plazo. Por último, se describe el algoritmo de estimación utilizado para adaptar los parámetros del modelo.

12.1 Medidas y mandos

El sistema objeto de estudio está formado por N trenes recorriendo una línea de explotación circular compuesta de M estaciones, donde todos los trenes paran en todas las estaciones para carga y descarga de viajeros. Los trenes están etiquetados desde 1 hasta N según el orden de circulación, y las estaciones desde 1 hasta M según el orden de paso. La estación siguiente a la estación j es la $j+1$, y la anterior la $j-1$. Debido a que la línea es cerrada, la estación siguiente a la M es la 1, y la anterior a la 1 la M . Análogamente, el tren anterior al i es el $i-1$, y el posterior el $i+1$. El tren anterior al 1 es el N , y el posterior al N es el 1. Cuando se suma o resta 1 a un identificador de tren o de estación se tendrán en cuenta estas relaciones:

$$\begin{aligned} \text{Id. de estaciones:} & \quad M+1 \Rightarrow 1 ; & \quad 1-1 \Rightarrow M \\ \text{Id. de trenes:} & \quad N+1 \Rightarrow 1 ; & \quad 1-1 \Rightarrow N \end{aligned}$$

[12.1]

Medidas

Las medidas que se toman del sistema son los tiempos de llegada y los tiempos de salida de cada tren de cada estación:

$$\begin{aligned} l_i^j &: \text{llegada del tren } i \text{ a la estación } j \\ t_i^j &: \text{salida del tren } i \text{ de la estación } j \end{aligned}$$

La medida del tiempo de llegada se realiza cuando el tren pisa el circuito de vía de estación. Desde este instante hasta su detención en estación y apertura de puertas transcurre un tiempo T_A . La medida del tiempo de salida se toma cuando el tren pisa el circuito de vía de salida, transcurrido un tiempo T_B desde que cerró puertas para arrancar. Los tiempos T_{Aj} y T_{Bj} se consideran constantes para cada estación j . Su valor típico es alrededor de los 5 segundos.

Si \bar{l}_i^j es el tiempo de detención en estación y \bar{t}_i^j el tiempo de arranque, se cumple que:

$$\begin{aligned} \bar{l}_i^j &= l_i^j + T_{Aj} \\ \bar{t}_i^j &= t_i^j - T_{Bj} \end{aligned}$$

[12.2]

Se dispone de una nueva medida de tiempo de salida o de entrada en estación en los tiempos discretos $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. El instante en que se produce cada medida coincide con el valor de dicha medida. La estación en la que se mide es la estación siguiente a la que se tomó la medida anterior del mismo tipo (entrada o salida) para el mismo tren.

Se definen dos vectores de medidas asociados al instante t_k :

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(t_k) &= [[\mu_i(t_k)]] & \quad i=1, \dots, N \\ \mathbf{Q}(t_k) &= [[\omega_i(t_k)]] & \quad i=1, \dots, N \end{aligned}$$

[12.3]

donde $\mu_i(t_k)$ es el tiempo de la última salida de estación anterior al tiempo t_k medida para el tren i -ésimo, y $\omega_i(t_k)$ es el tiempo de la última entrada en estación anterior al tiempo t_k medida para el mismo tren.

El modelo de simulación que se describe en el siguiente apartado aproxima la evolución del sistema por la sucesión de vectores de tiempos de salida de estación

$\{\mathbf{Y}(t_k)\}_{k=1,2,\dots}$. El vector de medidas de tiempos de entrada $\mathbf{Q}(t_k)$ se utiliza en el regulador para adaptar los parámetros que definen el modelo de simulación.

Mandos

La evolución de un tren a lo largo de la línea se divide en etapas. Una etapa comprende el período de tiempo entre dos salidas de estación consecutivas de un tren. Cada etapa se compone a su vez de un período de movimiento (recorrido de la interestación) y un período de parada en estación para carga y descarga de viajeros.

Durante el período de movimiento actúa sobre cada tren una variable de mando que afecta a su movimiento, u_R , que fija el nivel de marcha de entre un conjunto discreto.

Durante el período de parada, actúa la variable de mando u_P , que puede hacer que el tren retrase su salida de estación.

Las dos variables de mando (u_R, u_P) se envían a un tren cuando sale de estación. Se define el mando $u_{Ri}(t_k)$, $u_{Pi}(t_k)$ como el proporcionado al tren i -ésimo en la última salida anterior al tiempo t_k .

El vector de mando $\mathbf{U}(t_k)$ del sistema está compuesto por las variables de mando vigentes para cada tren en el instante t_k :

$$\mathbf{U}(t_k) = [[u_{Ri}(t_k)], [u_{Pi}(t_k)]] \quad i=1,\dots,N$$

[12.4]

12.2 Modelo simplificado basado en eventos

El modelo detallado del movimiento de trenes en una línea ferroviaria cerrada descrito en el capítulo 7 es demasiado complejo como para basar en él un control óptimo del sistema, debido a que:

- No se dispone de expresiones analíticas que permitan resolver el problema de optimización que se plantea mediante técnicas de programación matemática.
- El simulador asociado al modelo es demasiado lento como para constituir el módulo de evaluación de un algoritmo de optimización en tiempo real mediante técnicas de búsqueda directa.

En el presente apartado se define un modelo simplificado basado en eventos discretos que aproxima las medidas del sistema, dando lugar a un simulador suficientemente rápido como para permitir optimizar los mandos en tiempo real mediante técnicas de búsqueda directa.

12.2.1 Definición de las variables de estado

Sea el sistema formado por N trenes (etiquetados consecutivamente por los índices $1, 2, \dots, N$), recorriendo una línea circular de M estaciones (etiquetadas consecutivamente por $(1, 2, \dots, M)$). La evolución temporal del sistema se va a describir como una sucesión de valores de sus variables de estado en tiempo discreto $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. En cada uno de estos tiempos se produce una salida de estación de un tren. En el modelo discreto propuesto, éstos son los únicos eventos considerados: salidas de estación.

El vector de variables de estado en el instante de tiempo t_k se construye como:

$$\mathbf{X}(t_k) = [[\tau_i(t_k)], [\rho_i(t_k)], [\pi_i(t_k)], [\varepsilon_j(t_k)]] \quad i=1, \dots, N; \quad j=1, \dots, M \quad [12.5]$$

El significado de cada variable de estado es el siguiente:

$\tau_i(t_k)$: Último tiempo de salida conocido del tren i en el tiempo t_k .

$\rho_i(t_k)$: Estación donde se midió $\tau_i(t_k)$ (última estación de la que salió el tren i).

$\pi_i(t_k)$: Tiempo de salida inmediatamente anterior a $\tau_i(t_k)$ en la estación $\rho_i(t_k)$.

$\varepsilon_j(t_k)$: Último tiempo de salida conocido de la estación j en el tiempo t_k .

La variable $\pi_i(t_k)$ es necesaria para calcular el intervalo del tren i respecto al tren que le precede en el instante de salir de la estación $\rho_i(t_k)$. Este intervalo se utiliza para simular el comportamiento de los sistemas de protección. Nótese que la variable $\pi_i(t_k)$ no coincide en general con la variable $\tau_{i-1}(t_k)$ correspondiente a la última salida de estación del tren precedente, ya que esta última salida puede haber sido medida en una estación distinta, debido a que el tren precedente puede estar varias estaciones por delante.

La función de transición de estado \mathbf{E} obtiene el siguiente estado como función del estado actual y el vector de mando vigente:

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \mathbf{E}(\mathbf{X}(t_k), \mathbf{U}(t_k)) \quad [12.6]$$

donde $\mathbf{U}(t_k)$ es el vector de mando en el instante t_k definido en el apartado anterior, y el tiempo t_{k+1} es el tiempo asociado al siguiente evento, es decir, el tiempo de la primera salida de estación que se produce con posterioridad al tiempo t_k . Por definición del vector de estado, este tiempo cumple que:

$$t_{k+1} = \min \{ \tau_i(t_{k+1}) \}$$

[12.7]

Es decir, el tiempo de la próxima salida de estación de algún tren (tiempo asociado al evento) es el tiempo menor del nuevo vector de estado.

Nota bibliográfica:

En el modelo lineal por eventos discretos propuesto en [Campion, 86] en cada evento todos los trenes avanzan una estación. El vector de estados contiene el error temporal de cada uno de los trenes, medidos en estaciones consecutivas. Cada nuevo evento el vector de estados actualiza los errores de temporales que se producen en la siguiente estación de paso de cada tren. Por lo tanto, la diferencia entre dos eventos consecutivos no es un tiempo constante. La ventaja de este planteamiento es que permite expresar la función de transición de estados como una matriz. No es necesario almacenar en el estado más tiempos, debido a que este modelo no considera el efecto de las protecciones.

En [Ho, 94] se utiliza un modelo de movimiento por eventos discretos más detallado para el control del tráfico en los nodos de una red con topología compleja. El incremento mínimo de movimiento de cada tren es ahora un circuito de vía, para tener en cuenta el aspecto concreto de la señalización en cada circuito. En líneas metropolitanas, donde el tiempo de recorrido entre dos estaciones consecutivas es pequeño, no es necesario en general este nivel de detalle

La vigencia de cada variable de mando es la siguiente:

$u_{Ri}(t_k)$: valor de la variable de mando de recorrido dada al tren i en el instante t_k , vigente entre las estaciones $\rho_i(t_k)$ y $\rho_i(t_k)+1$.

$u_{Pi}(t_k)$: valor de la variable de mando de parada en estación dada al tren i en el instante t_k , vigente en la estación $\rho_i(t_k)+1$.

El vector de medidas de tiempos de salida $\mathbf{Y}(t_k)$ definido en [12.3] se obtiene directamente del vector de estados:

$$\mathbf{Y}(t_k) = \mathbf{N}(\mathbf{X}(t_k))$$

$$\mu_i(t_k) = \tau_i(t_k)$$

[12.8]

Donde \mathbf{N} representa la función de medición de tiempos de salida a partir del vector de estados, que simplemente toma las variables de estado τ_i .

12.2.2 Función de estado

La función de estado **E** calcula un nuevo estado $\mathbf{X}(t_{k+1})$ a partir del estado anterior $\mathbf{X}(t_k)$ y del vector de mando $\mathbf{U}(t_k)$. El nuevo vector de estado se diferencia del anterior en que ha sido actualizado con la información de una nueva salida. La función **E** deberá por tanto:

- Calcular el instante en que se produce la próxima salida de estación (t_e), y el tren que la provoca (e).
- Actualizar el vector de estados con esta información, siendo (t_e , e) el próximo evento.

Si t_i es la próxima salida de estación posterior al tiempo t_k para cada tren i , el próximo evento corresponderá a la salida que se produzca antes:

$$\begin{aligned} t_e &= \min \{ [t_i] \} & i=1, \dots, N \\ e &= \arg \min \{ [t_i] \} & i=1, \dots, N \end{aligned}$$

[12.9]

El cálculo de la próxima salida t_i exige simular el movimiento de cada tren i desde la estación actual hasta la próxima:

$$\begin{aligned} t_i &= \tau_i(t_k) + f_i^{\rho_i(k)}(\mathbf{X}(t_k), \mathbf{U}(t_k), t_i^*) \\ t_i^* &= \begin{cases} \mathcal{E}_{\rho_i+1} & \text{si } \rho_{i-1} \neq \rho_i \\ t_{i-1} & \text{si } \rho_{i-1} = \rho_i \end{cases} \end{aligned}$$

[12.10]

donde $f_i^{\rho_i(k)}$ es la función tiempo de recorrido del tren i en la etapa que va desde la estación $\rho_i(t_k)$ a la estación $\rho_i(t_k)+1$.

Las ecuaciones anteriores (una por cada tren i) distinguen entre los trenes tales que el vector de estados posee suficiente información como para calcular su próxima salida y los que no. Para cada tren i , esta información es el tiempo de salida del tren que le precede al simulado en la estación destino, representado por t_i^* :

- De un tren i tal que la última salida del tren anterior $i-1$ fue tomada en una estación distinta a la última salida del tren i ($\rho_{i-1} \neq \rho_i$), el vector de estados contiene el tiempo de salida del tren $i-1$ de la estación siguiente ρ_i+1 . Es la variable de estado \mathcal{E}_{ρ_i+1} .
- De un tren i tal que la última salida del tren anterior $i-1$ fue tomada en la misma estación que la última salida del tren i ($\rho_{i-1} = \rho_i$), el vector de estados aún no

contiene la salida del tren $i-1$ de la estación destino de i . Este tiempo ha de ser calculado, y es precisamente el próximo evento para el tren $i-1$, t_{i-1} .

La función de simulación f del movimiento de un tren en una etapa se detalla en el apartado 12.2.3.

Resolviendo las ecuaciones [12.10] y [12.9], se calcula el próximo evento (t_e, e) . El nuevo vector de estados $\mathbf{X}(t_{k+1})$ tendrá las mismas componentes que el vector $\mathbf{X}(t_k)$, excepto las relacionadas con la nueva salida calculada para el tren e :

$$\tau_e(t_{k+1}) = t_e \quad (a)$$

$$\rho_e(t_{k+1}) = \rho_e(t_k) + 1 \quad (b)$$

$$\pi_e(t_{k+1}) = \varepsilon_{\rho_e(t_k)+1}(t_k) \quad (c)$$

$$\varepsilon_{\rho_e(t_k)+1}(t_{k+1}) = t_e \quad (d)$$

[12.11]

El significado de estas ecuaciones es el siguiente:

- La ecuación (a) actualiza el nuevo tiempo de salida del tren e .
- La ecuación (b) aumenta en uno la estación de última salida del tren e .
- La ecuación (c) asocia al tren e la salida del último tren en la estación destino $\rho_e(t_k)+1$; este dato será necesario cuando el tren e vuelva a avanzar una etapa.
- La ecuación (d) actualiza el tiempo de salida asociado a la estación $\rho_e(t_k)+1$ con el nuevo tiempo de salida calculado del tren e en dicha estación.

Las ecuaciones [12.9], [12.10] y [12.11] definen las transformaciones de estado \mathbf{E} en el modelo simplificado basado en eventos.

Queda por definir la función f_i^j de la ecuación [12.10], que calcula el tiempo de recorrido del tren i en la etapa comprendida entre las estaciones j y $j+1$.

12.2.3 Cálculo del tiempo de recorrido de una etapa

El tiempo que tarda un tren en recorrer una etapa (tiempo entre dos salidas de estación consecutivas) se aproxima por la función f :

$$t_i^{j+1} = t_i^j + f_i^j(u_{Ri}, u_{Pi}, t_i^j, t_{i-1}^j, t_{i-1}^{j+1})$$

[12.12]

donde:

t_i^{j+1} : tiempo de salida del tren i de la estación $j+1$

t_i^j : tiempo de salida del tren i de la estación j

f_i^j : tiempo que tarda el tren i en recorrer la etapa comprendida entre las estaciones j y $j+1$

u_{Ri} : variable de mando sobre el movimiento del tren i . Es una variable discreta, que indica la marcha que se da al tren para recorrer la interestación.

u_{Pi} : variable de mando sobre la parada en la estación $j+1$ del tren i . Impone un horario de salida de estación; el tren no puede salir de estación al menos hasta el instante en que se cumple el horario. Este mando permite retrasar la salida de un tren.

t_{i-1}^j : tiempo de salida del tren $i-1$ de la estación j

t_{i-1}^{j+1} : tiempo de salida del tren $i-1$ de la estación $j+1$

El tiempo de recorrido de la etapa se expresa como suma de los siguientes tiempos:

$$f_i^j = r_i^j + T_{Aj+1} + p_{j+1} + T_{Bj+1}$$

[12.13]

donde:

r_i^j : función tiempo de marcha del tren i entre las estaciones j y $j+1$.

T_{Aj+1} : tiempo entre la medida de llegada de un tren a la estación $j+1$ y su apertura de puertas. Se considera constante.

p_{j+1} : función tiempo de parada en la estación $j+1$.

T_{Bj+1} : tiempo entre el cierre de puertas en la estación $j+1$ y la medida de salida de estación. Se considera constante (ver ecuaciones [12.2]).

A continuación se describen las funciones que aproximan el tiempo de marcha y el tiempo de parada en estación de un tren.

Tiempo de marcha

La función r_i^j modela el tiempo de marcha entre las estaciones j a $j+1$ del tren i . depende de las variables $\{t_{i-1}^j, t_i^j\}$, de la variable de mando m_{Ri} (orden de marcha m) y de los parámetros $\{R_j^m, \lambda_i^m, I_{Aj}\}$. Los parámetros que definen la función tienen el siguiente significado:

R_j^m : tiempo de recorrido nominal de la interestación j con marcha m .

λ_i^m : factor de marcha del tren i para la marcha m ; multiplicado por el tiempo de recorrido nominal R_j^m se obtiene el tiempo de recorrido sin perturbaciones del tren i en la interestación j con marcha m . Si el factor de marcha es 1, el tren se comporta nominalmente para esta marcha.

I_{Aj} : intervalo mínimo de un tren respecto del anterior medido en la estación j para que el movimiento del tren entre las estaciones j y $j+1$ no se vea perturbado por el disparo de los sistemas de protección ATP.

La expresión de la función tiempo de marcha dado un mando m es la siguiente:

$$r_i^j = \begin{cases} \lambda_i^m R_j^m & \text{si } t_i^j - t_{i-1}^j \geq I_{Aj} \\ \lambda_i^m R_j^m + I_{Aj} - (t_i^j - t_{i-1}^j) & \text{si } t_i^j - t_{i-1}^j < I_{Aj} \end{cases}$$

[12.14]

La primera expresión del tiempo de marcha es válida si el movimiento no es perturbado por el tren $i-1$, es decir, si el intervalo del tren i respecto al $i-1$ medido en la estación j es mayor que el intervalo mínimo de ATP.

La segunda expresión es válida cuando la salida del tren i viola el intervalo mínimo de ATP. Entonces el tiempo de recorrido aumenta, al frenar el tren por seguridad. Se ha aproximado el tiempo perdido por el tren perturbado por la diferencia entre el intervalo mínimo de ATP, I_{Aj} , menos el intervalo que lleva al tren precedente, $t_i^j - t_{i-1}^j$.

Por último, el tiempo de llegada a la estación $j+1$, l_i^{j+1} , se obtiene sumando el tiempo de salida al tiempo de marcha:

$$l_i^{j+1} = t_i^j + r_i^j$$

[12.15]

Tiempo de parada en estación

La función p_{j+1} en la fórmula [12.13] modela el tiempo de parada en estación de un tren que sale de la estación j y se detiene en la estación $j+1$ para carga y descarga de viajeros. Depende, para el tren i -ésimo, del tiempo de llegada a la estación $j+1$, l_i^{j+1} , de la variable t_{i-1}^{j+1} , de la variable de mando u_{Pi} y de los parámetros $\{\alpha_{j+1}, E_0, E_M, I_{Sj+1}, T_{Aj+1}, T_{Bj+1}\}$. Estos parámetros tienen el siguiente significado:

- α_{j+1} : espera unitaria de la estación $j+1$. Se modela el tiempo necesario para carga y descarga de pasaje como proporcional al tiempo transcurrido desde que el tren anterior $i-1$ arrancó hasta que el tren i se detiene en estación; el parámetro α es la pendiente de esta recta.
- E_0 : tiempo mínimo de parada en estación para carga y descarga de viajeros. Este tiempo se obtiene midiendo el tiempo de parada en estación cuando no hay viajeros.
- E_M : tiempo máximo de parada en estación para carga y descarga de viajeros. Se modela la saturación de la carga del tren mediante esta constante.
- I_{Sj+1} : intervalo mínimo de un tren respecto del anterior en la estación $j+1$ para que los sistemas de señalización le permitan abandonar la estación (señal en verde).
- T_{Aj+1} : tiempo entre la medida de llegada de un tren a la estación $j+1$ y su detención.
- T_{Bj+1} : tiempo entre el arranque de la estación $j+1$ y la medida de salida de estación (ver ecuaciones [12.2]).

El instante de arranque de estación será el más restrictivo entre:

- El instante en que finaliza la carga y descarga de viajeros (t_c)
- El instante en que los sistemas de señalización autorizan la salida (t_s)
- El instante en que por regulación se autoriza la salida (u_{Pi})

La función tiempo de espera se expresa entonces como:

$$p_j(l_i^{j+1}, t_{i-1}^{j+1}, u_{Pi}) = \min \{ t_c, t_s, u_{Pi} \} - (l_i^{j+1} + T_{Aj+1})$$

[12.16]

Donde $(l_i^{j+1} + T_{Aj+1})$ es el instante de apertura de puertas del tren i en la estación $j+1$. A continuación se presentan las expresiones para t_s y t_c de la ecuación anterior.

El instante de autorización de salida por protecciones (señal en verde) se aproxima a partir del intervalo mínimo I_{Sj+1} , sumando este intervalo al instante de arranque del tren anterior:

$$t_s = t_{i-1}^{j+1} - T_{Bj+1} + I_{Sj+1} \quad [12.17]$$

Es decir, la señal se pondrá en verde transcurrido un intervalo mínimo de circulación entre trenes.

Por último, el instante de final de carga y descarga t_c se calcula como:

$$t_c = l_i^{j+1} + T_{Aj+1} + t_p$$

$$t_p = \min \{ E_0 + \alpha_{j+1} t_o, E_M \}$$

$$t_o = (l_i^{j+1} + T_{Aj+1}) - (t_{i-1}^{j+1} - T_{Bj+1})$$

[12.18]

donde:

t_p : tiempo de carga y descarga del pasaje.

t_o : tiempo que transcurre desde el instante en que cerró puertas el tren anterior ($t_{i-1}^{j+1} - T_{Bj+1}$) y la apertura de puertas en estación del tren que llega ($l_i^{j+1} + T_{Aj+1}$). Durante este tiempo el andén se ha ido ocupando con pasaje.

La Figura 12.1 representa el modelo de tiempo de carga de viajeros empleado (ecuación de t_p). El modelo supone que este tiempo es proporcional al número de viajeros en el andén. Si se supone una afluencia de viajeros al andén constante, su número es también proporcional al tiempo que se ha estado ocupando el andén, t_o . La constante de proporcionalidad es α

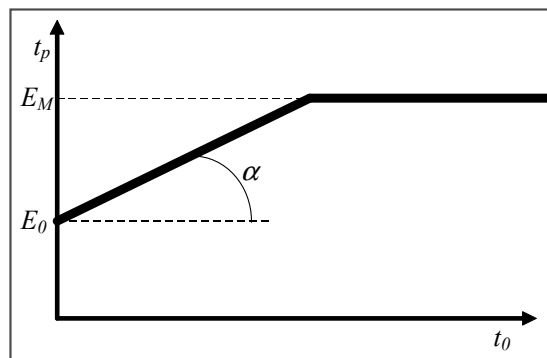


Figura 12.1. Modelo de tiempo de carga y descarga de pasajeros

La recta se satura cuando se alcanza un tiempo de carga E_M , debido a que el tren tiene una capacidad limitada. El tiempo de parada mínimo cuando no hay pasaje en el andén es E_0 .

Nota bibliográfica:

Si en el modelo de tiempo de recorrido de estación descrito en este apartado se eliminan las saturaciones, el efecto de los sistemas de protección y los parámetros asociados a trenes y estaciones, queda:

$$t_i^{j+1} = t_i^j + E_0 + r_i^j + a_{j+1}(t_i^{j+1} - t_{i-1}^{j+1})$$

que es el modelo lineal de tiempo de recorrido entre dos estaciones propuesto en [Sasama & Ohkawa, 83]. Este modelo es el utilizado en los reguladores lineales propuestos en [Campion, 85] y [Benoit & Wajsbrot, 89], y forma la base del modelo no lineal utilizado propuesto en [Chua, 86].

Utilización de la función de tiempo de recorrido en el modelo por eventos

La función f de tiempo de recorrido en una etapa descrita en este apartado es utilizada en la expresión [12.10] en el cálculo del próximo vector de estado del sistema. Queda por comprobar que el estado $\mathbf{X}(t_k)$ definido en [12.5] almacena la información necesaria para hacer uso de esta función.

Comparando la expresión del tiempo de salida de estación empleada anteriormente [12.12] con la expresión utilizada en el cálculo del siguiente evento en [12.10], y teniendo en cuenta el significado de cada variable, se comprueba que los argumentos que utiliza dicha función se encuentran almacenados en el vector de estado:

$$\begin{aligned} j &= \rho_i(t_k) \\ t_i^{j+1} &= t_i \\ t_i^j &= \tau_i(t_k) \\ t_{i-1}^j &= \pi_i(t_k) \\ t_{i-1}^{j+1} &= t_i^* \quad (\text{ver [12.10]}) \\ m_{Ri} &= m_{Ri}(t_k) \\ m_{Pi} &= m_{Pi}(t_k) \end{aligned}$$

[12.19]

12.2.4 Parámetros del modelo

La función que modela el tiempo de recorrido en una etapa f_i^j depende de parámetros asociados al tren i y de parámetros asociados a las estaciones j y $j+1$ (ver apartado 12.2.1). En el modelo discreto quedan agrupados estos parámetros en dos

vectores, \mathbf{p} y \mathbf{q} . En un sistema de N trenes, M estaciones y Z niveles de marcha posibles para recorrer cada interestación, se construyen estos vectores como:

$$\mathbf{p} = [[R_j^m], [\lambda_i^m], [\alpha_j]]$$

$$\mathbf{q} = [[I_{Sj}], [I_{Aj}], [T_{Aj}], [T_{Bj}], [E_0], [E_M]] \quad i=1,\dots,N; \quad j=1,\dots,M; \quad m=1,\dots,Z$$

[12.20]

Cada estación j tiene asociados los siguientes parámetros:

- R_j^m : tiempo nominal de recorrido entre las estaciones j y $j+1$ con marcha m
- α_j : espera unitaria en estación (pendiente de la recta de carga y descarga)
- I_{Sj} : intervalo mínimo impuesto por la señal de salida de la estación j
- I_{Aj} : intervalo mínimo impuesto por el ATP entre las estaciones j y $j+1$
- T_{Aj} : tiempo entre medida de llegada y apertura de puertas en estación j
- T_{Bj} : tiempo entre instante de cerrar puertas y medida de salida en estación j

Los parámetros E_0 y E_M , tiempos mínimo y máximo para carga y descarga del pasaje respectivamente, se consideran constantes para todas las estaciones de la línea.

Cada tren tiene asociados los parámetros λ_i^m , uno para cada marcha. La descripción de estos parámetros se encuentra en el apartado 12.2.1.

Los parámetros del vector \mathbf{q} se pueden considerar constantes. Sin embargo, los parámetros del vector \mathbf{p} pueden variar significativamente a lo largo del día dependiendo de variaciones en el flujo de viajeros a las estaciones (altera α), variaciones en la tensión de la catenaria (altera los tiempos de recorrido R) y por fallos de tracción de trenes concretos (altera λ). Estos parámetros son estimados por el regulador a partir de las medidas del sistema (ver apartado 12.5).

Incluyendo la dependencia de los parámetros adaptados, la ecuación de estado se escribe como:

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \mathbf{E}(\mathbf{X}(t_k), \mathbf{U}(t_k), \mathbf{p}(t_k))$$

[12.21]

Lo que distingue a las variables de estado de los parámetros adaptados es su ritmo de variación: los parámetros varían a lo largo del día más lentamente que las variables. Esto permite que el lazo principal de control pueda considerar los parámetros como constantes, mientras que el lazo de adaptación de parámetros (descrito en el apartado 12.5) actúa en paralelo con una constante de tiempo mayor.

12.3 Control a medio plazo

El control a medio plazo se encarga de calcular una trayectoria de tiempos de paso (horario de referencia) por las próximas estaciones para cada tren. En este apartado se plantea esta elección como un problema de control óptimo. En el capítulo 13 se describe la técnica de optimización por búsqueda directa empleada para su resolución.

12.3.1 Planteamiento del problema de control óptimo

Sea \mathbf{X} el vector de estados de un sistema ferroviario circular compuesto por N trenes y M estaciones. Se define el vector trayectoria del tren i -ésimo, \mathbf{H}_i , construido a partir del estado \mathbf{X} , por:

$$\mathbf{H}_i(\mathbf{X}) = [H_i^{\rho_i+1}, H_i^{\rho_i+2}, \dots, H_i^{\rho_i+n}] \quad [12.22]$$

donde H_i^j es el tiempo de salida del tren i de la estación j , n es el número de etapas de que se compone la trayectoria, y ρ_i la última estación de paso del tren i en el vector de estados \mathbf{X} . La primera estación de la trayectoria es la ρ_i+1 , y la última la ρ_i+n .

Una trayectoria completa \mathbf{H} para el sistema, calculada a partir del vector de estados \mathbf{X} , se define como el conjunto formado por las trayectorias de cada tren:

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}) = \{\mathbf{H}_1(\mathbf{X}), \mathbf{H}_2(\mathbf{X}), \dots, \mathbf{H}_N(\mathbf{X})\} \quad [12.23]$$

Durante un plan de regulación el tren recibe consignas de regulación a la salida de las estaciones comprendidas entre la ρ_i y la ρ_i+n-1 . A la salida de cada estación j el control a corto plazo tratará de cumplir el horario H_i^{j+1} mediante el mando M_i^{j+1} . Se define el vector de mandos $\mathbf{M}_i(\mathbf{X})$ para el tren i , asociado a un plan de regulación de longitud n que comienza a partir de un estado \mathbf{X} , por:

$$\mathbf{M}_i(\mathbf{X}) = [M_i^{\rho_i+1}, M_i^{\rho_i+2}, \dots, M_i^{\rho_i+n}] \quad [12.24]$$

Se define $\mathbf{M}(\mathbf{X})$ como el conjunto formado por los vectores de mando que se emplean a lo largo de un plan de regulación para cada tren.

$$\mathbf{M}(\mathbf{X}) = \{\mathbf{M}_1(\mathbf{X}), \mathbf{M}_2(\mathbf{X}), \dots, \mathbf{M}_N(\mathbf{X})\}$$

[12.25]

Una trayectoria $\mathbf{H}(\mathbf{X})$ es posible si existe un conjunto de mandos $\mathbf{M}(\mathbf{X})$ cuya aplicación en el sistema a partir del estado \mathbf{X} genera dicha trayectoria. El conjunto formado por todas las trayectorias posibles a partir de un estado \mathbf{X} se denotará por $\phi(\mathbf{X})$.

Para un plan de regulación de n estaciones de longitud con N trenes en línea, la expresión de la función objetivo fob asociada a una trayectoria se expresa como:

$$fob(\mathbf{H}) = J_a(H_1^n, H_2^n, \dots, H_N^n) + J_t(\mathbf{H})$$

[12.26]

La función J_a tiene en cuenta el aspecto final del sistema (grado de regulación) como resultado de aplicar el plan de regulación. Sólo depende de los tiempos de paso de cada tren por la última estación (n) de la trayectoria.

La función J_t tiene en cuenta el transitorio a lo largo de todo el plan. Depende de los tiempos de paso de cada tren por todas las estaciones, para considerar la molestia al pasaje durante la aplicación del plan, y del coste energético de la marcha necesaria para cumplir los tiempos de recorrido en cada interestación.

La trayectoria óptima $\mathbf{H}^*(\mathbf{X})$ asociada al estado \mathbf{X} será la que minimice la función objetivo entre todas las trayectorias posibles a partir de dicho estado:

$$\mathbf{H}^*(\mathbf{X}) = \arg \min\{fob(\mathbf{H})\} \quad \mathbf{H} \in \phi(\mathbf{X})$$

[12.27]

En la Figura 12.2 se representa el módulo de optimización de trayectorias del control a medio plazo, donde se parte del estado del sistema $\mathbf{X}(t)$ y se calcula una referencia $\mathbf{H}(\mathbf{X}(t))$ válida a partir del instante t .



Figura 12.2. Módulo de optimización de trayectoria

El capítulo 13 describe con detalle la función objetivo y el algoritmo de optimización por búsqueda directa empleado.

12.3.2 Ciclo de recálculo de trayectorias. Adelanto de medidas.

El control a medio plazo recalcula periódicamente la trayectoria referencia del control a corto plazo. Sea $\mathbf{H}(\mathbf{X}(t))$ la trayectoria en vigor en el intervalo entre t y $t+T$, donde T es el período. En el instante t el control a medio plazo comienza el cálculo de la siguiente trayectoria, $\mathbf{H}(\mathbf{X}(t+T))$, que entrará en vigor a partir del instante $t+T$. Por lo tanto el control a medio plazo dispone de un período T para optimizar la trayectoria.

La nueva trayectoria $\mathbf{H}(\mathbf{X}(t+T))$ se calcula a partir del estado del sistema en el instante $t+T$, pero en el instante en que comienza su elaboración se conoce el estado del sistema sólo hasta el tiempo t . Un módulo de simulación se encarga de estimar la evolución del sistema durante un período, obteniendo el estado $\mathbf{X}(t+T)$ que precisa el optimizador. En la Figura 12.3 se representa un esquema del control a medio plazo, compuesto por el módulo de adelanto (simulación) y el módulo optimizador.

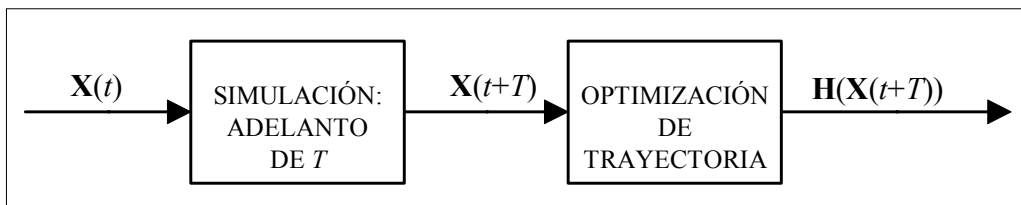


Figura 12.3. Control a medio plazo: adelanto de estado + optimización de trayectoria

El módulo de simulación empleado en el medio plazo ha de tener en cuenta el comportamiento del control a corto plazo ante la referencia $\mathbf{H}(\mathbf{X}(t))$, vigente hasta que entre en vigor la nueva en el tiempo $t+T$.

Mediante simulación se compensa el retraso que introduce el optimizador, adelantando las medidas un período. Las perturbaciones que se producen durante este tiempo son corregidas en la medida de sus posibilidades por el control a corto plazo, realizando su función esencial: ayudar a que se cumplan las predicciones de las simulaciones. De esta forma, cuando el sistema alcance el tiempo $t+T$, su estado estará muy cercano al estimado.

El tiempo que necesita en la práctica el optimizador para calcular una trayectoria es del orden de medio minuto, dependiendo del número de trenes en línea. El período de actuación del control a medio plazo ha de ser mayor que este tiempo, que podrá ser mayor cuanto menos perturbado se encuentre el sistema.

Un criterio de elección del período de actuación del medio plazo es hacerlo igual al menor de los tiempos de recorrido entre dos estaciones consecutivas. Esto garantiza que en el cálculo de nueva trayectoria no se dispone de medidas reales (sino simuladas) de como mucho un paso por estación para cada tren. En simulaciones tan cortas, y teniendo en cuenta la acción del corto plazo, el error de predicción es en general suficientemente pequeño. En caso de que precisamente en la estación simulada se produjera una fuerte perturbación, sería tenida en cuenta por el sistema como mucho un período más tarde, que se traduce en un paso por estación.

Cuando no hay ninguna trayectoria vigente el control a corto plazo ordena conducción nominal. Este es el caso cuando se elabora el primer plan de regulación, y por tanto el módulo de adelanto de medidas simulará conducción nominal durante un período. El resultado de esta simulación se impone como trayectoria vigente, con el objeto de que al final del intervalo el corto plazo haga que la realidad se parezca a la predicción, como punto de partida del módulo de optimización.

12.3.3 Horizonte de optimización

En el apartado 12.3.1 se definió la longitud n de una trayectoria como el número de estaciones para las que la trayectoria fija un horario de salida para cada tren. Esta longitud es el horizonte de optimización del medio plazo.

Horizontes de optimización demasiado cortos presentan los siguientes problemas:

- No hay margen para ensayar estrategias de regulación complejas; en ellas es habitual que en las primeras estaciones del plan disminuya la regularidad de la línea, preparándola para llegar a un resultado óptimo a final del plan. Por ejemplo, ante el retraso de un tren suele ser conveniente hacer que los trenes que le preceden en la línea también se retrasen, para cerrar el hueco, y posteriormente que todos los trenes recuperen el tiempo perdido. Este tipo de estrategias no se obtienen con horizontes demasiado cortos (2-3 estaciones).
- Cuando los trenes han de cumplir un horario de salida en determinadas estaciones pero no en las precedentes, el regulador sólo tendría en cuenta los horarios cuando los trenes estuvieran muy cerca de estas estaciones. Habría ya poco margen para tomar medidas.

Horizontes demasiado largos tampoco son convenientes:

- Por tiempo de optimización, que aumenta con el número de estaciones a simular.

- Por capacidad de predicción del simulador. Las previsiones en las primeras estaciones del plan de regulación para cada tren son buenas, pero los errores debidos tanto al modelo de simulación como a perturbaciones van haciendo cada vez peores las predicciones, a pesar de la acción del corto plazo. La función objetivo valora de igual forma retrasos producidos en la primera que en la última estación del plan, y evalúa especialmente el aspecto que tiene el sistema al final del plan de regulación. Es importante, por tanto, limitar el horizonte del medio plazo hasta donde exista suficiente confianza en las predicciones.

El capítulo 14 estudia el ajuste del horizonte de optimización utilizando un modelo estocástico simplificado, que tiene en cuenta la actuación del control a corto plazo y un nivel de ruido constante. Se estimará el error de predicción del simulador del medio plazo, y a partir de él se pondrá cota al número de estaciones de un plan de regulación.

En la práctica se obtienen buenos resultados con horizontes de optimización de entre cuatro y ocho estaciones, dependiendo del grado de perturbación que presente el sistema y de la potencia de cálculo disponible en el ordenador empleado.

12.4 Control a corto plazo

El control a medio plazo impone una trayectoria de tiempos de paso a cada tren. Cada vez que un tren sale de una estación, el control a corto plazo ha de calcular el mando (marcha y tiempo de espera en estación destino) que mejor cumpla el tiempo de salida en la estación destino fijado por la trayectoria.

La Figura 12.4 muestra para el tren i -ésimo el esquema de control del corto plazo. El vector de medidas \mathbf{Y} es el definido en la fórmula [12.3], \mathbf{H}_i es la trayectoria para el tren i , y (u_{Ri}, u_{Pi}) son, respectivamente, las componentes del vector de mandos de recorrido y parada en estación para el tren i definidos en la fórmula [12.4].

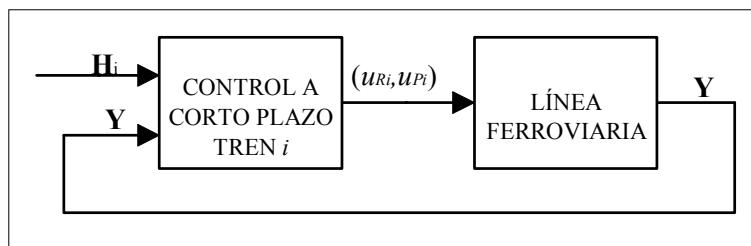


Figura 12.4. Esquema del control a corto plazo

El regulador del tren i utiliza del vector de medidas \mathbf{Y} la componente τ_i (último tiempo de salida de estación medido para el tren i) y la componente τ_{i-1} (último tiempo de salida de estación medido para el tren que precede en la línea al tren i). Este último tiempo es necesario para conocer el intervalo que el tren controlado lleva al que le precede, para simular los tiempos de parada y para simular los sistemas de protección (ver modelo de movimiento en una etapa en el apartado 12.2.3).

12.4.1 Tiempos de recorrido alcanzables en una etapa

Una etapa comprende el recorrido de una interestación y la parada en la estación destino. La Figura 12.5 muestra el rango de tiempos de recorrido alcanzables en una etapa, y los márgenes de control para cada tipo de mando: orden de marcha y espera forzada en estación destino.

El tiempo t_{m0} es el mínimo tiempo de recorrido posible, obtenido con la marcha más rápida y sin realizar espera extra en la estación destino (el tren abandona la estación destino cuando las protecciones y el pasaje se lo permiten).

El tiempo t_{m1} es el tiempo máximo de recorrido de etapa sin realizar espera extra en la estación destino, viajando con la marcha más lenta. El rango de tiempos comprendido entre t_{m0} y t_{m1} es la capacidad de control en una etapa utilizando sólo consignas de marcha. Existe un número discreto de marchas disponibles, que se representan en la gráfica por tiempos discretos en el margen de control con marchas.

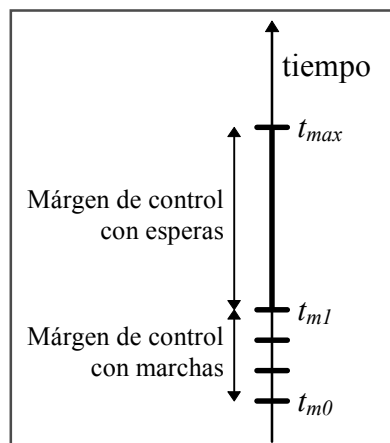


Figura 12.5. Tiempos de recorrido alcanzables en una etapa

El tiempo t_{max} representa en la gráfica el máximo tiempo de recorrido posible, conseguido con la marcha más lenta y parando en la estación destino el máximo tiempo permitido por regulación. Los tiempos de recorrido t comprendidos entre t_{m1} y t_{max} son todos posibles, utilizando la marcha más lenta y parando en la estación

destino un tiempo igual a $t-t_{ml}$. El tiempo comprendido entre t_{ml} y t_{max} es el margen de control de que se dispone haciendo uso de esperas en estación.

Todos los tiempos de recorrido por encima de t_{ml} se consideran generados con la marcha más lenta, debido a que tanto por criterios de ahorro de energía como de comodidad de los viajeros es preferible perder tiempo con marchas lentas a retener al tren en una estación.

En el capítulo 14 se introduce una modificación en el funcionamiento del control a corto plazo para el caso de trenes muy retrasados, para evitar comportamientos no deseables derivados de la incertidumbre en la planificación de la trayectoria.

12.4.2 Selección de mando por el control a corto plazo

Cuando el tren i sale de la estación j , el tiempo de recorrido objetivo z entre las estaciones j y $j+1$ (incluida la parada en la $j+1$) será:

$$z = H_i^{j+1} - \tau_i \quad [12.28]$$

donde H_i^{j+1} es el tiempo de referencia para el tren i en la estación destino y τ_i es el tiempo de salida de la estación origen.

Para elegir el mando que cause un tiempo de recorrido lo más cercano posible a z , el corto plazo comienza por simular el movimiento del tren en la etapa con la marcha más lenta, haciendo uso del modelo de simulación de movimiento en etapa descrito en el apartado 12.2.3. Se obtiene así el tiempo t_{ml} de la Figura 12.5, con el que se distinguen dos casos:

- Si el tiempo objetivo z es mayor que t_{ml} , la marcha u_{Ri} que se ordena es la más lenta, y existe orden de espera forzada en estación destino u_{Pi} hasta que se cumpla el tiempo objetivo, salvo que se sature por t_{max} (ver Figura 12.5):

$$\begin{aligned} u_{Pi} &= z - t_{ml} & \text{si } z < t_{max} \\ u_{Pi} &= t_{max} - t_{ml} & \text{si } z \geq t_{max} \end{aligned} \quad [12.29]$$

- Si el tiempo objetivo es menor que t_{ml} , se simula el movimiento del tren en la etapa con las marchas disponibles, eligiendo la marcha u_{Ri} que cause un tiempo de recorrido más cercano al objetivo. En este caso no se fuerza espera en la estación destino ($u_{Pi}=0$).

La corrección que se aplica al tren es la necesaria para cumplir la referencia en la siguiente estación. En este sentido, el control aplicado es proporcional, con constante igual a la unidad. Este control es el adecuado en este caso, ya que el sistema no presenta inercia, y no hay ningún criterio para elegir un mando distinto, debido a que el corto plazo no tiene información ni autoridad para valorar otras posibilidades. Para seguir a la referencia, lo importante es cumplir con el tiempo de salida marcado en la siguiente estación, no importa la magnitud del mando empleado.

12.5 Algoritmo de estimación de parámetros

En el capítulo 11 se describe el esquema de adaptación de parámetros empleado, que corresponde al de un regulador autoajustable. Un módulo estima los parámetros ajustables del modelo de la planta, que entran a formar parte del regulador. En el apartado 12.2.4 se define el vector \mathbf{p} de parámetros ajustables del modelo. En el presente apartado se describe el algoritmo de estimación de parámetros.

Ante cada nueva medida del sistema, entrada o salida de un tren de una estación, se actualiza el vector de parámetros según la función de estimación \mathbf{A} :

$$\mathbf{p}(t_k) = \mathbf{A}(\mathbf{X}(t_k), \mathbf{Q}(t_k), \mathbf{U}(t_{k-1}), \mathbf{p}(t_{k-1})) \quad [12.30]$$

donde:

$\mathbf{p}(t_k)$: nuevo vector de parámetros tras la medida tomada en el instante t_k .

$\mathbf{X}(t_k)$: vector de estados tras la medida tomada en el instante t_k .

$\mathbf{Q}(t_k)$: vector de medidas de tiempo de entrada tras la tomada en el instante t_k .

$\mathbf{U}(t_{k-1})$: vector de mandos vigente cuando fue tomada la medida en el instante t_k .

$\mathbf{p}(t_{k-1})$ vector de parámetros vigente cuando fue tomada la medida en el instante t_k .

Cada parámetro del vector \mathbf{p} se puede expresar como la pendiente de un modelo lineal:

$$y = p x \quad [12.31]$$

donde y es la magnitud estimada, p es el parámetro y x depende en general del mando empleado, del estado del sistema, del vector de medidas de tiempos de entrada en estación y del valor de otros parámetros.

A cada parámetro p se le puede asociar una sucesión de experimentos que se modelan de la forma anterior, de forma que variaciones mantenidas de la magnitud estimada son causadas por variaciones de p , no por variaciones de otros parámetros del sistema que intervienen en el cálculo de x . Por lo tanto, para estimar p es suficiente con efectuar un promediado de las sucesivas estimaciones de su valor obtenidas por los cocientes y/x de cada experimento, que filtre tanto el ruido propio del sistema como el introducido por variaciones todavía no adaptadas de otros parámetros que puedan intervenir en el cálculo de x .

A continuación se describe el algoritmo de promediado empleado, y en el apartado 12.5.1 la sucesión de experimentos asociados a la estimación de cada parámetro.

Algoritmo de promediado. Media móvil del cálculo.

Se ha elegido como algoritmo de promediado la media móvil del cálculo (MMC), que considera una ventana de promediado exponencial. Este es el algoritmo habitualmente empleado en aplicaciones en tiempo real por su rapidez y sencillez de implantación.

El nuevo valor asignado a un parámetro que sigue el modelo de la fórmula [12.31] según este algoritmo es:

$$p = \lambda p_a + (1 - \lambda) \frac{y}{x}$$

[12.32]

donde p es el nuevo valor del parámetro, p_a es su valor anterior, x , y son, respectivamente, la variable estimada y el estimador asociados al experimento que actualiza el parámetro.

El factor de olvido λ es un número positivo entre 0 y 1. Si fuese nulo significaría que se toma como valor del parámetro el último medido. Si valiera la unidad, no se actualizaría el parámetro. Para elegir el factor de olvido adecuado se tiene en cuenta su relación con la constante de tiempo del filtro exponencial asociado:

$$\tau = -\frac{T}{\ln \lambda}$$

[12.33]

donde τ es la constante de tiempo y T el período con el que se realiza el experimento.

12.5.1 Experimentos asociados a cada parámetro

El vector \mathbf{p} contiene los siguientes parámetros ajustables:

$$\mathbf{p} = [[R_j^m], [\lambda_i], [\alpha_j]] \quad i=1,\dots,N; \quad j=1,\dots,M; \quad m=1,\dots,Z \quad [12.34]$$

donde i es un índice a cada uno de los N trenes, j es un índice a cada una de las M estaciones de la línea, y m es un índice a cada una de las Z marchas disponibles en cada interestación.

A continuación se describe cómo se obtienen las medidas de x e y del modelo [12.31] en los experimentos asociados a cada parámetro R , λ , α .

Parámetro α Tiempo de carga y descarga de viajeros

En el apartado 12.2.3 se describe el modelo de carga y descarga de viajeros. Cada vez que un tren abandona una estación, se obtiene una nueva medida del tiempo de carga (y) en función del tiempo que se ha estado ocupando el andén con viajeros (x):

$$\begin{aligned} y &= \alpha x \\ y &= (t_i^j - T_{Bj}) - (l_i^j + T_{Aj}) \\ x &= (l_i^j + T_{Aj}) - (t_{i-1}^j - T_{Bj}) \end{aligned} \quad [12.35]$$

donde y es el tiempo de parada del tren i en la estación j , expresado como diferencia de tiempo de cerrar puertas menos tiempo de abrir puertas. El valor de x es la diferencia entre el tiempo de detención del tren i en la estación j y el tiempo de arranque del tren anterior de dicha estación, que da el tiempo de ocupación por viajeros del andén (ver apartado 12.2.3). T_A y T_B convierten medidas de llegada a estación (l) y medidas de salida de estación (t) en instantes de apertura y cierre de puertas, respectivamente.

La expresión [12.35] es válida cuando el tiempo de parada en estación ha sido determinado por el tiempo de carga y descarga de pasaje, esto es, cuando el tren no ha sido retenido por los sistemas de protección ni como estrategia de regulación. Esta expresión tampoco es válida si el tren está saturado de pasaje, ya que en este caso el tiempo de parada no depende del tiempo en que pasó por la estación el tren anterior. El algoritmo de promediado sólo considera como medidas válidas aquellas en que se estime que no ocurren estas circunstancias, estableciendo un tiempo de parada máximo por estación por encima del cual no se actualiza el parámetro.

Se define A_α como la componente de la función \mathbf{A} [12.30] que actualiza los parámetros α para cada estación. Depende del vector de estado $\mathbf{X}(t_k)$ y del vector de medidas de tiempos de llegada $\mathbf{Q}(t_k)$. Particularizada cuando se produce una medida de tiempo de salida del tren i de la estación j se expresa como:

$$\alpha_j(t_k) = A_\alpha(\tau_i(t_k), \pi_i(t_k), \omega_i(t_k)) \quad [12.36]$$

donde:

$\tau_i(t_k)$: último tiempo de salida del tren i , componente del vector de estado $\mathbf{X}(t_k)$. En la expresión [12.35], es el tiempo de salida t_i^j .

$\pi_i(t_k)$: último tiempo de salida de la estación donde se ha medido $\tau_i(t_k)$ del tren i , componente del vector de estado $\mathbf{X}(t_k)$. En la expresión [12.35], es el tiempo de salida del tren anterior t_{i-1}^j .

$\omega_i(t_k)$: último tiempo de llegada del tren i , componente del vector de medidas $\mathbf{Q}(t_k)$. En la expresión [12.35], es el tiempo de llegada l_i^j .

Parámetro λ . Factor de marcha asociado a un tren

En el apartado 12.4.1 se modeló el tiempo de marcha de un tren entre dos estaciones cuando su movimiento no es perturbado por los sistemas de protección como:

$$r_i^j = \lambda_i^m R_j^m \quad [12.37]$$

donde r_i^j es el tiempo de recorrido del tren i entre las estaciones j a la $j+1$, R_j^m es el parámetro tiempo de recorrido nominal entre las estaciones j a la $j+1$ con marcha m , y λ_i^m es el parámetro factor de marcha asociado al tren i cuando toma la marcha m .

La expresión [12.37] es válida si el tren no frena por estar demasiado cerca del tren que le precede en la línea. Cuando el tiempo de recorrido supera un tiempo máximo establecido para cada interestación, se considera que han actuado los sistemas de protección del tren, y no se actualiza el parámetro.

Cuando el sistema de tracción de un tren responde nominalmente, su factor de marcha vale la unidad para todas las marchas. Si el tiempo de recorrido medido en una interestación para el tren difiere apreciablemente del estimado según el modelo anterior, puede ser motivado por:

- Avería del tren. En este caso se volverán a medir errores de predicción de tiempo de marcha en las siguientes estaciones, cuyo valor permitirá un nuevo ajuste del parámetro λ . La sucesión de experimentos asociados a este parámetro es la medida de tiempo de recorrido para el tren por las estaciones.
- Variaciones sistemáticas de la tensión de alimentación. En este caso, afecta a todos los trenes. Los próximos trenes que pasen por la estación volverán a marcar una error de predicción de tiempo de recorrido aproximadamente igual, que permitirá ajustar el parámetro R asociado a la estación. La sucesión de experimentos asociados a este parámetro es la medida del tiempo de recorrido en una interestación de los trenes que van pasando.

Cada vez que un tren llega a una estación y se mide un tiempo de recorrido se actualiza el parámetro λ del tren como si fuera el responsable del error de predicción, tomando el parámetro R como una constante. A continuación se actualiza el parámetro R como si él fuera el responsable del error, tomando λ como una constante. Cuando se produce una variación de comportamiento de un tren o de la tensión de red, y se toma el suficiente número de medidas, se alcanza un nuevo equilibrio entre los parámetros.

Para el parámetro λ_i^m asociado al tren i y a la marcha m , el modelo definido en la fórmula [12.31] se escribe como:

$$y = \lambda_i^m x$$

$$y = l_i^{j+1} - t_i^j$$

$$x = R_j^m$$

[12.38]

donde y es el tiempo de recorrido entre las estaciones j y $j+1$, medido como diferencia entre el instante de llegada del tren i a la estación $j+1$ y la salida del mismo tren de la estación anterior j .

Se define A_λ como la componente de la función \mathbf{A} [12.30] que actualiza los parámetros λ para cada tren. Depende del vector de estado $\mathbf{X}(t_k)$, del vector de medidas de entrada en estación $\mathbf{Q}(t_k)$, del vector de mandos $\mathbf{U}(t_{k-1})$ y del vector de parámetros $\mathbf{p}(t_{k-1})$. Particularizada cuando se produce una medida de tiempo de entrada del tren i en la estación $j+1$ se expresa como:

$$\lambda_i^m(t_k) = A_\lambda(\tau_i(t_k), \omega_i(t_k), u_{Ri}(t_{k-1}), R_j^m(t_{k-1}))$$

[12.39]

donde:

- $\tau_i(t_k)$: último tiempo de salida del tren i , componente del vector de estado $\mathbf{X}(t_k)$. En la expresión [12.38], es el tiempo de salida t_i^j .
- $\omega_i(t_k)$: último tiempo de llegada del tren i , componente del vector de medidas $\mathbf{Q}(t_k)$. En la expresión [12.38], es el tiempo de llegada l_i^{j+1} .
- $u_{Ri}(t_{k-1})$: orden de marcha vigente del tren i , componente del vector de mando $\mathbf{U}(t_{k-1})$. En la expresión [12.38], es la marcha m dada al tren.
- $R_j^m(t_{k-1})$: tiempo de recorrido nominal para la interestación j y marcha m , componente del vector de parámetros $\mathbf{p}(t_{k-1})$. En la expresión [12.38], es la constante R_j^m .

Parámetro R . Tiempo de recorrido nominal de una interestación

Cada vez que un tren llega a una estación $j+1$ con marcha m se actualiza el parámetro de tiempo de recorrido R_j^m . El modelo [12.31] para el promediado correspondiente se escribe como:

$$\begin{aligned} y &= R_j^m x \\ y &= l_i^{j+1} - t_i^j \\ x &= \lambda_i^m \end{aligned}$$

[12.40]

donde y es el tiempo de recorrido entre las estaciones j y $j+1$, medido como diferencia entre el instante de llegada del tren i a la estación $j+1$ y la salida del mismo tren de la estación anterior j .

Las condiciones en que una medida de tiempo de recorrido provoca la actualización del parámetro R son las mismas que las descritas acerca del parámetro λ .

Se define A_R como la componente de la función \mathbf{A} [12.30] que actualiza los parámetros R para cada tren. Depende del vector de estado $\mathbf{X}(t_k)$, del vector de medidas de entrada en estación $\mathbf{Q}(t_k)$, del vector de mandos $\mathbf{U}(t_{k-1})$ y del vector de parámetros $\mathbf{p}(t_{k-1})$. Particularizada cuando se produce una medida de tiempo de entrada del tren i en la estación $j+1$ se expresa como:

$$R_j^m(t_k) = A_\lambda(\tau_i(t_k), \omega_i(t_k), u_{Ri}(t_{k-1}), \lambda_i^m(t_{k-1}))$$

[12.41]

donde $\tau_i(t_k)$, $\omega_i(t_k)$ y $u_{Ri}(t_{k-1})$ se obtienen de igual modo que en la fórmula [12.39], y $\lambda_i^m(t_{k-1})$ es la componente del vector de parámetros $\mathbf{p}(t_{k-1})$ de factor de marcha del tren i entre las estaciones j y $j+1$ con marcha m .

12.5.2 Ajuste de los factores de olvido

El factor de olvido λ del algoritmo de promediado está relacionado con la constante de tiempo del filtro exponencial asociado por la fórmula [12.33]. Despejando de esta ecuación el factor de olvido:

$$\lambda = e^{-\frac{T}{\tau}}$$

[12.42]

donde T es el período de toma de muestras del experimento asociado al parámetro promediado y τ la constante de tiempo del filtro.

La constante de tiempo τ se puede interpretar como una ventana de tiempo exponencial en la que se promedian las medidas, dentro de la cual se considera que el parámetro no varía significativamente. A continuación se describe para cada parámetro el cálculo del período y la constante de tiempo asociados.

Parámetro α Tiempo de carga y descarga de viajeros

El período T_α de paso de trenes por una estación se aproxima por el intervalo de circulación objetivo de trenes en la línea.

La ventana temporal en la que no cambia significativamente el ritmo de afluencia de viajeros a estación, τ_α , depende de la línea ferroviaria en concreto, y típicamente vale unos 20 minutos.

Parámetro λ Factor de marcha asociado a un tren

El período T_λ de paso de un tren por estación vale en promedio el tiempo de vuelta a la línea dividido entre el número de estaciones.

El cambio del factor de marcha asociado a un tren puede producirse por un fallo brusco del equipo de tracción. Sin embargo, este fallo puede ser puntual, y sólo debe provocar un cambio del valor del parámetro correspondiente si el error en tiempo de recorrido que provoca se repite en las siguientes estaciones. Se ha elegido una

ventana de promediado que contenga las cinco últimas medidas, que daría una constante τ_λ cinco veces mayor que el período T_λ .

Parámetro R . Tiempo de recorrido nominal de una interestación

El período T_R de paso de un tren por estación es el mismo que T_λ .

El valor de la ventana de tiempo τ_R depende del ritmo de variaciones significativas y sistemáticas de la tensión de alimentación de la línea en concreto. La variación de tensión suele estar directamente relacionada con el número de trenes en línea, que varía típicamente cada una o dos horas.

12. Modelado y diseño del sistema de control	207
12.1 Medidas y mandos	207
12.2 Modelo simplificado basado en eventos	209
12.2.1 Definición de las variables de estado	210
12.2.2 Función de estado	212
12.2.3 Cálculo del tiempo de recorrido de una etapa	213
12.2.4 Parámetros del modelo	218
12.3 Control a medio plazo	220
12.3.1 Planteamiento del problema de control óptimo	220
12.3.2 Ciclo de recálculo de trayectorias. Adelanto de medidas.	222
12.3.3 Horizonte de optimización	223
12.4 Control a corto plazo	224
12.4.1 Tiempos de recorrido alcanzables en una etapa	225
12.4.2 Selección de mando por el control a corto plazo	226
12.5 Algoritmo de estimación de parámetros	227
12.5.1 Experimentos asociados a cada parámetro	229
12.5.2 Ajuste de los factores de olvido	233

13. Optimización de trayectorias

En este capítulo se describe el algoritmo de optimización utilizado por el control a medio plazo para calcular las trayectorias de tiempos objetivo de salida de estación para cada tren, que servirán de referencia al control a corto plazo.

13.1 Planteamiento del problema de optimización

En el capítulo 12 se planteó el problema de optimización como:

$$\mathbf{H}^*(\mathbf{X}) = \arg \min \{J(\mathbf{H})\} \quad \mathbf{H} \in \phi(\mathbf{X})$$

[13.1]

donde:

- X**: estado del sistema, definido en el capítulo 12.
- H**: trayectoria de tiempos de salida de cada tren de cada para las próximas n estaciones a partir del estado **X**, donde n es el horizonte de optimización (ver capítulo 12).
- H**^{*}: trayectoria óptima.

$\phi(\mathbf{X})$: conjunto formado por todas las trayectorias posibles, es decir, aquellas que son resultado de aplicar una secuencia de mandos factible sobre el sistema real.

$J(\mathbf{H})$: función objetivo a minimizar. Los criterios que tiene en cuenta se describen en el capítulo 11. La forma concreta de esta función se describe en apartado 13.2.

Para generar trayectorias posibles es necesario simular la evolución del sistema, haciendo uso del modelo de simulación por eventos discretos descrito en el capítulo 12. Utilizar un modelo de simulación como función de evaluación tiene dos inconvenientes:

- No se pueden emplear para resolver el problema de optimización técnicas de programación matemática, que exigen expresiones analíticas de la función de evaluación.
- Cada evaluación lleva un tiempo de cálculo considerable. Es por ello fundamental que el modelo de simulación sea rápido pero suficientemente preciso.

El control a medio plazo limita el tiempo disponible para optimizar una trayectoria a un período de regulación (aproximadamente medio minuto), ya que al final de cada período ha de estar lista una nueva trayectoria óptima. El tiempo de cálculo es el problema principal en el diseño del algoritmo de optimización.

El diseño del algoritmo de optimización persigue encontrar buenas soluciones evaluando el menor número de puntos. Se divide la optimización en cuatro fases consecutivas, utilizando en cada una como punto inicial la solución de la anterior. En cada fase es clave la elección de las variables independientes, que restringen el espacio de búsqueda en las primeras fases y lo amplían en las últimas. Cada espacio de búsqueda restringido tiene, sin embargo, un significado preciso en cuanto al tipo de soluciones que contiene, que permite avanzar rápidamente hacia zonas de buenas soluciones.

Las características generales de la técnica de optimización por búsqueda directa empleada fueron descritas en el capítulo 5, a propósito del problema de optimización *off-line* de la conducción de un tren.

13.2 Función objetivo

En el capítulo 11 se presentaron los criterios que emplea el control a medio plazo para seleccionar la trayectoria de referencia: maximizar la regularidad, minimizar la

molestia al pasaje y minimizar el consumo de energía. Estos tres criterios son frecuentemente contradictorios; por ejemplo, para regularizar rápidamente el intervalo entre trenes sería suficiente con retener a los trenes en las estaciones el tiempo suficiente, pero el coste en molestia al viajero sería excesivo. En este apartado se describe una función objetivo en la que intervienen los tres atributos básicos, normalizados y parametrizados en función de unos pesos que tienen en cuenta la importancia relativa que el explotador del sistema da a cada uno.

La función objetivo (*fob*) tiene la siguiente forma:

$$fob = a (p_Y Y + p_H H + p_T T) + b (p_R R + p_W W) + c C + p_V V \quad [13.2]$$

donde:

- Y*: medida de la regularidad de intervalos a final del plan de regulación.
 - H*: medida del cumplimiento de horarios al final del plan de regulación.
 - T*: medida del cumplimiento de horarios en paso por estaciones cabecera.
 - R*: medida de la regularidad vista por el pasaje durante la aplicación del plan.
 - W*: medida de la molestia al pasaje por retener trenes en estación.
 - C*: medida del consumo de energía durante el plan de regulación.
 - V*: medida de la desviación de la velocidad media de los trenes respecto a la nominal.
- a*: peso asignado a la regularidad de la línea.
 - b*: peso asignado a la molestia al pasaje.
 - c*: peso asignado al ahorro de energía.

p_Y, p_H, p_T, p_R, p_W, p_V: pesos asignados a cada uno de los atributos anteriores.

Nota bibliográfica:

En [Taskin et al, 94] se propone una función objetivo que también incluye términos independientes para penalizar molestia al pasaje y desviaciones de regularidad. La molestia al pasaje se computa teniendo en cuenta el número de viajeros afectados por cada retraso, tanto en las estaciones como a bordo de los trenes. El trabajo presentado es un estudio previo al diseño de un regulador automático para el metro de Londres. Este ferrocarril es de topología compleja, por lo que también existe el problema de conflictos en los nodos de la red. La función objetivo tiene en cuenta indirectamente estos conflictos en la función objetivo, al penalizar desviaciones en el horario en el tránsito por los nodos.

En [Campion, 85] se emplea una función objetivo que penaliza durante todo el plan la media de las desviaciones cuadráticas de horario, de intervalo y el mando aplicado. Los tres términos se ponderan mediante pesos. Esta función es apropiada para aplicar técnicas de control óptimo cuadrático. No se penaliza de forma diferente la regularidad alcanzada al final del plan de regulación y los costes del transitorio.

La función objetivo tiene dimensión de tiempo (segundos). Los pesos son adimensionales, excepto el correspondiente al consumo *c*, que tiene dimensión de

‘segundos / porcentaje de energía ahorrada’. Cada atributo tiene un valor normalizado, medido como ‘segundos / (tren * estación)’.

Los pesos a , b y c determinan el compromiso global entre regularidad, molestia al pasaje y ahorro de energía. En la herramienta de regulación comercial desarrollada el administrador del sistema elige estos parámetros en función de sus criterios de explotación.

Los pesos p_Y , p_H , p_T , p_R y p_W son fijados en el diseño del regulador, cumpliendo una doble función. En primer lugar, determinan el compromiso entre atributos de regularidad (p_Y , p_H y p_T) y entre atributos de molestia al pasaje (p_R y p_W). En segundo lugar, permiten configurar la función objetivo (y por tanto el regulador) según los distintos tipos de regulación: regulación por intervalo, por horario y mixta (intervalo y horario en estaciones cabecera). Un ejemplo de los valores que tomarían para cada tipo de regulación es el siguiente:

	p_Y	p_H	p_T	p_R	p_W
<i>Regulación por intervalo</i>	1	0	0	1	1
<i>Regulación mixta</i>	1	0	1	1	1
<i>Regulación por horario</i>	0	1	0	1	1

En regulación por intervalo sólo se tiene en cuenta para la regularidad el término de intervalo, en regulación por horario el término de cumplimiento de horario en cada estación, mientras que en la mixta se tienen en cuenta dos atributos (intervalo y cumplimiento de horario en cabeceras). En el ejemplo, los pesos de estos dos últimos atributos son iguales; su ajuste determinará el compromiso en el cumplimiento de los dos objetivos, intervalo y horario.

El atributo V penaliza tiempos de recorrido en interestaciones distintos a los nominales, esto es, penaliza las acciones de control. Su objetivo es que, en ausencia de otros criterios, se elijan conducciones nominales. Su peso correspondiente, p_V , ha de ser claramente más pequeño que el resto, para que influya sólo cuando los demás atributos no deciden. Este atributo proporciona una ligera pendiente a zonas donde la *fo* sería plana (ver apartado 13.4.4).

13.2.1 Curva de penalización

Los atributos Y , H , T , R y W miden errores de tiempo, ya sean desviaciones respecto a un intervalo (Y , R), errores de cumplimiento de horario (H , T , R) o tiempos extra de espera en estación (W). El peso que tiene cada uno de estos atributos en la función objetivo no es lineal, debido a que no puede contribuir de igual forma, por ejemplo, 10 estaciones con 1 minuto de espera frente a 1 estación con 10 minutos de espera.

La contribución a la *foB* de cada atributo temporal lo determina una función de penalización, $g(t)$, en función del error medido en segundos. Esta función (ver Figura 13.1) está compuesta de dos tramos de penalización lineales (penalización pequeña y grande) conectados por un tramo parabólico de la forma $g(t) = A + B t^2$.

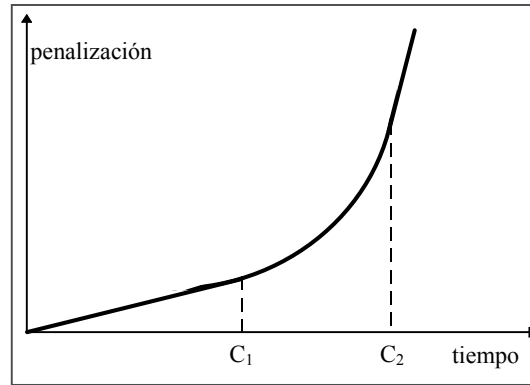


Figura 13.1. Forma general de la función de penalización temporal

La curva está definida por tres parámetros:

- Penalización pequeña, K_{min} . Es el factor que multiplica a errores temporales pequeños.
- Umbral de comienzo de penalización parabólica, C_1 . A partir de este valor temporal se considera que el error es considerable.
- Penalización grande, K_{max} . Es el factor que multiplica a errores temporales muy grandes.

La parábola $A + B t^2$ se calcula imponiendo un empalme de primer orden (valor y derivada) con la recta de penalización pequeña, obteniendo:

$$A = K_{min} \frac{C_1}{2}$$

$$B = \frac{K_{min}}{2C_1}$$

[13.3]

El comienzo de la zona lineal de penalización grande, C_2 , se calcula imponiendo que la parábola empalme suavemente con la recta de fuerte penalización:

$$C_2 = \frac{K_{max}}{2B}$$

[13.4]

La elección de los parámetros que definen la curva de penalización depende en general del atributo a evaluar. El umbral C_l se elige decidiendo para cada uno a partir de cuándo se considera que el error de horario o intervalo es excesivo, o en el caso del atributo de tiempo de espera, a partir de qué tiempo de espera en estación se comienza a molestar al viajero. El parámetro K_{min} se toma igual a la unidad para todos los atributos. Ello permite que, para situaciones no muy perturbadas por debajo de los umbrales C_l , los pesos que multiplican a cada atributo tengan un significado claro relacionando directamente errores de tiempo. El parámetro K_{max} se elige suficientemente alto (unas diez veces K_{min}), ya que el objetivo de la zona de fuerte penalización es simplemente hacer que el algoritmo de búsqueda descienda desde estas zonas rápidamente a las menos penalizadas.

13.2.2 Cálculo de los atributos

En este apartado se describe cómo se calculan los atributos asociados a una trayectoria de tiempos de paso por estación. En el capítulo 12 se definió el vector \mathbf{H}_i , trayectoria para el tren i -ésimo, como:

$$\mathbf{H}_i(\mathbf{X}) = [H_i^{\rho_i+1}, H_i^{\rho_i+2}, \dots, H_i^{\rho_i+n}] \quad [13.5]$$

donde ρ_i es la estación de comienzo de trayectoria para el tren i , n es el número de estaciones que se planifican (horizonte de optimización), y H_i^j es el tiempo planeado de salida del tren i de la estación j .

A continuación se detalla el cálculo de cada atributo en función de estos tiempos de salida.

Regularidad de intervalos al final del plan

El atributo Y se calcula mediante la fórmula:

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_Y(|I_i^{fin} - I_i^{obj}|) \quad [13.6]$$

donde:

- g_Y : función de penalización de errores en intervalo.
- N : número de trenes.
- I_i^{fin} : intervalo del tren i al final del plan de regulación, calculado simulando con conducción nominal desde la última estación del plan para dicho tren (ρ_i+n)

hasta alcanzar al tren que le precede en línea, que estará en la estación ρ_{i-1+n} (ver capítulo 11).

I_i^{obj} : intervalo objetivo del tren i . Es la media de los intervalos anteriores, que puede ser corregido para cada tren por decisión del operador del sistema (ver capítulo 11).

La fórmula anterior proporciona la penalización media del error de intervalo al final del plan.

Cumplimiento de horarios al final del plan

El atributo H se calcula mediante la fórmula:

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_i g_H(|H_i^{\rho_i+n} - T_i^{\rho_i+n}|)$$

[13.7]

donde:

g_H : función de penalización de errores en cumplimiento de horarios.

N : número de trenes.

n : número de estaciones de un plan de regulación (horizonte del plan).

γ_i : variable que vale 1 si el tren es regulado por horario y 0 si no lo es. El regulador contempla trenes que no contribuyen a regularidad por horario ($\gamma_i=0$) pero sí a regularidad por intervalo.

$H_i^{\rho_i+n}$: tiempo de salida del tren i de la última estación del plan para dicho tren.

$T_i^{\rho_i+n}$: tiempo de salida oficial del tren i de la última estación del plan para dicho tren.

La fórmula anterior proporciona la penalización media del error de cumplimiento de horario al final del plan de regulación

Cumplimiento de horarios en paso por estaciones cabecera

El atributo T se calcula mediante la fórmula:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i \frac{\delta_i^{\rho_i+j} \sum_{j=1}^n g_T(|t_i^{\rho_i+j} - T_i^{\rho_i+j}|)}{\sum_{j=1}^n \delta_i^{\rho_i+j}}$$

[13.8]

donde:

g_T : función de penalización de errores en cumplimiento de horarios en estaciones cabecera.

- N : número de trenes.
 n : número de estaciones de un plan de regulación (horizonte del plan).
 γ_i : variable que vale 1 si el tren es regulado por horario y 0 si no lo es.
 $H_i^{\rho_i+j}$: tiempo de salida del tren i de la estación ρ_i+j para dicho tren.
 $T_i^{\rho_i+j}$: tiempo de salida oficial del tren i de la estación ρ_i+j para dicho tren.
 $\delta_i^{\rho_i+j}$: variable que vale 1 si la estación ρ_i+j para el tren i es una estación cabecera y 0 en caso contrario.

El cociente de sumatorios realiza para cada tren la media de las penalizaciones de error en cumplimiento de horario en las estaciones cabecera durante el plan de regulación. La expresión de T se obtiene como media de estas penalizaciones, es decir, es la media de la penalización media por incumplimiento de horario por estación cabecera.

Regularidad vista por el pasaje

Cuando la frecuencia de paso de trenes en una línea es alta se suele ofrecer al pasajero un intervalo máximo de paso de trenes por estación. Cuando la frecuencia de paso de trenes es pequeña, típico de explotación en horario nocturno, en día festivo, o en líneas de baja ocupación, es habitual ofrecer al viajero unos horarios oficiales de paso de trenes por estación. La expresión de la regularidad vista por el pasaje tiene expresiones distintas dependiendo de estas dos formas de ofrecer el servicio.

Cuando se ofrece un intervalo de circulación, el error de intervalo e_i^j para el tren i en la estación j se calcula como:

$$e_i^j = \begin{cases} I_i^j - I_{ofer} & \text{si } I_i^j - I_{ofer} > 0 \\ 0 & \text{si } I_i^j - I_{ofer} \leq 0 \end{cases}$$

[13.9]

donde:

I_i^j : intervalo del tren i respecto al anterior $i-1$ visto en la estación j .

I_{ofer} : intervalo máximo de paso de trenes por estación ofrecido al pasaje.

Sólo se consideran errores en contra del viajero, es decir, intervalos mayores que el ofertado.

Si se ofrece al viajero un horario de salida de estaciones, el error e_i^j de cumplimiento de este horario para el tren i en la estación j se calcula como:

$$e_i^j = H_i^j - T_i^j$$

[13.10]

donde:

H_i^j : tiempo de salida del tren i de la estación j -ésima del plan para dicho tren.

T_i^j : tiempo de salida oficial del tren i de la estación j -ésima del plan para dicho tren.

La expresión anterior mide retrasos en el cumplimiento de horarios. Nunca es negativa, debido a que si el tren está en estación antes de su hora de salida, espera su horario para salir. En este caso, el atributo W penalizará el tiempo de espera extra para los pasajeros que ya están en el tren.

El atributo R se calcula en función del error de regularidad de cada tren como:

$$R = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n g_R(e_i^{\rho_i+j})$$

[13.11]

donde:

g_R : función de penalización de errores de regularidad vistos por el pasaje.

N : número de trenes.

n : número de estaciones de un plan de regulación (horizonte del plan).

Molestia al pasaje por parada extra en estación

El atributo W se calcula mediante la fórmula:

$$W = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n g_W(H_i^{\rho_i+j} - t_{pi}^{\rho_i+j})$$

[13.12]

donde:

g_W : función de penalización por parada extra en estación.

N : número de trenes.

n : número de estaciones de un plan de regulación (horizonte del plan).

$H_i^{\rho_i+j}$: tiempo de salida del tren i de la estación ρ_i+j para dicho tren.

$t_{pi}^{\rho_i+j}$: tiempo del final del proceso de carga y descarga de viajeros del tren i en la estación ρ_i+j , calculado según la fórmula [12.17].

Se calcula el tiempo de parada extra en cada estación como diferencia entre el tiempo de salida previsto por el plan de regulación y el instante en que se podría producir la salida si no hubiera espera extra, una vez terminado el proceso de carga y descarga.

Consumo

El atributo de consumo C se calcula según se describió en el capítulo 11 como:

$$C = 100 \frac{c_T - c_{min}}{c_{min}}$$

[13.13]

donde:

c_T : consumo total de energía durante el recorrido de todos los trenes a lo largo de la trayectoria.

c_{min} : consumo mínimo durante el recorrido de la trayectoria (si todos los trenes circularan con la marcha más lenta).

La contribución al consumo total de un tren en cada interestación de su trayectoria es función del tiempo empleado en recorrerla. Esta contribución se obtiene interpolando linealmente a partir del consumo de las dos marchas cuyos tiempos de recorrido son los más cercanos (superior e inferiormente) al empleado en la trayectoria. La Figura 13.2 representa la curva que proporciona el consumo en una interestación en función del tiempo t empleado en recorrerla.

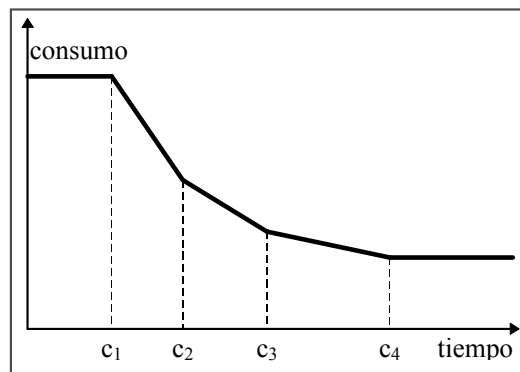


Figura 13.2. Curva de consumo en función del tiempo de recorrido

En el ejemplo de la figura anterior, existen 4 marchas definidas en la interestación, que emplean unos tiempos $\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ y consumen, respectivamente, $\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$.

Desviación respecto a conducción nominal

El atributo V de desviación respecto a conducción nominal se calcula a partir de las diferencias entre tiempos de recorrido nominales y tiempos de recorrido en la trayectoria para cada etapa, es decir, a partir de las acciones de control.

Si la línea se explota por horario, el tiempo nominal de recorrido en cada etapa lo marca dicho horario. La diferencia dif_i^j entre este tiempo y el que impone la trayectoria se expresa para cada tren i a la salida de cada estación j como:

$$dif_i^j = (H_i^j - H_i^{j-1}) - (T_i^j - T_i^{j-1}) \quad [13.14]$$

donde $(H_i^j - H_i^{j-1})$ es el tiempo que marca el horario en recorrer la etapa comprendida entre las estaciones $j-1$ y j , y $(T_i^j - T_i^{j-1})$ es el tiempo empleado por la trayectoria para la misma etapa.

Si la línea se explota por intervalo, el tiempo de recorrido nominal R_n de una etapa se calcula simulando con la marcha nominal vigente elegida por el operador. En esta simulación, el tiempo de parada en estación es debido sólo al pasaje, a partir de la estimación actual de afluencia de viajeros a la estación (ver modelo de parada en capítulo 12). La diferencia dif_i^j entre este tiempo y el que impone la trayectoria se expresa para cada tren i a la salida de cada estación j como:

$$dif_i^j = R_i^j - (T_i^j - T_i^{j-1}) \quad [13.15]$$

donde R_i^j es el tiempo de recorrido a marcha nominal entre las estaciones $j-1$ y j , y $(T_i^j - T_i^{j-1})$ es el tiempo empleado por la trayectoria para la misma etapa.

Calculados los tiempos de control dif para cada etapa de la trayectoria según el tipo de explotación, el atributo V de desviación respecto a conducción nominal se calcula como:

$$V = \frac{1}{Nn} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n |dif_i^{\rho_i+j}| \quad [13.16]$$

donde N es el número de trenes y n el número de estaciones del plan de regulación.

La expresión anterior es la media de los valores absolutos de las desviaciones de tiempo respecto al nominal de todas las etapas recorridas en el plan de regulación.

13.3 Generación de trayectorias posibles

En el capítulo 12 se definió una trayectoria posible como aquella cuyos tiempos de paso por estación se obtienen de aplicar al sistema real una secuencia de mandos factible. El módulo de optimización del control a corto plazo generará trayectorias posibles mediante simulación, utilizando el modelo por eventos discretos descrito en el capítulo 12.

En la Figura 13.3 se representan los tiempos de recorrido alcanzables de un tren en una etapa, que comprende el tiempo de marcha del tren mas el tiempo de parada en la estación destino. El tiempo t_{m0} corresponde al empleado cuando el tren circula con la marcha más rápida y no se le retiene por regulación en la estación destino. El tiempo t_{m1} corresponde a cuando el tren circula con la marcha más lenta y no se le retiene. Por último, el tiempo t_{max} es el máximo empleado cuando la marcha es la más lenta y se retiene al tren el máximo permitido por regulación. El tiempo comprendido entre t_{m0} y t_{m1} es el margen de tiempos en que se controla sólo eligiendo marcha, sin efectuar retención; el tiempo comprendido entre t_{m1} y t_{max} es el margen de control mediante retención en estación, donde la marcha es siempre la más lenta.

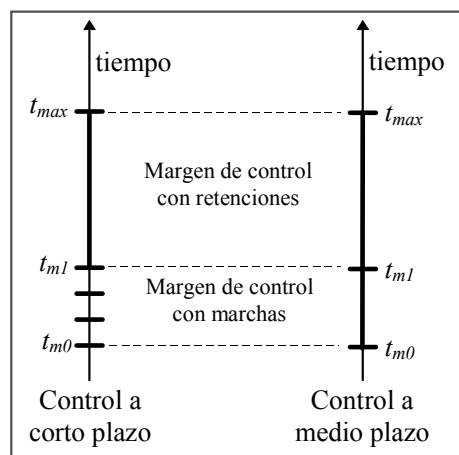


Figura 13.3. Tiempos alcanzables en una etapa en controles a corto y medio plazo

El margen de tiempos controlado mediante marchas es discreto, debido a que existe un número discreto de marchas disponibles. El control a corto plazo debe elegir aquella que más se acerque al tiempo objetivo. Sin embargo, el control a medio plazo considera este margen como un continuo de tiempos alcanzables, por las siguientes razones:

- Es cómodo para generar trayectorias y para el algoritmo de optimización considerar que en cada etapa son alcanzables todos los tiempos dentro de un intervalo temporal, que va de t_{m0} a t_{max} .

- El sistema puede seguir con suficiente precisión la trayectoria de referencia aunque en el cálculo de ella no se haya considerado la discretización. Esto se debe a que el error de tiempo de recorrido que se produce en una estación se tiende a compensar en las siguientes estaciones por el control a corto plazo, cuyas referencias son tiempos absolutos de paso de trenes por estación.
- El error de discretización es del mismo orden que el ruido típico en el tiempo de recorrido de una etapa (3 segundos). Por ello no merece la pena optimizar con marchas discretas, ya que muy probablemente la sucesión de marchas que elija en la realidad el control a corto plazo será distinta por correcciones debidas al ruido. Es preferible que el control a medio plazo no vea esta restricción, y que el control a corto plazo corrija los errores sin conocer si se deben a la discretización de las marchas o al ruido propio del sistema.

El algoritmo de optimización no genera trayectorias posibles simulando secuencias de mandos a lo largo del plan de regulación, sino imponiendo un tiempo de recorrido objetivo en cada etapa a recorrer. El módulo básico de simulación que se emplea calcula el tiempo de recorrido de una etapa (t_r) en función de un tiempo de recorrido objetivo (z), que actúa de variable independiente generadora de la trayectoria.



Figura 13.4. Módulo básico de simulación de etapa

La Figura 13.4 esquematiza este módulo, que calcula el tiempo de recorrido de etapa t_r en función del tiempo objetivo z y del estado de la línea al comienzo del recorrido de la etapa X .

El tiempo objetivo de la etapa no está restringido. El algoritmo de optimización puede generar y evaluar trayectorias imponiendo tiempos objetivo cualesquiera. El módulo de simulación se encarga de convertir esos tiempos objetivo en trayectorias posibles. Si el tiempo objetivo es mayor que el máximo alcanzable, el tiempo simulado siempre valdrá este máximo; si el tiempo objetivo es menor que el mínimo, el tiempo simulado se saturará al mínimo.

El módulo de simulación de etapa se construye a partir del modelo de tiempo de recorrido descrito en el capítulo 12. Es suficiente con calcular los tiempos alcanzables máximo y mínimo, utilizando la función de tiempo de recorrido con los mandos correspondientes. Cualquier tiempo objetivo que caiga dentro de este margen

de control es alcanzable, y por tanto el tiempo de recorrido es igual al tiempo objetivo.

Para generar una trayectoria completa, compuesta por un horizonte de tiempos de paso de n estaciones para cada tren, es necesario imponer un tiempo objetivo para cada etapa.

Se define un vector de tiempos objetivo \mathbf{O}_i del tren i -ésimo como:

$$\mathbf{O} = [O_i^{\rho_i+1}, O_i^{\rho_i+2}, \dots, O_i^{\rho_i+n}] \quad [13.17]$$

donde O_i^j es el tiempo objetivo del tren i en la etapa j y ρ_i es la variable de estado última estación de paso del tren i .

El conjunto \mathbf{O} , formado por los vectores \mathbf{O}_i para cada tren, contiene todos los tiempos objetivo necesarios para generar una trayectoria:

$$\mathbf{O} = \{\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \dots, \mathbf{O}_N\} \quad [13.18]$$

donde N es el número de trenes en línea.

La función \mathbf{G} genera a partir de un estado \mathbf{X} una trayectoria \mathbf{H} (definida en el capítulo 12) en función de un conjunto de tiempos objetivo \mathbf{O} :

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}, \mathbf{O}) = \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{O}) \quad [13.19]$$

La función \mathbf{G} se obtiene directamente del modelo de simulación por eventos descrito en el capítulo 12, utilizando para calcular el tiempo de recorrido de cada etapa el módulo de simulación ya descrito. Este módulo incluye el comportamiento del control a corto plazo.

13.4 Algoritmo de optimización

El proceso de optimización se compone de cuatro fases consecutivas. La primera calcula un punto inicial a partir de los errores temporales de cada tren. Las otras tres realizan optimizaciones partiendo de la solución de la fase anterior. Cada fase se

caracteriza por sus variables independientes, elegidas de tal forma que poseen un significado claro, proporcionando a cada fase un objetivo determinado.

El algoritmo de optimización utilizado es el mismo en todas las fases, y consiste en una adaptación del algoritmo de Hooke & Jeeves. Las características básicas de este algoritmo se encuentran en el capítulo 5, y su funcionamiento se describe en detalle en el apéndice 2.

Se va a describir en primer lugar el cálculo del error temporal de cada tren a comienzo del plan de regulación, que coincide con la corrección total a aplicar en el cálculo del punto inicial en la primera fase.

En segundo lugar se van a describir todas las variables independientes utilizadas en las distintas fases. Se han elegido de forma que las variables que no se utilizan en una fase toman valor nulo, permitiendo tener una sola función de evaluación. Se establecerá cómo se obtiene el conjunto de tiempos objetivo \mathbf{O} a partir de las variables independientes, paso intermedio para conocer la trayectoria \mathbf{H} que se desea evaluar.

Por último, se describen las fases de optimización en sí, concretando qué variables son utilizadas y el objetivo de cada fase.

13.4.1 Cálculo de la corrección inicial de cada tren

Se define tiempo de corrección total de un tren, b , como el retraso (si es positivo) o adelanto (si es negativo) que se desea aplicar sobre el tren en todo el plan de regulación. Se mide con respecto al tiempo de recorrido nominal total del tren en el plan. Para cada etapa, el tiempo de recorrido nominal, t_0 , depende del tipo de explotación del sistema:

- En explotación por intervalo, t_0 es la suma del tiempo de marcha nominal del tren en la etapa más el tiempo de parada en estación necesario para carga y descarga, suponiendo que el intervalo respecto al tren que le precede es el nominal.
- En explotación por horario o mixta, t_0 lo determina la diferencia de tiempos de salida oficiales de las dos estaciones que comprende la etapa.

El tiempo de recorrido nominal total para cada tren es la suma de los tiempos nominales de las etapas que recorre el tren en el plan. La corrección total será nula cuando el tren recorra las estaciones del plan en el tiempo nominal, aunque en cada etapa pueda no emplear el tiempo nominal de etapa.

En la primera fase se calcula para cada tren una corrección total inicial b_0 . Esta corrección se calcula haciéndola igual al error temporal que tiene cada tren al comienzo del plan de regulación. Si durante el plan se compensaran completamente estos errores, el estado de regulación al final sería óptimo. No se tiene en cuenta el transitorio, tan sólo se busca una solución que tienda a regularizar el servicio.

El cálculo de los errores temporales depende del tipo de explotación. En explotación por horario, el error asignado a cada tren es el que se produce en la última salida de estación para cada uno, respecto al horario de salida oficial en la estación. La corrección del tren i -ésimo se expresa como:

$$b_{0i} = t_i^{\rho_i} - T_i^{\rho_i}$$

[13.20]

donde $t_i^{\rho_i}$ es el último tiempo de salida conocido del tren i (estación ρ_i) y $T_i^{\rho_i}$ es el tiempo oficial de salida del tren en esa estación.

En explotación por intervalo, el cálculo de errores temporales es más delicado. Se realiza en cinco pasos:

- 1 Cálculo del intervalo y_i asociado a cada tren i al comienzo del plan. Este intervalo no es el medido, sino el estimado cuando cada tren alcance al que le precede con conducción nominal. En el capítulo 11 se estudian las ventajas de este intervalo, y se detalla su cálculo.
- 2 Cálculo de las distancias temporales d_i de cada tren respecto al primero tomado como referencia, mediante la fórmula (ver Figura 13.5, para $N=4$):

$$\begin{aligned} d_1 &= 0 \\ d_2 &= y_1 \\ d_3 &= y_1 + y_2 \\ &\dots \\ d_N &= \sum_{i=1}^{N-1} y_i \end{aligned}$$

[13.21]

- 3 Cálculo de las distancias temporales ideales D_i , suponiendo que el tren de referencia no tiene error. Para ello, se va distanciando en tiempo cada tren un intervalo medio más que el tren que le sigue. El intervalo medio I_0 es la media de los intervalos y_i . Las distancias ideales se calculan como:

$$\begin{aligned}
 D_1 &= 0 \\
 D_2 &= I_0 \\
 D_3 &= 2I_0 \\
 &\dots \\
 D_N &= (N-1)I_0
 \end{aligned}$$

[13.22]

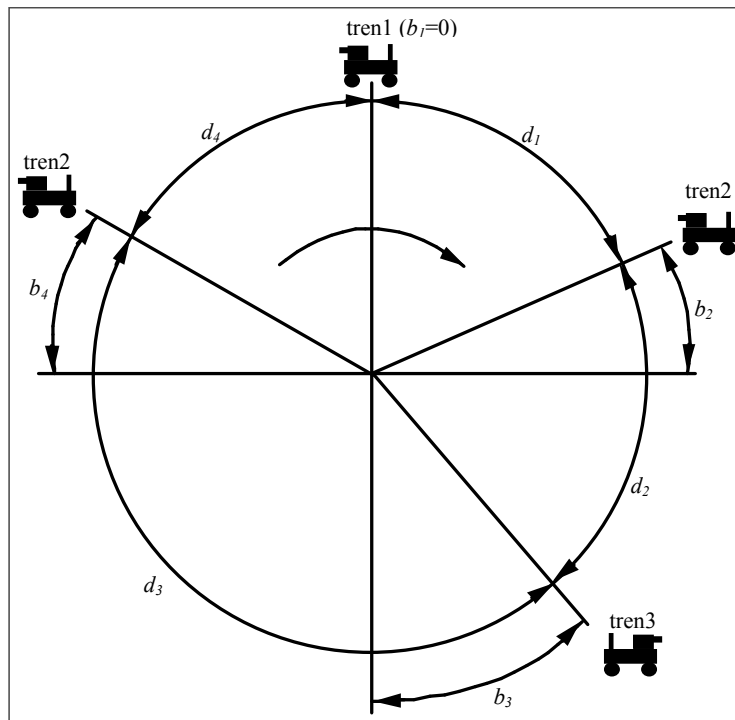


Figura 13.5. Cálculo de errores de intervalo

- 4 Cálculo de la corrección b como el error de intervalo de cada tren, diferencia entre el distanciamiento temporal y el ideal para cada tren (ver Figura 13.5):

$$b_i = d_i - D_i$$

[13.23]

- 5 Normalización de la corrección. A las correcciones b_i calculadas anteriormente se les puede sumar o restar una constante arbitraria B , ya que lo importante es conservar la diferencia de correcciones entre trenes, al considerar sólo intervalos relativos. Esto es equivalente a retener a todos los trenes un mismo tiempo; todos se retrasan, pero el intervalo relativo se conserva. Para normalizar se va a tomar una constante B tal que un tren quede con error nulo y los demás queden positivos (ver Figura 13.6):

$$B = \min(b_i) \quad i=1,2,\dots,N$$

[13.24]

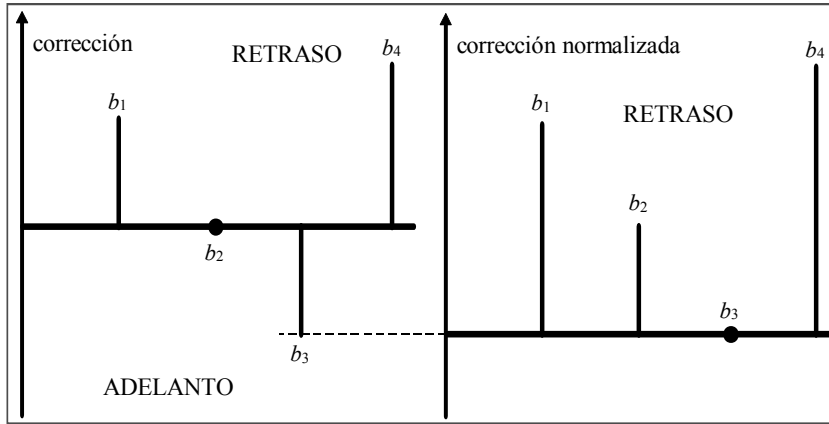


Figura 13.6. Normalización de errores de intervalo

13.4.2 Variables independientes

Las variables independientes que afectan a un tren determinan el tiempo de recorrido objetivo que ha de cumplir en cada etapa del plan de regulación. Este tiempo objetivo es igual al tiempo de recorrido nominal para esa etapa más la corrección temporal a aplicar al tren en la etapa:

$$O_i^j = t_0^j + z_i^j$$

[13.25]

donde O_i^j es el tiempo objetivo del tren i en la etapa j , t_0^j es el tiempo nominal de recorrido de la etapa j , y z_i^j es la corrección a aplicar al tren i en la etapa j . La suma de las correcciones del tren i durante las etapas del plan es igual a la corrección total a aplicar, b_i :

$$b_i = \sum_{j=1}^n z_i^{\rho_i+j}$$

[13.26]

donde n es el número de etapas y ρ_i la estación inicial del plan para el tren i .

Existen tres grupos de variables independientes, que están relacionadas con las tres optimizaciones que se realizarán. Estos grupos son la corrección global, la corrección individual y el reparto.

Corrección global t_g

Es una sola variable, que afecta por igual a todos los trenes. Decrementa con su valor la corrección total b_i a aplicar a cada tren en el plan.

Corrección individual t_b

Se define una variable de este tipo por tren. Incrementa con su valor la corrección total de cada tren. Teniendo también en cuenta la variable t_g , la corrección total b_i para el tren i se calcula como:

$$b_i = b_{0i} - t_g + t_{bi} \quad [13.27]$$

donde b_{0i} es la corrección total inicial del tren i calculada en el apartado anterior.

Variable de reparto r

Se define una variable de este tipo por tren. Determina para cada uno cómo se reparte la corrección total b de un tren en correcciones individuales z en cada etapa del plan, cumpliendo la restricción de la fórmula [13.26]. La fórmula que fija este reparto para obtener la corrección en la etapa j del plan para el tren i es la siguiente:

$$z_i^{\rho_i+j} = (r_i + 1 - \frac{2r_i}{n} j) \frac{b_i}{n} = f_R(r_i, j) \frac{b_i}{n} \quad [13.28]$$

donde r_i es la variable independiente, n es el número de etapas del plan, ρ_i la estación inicial del plan para el tren i y f_R un factor de reparto.

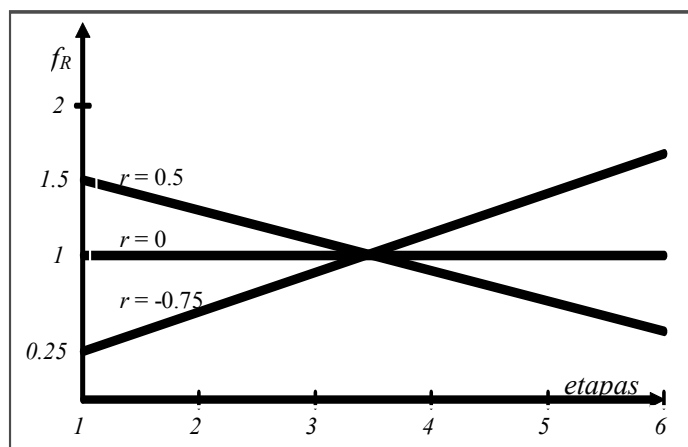


Figura 13.7. Factor de reparto para distintos valores de la variable r

El cociente b_i/n representa la corrección a aplicar en una etapa si se repartiera la corrección total en todas las etapas por igual. En la fórmula aparece multiplicado este cociente por un factor de reparto f_R (ver Figura 13.7), que es una recta que vale la unidad justo a la mitad del plan ($n/2$) y su ordenada en el origen vale $(1+r_i)$. Cuando $r_i = 0$, $f_R = 1$, y la recta es horizontal; el reparto es igual en todas las etapas. Si $r_i > 0$, las correcciones son mayores que la media en las primeras estaciones del plan, y van disminuyendo hasta ser menores en la segunda mitad del plan; si $r_i < 0$ ocurre lo contrario. Por simetría de la recta de reparto, la suma de las correcciones aplicadas en cada etapa para un tren es igual a la corrección total a aplicar en el plan para dicho tren.

Repartir la corrección total en etapas con una sola variable por tren hace disminuir drásticamente el número de soluciones posibles en la optimización de la trayectoria. Se consideran sólo aquellas soluciones en las que cada tren tiende a ganar tiempo o a perderlo linealmente con el número de etapas recorridas. Esta restricción no es un problema, ya que se genera suficiente riqueza de repartos de correcciones variando r . La ventaja, además de reducir el número de variables independientes, es que no serán consideradas (ni evaluadas) conducciones erráticas, en las que un tren, por ejemplo, corre en una etapa y pierde tiempo en la siguiente.

13.4.3 Fases de la optimización

El proceso de optimización se divide en cuatro fases consecutivas:

1. Cálculo del punto inicial
2. Optimización de la velocidad global del carrusel de trenes
3. Optimización de las correcciones totales de cada tren en el plan
4. Optimización conjunta del reparto de las correcciones por etapas y la corrección total de cada tren

A continuación se detalla cada fase.

Fase 1. Cálculo del punto inicial

Para calcular el punto inicial se asigna a cada tren una corrección total igual a su error temporal. El cálculo de estas correcciones iniciales se detalló en el apartado 13.4.1, dependiendo de si la explotación se realiza por horario o intervalo. La corrección b_i se expresa como:

$$b_i = b_{0i}$$

[13.29]

donde b_{0i} es la corrección total inicial de cada tren. Teniendo en cuenta la expresión de la corrección total en función de las variables independientes t_g y t_{bi} (fórmula [13.27]), se obtiene que estas variables son nulas para el punto inicial.

El reparto de la corrección total de cada tren en las etapas del plan se supone plano, es decir, todas las etapas han de corregir una misma cantidad. Esto significa que las variables de reparto r para cada tren (ver apartado anterior) también son nulas.

Fase 2. Optimización de la velocidad global

En la segunda fase se realiza una optimización de la variable de corrección global t_g . El resto de variables permanecen nulas. Las soluciones que se consideran tienen entonces las siguientes propiedades:

- Por ser nulas las variables t_b de corrección individual de cada tren, las diferencias de correcciones entre trenes permanecen constantes. Esto significa que todas las soluciones tratan de mantener el mismo intervalo de circulación entre trenes.
- Por ser nulas las variables r de reparto de todos los trenes, se consideran repartos de correcciones planos.

Al modificar la variable t_g se incrementa o decrementa en una misma cantidad la corrección total de cada tren, que significa que todos los trenes han perdido o ganado durante el plan un mismo tiempo respecto a la solución inicial. En esta primera fase se optimiza por tanto la velocidad global de carrusel, manteniendo constante la velocidad relativa entre trenes.

En la Figura 13.8 se representa cómo se modifican las correcciones b de cada tren al variar t_g (a partir de las correcciones normalizadas de la Figura 13.6). Se puede interpretar como una optimización del origen de referencia de las correcciones.

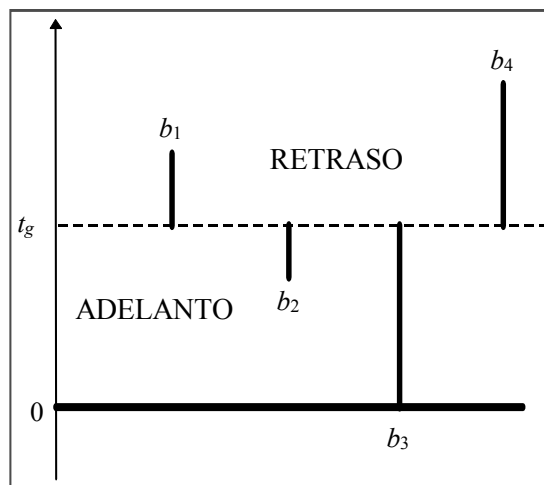


Figura 13.8. Optimización de la velocidad global del carrusel

Fase 3. Optimización de las correcciones individuales

En la tercera fase permanece constante el valor obtenido en la fase anterior de la variable de corrección global t_g . Las variables que se optimizan son las correcciones individuales t_b de cada tren. Las variables r de reparto de correcciones permanecen nulas en esta fase, es decir, se consideran repartos planos a lo largo del plan. El resultado es que la corrección total b_i de cada tren se modifica en la misma cantidad que su variable individual t_{bi} :

$$b_i = b_{0i} - t_g + t_{bi}$$

[13.30]

Al permitir que cada tren modifique individualmente su corrección total, se pretende que cada uno se retrase o adelante en el plan siguiendo objetivos locales en la línea, como son cumplir el horario en determinada estación o encontrar un buen equilibrio individual entre cumplimiento de intervalo, molestia al viajero y consumo.

Para que esta fase sea eficiente es necesario que parta de un buen punto inicial, proporcionado por la fase anterior. De otra forma el tiempo de cálculo sería excesivo, y el riesgo de caer en un mínimo local sería alto.

La Figura 13.9 esquematiza la búsqueda de soluciones en la tercera fase, modificando las correcciones totales de cada tren a partir de la solución de la fase anterior mostrada en la Figura 13.8. El tren primer tren incrementa su corrección respecto a la fase anterior, y los demás la disminuyen, es decir, aumentan su velocidad.

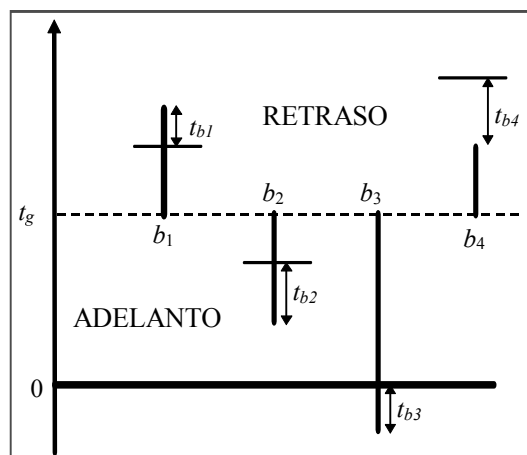


Figura 13.9. Optimización de la corrección individual

Fase 4. Optimización del reparto de las correcciones

En la última fase permanece constante la corrección global t_g obtenida en la segunda fase, y se consideran como variables independientes la corrección individual b y el reparto r para cada tren.

El valor inicial de las variables de corrección individual es el obtenido en la fase anterior, mientras que las variables de reparto comienzan valiendo cero, es decir, el reparto de correcciones en las distintas etapas comienza siendo plano.

El objetivo de esta fase es, partiendo de las correcciones totales para cada tren obtenidas en la fase anterior, alcanzar un nuevo equilibrio donde cada corrección puede ser administrada de forma diferente en cada etapa. De nuevo es importante comenzar la optimización en un buen punto, es decir, con unas buenas correcciones iniciales. Si se lanzara esta optimización antes de disponer de este punto inicial, por ejemplo antes de la tercera fase, se estaría perdiendo tiempo en optimizar repartos de óptimos provisionales cuyas correcciones totales no son suficientemente buenas. Es importante optimizar primero las variables que cualitativamente definen la estrategia de control global, las correcciones, para afinar en la siguiente fase introduciendo las variables que definen la forma concreta de ser aplicadas, el reparto por etapas.

El espacio de búsqueda de la optimización de las correcciones totales en la tercera fase está formado por soluciones cualitativamente distintas en cuanto al estado final del plan de regulación. No se consideran transitorios alternativos que lleven a las mismas correcciones totales. En la tercera fase se obtiene por tanto la solución que mejor regulariza el sistema al final del plan. En la cuarta fase se amplía el espacio de búsqueda para optimizar también la forma de aplicar las correcciones, es decir, se optimiza fundamentalmente el transitorio.

En la primera optimización hay una sola variable independiente, en la segunda tantas como trenes en línea, y en la tercera el doble que trenes. Es importante que el número de variables no dependa del número de etapas del horizonte de optimización, pues de otra forma dicho horizonte tendría una limitación adicional al aumentar rápidamente el tiempo de cálculo de los algoritmos. Este problema existiría si se tomaran como variables independientes directamente el mando a aplicar en cada etapa, cuyo número aumentaría con el número de etapas.

Una ventaja adicional de descomponer la optimización en fases es que desde muy pronto se dispone de un óptimo provisional aceptable. Cada fase mejora el óptimo de la fase anterior, pero todos ellos responden a una estrategia sensata. Si el tiempo de cálculo del óptimo se agota sin que los algoritmos hayan finalizado, siempre hay un buen óptimo provisional que puede aplicarse.

13.4.4 Tratamiento de las saturaciones

El módulo básico de simulación del tiempo de recorrido t_r de una etapa depende del tiempo objetivo O marcado en la misma. Como se discutió en el apartado 13.3, los tiempos de recorrido alcanzables son para cada etapa un intervalo $[t_{m0}, t_{max}]$ (en función del estado de la línea en el momento de recorrerla). Los tiempos objetivo

fuera de este intervalo no se cumplen, y el tiempo de recorrido simulado queda saturado al valor extremo correspondiente. Si consideramos ahora el plan de regulación completo para cada tren, el tiempo objetivo total de recorrido del plan viene determinado por el tiempo de corrección total b sumado al tiempo nominal de etapa. Estas correcciones se cumplen completamente mientras permanezcan dentro de un intervalo $[b_{m0}, b_{max}]$, que se obtiene a partir del intervalo alcanzable de cada etapa.

El óptimo encontrado por la segunda fase, en la que se optimiza la variable t_g de corrección global, contiene típicamente trenes cuyas correcciones se encuentran saturadas. Por ejemplo, si el carrusel de trenes debe correr para recuperar tiempo, el algoritmo disminuye t_g mientras la función objetivo sea sensible a este cambio, es decir, hasta que el último tren agote su capacidad de recuperar tiempo. En este momento, el resto de los trenes se encuentran ya saturados. En la Figura 13.10 se esquematiza este ejemplo, donde aparecen representadas en barras las correcciones totales en el plan. Las correcciones son negativas, ya que los trenes recuperan tiempo, y el límite de saturación del segundo tren es el que ha determinado el valor de t_g .

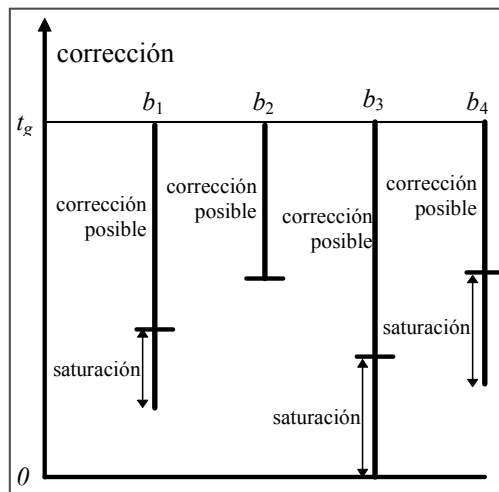


Figura 13.10. Saturación de trenes tras la optimización global

Soluciones saturadas como las del ejemplo anterior presentan problemas al ser utilizadas como punto inicial de la fase tercera. Cuando el algoritmo de optimización de esta fase evalúe correcciones cercanas a una saturada, puede ser insensible al cambio, y por tanto no se avanzaría. En general las saturaciones provocan en la función objetivo zonas planas que pueden atascar al algoritmo en mínimos locales.

Para resolver el problema de las saturaciones en el proceso de optimización el algoritmo incluye dos medidas:

- Sacar de la saturación las correcciones totales tras la fase de optimización global, dejando a los que presentan este problema al límite de su restricción activa.

- Evitar que las correcciones totales vuelvan a saturarse en las siguientes fases de la optimización, penalizando ligeramente alterar la corrección inicial de un tren. De esta forma, sólo aumentará la corrección si mejora claramente la función objetivo, es decir, si no se introduce en una zona plana (insensible a la variación).

La forma de eliminar las saturaciones tras la segunda fase es sencilla y rápida: sustituir la corrección total obtenida tras esta fase por la suma de los tiempos de recorrido simulados para cada tren:

$$b_{i0}^* = \sum_{j=1}^n t_{ri}^{\rho_i+j}(b_{i0})$$

[13.31]

donde b_{i0} es la corrección saturada del tren i , b_{i0}^* es el nuevo valor de esta corrección, ρ_i es la estación inicial del plan del tren i , $t_{ri}^{\rho_i+j}$ es el tiempo de recorrido simulado del tren i en la etapa ρ_i+j , y n es el número de etapas del plan.

Para evitar que en las fases tres y cuatro de la optimización las correcciones vuelvan a saturarse, el atributo V de la función objetivo (ver apartado 13.2) se encarga de penalizar el valor absoluto de la variable de control individual t_b de cada tren. La penalización tiene que ser pequeña, para que no interfiera con los atributos de interés.

13. Optimización de trayectorias	235
13.1 Planteamiento del problema de optimización	235
13.2 Función objetivo	236
13.2.1 Curva de penalización	238
13.2.2 Cálculo de los atributos	240
13.3 Generación de trayectorias posibles	246
13.4 Algoritmo de optimización	248
13.4.1 Cálculo de la corrección inicial de cada tren	249
13.4.2 Variables independientes	252
13.4.3 Fases de la optimización	254
13.4.4 Tratamiento de las saturaciones	257

14. Modelo estocástico del error de seguimiento

En este capítulo se considera un modelo estocástico del movimiento de un tren a lo largo de un plan de regulación, para estudiar la propagación de errores de seguimiento de trayectoria. Se obtendrá una estimación de la desviación típica de este error acumulado en un plan como función de la desviación típica del error de tiempo de recorrido en una estación, y de la capacidad de compensar perturbaciones del control a corto plazo. El análisis de estos resultados proporcionará una cota en la elección de la longitud n de los planes de regulación (horizonte de optimización), y pondrá de manifiesto la importancia del control a corto plazo. Por último, se estudia el problema derivado de la incertidumbre en la planificación cuando los mandos están saturados, y se propone una modificación del comportamiento del control a corto plazo ante esos casos.

Nota bibliográfica:

En [Chua, 86] se estudia la propagación de un retraso puntual de un tren en una estación sin ningún tipo de regulación. El modelo que se utiliza es determinista, suponiendo que no aparecen nuevos retrasos. Se muestra cómo aumenta el retraso inicial debido al aumento del tiempo de carga en estación por acumulación de pasaje.

14.1 Modelado sin control a corto plazo con tiempo de parada en estación constante

El control a medio plazo calcula para cada tren un horario de salida de estación para

las próximas n estaciones, $\{H_1, H_2, \dots, H_n\}$, que constituye la trayectoria de referencia para el control a corto plazo.

Un tren recorre las n estaciones de su plan de regulación saliendo de cada una en los tiempos $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$. El error x_j de seguimiento de la trayectoria se mide en cada estación j como diferencia entre la salida real y la de referencia:

$$x_j = t_j - H_j$$

[14.1]

Supongamos que no actúa el control a corto plazo, y que el error en tiempo de recorrido entre las estaciones $j-1$ y j es una variable gaussiana V_j centrada en cero y de desviación típica σ_j . Supongamos además que las variables gaussianas de cada estación $\{V_1, \dots, V_n\}$ son independientes, es decir, el error V_j que se acumula en la estación j no depende de los errores acumulados en las estaciones anteriores (más adelante se considerarán estas dependencias). El error de seguimiento x_n en el tiempo de salida de la estación n vale:

$$x_n = \sum_{j=1}^n V_j$$

[14.2]

Si se supone que la desviación típica de las variables aleatorias de todas las estaciones son iguales (σ_1), el sistema queda modelado como un movimiento browniano, en el que en cada paso se suma una variable gaussiana del mismo tipo.

A continuación se estudia cómo se propaga la función de probabilidad de error. El error en la primera estación, x_1 , es igual al valor de la variable gaussiana V_1 , y su función de probabilidad asociada $p_1(x)$ es una normal de desviación típica σ_1 :

$$p_1(x) = g(x, \sigma_1)$$

[14.3]

En la segunda estación el error vale $x_2 = V_1 + V_2$, suma de variables aleatorias gaussianas, y la función de probabilidad $p_2(x)$ se expresa como:

$$p_2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p_1(t) g(x-t, \sigma_1) dt = \int_{-\infty}^{\infty} g(t, \sigma_1) g(x-t, \sigma_1) dt$$

[14.4]

En esta expresión el integrando es la probabilidad de que la contribución al error en la primera estación valga $V_1 = t$ por la probabilidad de que en la segunda valga $V_2 = x-t$, que cumple $x = V_1 + V_2$. Si se suma esta función para todos los errores t se obtiene en efecto la probabilidad de error en la segunda estación.

La integral anterior se resuelve manipulando el integrando hasta dejarlo como una función exclusivamente de x (que sale fuera de la integral) por la integral de una distribución normal, que evaluada entre menos a más infinito vale la unidad. El resultado es otra función normal de x :

$$p_2(x) = g(x, \sigma_2)$$

$$\sigma_2^2 = 2\sigma_1^2$$

[14.5]

El cuadrado de la desviación típica, la varianza, se duplica. En general, si en una estación j la función de probabilidad es una normal de desviación típica σ_j , la función de probabilidad en la estación $j+1$ es otra normal de varianza igual a la varianza en j más la varianza que introduce el recorrido entre j y $j+1$, σ_1^2 :

$$p_j = g(x, \sigma_j)$$

$$p_{j+1} = g(x, \sigma_{j+1})$$

$$\sigma_{j+1}^2 = \sigma_j^2 + \sigma_1^2$$

[14.6]

La desviación típica al final del plan, en la estación n -ésima, valdrá:

$$\sigma_n^2 = \sum_{j=1}^n \sigma_1^2 = n\sigma_1^2$$

$$\sigma_n = \sigma_1\sqrt{n}$$

[14.7]

La desviación típica del error a final de plan es la desviación característica de una estación multiplicada por la raíz cuadrada del número de estaciones del plan.

14.2 Modelado con control a corto plazo y tiempo de parada en estación variable

En este apartado se incluye en el modelo probabilista el efecto del control a corto plazo, que compensa el error de seguimiento en cada recorrido tratando de que cada tren pase lo más cerca posible de su trayectoria en la próxima estación.

También se tendrá en cuenta que un error (por ejemplo un retraso) provoca en la estación siguiente un error adicional, debido al tiempo extra de parada en estación para carga y descarga por haberse acumulado un mayor número de viajeros.

Por último, se obtendrá una expresión de la función de probabilidad de error en la estación j -ésima, y a partir de ella la desviación típica del error de seguimiento. El valor de esta magnitud en la última estación del plan deberá ser menor que cierta cota para que el regulador trabaje correctamente.

14.2.1 Efecto del control a corto plazo

El error de seguimiento x_j acumulado hasta la estación j -ésima lo trata de recuperar el control a corto plazo en el recorrido entre la estación j y la $j+1$, aumentando o disminuyendo el tiempo de etapa según el signo de x_j . La capacidad de recuperación de error del control a corto plazo es limitada: si z_j es el tiempo de recorrido previsto por el control a medio plazo entre j y $j+1$, la capacidad de recuperación de retrasos será de $z_j - t_{m0}$, y para adelantos $t_{max} - z_j$, siendo t_{m0} y t_{max} los tiempos de recorrido de interestación mínimo y máximo, respectivamente (ver capítulo 12).

El margen de recuperación medio de adelantos es en general mayor que el de retrasos, ya que el tiempo de recorrido máximo t_{max} puede crecer notablemente si se permite la parada en estación como medida de control. Por conveniencia en los cálculos se consideran iguales los márgenes medios de recuperación de adelantos y retrasos, y del mismo valor en todas las estaciones del plan.

Sea D la capacidad de recuperación de errores del corto plazo en cualquier estación. Errores menores que D acumulados en la estación j son llevados a cero en la estación $j+1$, y los errores mayores disminuyen en D . El error total en $j+1$ (x_{j+1}) es la suma del error en j (x_j) modificado por el corto plazo (x_k^*) más el correspondiente error aleatorio que introduce el recorrido entre j y $j+1$ (V_{j+1}):

$$x_{j+1} = x_j^* + V_{j+1}$$

$$x_j^* = \text{sig}(x_j) \max(|x_j| - D, 0)$$

[14.8]

El error tras la acción del control a corto plazo se expresa como el máximo entre el error x_j decrementado en D y 0, que evita valores negativos de la diferencia. El signo del error se recupera al multiplicar por la función signo del error. La función $\text{sig}(x)$ vale 1 si $x > 0$, -1 si $x < 0$ y 0 si $x = 0$.

Errores extra en parada en estación

En el capítulo 12 se modeló el tiempo de parada de un tren en estación para carga y descarga de viajeros como proporcional al tiempo transcurrido entre la partida de estación del tren anterior y la llegada del tren considerado. La constante de proporcionalidad α es una medida del flujo de viajeros a estación, si se considera proporcional el tiempo de parada en estación a la cantidad de viajeros acumulada:

$$t_j = l_j + e_j$$

$$e_j = \alpha_j (l_j - t_j') = \alpha_j (t_j - e_j - t_j')$$

[14.9]

donde:

- e_j : tiempo de espera de un tren en la estación j .
- l_j : tiempo de llegada del tren considerado a la estación j .
- t_j : tiempo de salida del tren considerado de la estación j .
- t_j' : tiempo de salida del tren anterior al considerado de la estación j .
- α_j : parámetro de afluencia de viajeros.

Despejando el tiempo de espera de la ecuación anterior:

$$e_j = \frac{\alpha_j}{1 + \alpha_j} (t_j - t_j')$$

[14.10]

El tiempo de espera E_j que predijo la trayectoria se obtiene considerando los tiempos de referencia H_j y H_j' en la expresión anterior. El error en tiempo de espera y_j será por tanto:

$$\begin{aligned}
 y_j &= e_j - E_j = \frac{\alpha_j}{1 + \alpha_j} (t_j - t_j') - \frac{\alpha_j}{1 + \alpha_j} (H_j - H_j') = \\
 &= \frac{\alpha_j}{1 + \alpha_j} [(t_j - H_j) + (t_j' - H_j')]
 \end{aligned}$$

[14.11]

Si se tienen en cuenta errores sólo del tren estudiado, el error de salida del tren anterior ($t_j' - H_j'$) vale 0. El error en tiempo de espera se expresa entonces en función del error de salida en la estación j :

$$y_j = \frac{\alpha_j}{1 + \alpha_j} (t_j - H_j) = \frac{\alpha_j}{1 + \alpha_j} x_j$$

[14.12]

La expresión anterior dice que el error y en el tiempo de parada en estación debido al incremento de pasaje es proporcional al error total x medido a la salida de la estación. Nótese que el error total x incluye el error de parada y , lo que quiere decir que se está considerando que las esperas extra en el proceso de carga contribuyen a prolongar el mismo proceso de carga, con el mismo factor de proporcionalidad que los errores previos a la parada en estación. Para no complicar el modelo no se han distinguido dos factores α distintos según el momento en que se producen ambos errores (antes o después de la parada).

En la estación $j+1$, el error total x_{j+1} es el error en la estación j modificado por la acción del control a corto plazo entre j y $j+1$ (x_k^*), más un error aleatorio gaussiano introducido en el recorrido (V_{j+1}), más el nuevo error de tiempo de espera en $j+1$ (y_{j+1}):

$$\begin{aligned}
 x_{j+1} &= x_j^* + V_{j+1} + y_{j+1} = x_j^* + V_{j+1} + \frac{\alpha}{1 + \alpha} x_{j+1} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow x_{j+1} = (1 + \alpha)(x_j^* + V_{j+1})
 \end{aligned}$$

[14.13]

Definiendo la constante $\lambda = (1 + \alpha)$, y teniendo en cuenta la expresión [14.8] del error x_j^* en la estación j tras la acción del corto plazo, la ecuación de propagación del error de una estación a la siguiente queda:

$$x_{j+1} = \lambda(x_j^* + V_{j+1})$$

$$x_j^* = \text{sig}(x_j) \max(|x_j| - D, 0)$$

[14.14]

En la fórmula [14.13] y en la definición de λ se ha supuesto que el parámetro de afluencia de viajeros α es igual para todas las estaciones de la línea. Esta simplificación se realiza para facilitar los cálculos cuando se complique el modelo en los siguientes apartados.

14.2.2 Propagación de la distribución de probabilidad de error

Supongamos que la función de probabilidad de error acumulado en la estación j -ésima es una distribución normal centrada en cero de desviación típica σ_j :

$$p_j(x) = g(x, \sigma_j)$$

[14.15]

En el recorrido entre las estaciones j y $j+1$ actúa el corto plazo, y modifica esta distribución de error. Sea $p_k^*(x)$ esta nueva distribución, que valdrá:

$$p_j^*(x) = p_j(|x| + D) + c\delta(x) = g(|x| + D, \sigma_j) + c\delta(x)$$

$$c(D, \sigma_j) = \int_{-D}^D p_j(x) dx = \int_{-D}^D g(x, \sigma_j) dx$$

[14.16]

La función $p(x)$ se transforma tras aplicar la corrección del control a corto plazo en la suma de las funciones $p(|x| + D)$ y $c\delta(x)$, como indica la Figura 14.1. La primera distribución es seguida por errores mayores que $|D|$ a la salida de la estación j , que se ven reducidos en D por la acción del corto plazo. La segunda es seguida por los errores menores que $|D|$ y que son eliminados por el control a corto plazo en el recorrido entre j y $j+1$. El valor absoluto en x puede ser introducido en la fórmula anterior debido a que las funciones de distribución consideradas son pares.

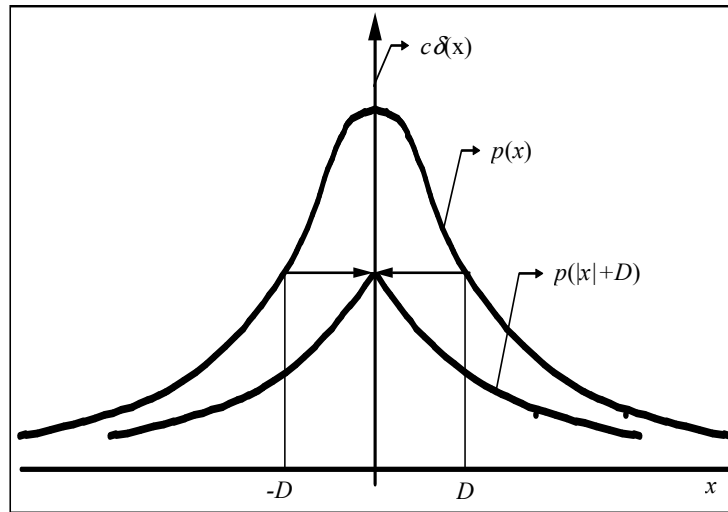


Figura 14.1. Efecto del control a corto plazo sobre una distribución normal

Para poder aplicar las ecuaciones de propagación de probabilidades gaussianas del apartado anterior a la distribución de probabilidades $p_k^*(x)$, se va a aproximar la función $g(|x|+D, \sigma_j)$ por una distribución normal de igual desviación típica. Para ello se considera la función normalizada $\bar{g}(|x|+D, \sigma_j)$ tal que:

$$g(|x|+D, \sigma_j) = I(D, \sigma_j) \bar{g}(|x|+D, \sigma_j)$$

$$I(D, \sigma_j) = \int_{-\infty}^{\infty} g(|x|+D, \sigma_j) dx = 2 \int_D^{\infty} g(x, \sigma_j) dx$$

[14.17]

donde $I(D, \sigma_j)$ es la probabilidad de que una medida siga la distribución $g(|x|+D, \sigma_j)$, calculada como el área total encerrada por dicha distribución. El cálculo de esta integral se realiza sobre la distribución normal $g(x, \sigma_j)$ origen, sustituyendo el límite de integración 0 por D (ver Figura 14.1).

La función de probabilidad buscada es una normal centrada en cero $g(x, \sigma)$ de la misma desviación típica que la función $\bar{g}(|x|+D, \sigma_k)$. Nótese que ambas funciones tienen además la misma integral entre más y menos infinito, es decir, representan al mismo número de medidas, por estar normalizadas. La desviación típica de $\bar{g}(|x|+D, \sigma_j)$ se calcula como:

$$\begin{aligned}\sigma^2(D, \sigma_j) &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \bar{g}(|x|+D, \sigma_j) dx = \frac{1}{I(D, \sigma_j)} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 g(|x|+D, \sigma_j) = \\ &= \frac{2}{I(D, \sigma_j)} \int_D^{\infty} x^2 g(x, \sigma_j) dx\end{aligned}$$

[14.18]

donde de nuevo se ha tenido en cuenta para el cálculo de la integral que $g(|x|+D, \sigma_j)$ es una traslación de $g(x, \sigma_j)$ para $x > 0$.

Sustituyendo la función $g(x, \sigma_j)$ por su aproximación $\bar{g}(|x|+D, \sigma_j)$ en la expresión [14.17]:

$$g(|x|+D, \sigma_j) = I(D, \sigma_j) g(x, \sigma(D, \sigma_j))$$

[14.19]

Sustituyendo esta expresión en [14.16] se obtiene la expresión del error x_j^* de la estación j -ésima tras la acción del corto plazo en el recorrido hasta la $j+1$:

$$p_j^* = I(D, \sigma_j) g(x, \sigma(D, \sigma_j)) + c(D, \sigma_j) \delta(x)$$

[14.20]

El error total en $j+1$ según [14.14] vale $x_{j+1} = \lambda(x_j^* + V_{j+1})$. Se considera la variable $h_{j+1} = x_j^* + V_{j+1}$, donde $x_{j+1} = \lambda h_{j+1}$. Se va a calcular la distribución de error $p(x)$ en función de la distribución de error $q(h)$ que sigue la variable h .

La probabilidad $dP(x)$ de que una medida x esté dentro de un dx se obtiene calculando la probabilidad $q(h)dh$ de que se produzca una medida en $h=x/\lambda$:

$$dP(x) = p(x)dx = q\left(\frac{x}{\lambda}\right)d\left(\frac{x}{\lambda}\right) = \frac{1}{\lambda} q\left(\frac{x}{\lambda}\right)dx$$

[14.21]

Identificando en la expresión anterior la distribución de probabilidad para $p(x)$:

$$p(x) = \frac{1}{\lambda} q\left(\frac{x}{\lambda}\right)$$

[14.22]

Si además la función q es una normal de desviación típica σ , esto es, si $q(h) = g(h, \sigma)$, se cumple que:

$$p(x) = \frac{1}{\lambda} g\left(\frac{x}{\lambda}, \sigma\right) = \frac{1}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\lambda^2\sigma^2}} = \frac{1}{\lambda} \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi}(\lambda\sigma)} e^{-\frac{x^2}{2(\lambda\sigma)^2}} = g(x, \lambda\sigma)$$

[14.23]

Al multiplicar una variable gaussiana por una constante se obtiene otra variable gaussiana de desviación típica producto de la original por la constante. Se va a calcular la función de probabilidad de la variable h , y a partir de ella la función de probabilidad buscada $p(x)$ aplicando la fórmula [14.23].

La variable h_{j+1} es suma del error x_k^* y una variable gaussiana V_{j+1} de desviación típica σ_l . El error x_k^* sigue la distribución de probabilidades expresada en [14.20] como una combinación lineal de una normal y de la función $\delta(x)$. En el apartado anterior se vio (expresión [14.4]) que una distribución normal se transforma al sumarle un error gaussiano en otra normal de varianza igual a la suma de las varianzas de cada una. Si se considera la función $\delta(x)$ como una distribución normal centrada en cero de desviación típica nula, se puede aplicar la transformación anterior tanto a la normal $g(x, \sigma)$ como a la función $\delta(x)$, resultando:

$$q_{j+1}(h) = I(D, \sigma_j)g(z, \sigma_j) + c(D, \sigma_j)g(z, \sigma_l)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma^2(D, \sigma_j) + \sigma_l^2}$$

[14.24]

donde las constantes I , c y σ dependen (ecuaciones [14.17], [14.16] y [14.18] respectivamente) de la desviación típica de la distribución normal en la estación j , σ_j y de la capacidad D de corrección de errores del control a corto plazo.

Aplicando la ecuación [14.23] a las dos distribuciones normales de la expresión anterior, se obtiene por fin la expresión de la distribución de error en $j+1$:

$$p_{j+1}(x) = I(D, \sigma_j)g(x, \lambda\sigma_j) + c(D, \sigma_j)g(x, \lambda\sigma_l)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\sigma^2(D, \sigma_j) + \sigma_l^2}$$

[14.25]

Por lo tanto, una distribución normal se transforma al propagarse de una estación a la siguiente en una combinación lineal de dos normales, una de ellas de desviación típica $\lambda\sigma_l$.

Se considera ahora la distribución de error en la estación j -ésima como una combinación lineal de j distribuciones normales:

$$p_j(x) = \sum_{i=1}^j a_{j,i} g(x, \sigma_{j,i})$$

$$\sum_i a_{j,i} = 1$$

[14.26]

donde $a_{j,i}$ es la componente i -ésima de la normal de desviación típica $\sigma_{j,i}$ en la estación j .

La distribución de probabilidad de error en la estación $j+1$ se obtiene transformado cada componente según la ecuación [14.25], obteniendo:

$$p_{j+1} = \sum_{i=1}^j a_{j,i} I(D, \sigma_{j,i}) g(x, \lambda \sigma_{j,i}) + \sum_{i=1}^j a_{j,i} c(D, \sigma_{j,i}) g(x, \lambda \sigma_1)$$

$$\sigma_{j+1,i} = \sqrt{\sigma^2(D, \sigma_{j,i}) + \sigma_1^2}$$

[14.27]

Identificando los nuevos coeficientes $a_{j+1,i}$ y las desviaciones típicas $\sigma_{j+1,i}$:

$$p_{j+1}(x) = \sum_{i=1}^{j+1} a_{j+1,i} g(x, \sigma_{j+1,i})$$

Si $i \neq j+1$

$$a_{j+1,i} = a_{j,i} I(D, \sigma_{j,i})$$

$$\sigma_{j+1,i} = \lambda \sqrt{\sigma^2(D, \sigma_{j,i}) + \sigma_1^2}$$

Si $i = j+1$

$$a_{j+1,i} = \sum_{i=1}^j a_{j,i} c(D, \sigma_{j,i})$$

$$\sigma_{j+1,i} = \lambda \sigma_1$$

[14.28]

Estas expresiones permiten calcular recursivamente la distribución de probabilidad de error en todas las estaciones, comenzando por $j=1$ donde sólo hay una normal de $\sigma_{1,1} = \sigma_1$, $a_{11} = 1$.

14.2.3 Propagación de las desviaciones típicas de error

La desviación típica del error en cada estación se obtiene sumando las varianzas de cada distribución normal. Las expresiones del cuadrado de la desviación típica en las estaciones j y $j+1$ en función de las componentes y desviaciones típicas de las normales en j quedan:

$$\sigma_j^2 = \sum_{i=1}^j a_{j,i} \sigma_{j,i}^2$$

$$\sigma_{j+1}^2 = \lambda^2 \left[\sum_{i=1}^j a_{j,i} I(D, \sigma_{j,i}) (\sigma^2(D, \sigma_{j,i}) + \sigma_1^2) + \sigma_0^2 \sum_{i=1}^j a_{j,i} c(D, \sigma_{j,i}) \right]$$

[14.29]

En esta expresión se aprecia claramente cómo el parámetro de afluencia de viajeros α determina la inestabilidad del sistema. Si no hay viajeros, $\alpha = 0$, y $\lambda = (1 + \alpha) = 1$, y la desviación típica del error sólo depende del nuevo error acumulado en el trayecto y de la recuperación del control a corto plazo. Para valores de $\alpha > 0$, $\lambda > 1$, la desviación típica aumenta en un factor λ .

14.3 Estudio del error de seguimiento

En este apartado se estudia el error de seguimiento de una trayectoria por un tren. Para ello, se hace uso de la expresión recurrente de la distribución de probabilidad de error (fórmulas [14.27] y [14.28]), y de la expresión de la desviación típica de dicho error (fórmula [14.29]). En concreto, se representan gráficas del error típico de seguimiento en las estaciones de una trayectoria para distintos valores de los parámetros de los que depende:

- Parámetro D de capacidad de eliminación de errores del corto plazo.
- Parámetro α , pendiente del modelo de tiempo de parada en estación.
- Parámetro σ_1 , desviación típica del error de tiempo de recorrido en una etapa.

Por último, se exponen los criterios de elección del número de estaciones del horizonte de optimización. Uno de ellos tendrá en cuenta una cota máxima del error típico de seguimiento.

Influencia de la capacidad del control a corto plazo D

En el capítulo 12 se definen dos márgenes de control del corto plazo, el regulable mediante marchas de ATO y el regulable mediante retenciones en estación. El segundo es relativamente grande, pero sólo corrige adelantos, mientras que el primero tiene capacidad de corregir retrasos siempre que el tiempo de marcha de referencia de la trayectoria no sea el mínimo. Para realizar estudios de error de seguimiento se considera el margen de compensación más desfavorable, el de retrasos. Suponiendo que en promedio el tiempo de marcha de referencia de la trayectoria está en la mitad de la zona de control de marchas, la capacidad D de recuperación de retrasos vale la mitad de dicho margen. Un valor típico del margen es de 15 s, distanciando 4 marchas disponibles 5 s una de otra, que da un valor típico de D de 7.5 s.

A continuación se incluyen gráficas del error típico de seguimiento en función del número de estaciones recorridas, partiendo de error nulo en la estación 0. Las gráficas corresponden a valores de D de 0 a 10 con incrementos de 2.5 s, tomando valores típicos para los otros dos parámetros: $\sigma_l = 6$; $\alpha = 0.03$.

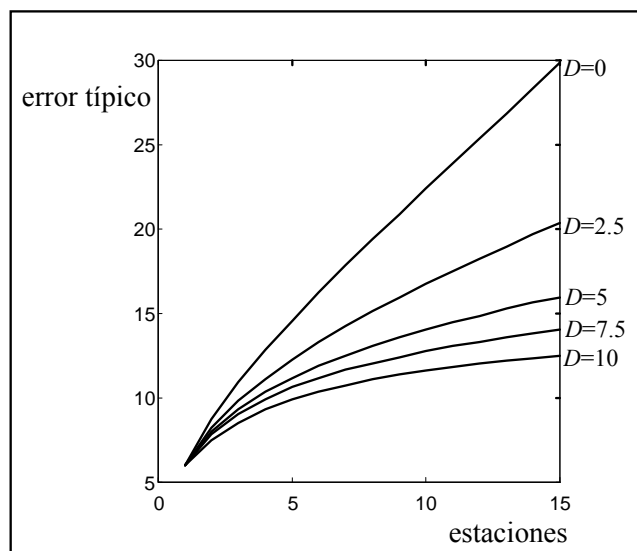


Figura 14.2. Error típico de seguimiento para distintos valores de D

En el gráfico se muestra la importancia del control a corto plazo para evitar que las perturbaciones se vayan acumulando rápidamente con el número de estaciones. El comportamiento mejora claramente cuando el margen de control es parecido al error típico que introduce el recorrido en cada etapa ($\sigma_l = 6$). El error típico decrece al aumentar el margen de control D según una exponencial inversa.

Influencia del parámetro de pendiente del modelo de tiempo de parada α

El parámetro α determina la inestabilidad del sistema, ya que representa el retraso (o adelanto) extra que se producirá en el tiempo de parada en una estación debido al retraso (o adelanto) acumulado en el tiempo de salida de la estación anterior. A continuación se incluyen gráficas del error típico de seguimiento en función del número de estaciones recorridas, partiendo de error nulo en la estación 0. Las gráficas corresponden a valores de α de 0 a 0.12 con incrementos de 0.03 s, tomando valores típicos para los otros dos parámetros: $\sigma_l = 6$; $D = 8$.

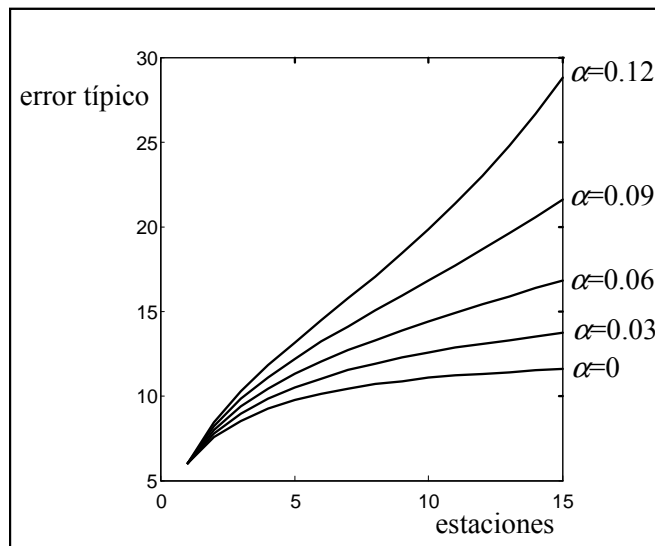


Figura 14.3. Error típico de seguimiento para distintos valores de α

En el ejemplo anterior a partir de aproximadamente la quinta estación el error de seguimiento aumenta linealmente con el número de estaciones, con una pendiente que crece exponencialmente en función de α .

El modelo de propagación de errores descrito en este capítulo no contempla la saturación del tren cuando el número de viajeros supera cierto umbral, que detiene el incremento del error debido al tiempo de espera extra en estación. Por este motivo las gráficas anteriores crecen al mismo ritmo indefinidamente en lugar de suavizarse al superar el umbral de saturación del tren. No se ha tenido en cuenta esta saturación en el modelo debido a que siempre ocurre a partir de un número de estaciones mayor que el horizonte de optimización, y queda por tanto fuera de la zona de interés.

Influencia del error típico de recorrido de una etapa σ_l

El error típico de tiempo de recorrido σ_l introducido en una etapa depende de varios factores:

- La precisión del sistema de conducción automática ATO. En general los errores que comenten estos sistemas en tiempo de recorrido son pequeños, del orden de un segundo.
- Comportamiento de los conductores. El instante de cierre de puertas y salida de estación lo decide el conductor, cuando considera que el andén está desalojado. Si no son sistemáticos en esta labor, se pueden introducir errores de predicción considerables de tiempo de parada.
- Grado de sobrecarga de la línea. Si el sistema se explota con un intervalo próximo al mínimo, las interacciones entre los trenes son más frecuentes, y por tanto aumenta la probabilidad de error en el modelo. Si la línea sufre variaciones bruscas del flujo de viajeros en determinadas estaciones, debido por ejemplo a enlaces con otras líneas, se provocan tiempos de parada extra no esperados.

A continuación se incluyen gráficas del error típico de seguimiento en función del número de estaciones recorridas, partiendo de error nulo en la estación 0. Las gráficas corresponden a valores de σ_l de 3 a 9 con incrementos de 2 s, tomando valores típicos para los otros dos parámetros: $\alpha = 0.03$; $D = 8$.

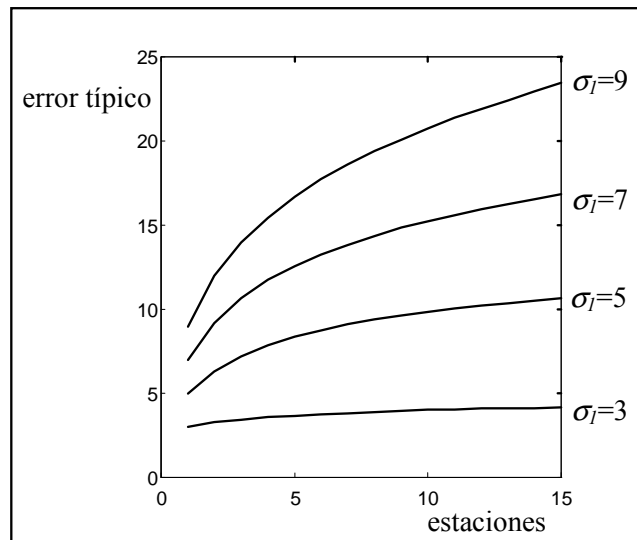


Figura 14.4. Error típico de seguimiento para distintos valores de σ_l

Es clara la tendencia a crecer más rápidamente el error de seguimiento cuanto mayor es el error típico de etapa σ_l , pero esta vez de una forma lineal.

Criterios de elección del horizonte de optimización

En el diseño del sistema de regulación de tráfico propuesto para un sistema concreto, la elección del número de estaciones del horizonte de optimización está acotada por varios factores:

- El tiempo que tarda en recorrerse un plan de regulación (el horizonte de regulación traducido a tiempo) ha de ser mayor que el período de recálculo de trayectorias del control a medio plazo. De otra forma, antes de finalizar un período se agotaría el plan de regulación.
- El error típico de seguimiento de la trayectoria de referencia ha de estar acotado por cierta cantidad. Se ha tomado como criterio que este error típico sea menor que el 5% del tiempo de recorrido promedio de una etapa. Construyendo la gráfica de error típico de seguimiento correspondiente, se obtiene una cota al número de estaciones del horizonte de optimización. Para un tiempo de recorrido medio de etapa de 200 s, y tomando como parámetros $\alpha = 0.03$; $D = 8$; $\sigma_l = 6$, el error típico máximo es 10 s, y se obtiene un valor máximo del horizonte de optimización de aproximadamente 5 estaciones.
- El tiempo de cálculo del algoritmo de optimización limita también el horizonte de optimización, ya que se incrementa al aumentar el número de estaciones simuladas en cada evaluación. Si el algoritmo está bien diseñado e implementado, suele ser más restrictiva la cota por error de seguimiento.

El ajuste definitivo del horizonte de optimización ha de efectuarse estudiando el comportamiento del sistema real ante distintos valores de este parámetro.

14.4 Tratamiento de la incertidumbre con mandos saturados

El control a medio plazo calcula una trayectoria óptima teniendo en cuenta que los trenes tienen una capacidad limitada de recuperar o perder tiempo en cada etapa del plan de regulación. Si un tren está muy retrasado y necesita recuperar más tiempo del que sus marchas más rápidas le permiten, su mando estará saturado en todas las etapas del plan. Este mando, calculado estimando la capacidad de recuperación real, es distinto del mando necesario para corregir el retraso si no existiera esta restricción. En la Figura 14.5 se representan el mando saturado y el mando corrector para un tren en este caso en una etapa del plan.

Desde el punto de vista de optimización, cuando se da la situación del ejemplo anterior se encuentra activa la restricción de máxima capacidad de recuperación de tiempo. Teniendo en cuenta sólo la trayectoria solución (mando saturado) no se tiene información de si el retraso del tren es pequeño o grande.

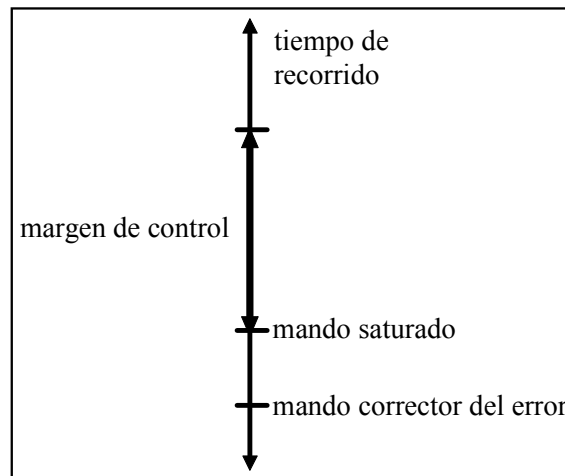


Figura 14.5. Mando saturado y mando corrector del error

Para calcular la trayectoria de referencia cuando el mando óptimo es correr al máximo en todo el plan, el control a medio plazo tiene que estimar cuál es la capacidad de recuperación de tiempo en cada etapa. El tiempo estimado de recuperación mediante marchas rápidas tiene una incertidumbre pequeña. Sin embargo, la incertidumbre en el tiempo de parada en estación cuando la regulación no marca el instante concreto de salida (cuando no hay que retener al tren) puede ser significativa. Esto puede ser debido a que es el conductor quien decide en este caso el instante de arranque, cuando da por finalizado el proceso de carga y descarga de viajeros. Si el tren va muy retrasado, el conductor puede ser consciente del retraso, y forzar un arranque apresurado. El resultado es que el tren recupera más tiempo del que el plan de regulación había supuesto. El control a corto plazo, sin embargo, interpreta el adelanto como un error de salida de estación respecto a la trayectoria óptima, y compensará este adelanto con una marcha lenta en la siguiente etapa. El resultado es que el regulador no trabajaría de forma adecuada, ya que estaría dando una marcha lenta a un tren retrasado.

El problema que se plantea en el ejemplo anterior es debido a que el control a medio plazo no recalcula la trayectoria óptima cada nueva medida, sino típicamente con un período de tiempo tal que el mando de cada tren es calculado a partir de una trayectoria que no tiene en cuenta la medida de su último paso por estación. En el caso en que los mandos no estén saturados para un tren, la trayectoria calculada es la que el tren realmente necesita para compensar sus errores, y es bueno que el control a corto plazo lo mantenga aunque en la última etapa haya existido un error de predicción. Sin embargo, si el tren está muy retrasado, la trayectoria calculada ya no representa el comportamiento corrector, sino el mejor comportamiento suponiendo cierta capacidad de recuperación.

En resumen: hay errores claramente favorables, que no deben ser compensados por el control a corto plazo en caso de producirse. Estos casos se producen cuando existen

trenes muy retrasados en línea. El control a corto plazo deberá poder identificar a estos trenes, y modificar para ellos su comportamiento.

Funcionamiento del control a corto plazo ante trenes muy retrasados

Se entiende por un tren muy retrasado aquel cuyos mandos están saturados inferiormente en todas las etapas del plan de regulación. La trayectoria que se calcula será la más rápida teniendo en cuenta una estimación de la capacidad de recuperación durante el plan. El control a corto plazo tratará a estos trenes de forma especial, dando incondicionalmente la marcha más rápida durante todo el tiempo de vigencia de dicha trayectoria.

Este comportamiento puede tener como resultado que no se cumplan los tiempos de la trayectoria para dicho tren, que han sido calculados teniendo en cuenta la evolución de todos los trenes, incluyendo sus interacciones. Sin embargo, justamente en el caso en que un tren está muy retrasado, el mando apropiado tiende a ser independiente del comportamiento del resto de los trenes: debe correr al máximo.

No sería perjudicial que el comportamiento descrito del control a corto plazo para trenes retrasados llevara a que un tren recupera tiempo en exceso, ya que es fácil compensar el adelanto introducido reteniendo al tren. Sin embargo, si el error ocurre al contrario sí resulta problemático compensarlo, ya que la capacidad de recuperación de tiempo es mucho más limitada. En cualquier caso, el control a medio plazo se dispara cada una o dos estaciones, y por lo tanto el retraso con que la trayectoria de referencia tiene en cuenta estos errores no es un problema importante.

14. Modelo estocástico del error de seguimiento	261
14.1 Modelado sin control a corto plazo con tiempo de parada en estación constante	261
14.2 Modelado con control a corto plazo y tiempo de parada en estación variable	264
14.2.1 Efecto del control a corto plazo	264
14.2.2 Propagación de la distribución de probabilidad de error	267
14.2.3 Propagación de las desviaciones típicas de error	272
14.3 Estudio del error de seguimiento	272
14.4 Tratamiento de la incertidumbre con mandos saturados	276

15. Resultados

En este capítulo se presentan en primer lugar resultados de optimización de trayectorias del control a medio plazo. Se construye una línea de pruebas y unos horarios sencillos de seguir, sobre la que se definen tres casos ejemplo con distintos tipos de retrasos iniciales. Se estudian los tres tipos de regulación considerados: intervalo, horario y mixto. En cada ejemplo se analizan los resultados tras cada fase de optimización, y se estudia la función objetivo frente a distintas variables independientes.

A continuación se ensaya el regulador ante el simulador detallado descrito en el capítulo 8, utilizando las mismas bases de datos que en los ejemplos de simulación del capítulo 9 para la Línea 3 de Metro de Madrid. Con estas pruebas se pretende comprobar el comportamiento del regulador ante una línea de tamaño y características reales. Se obtienen curvas de regularización del intervalo partiendo de un estado muy desequilibrado para distintos escenarios de viajeros y niveles de ruido, y el posterior mantenimiento del punto de equilibrio.

Por último se describen brevemente las características y algunos detalles de implantación del regulador automático de tráfico SIRO, que se ha instalado recientemente en la Línea 2 de Metro de Barcelona.

15.1 Optimización de trayectorias de referencia

En este apartado se presentan ejemplos de planes de regulación generados por el

módulo optimizador del control a medio plazo. Para facilitar la interpretación de los resultados se emplea una línea ferroviaria donde todas las interestaciones tienen las mismas características, sobre la que se han definido unos horarios sencillos de seguir. Se han construido tres casos base, correspondientes a tres estados iniciales de trenes en línea. En el primero los trenes cumplen el horario oficial excepto uno que presenta un retraso ligero, en el segundo se sitúa al mismo tren con un retraso severo, y en el tercero son varios los trenes que presentan retraso, de distinta magnitud.

Se van a presentar resultados para los tres tipos de regulación considerados: intervalo, horario y mixto (intervalo más horario en estaciones cabecera), estudiando la estrategia de regulación utilizada en cada uno.

Se considera que todas las estaciones presentan el mismo factor α , pendiente del modelo de tiempo de parada para carga y descarga de viajeros (ver capítulo 12). Se consideran dos valores de este parámetro, uno pequeño y otro grande. El primero corresponde a una línea no sobrecargada, donde el retraso de un tren se propaga lentamente al que le sigue debido a acumulación de pasaje en estación. El segundo corresponde a una línea sobrecargada, donde la propagación de los retrasos es rápida.

15.1.1 Características de la línea de pruebas

La línea de pruebas utilizada consta de diez estaciones (ver Figura 15.1), etiquetadas de 0 a 9 por orden de recorrido. Las estaciones 0 y 5 son las estaciones cabecera, donde los trenes cambian de sentido con vuelta por delante.

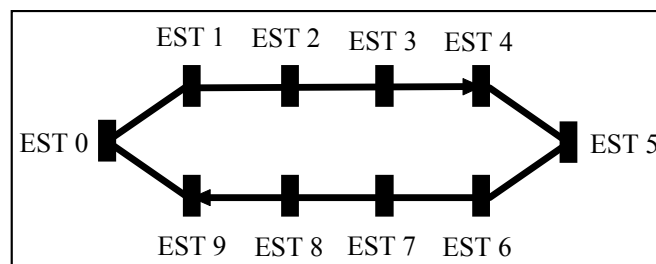


Figura 15.1. Esquema de la línea de pruebas

En cada interestación se dispone de cuatro marchas. En todas ellas el tiempo de recorrido de cada marcha es el mismo:

marcha 0:	88 s
marcha 1:	94 s
marcha 2:	100 s
marcha 3:	106 s

Las marchas están distanciadas 6 s, lo que permite un rango de 18 s de tiempo de regulación con marchas.

Para facilitar el seguimiento de los ejemplos, se ha considerado nulo el tiempo que transcurre entre que un tren pisa el circuito de vía de estación y se detiene, y el tiempo que transcurre entre que un tren arranca de estación y pisa el circuito de salida de estación. De esta forma se eliminan constantes, por ejemplo la que relaciona las medidas de tiempo de salida (cuando se pisa el circuito de salida) y el horario oficial de arranque.

En el modelo de tiempo de parada en estación para carga y descarga de pasaje el tiempo mínimo de parada sin pasaje se ha tomado de 10 s, y el tiempo máximo (saturación de la carga) de 100 s. Se consideran dos pendientes de la recta de carga, de valores 0.03 y 0.06. El factor de desviación de tiempo de marcha asociado a cada interestación se toma igual a la unidad, es decir, no influye.

La línea es recorrida por 5 trenes, numerados por orden de paso por una estación como tren 0, tren 1, ..., tren 4. El factor de desviación de tiempo de marcha asociado a cada tren se toma igual a la unidad, es decir, no influye, comportándose todos los trenes de igual forma.

Se ha construido un horario oficial de circulación para 5 trenes, necesario para los modos de explotación por horario y mixto. El horario señala una salida de estación cada 4 minutos. Para conseguir esta frecuencia con cinco trenes, es preciso que entre la salida de una estación y la salida de la siguiente cada tren emplee 2 minutos, proporcionando un tiempo de vuelta completa a la línea de 20 minutos. En el instante inicial ($t=0$) el tren 0 tiene su salida de la estación 0, el tren 1 de la estación 8, el tren 2 de la estación 6, el tren 3 de la estación 4 y el tren 4 de la estación 2.

15.1.2 Pesos de la función objetivo

En el capítulo 13 se definió la función objetivo empleada por el algoritmo de optimización del control a corto plazo como:

$$fob = a (p_Y Y + p_H H + p_T T) + b (p_R R + p_W W) + c C + p_V V \quad [15.1]$$

donde:

- Y : medida de la regularidad de intervalos a final del plan de regulación.
- H : medida del cumplimiento de horarios al final del plan de regulación.
- T : medida del cumplimiento de horarios en paso por estaciones cabecera.
- R : medida de la regularidad vista por el pasaje durante la aplicación del plan.
- W : medida de la molestia al pasaje por retener trenes en estación.
- C : medida del consumo de energía durante el plan de regulación.

V : medida de la desviación de la velocidad media de los trenes respecto a la nominal.

a : peso asignado a la regularidad de la línea.

b : peso asignado a la molestia al pasaje.

c : peso asignado al ahorro de energía.

$p_Y, p_H, p_T, p_R, p_W, p_V$: pesos asignados a cada uno de los atributos anteriores.

En el regulador automático los pesos a , b y c los elige el explotador de la línea, según criterios de importancia relativa dada a la regularidad, molestia al pasaje por medidas de regulación y ahorro de energía. El resto de los pesos dependen del tipo de regulación elegida, y de la importancia relativa dada a los distintos términos de regularidad y de molestia al pasaje.

En la Tabla 15.1 se especifican los valores de los pesos de la función objetivo empleada en los ejemplos para los tres tipos de regulación: por intervalo, por horario en todas las estaciones y mixto con horario en estaciones cabecera. En los tres casos los pesos son iguales, salvo los correspondientes a la medida de la regularidad de la línea tras aplicar el plan de regulación.

	a	b	c	p_Y	p_H	p_T	p_R	p_W	p_V
<i>Intervalo</i>	10	1	0.1	1	0	0	0.3	1	0.05
<i>Horario</i>	10	1	0.1	1	1	0	0.3	1	0.05
<i>Mixta</i>	10	1	0.1	1	0	1	0.3	1	0.05

Tabla 15.1. Pesos de la función objetivo

En regulación por intervalo, $p_Y=1$, mientras que los pesos correspondientes a atributos de horario (p_H y p_T) son nulos. Por horario global, el peso de cumplimiento de horario en todas las estaciones p_H vale 1, y el peso p_T de cumplimiento de horario en cabeceras es nulo, pero además se considera regularidad por intervalo, con $p_Y=1$, por motivos que se detallan en los ejemplos correspondientes. En regulación mixta, se considera regularidad de intervalo y cumplimiento de horario en cabeceras ($p_Y=1$, $p_T=1$), siendo nulo el peso de horario global ($p_H=0$).

Los pesos a , b y c correspondientes a regularidad, molestia al viajero y consumo se han tomado 10, 1 y 0.1, respectivamente. Con ello se da prioridad en primer lugar a la regularidad de la línea, en segundo lugar a molestia al viajero y por último al ahorro de energía. Este criterio ha sido el aplicado en sistemas reales.

Los pesos p_R y p_W deciden la molestia relativa al viajero por falta de regularidad del servicio y por espera de los trenes en estación, respectivamente. Se ha tomado el peso

por esperas en estación 3 veces mayor que el de falta de regularidad, debido a que el viajero se incomoda especialmente cuando el tren en el que viaja se detiene sin causa aparente.

Por último, el peso p_V que penaliza las acciones de control distintas a las nominales se ha tomado igual a 0.05, para que sólo influya cuando el resto de los pesos no deciden.

15.1.3 Parámetros de la función de penalización

En el capítulo 13 se definió la función de penalización de errores temporales g , formada por dos tramos rectos unidos por uno parabólico:

$$\begin{aligned} g(t) &= K_{min} t & t < C_1 \\ g(t) &= A + B t^2 & C_1 < t < C_2 \\ g(t) &= (A + B C_2^2) + K_{max} t & C_2 < t \end{aligned}$$

[15.2]

donde t es el error temporal, K_{min} y K_{max} son las pendientes de los tramos rectos, A y B las constantes que definen el tramo parabólico, y C_1 y C_2 determinan el comienzo de validez de cada tramo. En el capítulo 13 se obtienen expresiones de los parámetros A , B y C_2 en función de K_{min} , K_{max} y C_1 .

Se han elegido los siguientes valores de los parámetros:

$$\begin{aligned} K_{min} &= 1 \\ K_{max} &= 10 \\ C_1 &= 20 \text{ s} \end{aligned}$$

Esto significa que los errores pequeños se penalizan con el valor del error, los errores grandes con 10 veces el valor del error, y el comienzo de penalización parabólica ocurre para errores de 20 s. El resto de los parámetros se calculan en función de los anteriores, resultando:

$$\begin{aligned} A &= 10 \\ B &= 0.025 \\ C_2 &= 200 \text{ s} \end{aligned}$$

La zona de penalización lineal severa comienza para errores temporales de 200 s.

15.1.4 Caso 1. Retraso ligero de un tren

En este primer ejemplo el tren 0 ha salido de la estación 0 con un retraso de 25 s, mientras que el resto han salido conforme a horario de sus estaciones respectivas. Los últimos tiempos de salida medidos para cada tren y las estaciones correspondientes se encuentran en la Tabla 15.2.

	Última estación de salida	Último tiempo de salida (s)
tren 0	0	25
tren 1	8	0
tren 2	6	0
tren 3	4	0
tren 4	2	0

Tabla 15.2. Caso 1. Última medición de cada tren

A continuación se presentan los resultados de optimización del control a medio plazo para las próximas 5 estaciones para los tres tipos de regulación y una pendiente α del modelo de carga igual a 0.03. En regulación por horario se compara el resultado con el que se obtiene en una línea con una pendiente de 0.06.

Regulación por intervalo con pendiente del modelo carga $\alpha = 0.03$

Se van a detallar los resultados de las 4 fases sucesivas de que consta el algoritmo de optimización (ver capítulo 13):

- Fase 1: cálculo del punto inicial.
- Fase 2: optimización de la velocidad global (variable t_g).
- Fase 3: optimización de las correcciones individuales (variables t_b).
- Fase 4: optimización conjunta del reparto y de las correcciones individuales (variables t_r y t_b).

En la Tabla 15.3 se presentan los resultados de la Fase 1 y de la Fase 2. Para cada tren se especifican los siguientes valores:

b_0 : corrección total inicial a aplicar al tren (resultado de la Fase 1). Correcciones positivas indican que hay que retener al tren, negativas que se ha de ganar tiempo. Esta corrección es la objetivo, que se cumple en función de la capacidad de regulación del tren.

T : tiempo de recorrido nominal durante el plan. Se emplea como marcha nominal la marcha 1 (la segunda más rápida).

- d: tiempo de recorrido durante el plan menos tiempo de recorrido nominal. Representa la corrección real experimentada por cada tren.
- e: error de intervalo (intervalo medio menos intervalo del tren a final del plan). El intervalo a final de plan se calcula simulando previamente el movimiento nominal de cada tren hasta alcanzar la estación del tren que le precede, como se estudia en el capítulo 11. Los errores de intervalo en la tabla anterior están medidos respecto a la media de estos intervalos. Para el Caso 1, este intervalo medio es igual a 220 s.

	b_0	T	d	e
tren 0	0	555	-21	3
tren 1	26	548	5	-7
tren 2	26	551	5	3
tren 3	26	551	5	0
tren 4	26	551	5	0

Tabla 15.3. Caso1, intervalo. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.03$).

El error de salida de la estación 0 del tren 0 fue de 25 s, que se estima se ampliará a 26 s cuando pase por la estación inicial del tren que le precede, si continuara circulando a marcha nominal. La corrección inicial a aplicar a cada tren muestra los errores de intervalo de cada uno normalizados al más retrasado. En este caso el más retrasado es el tren 0, al que se le asocia corrección nula. Para regularizar los intervalos, al resto de los trenes habría que retenerlos entonces un tiempo igual al retraso del tren 0, ($b_0=26$ s).

Las correcciones anteriores constituyen el punto inicial de la Fase 1. La variable t_g de corrección global resultado de esta fase vale 21 s. Esto significa que el algoritmo ha encontrado que, respecto de las correcciones iniciales, el óptimo se encuentra cuando cada tren recupera 21 s adicionales. La variable d refleja la corrección efectiva aplicada a cada tren. El tren 0 recupera 21 s y el resto de los trenes se retienen 5 s.

Nótese que la aplicación de correcciones totales obtenidas midiendo errores iniciales no consigue eliminar completamente los errores de intervalo al final del plan de regulación. El motivo es que durante las 5 estaciones que dura el plan el tren 0 acumula nuevos retrasos, mientras que el que le sigue (tren 1) tiende a adelantarse, disminuyendo su intervalo, afectando en la medida de intervalo relativo al que le sigue (tren 2). Este efecto se refuerza debido a que los intervalos están medidos simulando cada tren desde su estación de final de plan hasta alcanzar la posición del que le precede en línea, acumulando en este recorrido nuevos retrasos o adelantos. Estos errores serán eliminados en la Fase 2, cuando se permita a cada tren elegir individualmente su corrección.

En la Tabla 15.4 figura el valor óptimo de la variable t_g , de la función objetivo para esta solución (fo), los atributos de que consta multiplicados por los pesos

correspondientes, el consumo mínimo y el consumo planeado durante el plan en kWh (U_{min} y U), y el número de evaluaciones efectuado hasta encontrar el óptimo. Los atributos cuyo peso es nulo aparecen con un guión.

t_g	fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
21	36.2	27.4	-	-	1.30	0	4.51	0.08	62.5	90.7	9

Tabla 15.4. Caso 1, intervalo. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.03$).

El atributo que está determinando la solución es el de regularidad de intervalo. El atributo W que penaliza las esperas en estación por regulación es nulo, debido a que no se ha efectuado ninguna acción de este tipo.

La Figura 15.2 muestra la forma de la función objetivo en función de t_g . La zona de pendiente pequeña en el centro de la gráfica corresponde a valores de t_g que llevan a correcciones temporales sobre cada tren posibles con las marchas disponibles. Todos estos puntos llevan a situaciones a final de plan en que desaparecen casi por completo los errores de intervalo, y el óptimo ($t_g=21$) es un compromiso con el resto de atributos que influyen en la función objetivo.

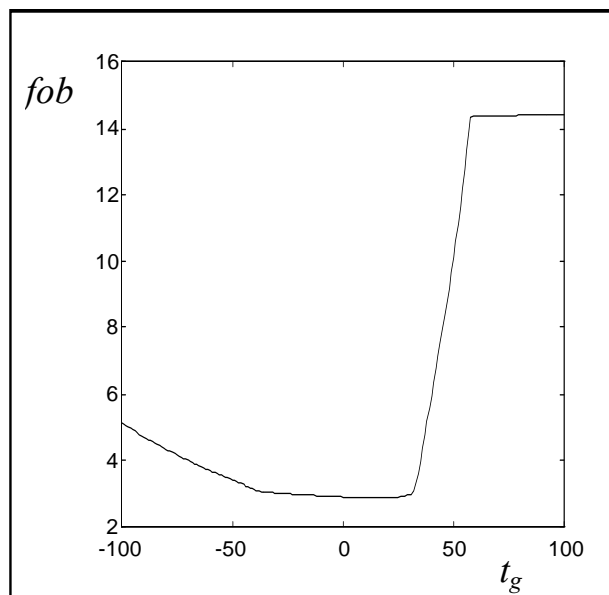


Figura 15.2. Caso 1, intervalo. Función objetivo de Fase 2 ($\alpha=0.03$)

Para valores de t_g menores de aproximadamente -55 s se satura la capacidad de perder tiempo mediante marchas, pues los trenes ya circulan a su marcha más lenta. En esta zona las pérdidas de tiempo impuestas se realizan mediante paradas en estación, que están penalizadas por el atributo de molestia al pasaje. Este es el motivo por el que en esta zona de la función objetivo existe una pendiente creciente al aumentar la retención. En la gráfica no se alcanza hasta la zona en que se satura el

tiempo de retención en estación, a partir del cual la función objetivo es prácticamente plana.

Para valores de t_g mayores de 31 s se satura la capacidad de ganar tiempo del tren más retrasado, el tren 0, y ya no puede recuperar el tiempo que le impone la corrección que le corresponde. La capacidad de recuperar tiempo del resto de los trenes no se satura sin embargo hasta que t_g vale 52 s, debido a que parten de una corrección inicial 21 s más retrasada. En esta zona la función objetivo crece con una pendiente fuerte, debido a que el error de intervalo aumenta al no responder uno de los trenes a la consigna de recuperación de tiempo que le corresponde.

Para valores de t_g mayores de 52 s se satura la capacidad de recuperación de tiempo del resto de los trenes, y a partir de este punto se obtiene la misma conducción para cualquier valor de t_g . El valor de todos los atributos es el mismo excepto el de penalización de mando V , que es el responsable de la ligera pendiente final provocada por un valor muy pequeño del peso p_V .

En la Fase 3 se parte de la solución obtenida en la Fase 2, calculando una corrección adicional b individual de cada tren. En la Tabla 15.5 se detalla la solución obtenida, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y el error e de intervalo a final de plan.

	b	d	e
<i>tren 0</i>	-1	-22	0
<i>tren 1</i>	7	12	0
<i>tren 2</i>	3	8	0
<i>tren 3</i>	3	8	0
<i>tren 4</i>	3	8	0

Tabla 15.5. Caso1, intervalo. Fase 3 ($\alpha=0.03$).

Se encuentra una solución muy cerca a la de la Fase 2, donde cada tren altera ligeramente su corrección individual para conseguir un error de intervalo nulo.

En la Tabla 15.6 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés. La función objetivo ha disminuido respecto de la fase anterior principalmente a costa de la regularidad de intervalo Y , sin variar significativamente el resto de los atributos.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
9.33	3.51	-	-	1.36	0	4.35	0.11	62.5	89.7	300

Tabla 15.6. Caso 1, intervalo. Datos del algoritmo de optimización Fase 3 ($\alpha=0.03$).

En la Figura 15.3 se incluyen curvas de la función objetivo en función de cada variable independiente b_i ($i=0,\dots,4$) asociada a cada tren. En la curva asociada a una

variable se dejan constantes e igual a su valor óptimo el resto de las variables. Las curvas asociadas a los trenes 3 y 4 son iguales que la representada para el tren 2.

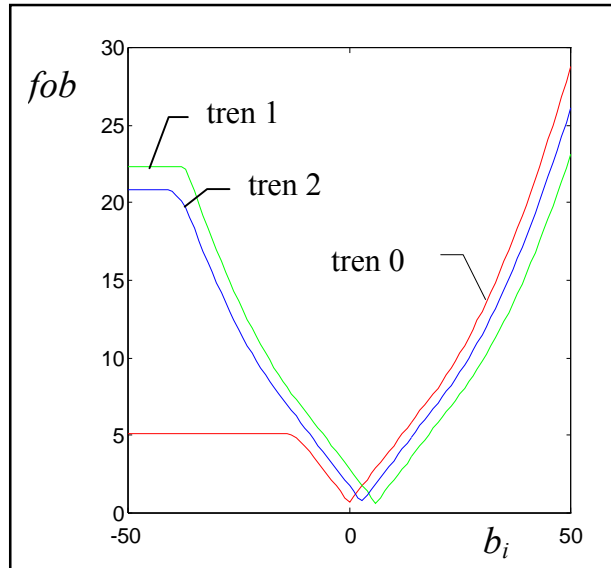


Figura 15.3. Caso 1, intervalo. Función objetivo de Fase 3 ($\alpha=0.03$)

La función objetivo de cada curva presenta un mínimo muy pronunciado debido a que, al dejar constantes el resto de las variables, retrasar o adelantar a un tren fuera de su valor óptimo supone romper la regularidad de los intervalos. En la Fase 2 la variable t_g modificaba de igual forma las correcciones de todos los trenes, llevando a intervalos aproximadamente regulares en zonas no saturadas.

Nótese que valores positivos de las variables b_i significan ahora que el tren debe perder tiempo y viceversa, al contrario del criterio de la variable t_g . Cada tren tiene un valor negativo de su variable a partir del cual no puede recuperar más tiempo, haciendo prácticamente plana la fob a partir de ese punto.

En la Tabla 15.7 se recoge la trayectoria de tiempos de salida de estación que el control a medio plazo impone al control a corto plazo. En cada celda el número superior es el tiempo de salida en segundos, y el inferior indica el tiempo de marcha que ha elegido el simulador para cumplir con el tiempo de salida en la interestación anterior. Este tiempo es relativo a la marcha nominal (marcha 1; 94 s), siendo positivo para marchas más lentas y viceversa. En este ejemplo no ha sido necesario recurrir a retenciones en estación como medida de regulación.

En este ejemplo con regulación por intervalo la Fase 3 de optimización de los repartos no mejora significativamente la solución encontrada por la fase anterior. En regulación mixta se verá cuándo es útil esta fase: cuando existe horario en estaciones determinadas y no en el resto.

	esta 0	esta 1	esta 2	esta 3	esta 4	esta 5	esta 6	esta 7	esta 8	esta 9
tren 0	25	131.9 -4.2	238.5 -4.0	345.09 -3.9	451.7 -3.7	558.4 -3.5				
tren 1	224.4 2.1	336.0 2.0	447.5 1.8	559.0 1.6					0	112.7 2.2
tren 2	446.9 1.5	558.5 1.5					0	111.9 1.5	223.6 1.4	335.2 1.4
tren 3					0	111.9 1.5	223.6 1.5	335.2 1.5	446.9 1.5	558.6 1.5
tren 4			0	111.9 1.5	223.7 1.5	335.4 1.5	447.1 1.5	558.8 1.5		

Tabla 15.7. Caso1, intervalo. Trayectoria solución Fase 3 ($\alpha=0.03$).

Regulación por horario con pendiente del modelo carga $\alpha = 0.03$

En la Tabla 15.8 se presentan los resultados de la Fase 1 y de la Fase 2, donde ahora el error e representa desviación respecto al horario en la última estación del plan de regulación.

El tiempo de recorrido nominal durante el plan T vale en regulación por horario 600 s para todos los trenes, ya que este es el tiempo que deberá emplear un tren libre de perturbaciones en recorrer el plan ajustándose al horario en cada estación.

Las correcciones iniciales b_0 de cada tren son directamente el error de horario al comienzo del plan de regulación, donde sólo el tren 0 tiene un retraso de 25 s. En regulación por horario las correcciones no se normalizan debido a que, a diferencia de lo que ocurre en regulación por intervalo, es importante el tiempo absoluto, y no sólo el relativo.

	b_0	T	d	e
tren 0	-25	600	-25	0
tren 1	0	600	0	0
tren 2	0	600	0	0
tren 3	0	600	0	0
tren 4	0	600	0	0

Tabla 15.8. Caso1, horario. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.03$).

El resultado al final de plan es que el retraso del tren 0 se elimina completamente. El valor que ha tomado la variable t_g en la Fase 2 es de 17 s. En la Tabla 15.9 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta Fase.

t_g	f_{ob}	$a_{p_Y Y}$	$a_{p_H H}$	$a_{p_T T}$	$b_{p_R R}$	$b_{p_W W}$	c_C	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
17	1.74	0	0	-	0.30	0	1.22	0.22	62.5	70.1	12

Tabla 15.9. Caso 1,horario. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.03$).

Cuando $t_g=17$ se solicita que todos los trenes ganen 17 s además de lo que indica su corrección inicial correspondiente. Para el tren 0 esto significa recuperar 42 s en todo el plan, que con reparto plano supone 8.4 s en cada una de las 5 estaciones. A este ritmo el error inicial de 25 s se corrige en 3 estaciones. Una vez recuperado este error el tren ya no recupera más tiempo, debido a que el tren no se puede adelantar a su horario en ninguna estación. Por lo tanto, a partir de la tercera estación el tren 0 ya se comporta nominalmente. El valor óptimo de t_g ha de ser interpretado como aquél que ha impuesto el ritmo de recuperación de tiempo adecuado (8.4 s por estación), aunque la corrección total (42 s) no se lleva a cabo.

A los trenes no retrasados se les solicita recuperar 17 s durante el plan. Pero la restricción de no adelantarse al horario en ninguna estación impide que se gane tiempo. Para cualquier valor positivo de t_g se llega al mismo resultado, siendo exclusivamente el comportamiento del tren 0 el que está determinando el valor de t_g .

En la Figura 15.4 se representa la *fob* en función de valores positivos de t_g . Los valores que toma esta función son muy pequeños, ya que los atributos con más peso de regularidad están a 0, debido a que para $t_g \geq 0$ el tren 0 recupera su retraso. Para valores negativos de t_g la *fob* crece rápidamente, debido a que todos los trenes comienzan a acumular retraso. No se han representado estos valores en la gráfica por problemas de escala.

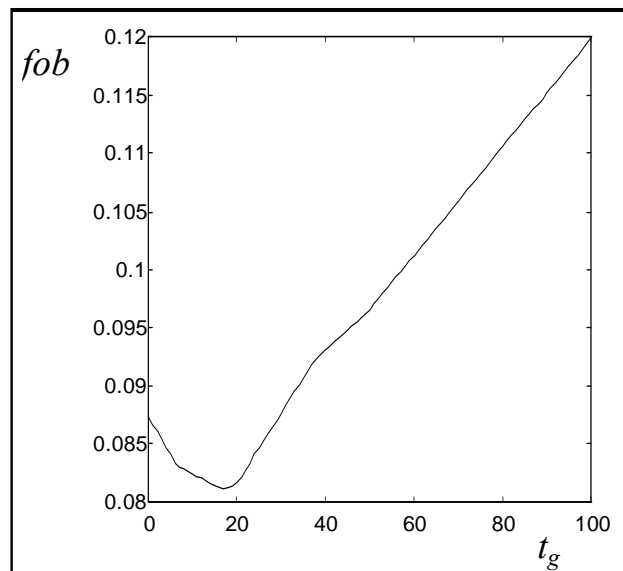


Figura 15.4. Caso1, horario. Función objetivo de Fase 2 ($\alpha=0.03$)

El valor óptimo alcanzado es un compromiso entre los atributos de molestia al viajero, consumo de energía y penalización del mando. El primero tiende a recuperar el retraso tan rápido como sea posible, el segundo penaliza la rapidez, ya que las marchas rápidas son costosas energéticamente, y el tercero también penaliza valores altos de t_g , ya que implica solicitar correcciones también altas.

En la Fase 3 se calculan las correcciones individuales b para cada tren. En la Tabla 15.10 se detalla la solución obtenida, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y el error e de horario a final de plan.

	b	d	e
<i>tren 0</i>	-3	-25	0
<i>tren 1</i>	17	0	0
<i>tren 2</i>	17	0	0
<i>tren 3</i>	17	0	0
<i>tren 4</i>	17	0	0

Tabla 15.10. Caso1, horario. Fase 3 ($\alpha=0.03$).

Las correcciones individuales introducen a los trenes no retrasados inicialmente un retraso de 17 s que compensan los 17 s de adelanto que les impuso la variable global t_g , quedando con corrección nula. Se alcanzan estos valores gracias al atributo de penalización de mando, que penaliza los adelantos que no llevan a una mejora del resto de los atributos.

El tren 0 modifica en 3 segundos su corrección global, al alcanzarse un nuevo equilibrio de atributos al haber disminuido el atributo V de penalización de mando a causa del resto de los trenes. En la Tabla 15.11 se detallan estos atributos y otros datos de interés.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
1.59	0	0	-	0.27	0	1.23	0.09	62.5	70.17	297

Tabla 15.11. Caso 1, horario. Datos del algoritmo de optimización Fase 3 ($\alpha=0.03$).

En la Tabla 15.12 se representa la trayectoria de tiempos de salida de estación que el control a medio plazo impone al control a corto plazo. El número inferior en cada celda indica el tiempo de marcha que ha elegido el simulador para cumplir con el tiempo de salida en la interestación anterior. En regulación por horario y horario en cabeceras este número aparece referido al tiempo de la marcha más rápida (marcha 0, 88 s).

En la trayectoria anterior se aprecia cómo el tren 0 comienza a cumplir con el horario a partir de la estación 3, por haber utilizado marchas rápidas. El simulador ajusta el tiempo de marcha en cada interestación para que el tren no tenga que esperar en la estación destino a que se cumpla el horario. Este es el motivo por el que los tiempos de marcha del tren 1 en las primeras estaciones son más grandes, ya que el tren parará menos para carga y descarga de viajeros debido a que el intervalo al tren 0 es todavía más pequeño de lo normal.

	<i>esta 0</i>	<i>esta 1</i>	<i>esta 2</i>	<i>esta 3</i>	<i>esta 4</i>	<i>esta 5</i>	<i>esta 6</i>	<i>esta 7</i>	<i>esta 8</i>	<i>esta 9</i>
<i>tren 0</i>	25	136.0 5.8	247.0 6.1	360.0 8.3	480.0 15.3	600.0 15.3				
<i>tren 1</i>	240.0 16.0	360.0 15.8	480.5 15.5	600.0 15.3					0	120.0 15.3
<i>tren 2</i>	480.0 15.3	600.0 15.3					0	120.0 15.3	240.0 15.3	360.0 15.3
<i>tren 3</i>					0	120.0 15.3	240.0 15.3	360.0 15.3	480.0 15.3	600.0 15.3
<i>tren 4</i>			0	120.0 15.3	240.0 15.3	360.0 15.3	480.0 15.3	600.0 15.3		

Tabla 15.12. Caso1, horario. Trayectoria solución Fase 3 ($\alpha=0.03$).

La fase 4 de optimización de los repartos tampoco mejora la solución obtenida en la fase anterior.

Regulación mixta con pendiente del modelo carga $\alpha = 0.03$

En regulación mixta los trenes tienen un horario de paso por las estaciones cabecera, estaciones 0 y 5. Los trenes no pueden salir de estas estaciones con adelanto respecto al horario oficial. Si llegaran demasiado pronto, serían retenidos. En el resto de las estaciones, sin embargo, sí pueden adelantarse al horario de paso. El plan de regulación del tren 0 finaliza en la estación 5, que es cabecera, mientras que para el resto de los trenes no existe restricción de salida mínima por horario en la última estación del plan.

En la Tabla 15.13 se presentan los resultados de la Fase 1 y de la Fase 2, donde ei es el error de intervalo a final de plan y ec es el error de horario en el paso que todo tren efectúa por una estación cabecera durante el plan. El error de intervalo está medido sobre la media de los intervalos a comienzo del plan, que vale 240 s.

El tiempo de recorrido nominal durante el plan T vale en regulación por horario 600 s para todos los trenes, ya que éste es el tiempo que deberá emplear un tren libre de perturbaciones en recorrer el plan al ritmo que marcan los horarios en las estaciones cabecera.

Las correcciones iniciales b_0 de cada tren han sido calculadas teniendo en cuenta errores de intervalo, por lo que aparecen normalizadas.

	b_0	T	d	ei	ec
<i>tren 0</i>	0	600	-25	0	0
<i>tren 1</i>	25	600	0	0	0
<i>tren 2</i>	25	600	0	0	0
<i>tren 3</i>	25	600	0	0	0
<i>tren 4</i>	25	600	0	0	0

Tabla 15.13. Caso1, mixto. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.03$).

El valor que toma la variable t_g de corrección global para la solución anterior es de 25 s. Teniendo en cuenta el valor de las correcciones iniciales b_0 para cada tren, al tren 0 se le solicita recuperar un total de 25 s, y al resto de los trenes 0 s, es decir, comportamiento nominal. El ritmo de recuperación del retraso del tren 0 es de 5 s por estación, y por tanto recupera totalmente el retraso inicial en la última estación del plan, que es estación cabecera. En esta fase de optimización de la corrección global no es adecuado solicitar ganar más tiempo a los trenes, pues los trenes no retrasados se adelantarían a su horario en la última estación del plan, ya que por no ser estaciones cabecera no existe restricción de esperar a que se cumpla el horario.

En la Tabla 15.14 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta fase.

t_g	fob	$a_{p_Y Y}$	$a_{p_H H}$	$a_{p_T T}$	$b_{p_R R}$	$b_{p_W W}$	c_C	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
25	1.87	0	-	0	0.6	0	1.22	0.05	62.5	70.1	15

Tabla 15.14. Caso 1, mixto. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.03$).

En la Figura 15.5 se representa la fob en función de la variable t_g , presentando un mínimo muy claro en $t_g=25$ s. Para valores menores el tren 0 no recupera completamente su retraso, y para valores mayores el resto de los trenes comienzan a adelantarse a su horario en la última estación del plan, penalizándose el atributo de regularidad de intervalo a final de plan debido a que el tren 0 no puede adelantarse a su horario.

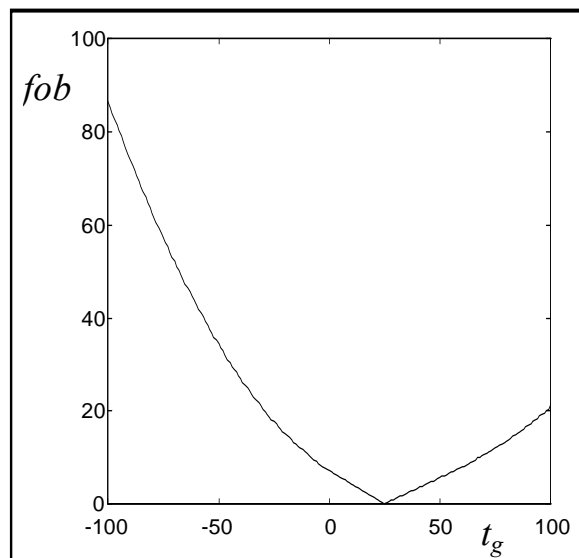


Figura 15.5. Caso 1, mixto. Función objetivo de Fase 2 ($\alpha=0.03$)

En la Fase 3 se calculan las correcciones individuales b para cada tren. En la Tabla 15.15 se detalla la solución obtenida, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y los errores de intervalo y horario en cabeceras.

	b	d	ei	ec
<i>tren 0</i>	-9	-25	0	0
<i>tren 1</i>	0	0	0	0
<i>tren 2</i>	0	0	0	0
<i>tren 3</i>	0	0	0	0
<i>tren 4</i>	0	0	0	0

Tabla 15.15. Caso1, horario. Fase 3 ($\alpha=0.03$).

Tras la fase de correcciones individuales los trenes no retrasados continúan con corrección nula, debido a que cualquier desviación penaliza la regularidad como en la fase anterior. El tren 0 aumenta la rapidez de recuperación del error, solicitando una corrección total de $25 + 9 = 36$ s, que supone un ritmo de recuperación de 7.2 s por estación. Este es el compromiso alcanzado entre los atributos de consumo, molestia al viajero por irregularidad del intervalo durante el plan y magnitud del mando.

En la Tabla 15.16 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta fase.

fob	$a_{p_Y}Y$	$a_{p_H}H$	$a_{p_T}T$	$b_{p_R}R$	$b_{p_W}W$	c_C	p_VV	U_{min}	U	$n. eval.$
1.70	0	-	0	0.41	0	1.22	0.068	62.5	70.1	271

Tabla 15.16. Caso 1, mixto. Datos del algoritmo de optimización Fase 3 ($\alpha=0.03$).

En la Tabla 15.17 se presenta el resultado tras la Fase 4 de la optimización, donde las variables independientes son las correcciones individuales b y los repartos r de corrección a aplicar en cada estación del plan.

	b	r	d	ei	ec
<i>tren 0</i>	-4	0.8	-25	0	0
<i>tren 1</i>	0	0	0	0	0
<i>tren 2</i>	0	0	0	0	0
<i>tren 3</i>	0	0	0	0	0
<i>tren 4</i>	0	0	0	0	0

Tabla 15.17. Caso1, mixto. Fase 4 ($\alpha=0.03$).

Con el grado de libertad adicional que le proporciona la variable de reparto, el tren 0 ha alcanzado un nuevo equilibrio en su transitorio. En particular, la variable de reparto se hace positiva, lo que indica que en las primeras estaciones del plan recupera más tiempo que en las últimas. La corrección individual del tren 0 también se ha corregido unos segundos.

En la Tabla 15.18 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta fase.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
1.58	0	-	0	0.26	0	1.26	0.06	62.5	70.4	189

Tabla 15.18. Caso 1, mixto. Datos del algoritmo de optimización Fase 4 ($\alpha=0.03$).

La solución mejora debido a la disminución del atributo de molestia al viajero, que está midiendo el intervalo que ve el usuario durante el transitorio. Al recuperar más tiempo el tren 0 en las primeras estaciones disminuye antes el error de intervalo en las estaciones del plan para dicho tren. En la Figura 15.6 se representa la fob en función de la variable de reparto del tren 0, r_0 , manteniendo constantes el resto de las variables en su valor óptimo.

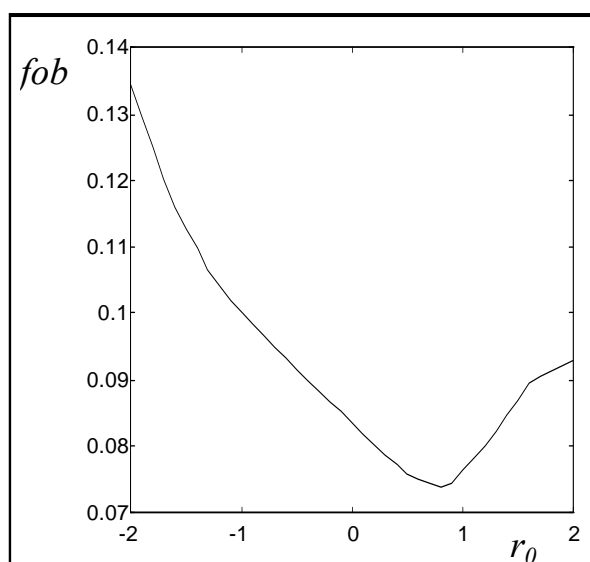


Figura 15.6. Caso 1, mixto. Variable de reparto del tren 0 ($\alpha=0.03$)

	esta 0	esta 1	esta 2	esta 3	esta 4	esta 5	esta 6	esta 7	esta 8	esta 9
tren 0	25	134.5 4.4	246.4 7.0	360.7 9.5	477.3 12.0	600.0 18.0				
tren 1	240.0 16.0	360.0 15.7	480.5 15.5	600.0 15.3					0	120.0 15.3
tren 2	480.0 15.3	600.0 15.3					0	120.0 15.3	240.0 15.3	360.0 15.3
tren 3					0	120.0 15.3	240.0 15.3	360.0 15.3	480.0 15.3	600.0 15.3
tren 4			0	120.0 15.3	240.0 15.3	360.0 15.3	480.0 15.3	600.0 15.3		

Tabla 15.19. Caso 1, horario. Trayectoria solución Fase 4 ($\alpha=0.03$).

En la Tabla 15.19 se detalla el plan de regulación definitivo tras la Fase 4. El tren 0 llega a recuperar el retraso en la estación 3, pero para llegar en horario a la estación cabecera de final de plan le es suficiente con marchas lentas en las siguientes estaciones, aprovechándose que en la estación 4 se puede permitir llegar con retraso, pues no es estación cabecera.

Regulación por horario con pendiente del modelo carga $\alpha = 0.06$

Para estudiar la influencia de la pendiente α del modelo de carga de viajeros se presenta a continuación el plan de regulación resultado cuando dicho parámetro vale el doble a los ejemplos previos, esto es, $\alpha=0.06$. En particular se considera regulación por horario, ya que permite la comparación con el caso de $\alpha=0.03$ de forma especialmente sencilla.

En la Tabla 15.20 se presentan los resultados de las Fases 1 y de la Fase 2, donde el error e representa desviación respecto al horario en la última estación del plan de regulación.

	b_0	T	d	e
<i>tren 0</i>	-25	600	-25	0
<i>tren 1</i>	0	600	0	0
<i>tren 2</i>	0	600	0	0
<i>tren 3</i>	0	600	0	0
<i>tren 4</i>	0	600	0	0

Tabla 15.20. Caso 1, horario. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.06$).

El resultado de la Fase 2 de optimización global es $t_g = 12$, frente al resultado de $t_g = 21$ obtenido cuando $\alpha=0.03$. Esto quiere decir que el ritmo de recuperación del retraso es menor, pasando de $(25+21)/5 = 8.4$ s a $(25+12)/5 = 7.4$ s por estación. El motivo es que, una vez que los atributos de regularidad a final de plan no influyen por estar completamente corregido el error inicial, el atributo que está determinando el transitorio es el de consumo. Al ser mayor el parámetro α es necesario que los trenes incrementen su velocidad para recuperar el mismo retraso, pues el tiempo de parada en estación será mayor. Este incremento de velocidad se traduce en un incremento de consumo, cuyo resultado es un nuevo equilibrio entre molestia al viajero y consumo en el que el tren 0 recupera el retraso más lentamente, evitando marchas excesivamente rápidas y costosas.

t_g	f_{ob}	$a_{p_Y Y}$	$a_{p_H H}$	$a_{p_T T}$	$b_{p_R R}$	$b_{p_W W}$	c_C	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
12	4.44	0	0	-	0.36	0	3.72	0.17	62.5	85.7	9

Tabla 15.21. Caso 1, horario. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.06$).

En la Tabla 15.21 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta Fase. La contribución del atributo de consumo a la función objetivo se ha triplicado en comparación con el ejemplo con parámetro α pequeño.

El consumo total durante el plan se ha incrementado en 15 kWh al doblarse el parámetro α , a lo que contribuye no sólo la recuperación del tren 0, sino que el resto de los trenes han de aumentar su marcha para mantenerse en horario.

En la Tabla 15.22 se detalla la solución obtenida tras la Fase 3 de optimización de las correcciones individuales, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y el error e de horario a final de plan.

	b	d	e
<i>tren 0</i>	0	-25	0
<i>tren 1</i>	12	0	0
<i>tren 2</i>	12	0	0
<i>tren 3</i>	12	0	0
<i>tren 4</i>	12	0	0

Tabla 15.22. Caso1, horario. Fase 3 ($\alpha=0.06$).

Las correcciones individuales introducen a los trenes no retrasados inicialmente un retraso de 12 s que compensan los 12 s de adelanto que les impuso la variable global t_g , quedando con corrección nula. Es el mismo tipo de resultado que se obtuvo en el ejemplo anterior de regulación por horario.

En la Tabla 15.23 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta fase.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
4.82	0	0	-	0.36	0	3.72	0.74	62.5	85.7	280

Tabla 15.23. Caso 1, horario. Datos del algoritmo de optimización Fase 4 ($\alpha=0.06$).

La disminución de la fob está causada exclusivamente por la penalización del mando mediante el atributo V .

En la Tabla 15.24 se detalla el plan de regulación definitivo tras la Fase 4. El tren 0 llega a recuperar totalmente su retraso una estación más tarde, en la estación 4. Nótese que el tiempo de marcha que emplean todos los trenes es menor que el utilizado en los ejemplos con $a = 0.03$. También se observa cómo según se va reduciendo el retraso del tren 0 va siendo necesario un tiempo de marcha más lento para mantener el mismo ritmo de recuperación de retraso, debido a que el tren se encuentra menos viajeros en las estaciones.

	<i>esta 0</i>	<i>esta 1</i>	<i>esta 2</i>	<i>esta 3</i>	<i>esta 4</i>	<i>esta 5</i>	<i>esta 6</i>	<i>esta 7</i>	<i>esta 8</i>	<i>esta 9</i>
<i>tren 0</i>	25	137.6 0.6	250.2 1.0	362.8 1.4	480.0 6.2	600.0 9.0				
<i>tren 1</i>	240.0 10.4	360.0 10.0	480.5 9.6	600.0 9.1					0	120.0 9.0
<i>tren 2</i>	480.0 9.0	600.0 9.0					0	120.0 9.0	240.0 9.0	360.0 9.0
<i>tren 3</i>					0	120.0 9.0	240.0 9.0	360.0 9.0	480.0 9.0	600.0 9.0
<i>tren 4</i>			0	120.0 9.0	240.0 9.0	360.0 9.0	480.0 9.0	600.0 9.0		

Tabla 15.24. Caso1, horario. Trayectoria solución Fase 3 ($\alpha=0.06$).

15.1.5 Caso 2. Retraso severo de un tren

En el segundo caso ejemplo el tren 0 sale de la estación 0 con un retraso de 100 s, mientras que el resto han salido conforme a horario de sus estaciones respectivas. Los últimos tiempos de salida medidos para cada tren y las estaciones correspondientes se encuentran en la Tabla 15.25.

	<i>Última estación de salida</i>	<i>Último tiempo de salida (s)</i>
<i>tren 0</i>	0	100
<i>tren 1</i>	8	0
<i>tren 2</i>	6	0
<i>tren 3</i>	4	0
<i>tren 4</i>	2	0

Tabla 15.25. Caso 2. Última medición de cada tren

La diferencia fundamental que presenta este caso ejemplo respecto del anterior con retraso ligero es que ahora el retraso no puede ser recuperado por el tren 0 simplemente incrementando su velocidad. En regulación por intervalo el resto de los trenes perderán un tiempo apreciable para alcanzar un nuevo equilibrio de intervalos, siendo necesario recurrir a retenciones en estación. En regulación por horario el plan no eliminará completamente los errores a final de plan, obteniéndose un resultado especialmente interesante para el valor alto de α : el tren 4 (anterior al retrasado) espera al tren 0 en contra de sus intereses de horario para facilitar la recuperación de tiempo del tren 0, y contribuir a cerrar el hueco creado.

A continuación se presentan los resultados de optimización del control a medio plazo para las próximas 5 estaciones, para regulación por intervalo y pendiente del modelo de carga 0.03 y regulación por horario y pendiente del modelo de carga 0.06.

Regulación por intervalo con pendiente del modelo carga $\alpha=0.03$

En la Tabla 15.26 se presentan los resultados de la Fase 1 y de la Fase 2. Para cada tren se especifican los mismos datos que en los ejemplos anteriores. El error e mide el error de intervalo al final del plan de regulación, medido respecto de la media de los intervalos circulando con marcha nominal 1 (220 s).

	b_0	T	d	e
tren 0	0	567	-31	12
tren 1	102	538	71	-29
tren 2	103	551	72	15
tren 3	104	551	73	-2
tren 4	105	551	74	-2

Tabla 15.26. Caso 2, intervalo. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.03$).

Las correcciones iniciales b_0 aparecen normalizadas al mayor retraso (tren 0). Los demás trenes quedan con adelantos ligeramente superiores a 100 s. El tren 4 queda adelantado 5 s más de lo esperado debido a que se produce un adelanto adicional por su cercanía al tren 0, que se lleva parte de su pasaje. Este efecto se propaga al resto de los trenes, incrementando un adelanto de un segundo más a cada tren.

La variable t_g de corrección global en la Fase 2 toma un valor de 31 s. Provoca que el tren 0 gane 31 s en todo el plan, circulando prácticamente a su velocidad máxima, mientras que el resto de los trenes pierden poco más de 70 s respecto a su tiempo nominal T de recorrido si no hubiera acciones de control. Al final del plan, los errores de intervalo todavía son considerables.

En la Tabla 15.27 se detallan las contribuciones de los distintos atributos a la función objetivo en el punto óptimo y otros datos de interés.

t_g	f_{ob}	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
31	140.9	122.4	-	-	14.8	1.3	1.8	0.64	62.5	73.9	10

Tabla 15.27. Caso 2, intervalo. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.03$).

El atributo que determina la solución es Y , regularidad de intervalo a final del plan. El atributo W de molestia al viajero por retención es ahora no nulo, indicando que hay consignas de regulación de esperas en estación. La energía empleada en el plan es pequeña, debido a que los trenes no retrasados circulan a su marcha más lenta.

La Figura 15.7 muestra la forma de la función objetivo en función de t_g . La zona de pendiente pequeña en el centro de la gráfica corresponde a valores de t_g en que no está saturado el mando de ningún tren. La fuerte rampa para valores altos de t_g se debe a que se satura la capacidad de recuperación de tiempo del tren 0, y la rampa

para valores muy negativos corresponde a saturación de la capacidad de retención en estación de los trenes no retrasados.

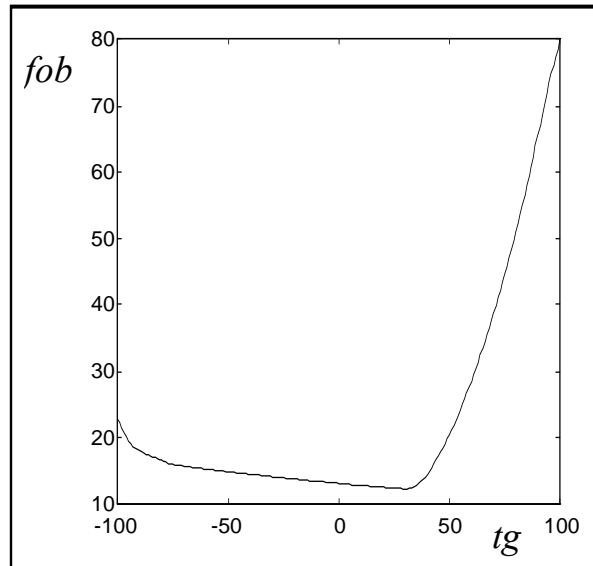


Figura 15.7. Caso 2, intervalo. Función objetivo de Fase 2 ($\alpha=0.03$)

En la Tabla 15.28 se detalla la solución obtenida tras la optimización de las correcciones individuales en la Fase 3, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y el error e de intervalo a final de plan.

	b	d	e
tren 0	-12	-36	0
tren 1	24	94	0
tren 2	9	81	0
tren 3	8	81	-1
tren 4	6	80	-1

Tabla 15.28. Caso 2, intervalo. Fase 3 ($\alpha=0.03$).

Tras la Fase 3 se modifican los tiempos de corrección de cada tren, contribuyendo a eliminar casi completamente el error de intervalo a final del plan a costa de retener a los trenes no retrasados en torno a los 85 s.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
24.0	3.39	-	-	14.8	3.06	2.0	0.75	62.5	75	337

Tabla 15.29. Caso 2, intervalo. Datos del algoritmo de optimización Fase 3 ($\alpha=0.03$).

En la Tabla 15.29 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés. La función objetivo ha disminuido respecto de la fase anterior a costa de la regularidad de intervalo Y . El atributo de molestia al viajero por retenciones en estación crece,

debido a que los trenes no retrasados ya circulaban a su marcha más lenta, y tienen que perder tiempo. El consumo crece, ya que el tren 0 circula tras esta fase a su marcha más rápida en todas las estaciones del plan.

En la Figura 15.8 se representa la *fob* en función de las correcciones individuales de cada tren, tomando para cada una de ellas el resto en su valor óptimo.

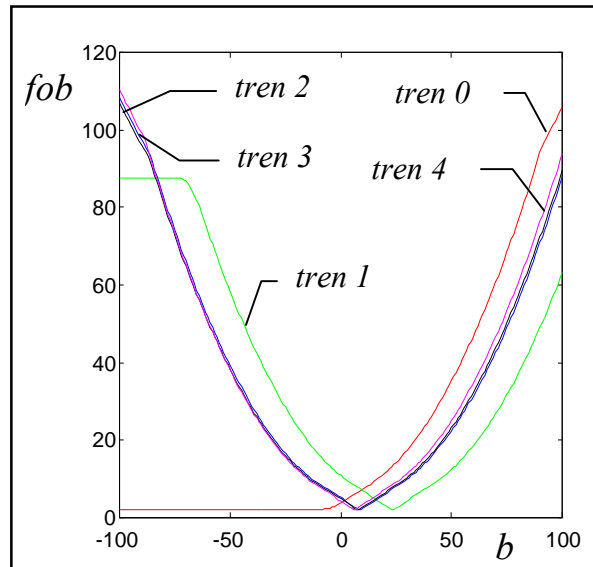


Figura 15.8. Caso 12, intervalo. Función objetivo de Fase 3 ($\alpha=0.03$)

La capacidad de recuperar tiempo del tren 0 se satura para correcciones negativas, mientras que los demás trenes alcanzan su óptimo en un punto tal que equilibran los intervalos del carrusel de trenes.

	esta 0	esta 1	esta 2	esta 3	esta 4	esta 5	esta 6	esta 7	esta 8	esta 9
tren 0	100	207.2 -6 0	314.1 -6 0	420.4 -6 0	526.0 -6 0	631.1 -6 0				
tren 1	255.2 12 6	381.0 12 5	506.6 12 4	632.0 12 4					0	129.3 12 6
tren 2	505.7 12 4	632.2 12 4					0	126.6 12 4	253.0 12 3	379.3 12 3
tren 3					0	126.6 12 4	252.8 12 3	379.1 12 3	505.3 12 3	631.6 12 3
tren 4			0	126.5 12.0 4	252.7 12.0 3	378.8 12.0 3	505.0 12.0 3	631.2 12.0 3		

Tabla 15.30. Caso 2, intervalo. Trayectoria solución Fase 3 ($\alpha=0.03$).

En la Tabla 15.30 se representa la trayectoria de tiempos de salida de estación que el control a medio plazo impone al control a corto plazo. Además del tiempo de salida de cada estación y el tiempo de marcha elegido para recorrer cada interestación, aparece al final de cada celda el tiempo de retención por regulación previsto en cada estación. Esta retención vale para los trenes no retrasados aproximadamente 4 s por estación.

El tren inicialmente retrasado circula con su marcha más rápida, mientras que el resto de los trenes lo hacen con la marcha más lenta (en la tabla los tiempos de marcha están referidos a la marcha 1, marcha nominal). En este ejemplo, se ha optimizado el valor de las retenciones en estación de cada tren, ya que todos los trenes circulan con marchas saturadas.

Tras la Fase 4 de optimización del reparto de las correcciones por estaciones disminuye muy poco la función objetivo, por lo que se considera que no mejora significativamente la solución de la fase 3.

Regulación por horario con pendiente del modelo carga $\alpha=0.06$

A continuación se estudia el Caso 2 con regulación por horario y pendiente α del modelo tiempo de parada por viajeros igual a 0.06. Al presentar este parámetro un valor alto, aumentan las interacciones entre los trenes, pues el retraso o adelanto de un tren en una estación provoca que el tren que le sigue altere significativamente su tiempo de parada en su paso por la misma estación.

En la Tabla 15.31 se presentan los resultados de la Fase 1 y de la Fase 2, donde el error e representa desviación respecto al horario en la última estación del plan de regulación.

El tiempo de recorrido nominal durante el plan T vale en regulación por horario 600. Las correcciones iniciales b_0 de cada tren son directamente el error de horario al comienzo del plan de regulación, donde el tren 0 tiene un retraso de 100 s.

	b_0	T	d	e
<i>tren 0</i>	-100	600	-21	79
<i>tren 1</i>	0	600	28	28
<i>tren 2</i>	0	600	28	28
<i>tren 3</i>	0	600	28	28
<i>tren 4</i>	0	600	28	28

Tabla 15.31. Caso 2, horario. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.06$).

El resultado a final de plan es que el tren 0 sólo puede recuperar 21 s, debido a que el valor alto del parámetro α hace que los tiempos de parada en estación sean altos, y el margen de tiempo a recuperar pequeño. El resto de los trenes pierden su horario, y esperan al tren retrasado 28 s. De otra forma el retraso del tren 0 iría en aumento,

debido a que el intervalo abierto con el tren que le precede provocaría unos tiempos de parada en estación muy altos.

En la Tabla 15.32 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta Fase, que tiene su óptimo en $t_g = -28$ s.

t_g	fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
-28	871.9	290.6	561.5	-	16.4	0.14	2.84	0.39	62.5	80.3	12

Tabla 15.32. Caso 2, horario. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.06$).

Los atributos que determinan el valor del óptimo son los de regularidad de horario e intervalo a final de plan. En este ejemplo se aprecia claramente la conveniencia de valorar en regulación por horario el atributo de regularidad de intervalo. Este atributo es el responsable de que el resto de los trenes pierdan su horario y esperen al tren retrasado cuando el valor del retraso es tal que este tren tendería a ampliar su error en lugar de corregirlo. A este efecto también contribuye el atributo de molestia al viajero por incumplimiento de horario durante el transitorio.

En la Figura 15.9 se representa la fob en función de la variable de corrección global t_g . Para valores positivos de esta variable el tren retrasado ya está saturado a la marcha más rápida, mientras que el resto de los trenes cumplen su horario en la última estación del plan. Como no es posible adelantarse al horario, valores positivos de t_g no modifican tampoco para estos trenes su comportamiento, resultando una fob con la pequeña pendiente que introduce la penalización del mando.

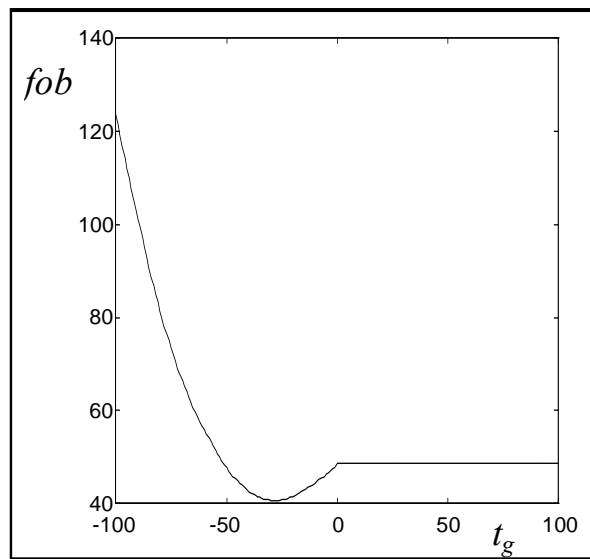


Figura 15.9. Caso 2, mixto. Función objetivo de Fase 2 ($\alpha=0.06$)

Para valores negativos de t_g los trenes inicialmente no retrasados pierden tiempo, y no llegan a su hora a su última estación del plan. El óptimo es un compromiso entre que los trenes inicialmente no retrasados no pierdan demasiado tiempo y que no se abra demasiado hueco entre el tren 0 y el que le precede en línea.

En la Tabla 15.33 se detalla la solución obtenida tras la Fase 3 de optimización de las correcciones individuales, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y el error e de horario a final de plan.

	b	d	e
<i>tren 0</i>	43	-22	78
<i>tren 1</i>	0	28	28
<i>tren 2</i>	0	28	28
<i>tren 3</i>	0	28	28
<i>tren 4</i>	7	35	35

Tabla 15.33. Caso 2, horario. Fase 3 ($\alpha=0.06$).

Tras la Fase 3 dos trenes corrigen su comportamiento. El tren 4 realiza una corrección muy interesante, perdiendo 7 s adicionales. El motivo es que este tren espera al tren 0 para ayudarlo a ganar tiempo y disminuir el hueco creado, a costa de su propio horario. Este comportamiento no se presenta cuando el retraso inicial es menor o cuando el parámetro α es pequeño. Al modificar su comportamiento el tren 4, el tren 0 puede apurar un segundo más, y modifica su corrección individual hasta conseguirlo.

En la Tabla 15.34 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés. La disminución de la fob está causada por la mejora del intervalo a final de plan, a costa del horario del tren 4.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
866.4	268.6	578.0	-	16.6	0.14	2.77	0.29	62.5	79.8	361

Tabla 15.34. Caso 2, horario. Datos del algoritmo de optimización Fase 3 ($\alpha=0.06$).

En la Tabla 15.35 se detalla el plan de regulación tras la Fase 3. Como en el ejemplo anterior, se incluye en cada celda en último lugar el tiempo de retención aplicado en estación. Los tiempos de marcha están referidos a la marcha más rápida, por lo que 0 indica marcha 1 y 18 s marcha 4.

Los trenes inicialmente no retrasados circulan con marchas lentas, pero en general no se utilizan retenciones en estación. Comparando esta trayectoria con la obtenida anteriormente por intervalo (Tabla 15.34) vemos que por horario se retiene menos a los trenes inicialmente no retrasados, debido a que no se puede llegar a un nuevo equilibrio después de perder tiempo como ocurría por intervalo. En explotación por horario la situación ideal son tiempos absolutos, lo que hace más largo el proceso de

recuperación de errores. Los trenes que se retrasan como medida de regulación han de recuperar en planes posteriores el tiempo perdido.

	<i>esta 0</i>	<i>esta 1</i>	<i>esta 2</i>	<i>esta 3</i>	<i>esta 4</i>	<i>esta 5</i>	<i>esta 6</i>	<i>esta 7</i>	<i>esta 8</i>	<i>esta 9</i>
<i>tren 0</i>	100 0 0	216.4 0 0	332.7 0 0	448.4 0 0	563.3 0 0	677.6 0 0				
<i>tren 1</i>	251.2 18.0 2	376.8 18.0 1	502.4 18.0 1	628.0 18.0 0					0	125.6 14.3 0
<i>tren 2</i>	502.4 13.9 0	628.0 13.9 0					0	125.6 14.3 0	251.2 13.9 0	376.8 13.9 0
<i>tren 3</i>					0	125.6 14.3 0	251.2 13.9 0	376.8 13.9 0	502.4 13.9 0	628.0 13.9 0
<i>tren 4</i>			0	126.9 15.5 0	253.8 15.1 0	380.7 15.0 0	507.6 15.0 0	634.5 14.9 0		

Tabla 15.35. Caso 2, horario. Trayectoria solución Fase 3 ($\alpha=0.06$).

En este caso la Fase 4 de optimización del reparto tampoco mejora significativamente la solución obtenida en la Fase 3.

15.1.6 Caso 3. Múltiples retrasos

Se va a considerar ahora un caso en el que varios trenes presentan un retraso inicial. El tren 0 parte con un retraso severo de 100 s, el tren 2 con un retraso de 50 s, y el tren 3 con un retraso del mismo valor. El tren 1 y el tren 4 no tienen error respecto del horario de salida en su paso por la última estación. En la Tabla 15.36 figura la última medida de cada tren.

	<i>Última estación de salida</i>	<i>Último tiempo de salida (s)</i>
<i>tren 0</i>	0	100
<i>tren 1</i>	8	0
<i>tren 2</i>	6	50
<i>tren 3</i>	4	50
<i>tren 4</i>	2	0

Tabla 15.36. Caso 3. Última medición de cada tren

Se va a estudiar la trayectoria generada por el control a medio plazo, en primer lugar con regulación por intervalo y a continuación con regulación mixta. Se empleará una pendiente α del modelo de carga igual a 0.03. En el primer ejemplo se alcanza un

nuevo equilibrio de intervalos, donde cada tren gana o pierde tiempo en función de su retraso inicial. En el segundo ejemplo se aprecia claramente la mejora que introduce en la solución final la Fase 4 de optimización de los repartos de las correcciones, cuando hay que mantener el horario en ciertas estaciones del plan para cada tren.

Regulación por intervalo con pendiente del modelo carga $\alpha = 0.03$

En la Tabla 15.37 se presentan los resultados de la Fase 1 y de la Fase 2. Para cada tren se especifican los mismos datos que en los ejemplos anteriores. El error e mide el error de intervalo al final del plan de regulación, medido respecto de la media de los intervalos circulando con marcha nominal 1 (221 s).

	b_0	T	d	e
<i>tren 0</i>	0	567	-31	-19
<i>tren 1</i>	102	538	71	30
<i>tren 2</i>	51	559	20	-21
<i>tren 3</i>	51	552	20	8
<i>tren 4</i>	104	545	73	6

Tabla 15.37. Caso 3, intervalo. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.03$).

Las correcciones iniciales b_0 aparecen normalizadas al mayor retraso (tren 0). Los trenes inicialmente no retrasados quedan con retrasos superiores a los 100 s, y los trenes inicialmente retrasados 50 s quedan con adelantos de 51 s. Las correcciones d efectuadas no logran regularizar completamente los intervalos, que aún presentan errores apreciables.

El valor óptimo de la variable t_g de corrección global en la Fase 2 es de 31 s. En la Tabla 15.38 se detallan las contribuciones de los distintos atributos a la función objetivo en el punto óptimo y otros datos de interés.

t_g	fob	$a_{p_Y Y}$	$a_{p_H H}$	$a_{p_T T}$	$b_{p_R R}$	$b_{p_W W}$	c_C	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
31	187.6	167.4	-	-	16.4	0.49	2.9	0.43	62.5	80.6	10

Tabla 15.38. Caso 3, intervalo. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.03$).

El atributo que determina la solución es el de regularidad de intervalo a final del plan. El atributo W de molestia al viajero por retención es ahora no nulo, indicando que hay consignas de regulación de esperas en estación.

La Figura 15.10 muestra la forma de la función objetivo en función de t_g . De nuevo existe una zona central de pendiente pequeña en el centro de la gráfica correspondiente a valores de t_g en que no está saturado el mando de ningún tren. La fuerte rampa para valores altos de t_g se debe a que se satura la capacidad de recuperación de tiempo del tren más retrasado.

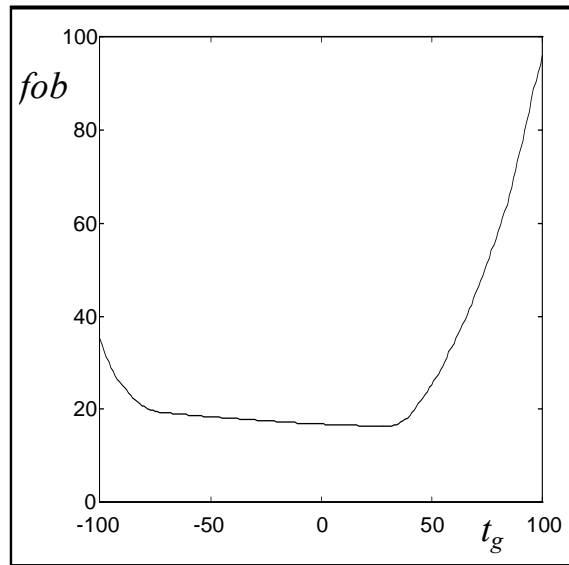


Figura 15.10. Caso 3, intervalo. Función objetivo de Fase 2 ($\alpha=0.03$)

En la Tabla 15.39 se detalla la solución obtenida tras la optimización de las correcciones individuales en la Fase 3, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y el error e de intervalo a final de plan.

	b	d	e
tren 0	-11	-36	0
tren 1	23	94	0
tren 2	3	22	0
tren 3	10	30	0
tren 4	14	87	1

Tabla 15.39. Caso 3, intervalo. Fase 3 ($\alpha=0.03$).

Tras la Fase 3 el tren inicialmente más retrasado logra recuperar 5 s más, viajando en todas las estaciones del plan a su marcha más rápida. El resto de los trenes pierden tiempo, alcanzando un nuevo equilibrio de intervalos similar al obtenido en el Caso 2. Esto es debido a que en los dos ejemplos la magnitud del mayor retraso es la misma. Los retrasos adicionales del tren 2 y del tren 3 facilitan en este caso la regularización del intervalo, pues al estar ya retrasados han de perder un tiempo menor en comparación con el Caso 2.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
23.8	2.76	-	-	15.8	1.8	2.9	0.55	62.5	80.6	370

Tabla 15.40. Caso 3, intervalo. Datos del algoritmo de optimización Fase 3 ($\alpha=0.03$).

En la Tabla 15.40 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés. La función objetivo ha disminuido respecto de la fase anterior a costa de la regularidad

de intervalo Y . Comparado con el Caso 2, disminuye el atributo de retenciones en estación W , ya que los trenes inicialmente retrasados 50 s han de perder menos tiempo.

En la Tabla 15.41 aparece la trayectoria de tiempos de salida de estación, junto al tiempo de marcha elegido en cada interestación (referido al tiempo de la marcha 1) y el tiempo de retención impuesto en estación.

	<i>esta 0</i>	<i>esta 1</i>	<i>esta 2</i>	<i>esta 3</i>	<i>esta 4</i>	<i>esta 5</i>	<i>esta 6</i>	<i>esta 7</i>	<i>esta 8</i>	<i>esta 9</i>
<i>tren 0</i>	100	207.2	314.1	420.3	526.0					
		-6	-6	-6	-6					
		0	0	0	0					
<i>tren 1</i>	255.1	380.8	506.3	632.0					0	129.2
	12	12	12	12						12
	6	5	4	4						6
<i>tren 2</i>	515.1	631.6					50	166.41	282.6	398.8
	5.1	5.5						4.4	4.2	4.6
	0	0						0	0	0
<i>tren 3</i>					50	167.9	284.0	400.0	516.0	632.0
						5.8	5.6	5.5	5.5	5.5
						0	0	0	0	0
<i>tren 4</i>			0	127.8	253.8	380.0	505.6	631.4		
				12	12	12	12	12		
				5	4	4	4	3		

Tabla 15.41. Caso 3, intervalo. Trayectoria solución Fase 3 ($\alpha=0.03$).

El tren 0, el más retrasado inicialmente, circula a su marcha más rápida, mientras que el resto de los trenes se retrasan respecto de su horario. El tren 1 y el tren 4, inicialmente no retrasados, necesitan de retenciones adicionales en estación para perder el tiempo necesario.

De nuevo la Fase 4 de optimización del reparto de las correcciones no mejora significativamente la solución encontrada en la Fase 3. En el ejemplo siguiente, en regulación mixta, sí se obtendrán beneficios de la fase de reparto.

Regulación mixta con pendiente del modelo carga $\alpha = 0.03$

En la Tabla 15.42 se presentan los resultados de la Fase 1 y de la Fase 2 para regulación mixta, donde ei es el error de intervalo a final de plan y ec es el error de horario en el paso que todo tren efectúa por una estación cabecera durante el plan. El error de intervalo está medido sobre la media de los intervalos a comienzo del plan, que vale 240 s.

Las correcciones iniciales b_0 de cada tren han sido calculadas teniendo en cuenta errores de intervalo, por lo que aparecen normalizadas.

	b_0	T	d	ei	ec
<i>tren 0</i>	0	600	-68	-21	32
<i>tren 1</i>	100	600	11	21	4
<i>tren 2</i>	50	600	-39	0	19
<i>tren 3</i>	50	600	-39	0	42
<i>tren 4</i>	100	600	11	0	7

Tabla 15.42. Caso 3, mixto. Punto inicial y Fase 2 ($\alpha=0.03$).

El valor que toma la variable t_g de corrección global para la solución anterior es de 89 s, aunque el tiempo máximo que logra corregir el tren 0 es 68 s, viajando con la marcha más rápida durante todo el plan. En el óptimo los errores de intervalo del tren 0 y del tren 1 tienen la misma magnitud y distinto signo, y el resto de los trenes quedan sin error de intervalo. Los errores de horario, que sólo se pueden corregir recuperando tiempo, son considerables.

En la Tabla 15.43 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés de esta fase.

t_g	fob	$a_{p_Y Y}$	$a_{p_H H}$	$a_{p_T T}$	$b_{p_R R}$	$b_{p_W W}$	c_C	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
89	335.7	83.5	-	239.4	8.6	0.33	3.45	0.38	62.5	84.1	10

Tabla 15.43. Caso 3, mixto. Datos del algoritmo de optimización Fase 2 ($\alpha=0.03$).

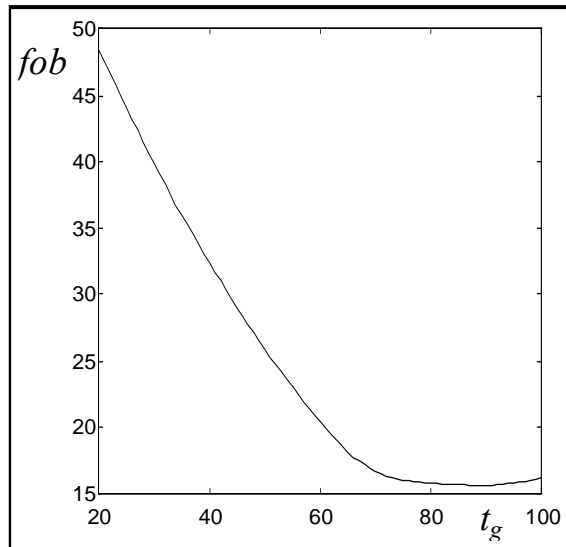


Figura 15.11. Caso 3, mixto. Función objetivo de Fase 2 ($\alpha=0.03$)

En la Figura 15.11 se representa la fob en función de la variable t_g . En la zona de fuerte pendiente para valores de tiempo de recuperación pequeños los trenes inicialmente no retrasados pierden un tiempo considerable en el plan, debido a que parten de una corrección inicial normalizada de 100 s de retención. Esto provoca que

su error de horario sea muy alto (penalizado fuertemente). El descenso de la fob en esta zona se debe a que el tren 0 aún no ha saturado su capacidad de recuperación de tiempo, con lo que el error de intervalo es pequeño, y el error de horario descende conforme todos los trenes aumentan su velocidad. A partir de que se satura la capacidad de recuperación del tren 0, aproximadamente en $t_g=70$ s, comienza a aumentar el error de intervalo, compensando la disminución del error de horario. El punto óptimo se alcanza cuando los errores de intervalo del tren 0 y del tren 1 tienen la misma magnitud.

En la Fase 3 se calculan las correcciones individuales b para cada tren. En la Tabla 15.44 se detalla la solución obtenida, junto con la corrección total real d experimentada por cada tren y los errores de intervalo y horario en cabeceras.

	b	d	ei	ec
<i>tren 0</i>	16	-68	-21	32
<i>tren 1</i>	0	11	21	4
<i>tren 2</i>	0	-39	0	19
<i>tren 3</i>	0	-39	0	42
<i>tren 4</i>	0	11	0	7

Tabla 15.44. Caso 3, horario. Fase 3 ($\alpha=0.03$).

Sólo el tren 0 modifica su corrección individual, pero consiguiendo recuperar el mismo tiempo. Se debe a que el movimiento de este tren ya estaba saturado, y la corrección individual ha llevado a la variable hasta su límite de sensibilidad mediante el atributo de penalización del mando V . En la Tabla 15.45 se detallan los atributos del óptimo, donde efectivamente sólo disminuye el atributo de mando.

fob	$a_{p_Y Y}$	$a_{p_H H}$	$a_{p_T T}$	$b_{p_R R}$	$b_{p_W W}$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
335.6	83.5	-	239.4	8.6	0.33	3.45	0.34	62.5	84.1	282

Tabla 15.45. Caso 3, mixto. Datos del algoritmo de optimización Fase 3 ($\alpha=0.03$).

En la Tabla 15.46 se presenta el resultado tras la Fase 4 de la optimización, donde las variables independientes son las correcciones individuales b y los repartos r de corrección a aplicar en cada estación del plan.

	b	r	d	ei	ec
<i>tren 0</i>	21	0	-67	-16	33
<i>tren 1</i>	6	-1.4	17	16	0
<i>tren 2</i>	1	1.5	-33	0	13
<i>tren 3</i>	5	1.2	-33	0	26
<i>tren 4</i>	6	-2.0	17	0	0

Tabla 15.46. Caso 4, mixto. Fase 4 ($\alpha=0.03$).

En este ejemplo la optimización de los repartos de las correcciones sí mejora la solución obtenida en la Fase 3. Se modifican, además de las variables de reparto, las correcciones individuales, obteniendo una pequeña mejora en los errores de intervalo y algo mayor en errores de horario en cabeceras.

Los trenes cuya variable de reparto es positiva recuperan tiempo (d negativa), y viceversa. Esto supone que todos los trenes corren más en las primeras estaciones del plan y menos en las últimas. Cuando la corrección total es positiva (retraso), para correr más en las primeras estaciones del plan se ha de repartir más corrección al final del plan, resultando una variable de reparto negativa. Cuando la corrección total es negativa (adelanto) para correr más al principio se ha de repartir más corrección también al principio, resultando una variable de reparto positiva.

En la Tabla 15.47 se detallan los atributos del óptimo y otros datos de interés. La disminución de la función objetivo se realiza mejorando la regularidad de intervalo a final de plan y sobre todo el error de horario en estaciones cabecera.

fob	$a p_Y Y$	$a p_H H$	$a p_T T$	$b p_R R$	$b p_W W$	$c C$	$p_V V$	U_{min}	U	$n. eval.$
258.5	62.8	-	182.5	8.6	0.33	3.9	0.39	62.5	87.0	1351

Tabla 15.47. Caso 3, mixto. Datos del algoritmo de optimización Fase 4 ($\alpha=0.03$).

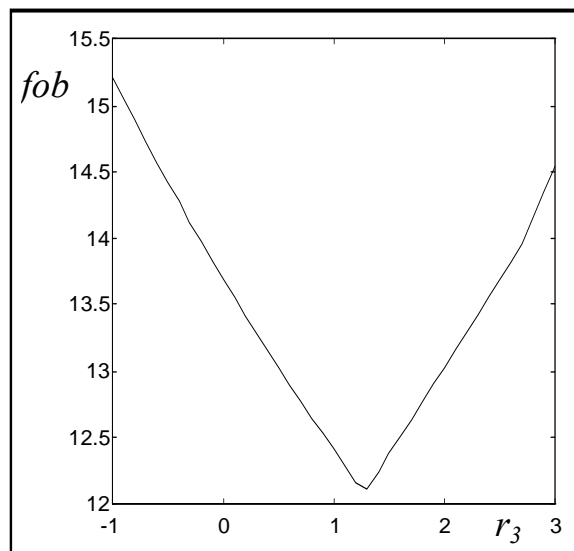


Figura 15.12. Caso 3, mixto. Función objetivo de Fase 4 ($\alpha=0.03$)

En la Figura 15.12 se ha tomado como ejemplo el tren 3, representando la fob en función de su variable de reparto r_3 manteniendo el resto de las variables en su valor óptimo. Este tren pasa por una cabecera en la estación siguiente al comienzo del plan.

El óptimo corresponde al valor del reparto que minimiza el error de horario en esta estación.

En la Tabla 15.48 aparece la trayectoria de tiempos de salida de estación tras la Fase 4, junto al tiempo de marcha elegido en cada interestación (referido al tiempo de la marcha 0) y el tiempo de retención impuesto en estación.

	<i>esta 0</i>	<i>esta 1</i>	<i>esta 2</i>	<i>esta 3</i>	<i>esta 4</i>	<i>esta 5</i>	<i>esta 6</i>	<i>esta 7</i>	<i>esta 8</i>	<i>esta 9</i>
<i>tren 0</i>	100	207.2 0 0	314.1 0 0	420.7 0 0	526.84 0 0	632.5 0 0				
<i>tren 1</i>	240 18.0 0	363.3 18.0 3	489.0 18.0 5	617.0 18.0 7					0	118.6 13.9 0
<i>tren 2</i>	492.9 13.1 0	616.9 18.0 1					50	155.7 0 0	262.3 1.3 0	374.8 7.2 0
<i>tren 3</i>					50	155.7 0 0	264.5 4.8 0	377.6 8.9 0	495.0 12.9 0	616.8 17.0 0
<i>tren 4</i>			0	116.5 11.9 0	236.3 16.7 0	360.0 18.0 0	486.7 18.0 5	616.9 18.0 8		

Tabla 15.48. Caso 3, mixto. Trayectoria solución Fase 4 ($\alpha=0.03$).

El efecto de la variable de reparto se aprecia claramente en la secuencia de tiempos de marcha y retenciones a aplicar para cada tren a lo largo del plan. El tren 1 y el tren 4 circulan a velocidad lenta, y escalonan sus retenciones de menos a más. El tren 2 y el tren 3 eligen progresivamente tiempos de marcha más lentos.

El efecto de la fase de reparto es especialmente claro para el tren 4, que elige marchas para cumplir justo el horario en la estación 5 y a continuación se le aplican retenciones en las estaciones 6 y 7.

15.2 Pruebas de regulación frente al simulador detallado

En el capítulo 8 se describió un simulador detallado del tráfico en una línea ferroviaria modelable como cerrada. En el capítulo 9 se presentaron resultados de simulación realizados modelando la Línea 3 de Metro de Madrid, utilizando como sistema de protección el ATP basado en códigos de velocidad en circuitos de vía. En el presente apartado se va a ensayar el regulador propuesto frente a este simulador, utilizando las mismas bases de datos (línea, características de trenes y escenarios de pasajeros) que las utilizadas en los ejemplos de simulación mencionados.

La Línea 3 de metro de Madrid está compuesta de 20 interestaciones más dos tramos en los finales de línea para realizar el cambio de sentido con vuelta por detrás. Para cada una de ellas se han definido cuatro vectores de deriva de conducción automática ATO, que constituyen las cuatro marchas disponibles en cada interestación (marcha 0, 1, 2, 3). La más rápida (marcha 0) coincide con la marcha tendida, y a partir de ella se han elegido la velocidad de deriva y de remotor apropiadas para distanciar consecutivamente en tiempo de recorrido el resto de las marchas aproximadamente en 6 s. Los vectores de deriva diseñados para Línea 3 se encuentran en el Apéndice E.

Cuando no actúa el regulador automático los trenes reciben sistemáticamente la marcha nominal (marcha 1), y salen de estación tan pronto como han cargado completamente al pasaje y las protecciones se lo permiten. Cuando el regulador actúa, elige la marcha más apropiada, y retiene a los trenes en estación si es preciso.

En el capítulo 9 se presentaron ejemplos de evolución del tráfico en Línea 3 sin regulación para dos tipos de escenarios de viajeros, regular y no regular. En el primero el flujo de viajeros en todas las estaciones de la línea es el mismo, y el porcentaje de viajeros que tiene como destino cada estación se reparte uniformemente entre las estaciones que restan desde la origen hasta el final de línea. En el escenario no regular existen tres estaciones cuyos flujos de viajeros triplican el del resto. En este apartado se van a considerar los mismos dos escenarios de viajeros que en el capítulo 9.

Se consideraron en el capítulo 9 dos situaciones iniciales: equilibrada y no equilibrada. La situación inicial equilibrada fue generada dejando evolucionar la línea con el regulador actuando, hasta que los errores de intervalo entraron dentro del margen de tolerancia de 10 s. A continuación se eliminó el control, y se dejó evolucionar el sistema. La situación no equilibrada se generó dejando evolucionar al sistema sin control hasta el mismo tiempo que en el caso anterior. En este apartado se va a considerar el mismo caso no equilibrado. Para ello se generará la situación de partida del capítulo 9 dejando evolucionar al sistema sin control hasta la misma situación inicial, y a continuación se comenzará a regular.

El simulador preciso tiene en cuenta las continuas perturbaciones a que está sometida la línea mediante un ruido en la predicción del tiempo de recorrido de cada etapa. Se van a considerar dos desviaciones típicas de este ruido, $\sigma=6$ s y $\sigma=12$ s.

Las condiciones de explotación de la línea ferroviaria son realistas en la Línea 3 de Metro de Madrid en hora punta, con 17 trenes circulando en explotación por intervalo.

Caso 1. Escenario regular, $\sigma=6$ s

La Figura 15.13 representa la evolución temporal del intervalo medio de circulación entre trenes, junto con el intervalo máximo medido en línea y el intervalo mínimo. El

intervalo máximo representa el mayor hueco entre trenes abierto en línea, y el intervalo mínimo representa la mayor proximidad entre dos trenes consecutivos.

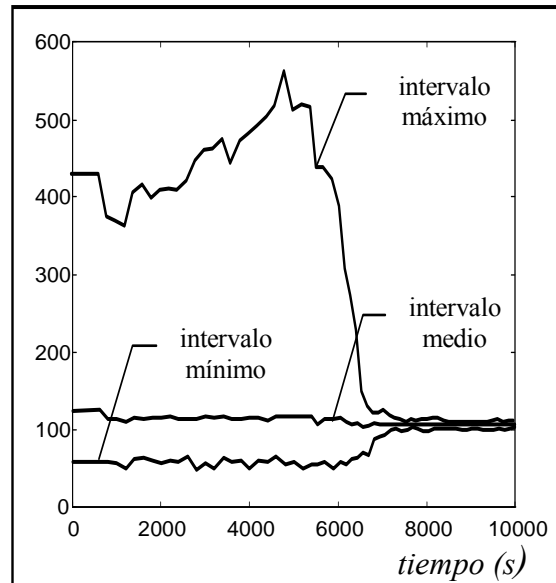


Figura 15.13. Desviaciones máximas del intervalo para escenario regular, $\sigma=6$ s

Los errores máximos de intervalo son la diferencia entre el intervalo máximo y el medio (desviación máxima positiva) y entre el intervalo medio y el mínimo (desviación máxima negativa).

En la gráfica se aprecian tres zonas. En la primera, hasta $t = 5000$ s, se deja evolucionar al sistema sin regulación desde una situación ya desequilibrada. La desviación máxima de intervalo crece, abriéndose entre dos trenes un gran hueco. La desviación mínima se satura, debido a que los sistemas de protección impiden que se baje del intervalo mínimo de circulación. En la segunda zona, a partir de $t = 5000$ s, se comienza a regular. El transitorio dura aproximadamente hasta $t = 7200$ s, y en él los errores de intervalo disminuyen continuamente. La tercera zona a partir de $t = 7200$ s, es el estacionario, permaneciendo el error máximo de intervalo por debajo de 10 s.

En el ejemplo se aprecia la capacidad del regulador para recuperar grandes perturbaciones y para mantener la regularidad del intervalo ante las continuas pequeñas perturbaciones a que se ve sometida la línea. Para corregir grandes perturbaciones se utilizan retenciones en estación y marchas de ATO extremas, mientras que para mantener la regularidad es en general suficiente recurrir a marchas.

Caso 2. Escenario regular, $\sigma = 12$ s

En la Figura 15.14 se representa la evolución de los intervalos cuando el nivel de ruido es doble que en el Caso 1.

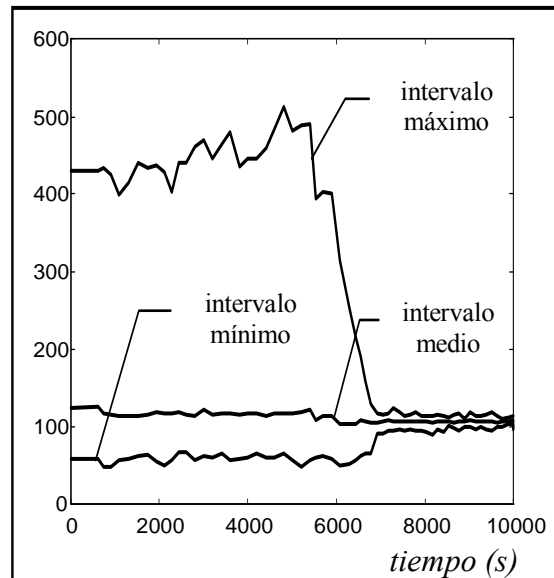


Figura 15.14. Desviaciones máximas del intervalo para escenario regular, $\sigma=15$ s

El período transitorio tiene aproximadamente igual duración que en el Caso 1, debido a que durante el mismo los errores a corregir son en general mucho mayores que el nivel de ruido. En el estacionario, sin embargo, el error de intervalo al que se llega es mayor, tomando un valor típico de 15 s.

Caso 3. Escenario no regular, $\sigma=6$ s

En la Figura 15.15 se considera el escenario de viajeros no regular y un ruido de desviación típica $\sigma=6$ s.

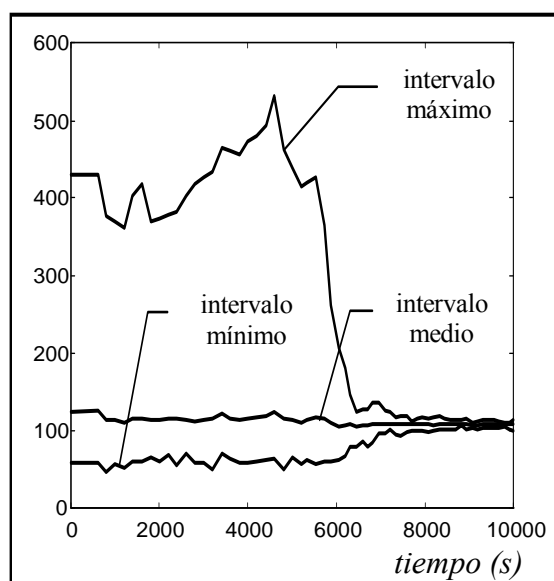


Figura 15.15. Desviaciones máximas del intervalo para escenario no regular, $\sigma=6$ s

El período transitorio se prolonga aproximadamente hasta el instante $t = 7900$ s debido a que mientras el servicio fue muy irregular se acumularon viajeros en las estaciones de alta afluencia, que provocan perturbaciones hasta que la situación se normaliza por completo. También es necesario un tiempo adicional para que el reparto de viajeros en los trenes se regularice.

El error del estacionario es aproximadamente igual al caso 1, con un error típico de intervalo de 10 s.

Caso 4. Escenario no regular, $\sigma = 12$ s

Se considera por último en la Figura 15.16 un escenario de viajeros no regular y un nivel de ruido alto.

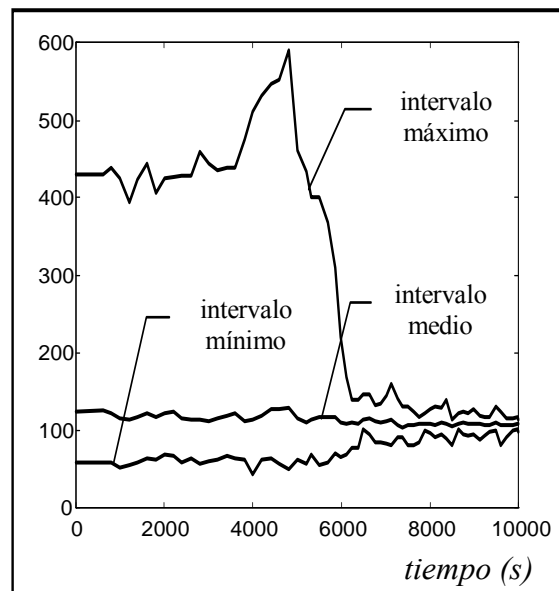


Figura 15.16. Desviaciones máximas del intervalo para escenario no regular, $\sigma = 15$ s

El error de intervalo que se alcanza en el período estacionario es claramente mayor que en el resto de casos, debido a que se refuerza el alto nivel de ruido con las perturbaciones adicionales que introduce el pasaje en las estaciones de alto flujo. El error típico en el estacionario es aproximadamente de 22 s.

El comportamiento del transitorio es básicamente el mismo que en el resto de los casos, aunque debido a que el error del estacionario es mayor se puede considerar que comienza algo antes.

Nota bibliográfica:

En [Fernández et al, 94] se pueden encontrar más ejemplos de regulación frente al simulador detallado de tráfico. Se emplean distintos tipos de escenarios de viajeros que simulan horas punta y los picos de afluencia que se producen en una estación de correspondencia entre líneas.

15.3 El regulador automático SIRO

Utilizando las técnicas de regulación propuestas en los capítulos anteriores se ha desarrollado un regulador automático para la Línea 2 de Metro de Barcelona. El SIRO (Sistema de Regulación Óptima) se integra en el nuevo centro de control de tráfico de DIMETRONIC S.A. (ver [Fontela et al, 94]), encargándose de las siguientes funciones:

- Regulación automática del tráfico. Para ello selecciona la marcha del conductor automático y el tiempo de retención en estación si ha lugar. Incluye regulación por intervalo, por horario y regulación mixta por intervalo más horario en estaciones cabecera.
- Monitorización del estado de la línea. Un interfaz gráfico muestra información detallada sobre el estado de regulación del sistema, mediante medidas de intervalos, cumplimiento de horarios y distintos índices de calidad del servicio. También informa al operador sobre las medidas concretas de control que se ejercen sobre cada tren y otros detalles de operación.
- Información al pasaje. El SIRO se encarga de predecir mediante simulación los tiempos de llegada de cada tren a cada estación, y facilitar esta información a los carteles de información al pasaje (CINP) situados en los andenes.
- Informes diarios de calidad del servicio.

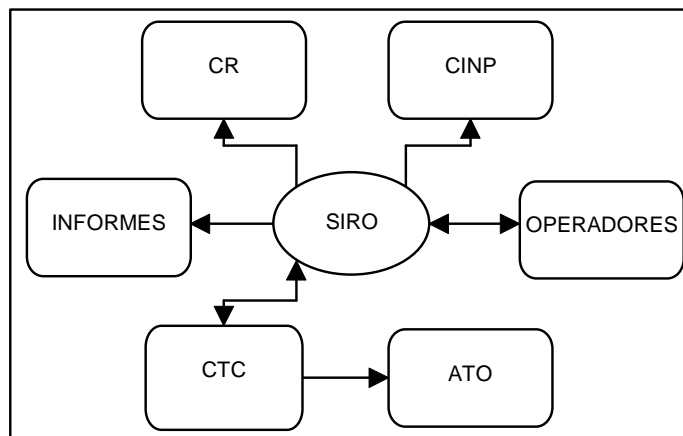


Figura 15.17. Relaciones del SIRO con su entorno

La Figura 15.17 esquematiza los distintos elementos que forman el sistema, y sus relaciones con el SIRO. El CTC (Control de Tráfico Central) se encarga de informar al SIRO sobre el movimiento de trenes en línea, y es el encargado de transmitir las

órdenes de marcha de ATO a las balizas correspondientes. Los CR (Carteles de Regulación) son unos dispositivos situados a la salida de cada estación, que marcan al conductor mediante una cuenta atrás el instante concreto de salida que impone el SIRO, caso de que este sistema decida retener al tren. A los operadores se les envía el estado de regulación, y se recibe de ellos el tipo de regulación seleccionada y el valor de distintos parámetros del regulador.

La Figura 15.18 muestra una versión simplificada de la estructura interna del SIRO, con sus principales procesos, las comunicaciones entre ellos y el estado interno. Los principales procesos que componen el SIRO son los siguientes:

- Gestionador del estado y las tareas. A este proceso llegan todos los eventos del exterior, que son despachados secuencialmente encargando tareas al resto de los procesos, y manteniendo el estado interno del sistema.
- Módulo de optimización (control a medio plazo). Existe uno de estos procesos por cada línea a controlar. Se encarga de optimizar la trayectoria de tiempos de paso por estación para todos los trenes.
- Gestionador de gráficos. Actualiza la información gráfica de los operadores ante cualquier cambio de estado.

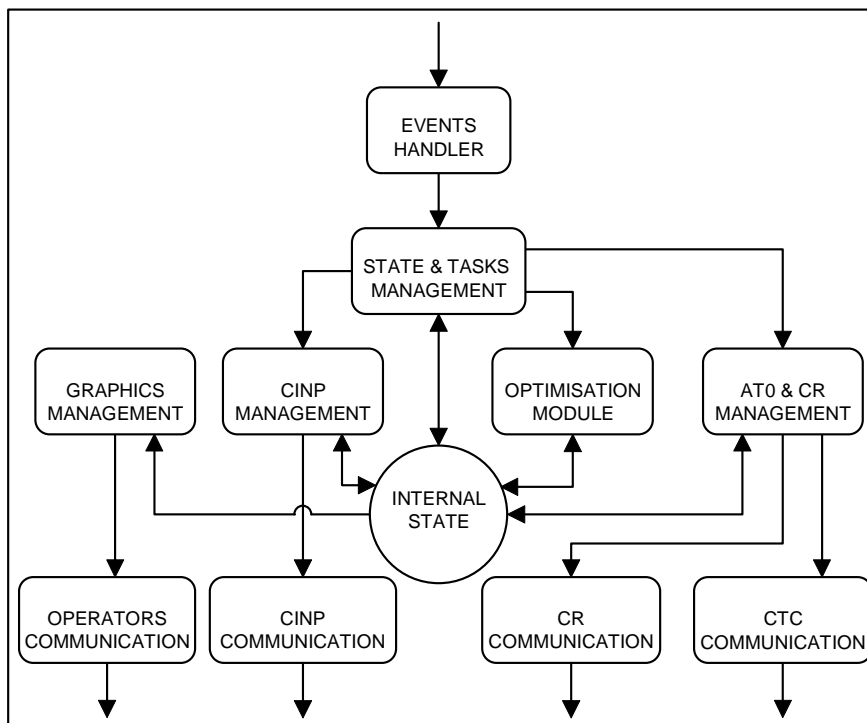


Figura 15.18. Estructura interna del SIRO

- Gestionador de los CINP. Este proceso calcula la próxima llegada a cada estación y decide la actualización de los tiempos anunciados en los CINP.

- Procesos de comunicaciones. Se encargan de enviar y recibir los mensajes que se intercambian con el entorno.

La arquitectura *hardware* empleada se muestra en la Figura 15.19. El servidor del SIRO es un máquina UNIX donde corren los procesos descritos anteriormente (incluyendo un proceso de optimización específico para cada línea). Cada puesto de operador está equipado con dos estaciones de trabajo UNIX, una para los gráficos del SIRO y otra para los gráficos del CTC y órdenes del operador. Las máquinas se comunican a través de una red local duplicada (LAN).

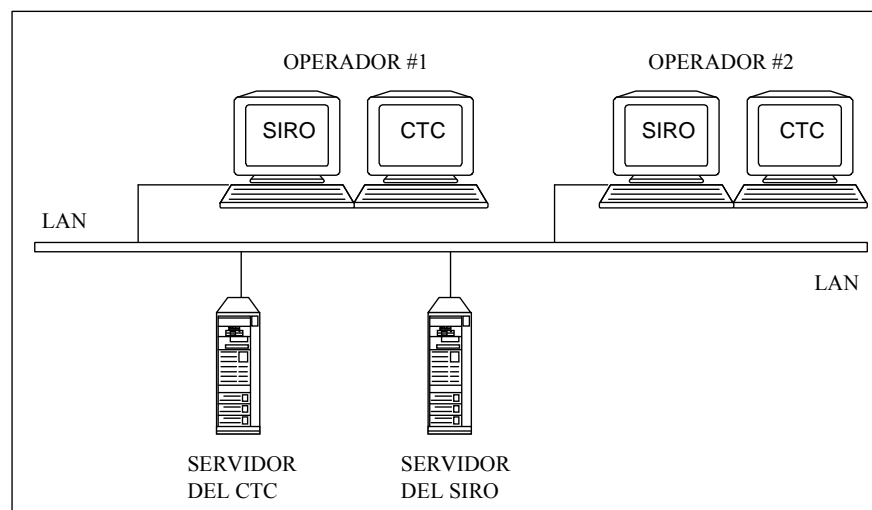


Figura 15.19. Arquitectura hardware

La implementación de los procesos del SIRO se ha efectuado en ANSI-C, bajo el entorno de desarrollo SoftBench de HP.

Nota bibliográfica:

En [Fernández et al, 96] se encuentra información más detallada de las características de la herramienta de regulación SIRO.

Actualmente el sistema se encuentra en período de pruebas en la Línea 2 de Metro de Barcelona. Ha comenzado el desarrollo de una nueva versión del regulador (SIRAT) para su implantación en Metro de Madrid.

15.4 Conclusiones

El análisis de las trayectorias que genera el optimizador del control a medio plazo ha demostrado que se corresponden con estrategias de regulación apropiadas,

alcanzándose un equilibrio entre los atributos de regularidad, molestia al viajero y consumo de energía. La estructuración en fases consecutivas del algoritmo de optimización permite encontrar rápidamente buenas soluciones, haciendo posible emplear el algoritmo en un sistema de control en tiempo real.

En regulación por intervalo y por horario han sido suficiente las fases de optimización global y optimización de las correcciones individuales, no mejorando la solución significativamente la fase de optimización de los repartos. Para estos tipos de regulación lo importante es la magnitud de la corrección a corregir, y es suficiente con realizarla con un reparto por estaciones equilibrado. En regulación mixta, donde existen horarios a cumplir en determinadas estaciones, sí ha resultado apropiado optimizar el ritmo de aplicación de la corrección a lo largo del plan, para cumplir con mayor precisión con los tiempos de paso que marca el horario en las terminales. Otras situaciones en que resultaría útil la optimización del reparto son aquellas en que existen fuertes desequilibrios en determinadas estaciones, que requieren concentrar las medidas de regulación en dichas estaciones para evitar la propagación de retrasos.

En los ejemplos se han utilizado cuatro marchas de ATO con un margen de variación entre la más lenta y la más rápida de 18 s. Utilizar solamente marchas es suficiente para recuperar perturbaciones pequeñas. Este tipo de perturbaciones son las que se producen cuando el sistema está equilibrado, y suele bastar por tanto con una selección adecuada de marchas para mantener la regularidad. Cuando se parte de una situación muy alejada del equilibrio o ante una fuerte perturbación se hace necesario retener trenes en estación para recuperar el sistema en un tiempo razonable.

Las pruebas de regulación efectuadas sobre el simulador detallado de Línea 3 muestran la eficacia de la estructura jerárquica del regulador propuesto, ejecutando para los niveles de ruido considerados las trayectorias óptimas con suficiente precisión. El modelado que realiza el simulador del control a medio plazo de los sistemas de protección y en general las no linealidades del sistema han demostrado ser suficientemente precisas para los objetivos de regulación buscados. Estas pruebas muestran asimismo que no existen problemas con el tiempo de cálculo de las trayectorias en una línea real y relativamente extensa, compuesta de 22 estaciones y 17 trenes.

La implantación del regulador en Línea 2 de Metro de Barcelona ha puesto de manifiesto la principal ventaja que tiene emplear un modelo de simulación como módulo de evaluación de estrategias de regulación. Es muy sencillo incorporar al regulador características y restricciones particulares de cada sistema ferroviario concreto, sin más que añadirlas al modelo de simulación. Los pesos que determinan en la función objetivo la importancia relativa de la regularidad, molestia al viajero y ahorro de energía permiten al administrador del sistema adaptar el comportamiento del regulador a sus propios criterios en función del tipo de regulación.

15. Resultados	279
15.1 Optimización de trayectorias de referencia	279
15.1.1 Características de la línea de pruebas	280
15.1.2 Pesos de la función objetivo	281
15.1.3 Parámetros de la función de penalización	283
15.1.4 Caso 1. Retraso ligero de un tren	284
15.1.5 Caso 2. Retraso severo de un tren	298
15.1.6 Caso 3. Múltiples retrasos	305
15.2 Pruebas de regulación frente al simulador detallado	312
15.3 El regulador automático SIRO	317
15.4 Conclusiones	319

16. Conclusiones, aportaciones y futuros desarrollos

En este capítulo se exponen las conclusiones, aportaciones y futuros desarrollos de este trabajo.

16.1 Conclusiones

Las conclusiones parciales de cada una de las tres partes en que se estructura este trabajo ya se han expuesto en los capítulos de resultados correspondientes. En concreto, las conclusiones sobre modelado y simulación del movimiento de un tren y diseño de la señalización se encuentran en el apartado 6.2.7, sobre las herramientas de ayuda a la conducción óptima en los apartados 6.3.3 y 6.4.3, sobre modelado y simulación del tráfico en una línea cerrada en el apartado 9.3, y sobre regulación automática del tráfico en el apartado 15.4. En este apartado se resumen y generalizan estas conclusiones.

16.1.1 Modelo de simulación del movimiento de un tren

El modelo de simulación del movimiento de un tren que se describe en la Parte I ha demostrado ser eficaz en aplicaciones donde se requiere una precisión alta y una velocidad de simulación elevada. La técnica empleada, basada en la concatenación de curvas analíticas de movimiento entre eventos, es mucho más eficiente en velocidad de cálculo y gestión de resultados que la simulación por tiempo discreto habitualmente utilizada en problemas de diseño de la explotación ferroviaria.

Los distintos tipos de sistemas de protección y de conducción han sido fácilmente modelados e integrados en el simulador. El control por eventos de estos sistemas se

integra perfectamente en el nivel de simulación discreta, dejando aislado en el nivel de simulación continua el problema dinámico.

La representación de los resultados de simulación como sucesión de estados de movimiento ha resultado clave en la construcción de herramientas eficientes de ayuda al diseño. En la herramienta PACA esta representación ha permitido gestionar sin problemas simulaciones largas, recuperando cuando es necesario puntos concretos del movimiento evaluando las curvas analíticas parametrizadas correspondientes. Esta técnica se ha mostrado especialmente adecuada en los interfaces gráficos, proporcionando la rapidez de respuesta que se requiere en las herramientas de diseño CAD.

La técnica de simulación descrita modela cada característica de la vía o del sistema de tracción a tramos lineales o cuadráticos. En la práctica sólo se han empleado tramos cuadráticos para modelar la resistencia al avance del tren. A la vista de la rapidez en la gestión de eventos conseguida, podría ser más eficiente modelar también esta característica con tramos lineales, aumentando el número de tramos. De esta forma la ecuación diferencial del movimiento pierde el término cuadrático, disminuyendo el número de tipos de soluciones y haciendo más sencillas sus expresiones analíticas.

El modelo de consumo de energía del tren ha resultado adecuado para el tipo de aplicaciones consideradas, donde se requiere rapidez en la simulación. Para realizar estudios eléctricos de sistemas ferroviarios son necesarios modelos más detallados, que exigen simular a tiempo discreto.

16.1.2 Diseño de la conducción del tren

La primera conclusión que se obtiene del estudio de la conducción de un tren entre dos estaciones es la necesidad de herramientas adecuadas para realizar un diseño eficaz. En interestaciones cortas, llanas y con límites de velocidad constantes resulta relativamente sencillo encontrar la conducción óptima en consumo para un tiempo objetivo dado. En interestaciones largas, con pendientes considerables o con límites de velocidad variables el diseño óptimo en consumo es en general muy complejo. Las diferencias en consumo entre conducciones que llevan a un mismo tiempo objetivo pueden alcanzar el 50 %.

El enfoque empleado en este trabajo, basado en un modelo de simulación detallado del movimiento del tren y la optimización mediante búsqueda directa, ha proporcionado conducciones realistas, directamente aplicables y adaptadas a un equipo de conducción automática concreto. Las técnicas de programación matemática empleadas hasta ahora no son de uso práctico, debido a que utilizan modelos del movimiento demasiado sencillos.

Las técnicas de optimización empleadas basadas en búsqueda directa y descomposición en fases han resultado muy apropiadas, consiguiendo tiempos de cálculo razonables para su utilización en herramientas de diseño interactivas. Han permitido introducir fácilmente en los algoritmos conocimiento heurístico, guiando la búsqueda rápidamente hacia buenas soluciones.

En el problema de la optimización por vectores de deriva ATO se concluye que en general es suficiente utilizar uno o dos vectores de deriva distintos en cada interestación. La mejora en consumo que puede introducir un tercer vector de deriva no es significativa incluso en interestaciones largas.

Se ha comprobado que el algoritmo de búsqueda en árbol utilizado en el problema de la conducción continua puede llevar un tiempo excesivo con precisiones en tiempo muy pequeñas. Para solucionar este problema se propone añadir una fase final que determine la duración de cada modo utilizando la precisión requerida, permitiendo utilizar en la búsqueda en árbol una precisión menor. Véase el apartado de Futuros Desarrollos.

La optimización de la conducción libre, que no está restringida por las características de ningún equipo de conducción en particular, ha resultado especialmente útil en aplicaciones reales. Permite determinar el perfil de conducción óptimo en la interestación, y partir de él diseñar la conducción restringida por el equipo de conducción utilizado.

Un tipo de restricciones no tenidas en cuenta en el modelo de conducción del tren son las impuestas por la comodidad de los viajeros. En aplicaciones reales ha sido necesario retocar manualmente algunas conducciones calculadas para suavizarlas. Para evitar este problema es necesario definir con precisión estas restricciones, para ser incorporadas al algoritmo de evaluación, ya que la estrategia de optimización no se vería alterada.

16.1.3 Simulación del tráfico de trenes en una línea cerrada

La técnica de simulación de tráfico de trenes propuesta en la Parte II de este trabajo mejora la velocidad de los simuladores de tráfico que utilizan eventos discretos por circuito de vía y la de aquellos que avanzan por tiempo discreto. Se ha sacado partido al tipo particular de relaciones que se establecen entre los trenes en una línea circular, que permite desacoplar su movimiento durante períodos importantes de tiempo.

El método empleado almacena el estado de las protecciones indirectamente a través de la simulación del tren que las dispara. Para la realización práctica de esta idea ha resultado fundamental el uso del modelo de simulación del movimiento de un tren

descrito en la Parte I, que ha permitido gestionar de forma eficiente los tramos de simulación asociados a cada tren.

La posibilidad de definir escenarios alternativos de viajeros en una línea ha facilitado estudiar con detalle distintos tipos de perturbaciones debidas al pasaje, y distintos comportamientos de la línea en hora punta y hora valle. El hecho de tener en cuenta la masa de pasaje a bordo de los trenes no ha modificado considerablemente la dinámica de los trenes, pero sí ha permitido estudiar la distribución de pasaje por la línea cuando se producen perturbaciones.

El hecho de que la simulación de cada tren se obtenga de forma asíncrona no ha resultado problemático para la presentación síncrona de resultados en un interfaz gráfico. El programa gráfico se encarga de muestrear la posición y velocidad de cada tren con el período impuesto por la velocidad de simulación elegida, haciendo uso de las ecuaciones parametrizadas del modelo continuo.

El método de simulación descrito puede ser empleado en otros sistemas compuestos por elementos que se relacionan mediante eventos. Cada elemento se simula hasta donde el conocimiento de la evolución del estado del sistema que afecta a su comportamiento le permite. De cada elemento es necesario almacenar el intervalo de su historia reciente que puede afectar a otros elementos. La eficacia del método depende del tipo de dependencias que se establecen entre los distintos elementos que forman el sistema, y por supuesto mejora cuanto más débil sea el acoplamiento temporal entre dichos elementos.

16.1.4 Regulación de tráfico de líneas cerradas

El regulador de tráfico de trenes descrito en la Parte III de este trabajo se ha mostrado eficaz, tanto en ensayos frente al simulador como en funcionamiento real en pruebas en Línea 2 de Metro de Barcelona. Cumple con los dos objetivos básicos de regulación: mantenimiento de las condiciones nominales de explotación (control de pequeña perturbación) y obtención de condiciones de equilibrio desde cualquier estado inicial (control de gran perturbación).

Del período de pruebas efectuado en Línea 2 de Metro de Barcelona se llega a la conclusión de que para mantener la línea en equilibrio es suficiente en general con elegir adecuadamente la marcha dada a cada tren, evitando retener a los trenes en las estaciones. Sólo cuando se producen fuertes perturbaciones es necesario recurrir a este último tipo de medidas.

La técnica de optimización de planes de regulación mediante búsqueda directa y descomposición en fases ha demostrado ser muy apropiada para este problema. Se han conseguido optimizar planes de regulación en líneas de tamaño relativamente grande en tiempos por debajo de medio minuto, y disponer de buenas soluciones

desde los primeros segundos. De las tres fases de búsqueda utilizadas, las dos primeras (optimización global y optimización de las correcciones individuales) son suficientes en la mayoría de los casos. La tercera fase (optimización de los repartos) sólo mejora significativamente la solución en explotación mixta o cuando estaciones concretas poseen características diferentes, como afluencias anormales de viajeros.

El sistema de regulación ha sido adaptado a las particularidades de los métodos de explotación en Metro de Barcelona y Metro de Madrid. La principal conclusión obtenida es la importancia de poder incluir fácilmente en el regulador estas características particulares, que se pueden agrupar en cuatro puntos:

- Adaptación al tipo e instantes de envío de las consignas de regulación. El control a corto plazo se encarga de traducir los horarios de referencia del control a medio plazo a los modos de actuación particulares sobre los trenes en cada ferrocarril. No ha sido necesario modificar el algoritmo de regulación del control a medio plazo para las distintas explotaciones.
- Características que deben ser tenidas en cuenta por el modelo de simulación. Son, por ejemplo, aspectos particulares de los sistemas de protección y de la forma de efectuar las maniobras de cambio de sentido en las cabeceras de línea. Se han podido tener en cuenta fácilmente al utilizar un modelo de simulación no lineal independiente del proceso de optimización.
- Criterios de regularidad propios del sistema de explotación. Por ejemplo explotación por intervalo pero con restricciones de cumplimiento de horario en determinadas estaciones para cambio de turno de conductor (explotación mixta). Estos criterios se han incluido en el regulador definiendo adecuadamente la función objetivo del control a medio plazo.
- Características de operación, como las retiradas o incorporaciones programadas de trenes en línea. Modificando el intervalo objetivo de cada tren es posible alterar su comportamiento particular de cada tren, con el objeto de suavizar el efecto de este tipo de operaciones.

Como conclusión final de la instalación del regulador de tráfico descrito en sistemas reales, hay que subrayar la importancia que tiene una integración adecuada del sistema en el Centro de Control de Tráfico y con los métodos de operación y control del operador. Para ello es fundamental que el operador se encuentre informado de forma clara del estado de regulación actual y futuro de la línea, y pueda utilizar de manera sencilla y previsible los recursos del regulador.

16.2 Aportaciones

A continuación se detallan las aportaciones de este trabajo divididas en tres grupos: modelado y simulación, diseño de la explotación y regulación de líneas ferroviarias.

Modelado y simulación de sistemas ferroviarios

- Se ha desarrollado un método original de modelado y simulación del movimiento de un tren basado en concatenación de curvas analíticas parametrizadas. Este método es especialmente apropiado para ser utilizado en aplicaciones donde se requiere una velocidad de simulación elevada conservando una precisión alta, como en herramientas de diseño CAD y algoritmos de optimización en general. La técnica es aplicable a otros sistemas, y especialmente apropiado a aquellos fuertemente no lineales y controlados por eventos.
- Se ha propuesto un método original para el cálculo del consumo de energía de un tren a partir de su movimiento y conocidas las curvas características del motor para par máximo. El método presenta tres ventajas: primero, permite estimar el consumo cuando se trabaja con pares por debajo del máximo, para los que en general no se dispone de curvas de intensidad; segundo, es independiente del tipo de motor empleado (continua o alterna); tercero, el tiempo de cálculo es muy pequeño, integrándose perfectamente con el algoritmo general de simulación del movimiento de un tren.
- En el diseño del simulador de tráfico de trenes bajo perturbaciones se ha empleado un nuevo modelo discreto para resolver el problema de las interacciones entre trenes a través de la señalización. En lugar de almacenar explícitamente el estado de las protecciones, se guarda la historia de cada tren que puede condicionar el movimiento del que le sigue. El tipo de dependencias circulares que se establecen entre los trenes permiten desacoplar su movimiento durante períodos largos, mejorando la eficiencia del algoritmo frente a los clásicos por eventos discretos. La técnica de simulación es aplicable a otros sistemas compuestos por elementos que se relacionan mediante eventos, dependiendo su eficacia del tipo de estas relaciones.
- Se ha desarrollado un modelo de escenarios de viajeros en una línea de cerrada, que define en un intervalo temporal el flujo de viajeros y sus destinos para cada estación de la línea. Permite el estudio de la evolución del sistema bajo escenarios tipo, como hora punta y hora valle, y simular perturbaciones sistemáticas o puntuales debidas al incremento de pasaje en determinadas estaciones.
- Se ha desarrollado la herramienta de simulación de tráfico en líneas cerradas PACO, que incluye un modelo detallado el movimiento de los trenes y de las perturbaciones producidas por los sistemas de protección. Tiene en cuenta

explícitamente el pasaje en las estaciones y a bordo de los trenes, considerando escenarios alternativos de viajeros. Esta herramienta ha sido utilizada como banco de pruebas del regulador de tráfico desarrollado.

- Se ha desarrollado un modelo original de simulación rápida del tráfico de trenes en una línea cerrada, que tiene en cuenta las principales no linealidades del sistema. Ha sido utilizado como función de evaluación del algoritmo de optimización de planes de regulación. Se han establecido además los algoritmos de estimación de parámetros y los experimentos asociados correspondientes para adaptar el valor de los parámetros del modelo a partir de medidas reales del sistema.
- Se ha propuesto un modelo estocástico original del error de seguimiento de un tren de una trayectoria de horarios de paso por estaciones. Tiene en cuenta el error típico que se genera al recorrer cada tramo, los retrasos adicionales que se generan debidos al exceso de pasaje en estaciones cuando existe un retraso previo, y el efecto de recuperación de errores del control a corto plazo. Se obtienen las funciones de distribución y las desviaciones típicas del error de seguimiento en cada estación, partiendo de una estación inicial con error nulo.

Diseño de la explotación de sistemas ferroviarios

- Se ha desarrollado la herramienta PACA de ayuda al diseño de la señalización y de la conducción de trenes. Calcula el movimiento y el consumo de un tren para los sistemas de señalización y de conducción automática más habituales. El diseñador propone las características del sistema de protección y las consignas del conductor automático, y la herramienta evalúa el diseño calculando el intervalo mínimo de circulación y otros datos de interés para el diseñador. Se presentan estos datos en un interfaz gráfico, junto con las curvas de movimiento del tren.
- Se han diseñado dos algoritmos de optimización de la conducción de un tren entre dos estaciones, utilizando técnicas de búsqueda local y en árbol. El primero considera la conducción automática habitual, y el segundo considera una conducción sin restringir por un equipo de conducción en concreto. El empleo de modelos de simulación detallados permite aplicar los resultados a problemas reales, superando el principal inconveniente de los algoritmos basados en programación matemática.
- Se han desarrollado dos herramientas de ayuda al diseño de la conducción, la herramienta CAT y la herramienta ALEHOPT. La primera incorpora los algoritmos diseñados para la conducción automática habitual, y la segunda los diseñados para conducción sin restringir.

Regulación de tráfico de líneas cerradas

- Se ha ensayado en este trabajo el empleo de métodos de Optimización Estructurada Multiatributo basados en búsqueda directa en un sistema de regulación en tiempo real. Los problemas de tiempo de cálculo que implica la utilización de un modelo de simulación como función de evaluación han sido solucionados mediante un diseño jerárquico adecuado del sistema de control.
- Se ha presentado un enfoque original al problema de regulación de tráfico en líneas cerradas. El regulador automático desarrollado se basa en un modelo de simulación simplificado que incluye las principales no linealidades del sistema. Este simulador permite la evaluación de estrategias de regulación alternativas en tiempo real, a partir del estado actual del sistema y su evolución estimada. Mediante un esquema de control adaptativo se estiman los parámetros principales del modelo, permitiendo adecuar el comportamiento del regulador a las condiciones de la línea. Un diseño jerárquico del sistema de control permite separar el cálculo de los planes de regulación a medio plazo del cálculo de las consignas concretas de regulación a cada tren. Este enfoque soluciona el problema que los reguladores de tráfico en lazo abierto, que disponen de estrategias prediseñadas sólo para perturbaciones tipo. También mejora el comportamiento de los reguladores basados en control óptimo cuadrático, que tienen una aplicación y un rendimiento limitados debido a la sencillez de los modelos analíticos que emplean. La técnica de regulación empleada permite nuevas posibilidades de operación de líneas cerradas, al poder modificar fácilmente los criterios de optimalidad variando la función objetivo, y al disponer de un simulador rápido *on-line* para predecir el resultado de las acciones de control.
- Se ha diseñado un algoritmo original para la optimización de la trayectoria de horarios de paso de trenes por estaciones, utilizando un modelo de simulación como función de evaluación. El algoritmo se estructura en una fase inicial de cálculo de un buen punto inicial y tres fases consecutivas de optimización por búsqueda directa. En cada fase de optimización es clave la elección de las variables independientes, que proporcionan un significado claro a cada fase en términos de estrategias de regulación consideradas.
- Se ha desarrollado la herramienta SIRO de regulación automática del tráfico de trenes en líneas circulares. Utiliza el enfoque y los modelos de tráfico mencionados en los puntos anteriores. Está integrado en un Centro de Control de Tráfico que comercializa DIMETRONIC S.A. Incluye un interfaz gráfico con el operador que le informa del estado de regulación de la línea actual y previsto. Emplea el modelo de simulación para realizar funciones adicionales como información al pasaje de los tiempos de llegada de trenes a las estaciones.

16.3 Futuros desarrollos

Los futuros desarrollos se centran en la extensión de las técnicas de simulación y control propuestas a redes ferroviarias de topología compleja y en la mejora de los métodos de diseño de la explotación.

Mejora de los métodos de diseño de la explotación

En este trabajo se propone una herramienta basada en simulación que evalúa un sistema de señalización en concreto. En sistemas basados en circuitos de vía, el diseñador propone la posición y longitud de cada circuito, así como una conducción nominal. La herramienta calcula el intervalo mínimo de circulación que imponen las protecciones y otros datos de interés para el diseñador. El siguiente paso es incluir en el proceso de diseño de las protecciones la búsqueda automática de soluciones. La técnica de optimización que se propone aplicar es de nuevo búsqueda directa, guiada por criterios de alto nivel impuestos por el diseñador.

De la experiencia adquirida en aplicaciones reales, se propone un nuevo diseño del algoritmo de optimización de la conducción libre de un tren. Se trata de incluir una fase más al proceso de búsqueda, que optimice la duración de cada consigna de tracción de la solución obtenida. De esta forma, las fases anteriores determinan exclusivamente la secuencia de consignas de tracción (aceleración, deriva, etc.), y la última fase ajusta los instantes de cambio. El objetivo es poder aumentar el incremento mínimo de tiempo en las fases iniciales, disminuyendo el tamaño del árbol de soluciones y el tiempo de cálculo. En la última fase que se propone ahora se utiliza el incremento de tiempo definitivo, realizando el ajuste fino.

Por último, queda pendiente el desarrollo de una herramienta de ayuda al diseño de la conducción de nivel comercial, partiendo de los prototipos descritos en este trabajo. Debería incluir nuevas restricciones relacionadas con suavidad en la conducción para comodidad del pasaje, y un interfaz que incluya el manejo de las bases de datos.

Extensión a ferrocarriles con topología compleja

En líneas con topología compleja hay que tener en cuenta diferentes tipos de servicio circulando por la misma red. La principal característica que diferencia estos sistemas de los estudiados son los cruces de vía, que exigen un diseño cuidadoso de los horarios de circulación y son fuente de conflictos cuando aparecen perturbaciones. Una gran parte de los trabajos de regulación consisten en asignar el orden de paso de los trenes por los cruces, teniendo en cuenta criterios como el de mínimo retraso, mínima molestia o respeto de prioridades de cada tipo de servicio. El grado de automatización alcanzado es en general pequeño. Los sistemas de enrutamiento automático liberan al operador de establecer ruta a cada tren, pero utilizan una lógica

sencilla e insuficiente para resolver conflictos serios. Para ayudar al operador en la toma de decisiones se utilizan simuladores para predecir las consecuencias de las posibles estrategias de regulación. Integrados en el mismo sistema se utilizan sistemas basados en reglas o en algoritmos de optimización que proponen al operador las estrategias a seguir cuando hay fuertes perturbaciones.

El enfoque de regulación automática utilizado para líneas cerradas se generaliza fácilmente para líneas de topología compleja. En primer lugar es necesario desarrollar un modelo discreto de simulación rápida para este tipo de sistemas, que tenga en cuenta cruces y diferentes tipos de servicios. Para comparar distintas estrategias es preciso ampliar la función objetivo empleada, para tener en cuenta el estado de regularidad en los nodos de la red o los niveles de prioridad de determinados servicios. El esquema de regulación propuesto en este trabajo sigue siendo válido. Un control a medio plazo se encarga de optimizar los tiempos de paso de cada tren por cada estación y cada nodo de la red, estableciendo por tanto el orden de paso de trenes por cada nodo. Un control a corto plazo de respuesta rápida se encarga de proporcionar las órdenes de control apropiadas para respetar la referencia del medio plazo. El tipo de órdenes que emplea el corto plazo incluye ahora las necesarias para asignar ruta a los trenes, además de las habituales de velocidad y retenciones en estación.

La optimización que ha de realizar el control a medio plazo posee un nuevo nivel de decisión, el orden de paso de los trenes por los cruces. Este tipo de problemas, claramente estructurables y con diferentes tipos de variables, son precisamente donde las técnicas de búsqueda directa y descomposición en fases explotan sus posibilidades.

Los modelos de simulación detallada del movimiento de un tren siguen siendo válidos en líneas con topología compleja. Sin embargo la técnica de simulación detallada del tráfico basada en simulación asíncrona de trenes ya no presenta ventajas claras en este tipo de líneas. El motivo es que el tipo de dependencias que se establecen entre los trenes ya no son circulares, debido a los conflictos de paso por los nodos de la red.

16. Conclusiones, aportaciones y futuros desarrollos	321
16.1 Conclusiones	321
16.1.1 Modelo de simulación del movimiento de un tren	321
16.1.2 Diseño de la conducción del tren	322
16.1.3 Simulación del tráfico de trenes en una línea cerrada	323
16.1.4 Regulación de tráfico de líneas cerradas	324
16.2 Aportaciones	326
16.3 Futuros desarrollos	329

Referencias

A

[Al-Khalili, 85]

A.J. Al-Khalili, “**Urban Traffic Control - A General Approach**”, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol.smc-15, n° 2, 1985.

[Astrom, 83]

K.J. Astrom, “**Theory and Applications of Adaptive Control - A Survey**”, Automática, vol. 19, n° 5, 1983.

B

[Banks & Carson, 84]

J. Banks, F.S. Carson, “**Discrete-event system simulation**”, Prentice-Hall, New Jersey, 1984.

[Benoit & Wajsbrot, 89]

C. Benoit, J.P. Wajsbrot, “**Traffic: a Tool for Railway Regulation**”, Proc. IFAC Symposium Control, Computers, Communications in Transportation, Paris 1989.

[Bienfait & Franckart, 91]

B. Bienfait, J.P. Franckart, “**Development and Application of a Traffic Automatic Management System**”, Journal A, vol. 32, n° 2, 1991.

[Boccalatte et al, 93]

A. Boccalatte, A. Di Febbraro, R. Minciardi, M. Paolucci, R. Pesenti, “**Modelling and Simulating for Optimal Management of Underground Railway Systems**”, Proc. International Conference On Systems, Man and Cybernetics, Le Touquet, oct. 1993.

[Breusegem et al, 87]

V. Van Breusegem, G. Bastin, G. Campion, "**State Feedback Traffic of the Transient Behaviour of Underground Public Transportation Systems**", Proc. 10th IFAC World Congress of Automatic Control, Munich, august 1987.

[Breusegem et al, 88]

V. Van Breusegem, G. Campion, G. Bastin, "**Simulation and Control of the Traffic of Metro Lines**", Proc. of de European Simulation Multi conference, june 1988.

[Breusegem et al, 89]

V. Van Breusegem, G. Campion, "**Traffic Modelling and Control for Metro Circle Lines**", Proc. IFAC symposium Control, Computers Communications in Transportation, Paris, sept. 1988.

[Breusegem et al, 91]

V. Van Breusegem, G. Campion, G. Bastin, "**Traffic Modeling and State Feedback Control for Metro Lines**", IEEE Transactions on automatic control, vol 36, N. 7, july 1991.

[British Rail, 84]

British Rail, "**Automatic Route Setting Eases the Signalman's Load**", Railway Gazette International, october 1984.

[Brunner, 94]

P. Brunner, "**Tramatik', a Simulation Program for Tramway and Light Rail Systems**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.

C

[Campion et al, 85]

G. Campion, V. Van Breusegem, P. Pinson, G. Bastin, "**Traffic Regulation of an Underground Railway System by State Feedback**", Optimal control applications and methods, vol. 6, 1985.

[Campion et al, 86]

G. Campion, V. Van Breusegem, G. Bastin, "**Modelling, Simulation and Control of the Traffic at the Terminus Stations of Urban Underground Railway Lines**", Proc. IFAC symposium Control in Transportation, Viena 1986.

[Casalino et al, 89]

G. Casalino, A. Di Febbraro, A. Ferrara, R. Minciardi, D. Nicoletti, "**Discrete-Event Simulation and Control Strategies for Underground Railways**", Proc. IFAC symposium Control, Computers, Communications in Transportation, Paris 1989.

[Chang et al, 93]

C.S. Chang, T.T. Chan, S.L. Ho, K.K. Lee, "**AI Applications and Solution Techniques for AC-Railway-Systems Control and Simulation**", IEE Proceedings-B, vol. 140, n° 3, 1993.

- [Chang & Thia, 95]
C.S. Chang, B.S. Thia, "**Event-Driven Fuzzy Control for Automatic Emergency Rescheduling in DC Railway Systems**", Engineering Intelligent Systems, vol. 3, nº 4, 1995.
- [Chu, 74]
K.C. Chu, "**Optimal Decentralized Regulation of a String of Coupled Systems**", IEEE Trans. On Automatic Control, vol. AC-19, 1974.
- [Chua, 86]
C.K. Chua, "**Disturbed Running On Metro Systems**", MPhil. thesis, University of Birmingham, 1986.
- [Clymer et al, 92]
J.R. Clymer, D.J. Cheng, D. Hernández, "**Induction of Decision Making Rules for Context Sensitive Systems**", SIMULATION, Simulation Councils Inc., september 1992.
- [Cuadra, 90]
F. de Cuadra, "**El Problema General de la Optimización de Diseño por Ordenador**", Tesis doctoral, Universidad Pontificia Comillas, Madrid 1990.
- [Cullyer & Wong, 93]
J. Cullyer, W. Wong, "**Application of formal methods to railway signalling - a case study**", Computing & Control Engineering Journal, feb. 1993.
- [Cury et al, 80]
J.E. Cury, F.A.C. Gomide, M.J. Mendes, "**A Methodology for Generation of Optimal Schedules for an Underground Railway System**", IEEE, Trans. On Automatic Control, vol.ac-25, nº 2, 1980.

F

- [Fernández et al, 94]
A. Fernández, F. de Cuadra, F. Montes, "**Traffic Simulation and Regulation. A Predictive Adaptive Control System**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.
- [Fernández et al, 96]
A. Fernández, F. de Cuadra, A. García, "**SIRO: an Optimal Regulation System in an Integrated Control Centre for Metro Lines**", Proc. of the 5th COMPRAIL Conference, Berlin, Aug. 1996.
- [Fontela et al, 94]
J.L. Fontela, C. Martínez, A. García, "**Integrated Control Centre**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.

G

[Gill et al, 81]

P.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright, "**Practical Optimization**", Academic Press Inc., London 1981.

[Gill et al, 92]

D.C. Gill, C.J. Goodman, H.J. McCormick, R.W. Aylward, "**Automated Search Technique for Optimising Speed Command Levels in the London Underground Central Line ATC System**", Proc. of the 3th COMPRAIL Conference, Washington, Aug. 1992.

[Gill & Goodman, 92]

D.C. Gill, C.J. Goodman, "**Computer-Based Optimisation Techniques for Mass Transit Railway Signalling Design**", IEE Proceedings-B, vol. 139, n° 3, may, 1992.

[Gill & Sadler, 94]

D.C. Gill, S.J. Sadler, "**Simulation analysis of transmission-based signalling systems for metro applications**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.

[Guieysse, 70]

L. Guieysse, "**Research For Increasing the Transport Capacity of Paris Metro Lines by means of Simulation Models**", Rail International, sept. 1970.

H

[Herrero, 95]

M.A. Herrero, "**Desarrollo de una Herramienta para la Optimización Automática de la Conducción de un Tren**", Proyecto Fin de Carrera, Universidad Pontificia Comillas, Madrid 1995.

[Hill, 94.a]

R.J. Hill, "**Electric Railway Traction. Part 1. Electric Traction and DC Traction Motor Drives**", Power Engineering Journal, feb. 1994.

[Hill, 94.b]

R.J. Hill, "**Electric Railway Traction. Part 2. Traction Drives with Three-Phase Induction Motors**", Power Engineering Journal, june 1994.

[Howard, 88]

T.S. Howard, "**Signalling and Train Control - The Key to Urban Mass Transit Performance**", Hong Kong Engineer, april 1988.

[Ho, 94]

M. Ho, "**Optimal Control of Traffic Flow at a Conflict Area in Railway Network**", Ph.D. Thesis, University of Birmingham, 1994.

[Ho et al, 89]

T.K. Ho, J. Alan, G. Digby, C.J. Goodman, "**Modelling of Signalling for an Interactive On-Line Rapid Transit Railway Simulator**", Software Engineering for Real Time Systems - 2nd International Conference, Cirencester, sep. 1989.

[Hooke & Jeeves, 61]

R. Hooke, T.A. Jeeves, "**Direct Search: solution of numerical and statistical problems**", Journal of the A.C.M., 1961.

J

[Jiaxin & Howlett, 92]

C.Jiaxin, P.Howlett, "**Application of Critical Velocities to the Minimisation of Fuel Consumption in the Control of Trains**", Automática, vol 28, nº. 1, 1992.

[Jiaxin & Howlett, 93]

C.Jiaxin, P.Howlett, "**A Note on the Calculation of Optimal Strategies for the Minimisation of Fuel Consumption in the Control of Trains**", IEEE Transactions on Automatic Control, vol 38, nº. 11, nov. 1993.

[Juan, 95]

J. de Juan, "**Desarrollo de una Herramienta Automática para la Optimización de la Conducción de Trenes por Vectores de Deriva**", Proyecto Fin de Carrera, Universidad Pontificia Comillas, Madrid 1995.

K

[Kalay et al, 87]

Y.E. Kalay, L.M. Swerloff, A.C. Harfmann, "**A Knowledge-Based Computable Model of Design**", "Expert Systems in CAD", J.S. Gero ed., North Holland, 1987.

[Kashani & Saridis, 83]

H.R. Kashani, G.N. Saridis, "**Intelligent Control for Urban Traffic Systems**", Automatica, vol. 19, nº 2, 1983.

[Komaya, 91]

K. Komaya, "**A New Simulation Method and its Application to Knowledge-Based Systems for Railway Scheduling**", Proc. of the IEEE/ASME Joint Railroad Conference, St. Louis, may 1991.

L

[Lagana, 87]

A. Lagana, "**Railway Traffic Control - New Techniques to Aid Decision-Making**", Rail International, vol. 18, n° 6, 1987.

[Levine & Athans, 66]

W.S. Levine, M. Athans, "**On the Optimal Error Regulation of a String of Moving Vehicles**", IEEE Trans. On Automatic Control, vol. ac-11, n° 3, 1966.

[Lidén, 93]

T. Lidén, "**The New Train Traffic Simulation Program**", ASU Newsletter, vol. 21, n° 2, 1993.

M

[Mellitt et al, 78]

B. Mellitt, C.J. Goodman, R.I.M. Arthurton, "**Simulator for studying operational and power supply conditions in rapid transit railways**", Proc. IEE, vol. 125, n° 4, 1978.

[Melzer & Kuo, 71]

S. Melzer & B.C. Kuo, "**A Closed Form Solution for the Optimal Error Regulation of a String of Moving Vehicles**", IEEE Trans. On Automatic Control, vol. AC-16, 1971.

[McGuire & Linder, 94]

M. McGuire, D. Linder, "**Train Simulation On British Rail**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.

[Minciardi et al, 94]

R. Minciardi, S. Savio, G. Sciutto, "**Models and Tools for Simulation and Analysis of Metrorail Transit Systems**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.

P

[Peppaed & Gourishankar, 70]

L.E. Peppaed, V. Gourishankar, "**Optimal Control of a String of Moving Vehicles**", IEEE Trans. On Automatic Control, vol. ac-15, 1970

R

[Rice, 74]

P. Rice, "**Urban Transport Systems Capacity with special reference to London Transport Underground Railways**", Proc. Conference on Control Aspects of New Forms of Guided Land Transport, London, august 1974.

[Rambukwella et al, 87]

N.B. Rambukwella, B. Mellit, C.J. Goodman, Z.S. Mouneimne, "**Traction Equipment Modelling and the Power Network Solution for DC Supplied Rapid Transit Power System Studies**", Proc. International Conference On Electric Railways Systems for a New Century, London 1987.

S

[Sasama & Ohkawa, 83]

H. Sasama, Y. Ohkawa, "**Floating Traffic Control for Public Transportation Systems**", Proc. 4th IFAC Conference on Control and Transportation Systems, Baden-Baden, april 1983.

[Sujitjorn et al, 92]

S. Sujitjorn, B. Mellit, N.B. Rambukwella, "**Energy Minimisation in Transit Systems Using a Train Based Expert System for Dynamic Coast Control**", Proc. of the 3th COMPRAIL Conference, Washington, Aug. 1992.

T

[Taskin et al, 94]

T. Taskin, J. Allan, A. Simmons, B. Mellitt, "**Automatic Service Regulation for London Underground's Central Line**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.

[Tomiyama & Ten Hagen, 87]

T. Tomiyama, P.J.W. Ten Hagen, "**Organization of Design Knowledge in an Intelligent CAD Environment**", "Expert System in CAD", J.S. Gero ed., North Holland, 1987.

[Tsukamoto et al, 94]

K. Tsukamoto, I. Watanable, S. Ohhashi, T. Shimamura, "**Computer Aided Signalling Blocks Arrangement System for ATC on Shinkansen Lines**", Proc. of the 4th COMPRAIL Conference, Madrid, Sept. 1994.

W

[Waldron, 89]

M.B. Waldron, "**Modelling of the Design Process**", "Intelligent CAD I", H. Yoshikawa, D. Gossard eds., North Holland 1989.

[Welding & Day, 65]

P.I. Welding, D.J. Day, "**Simulation of Underground Railway Operation - Development of a Model to Study the Regularity of Close Interval Services**", Railway Gazette, June 1965.

Y

[Yoshikawa et al, 83]

T. Yoshikawa, H. Oka, H. Hanafusa, "**Decentralized Control of Moving Vehicles on a Loop Line**", Proc. IFAC Conference of Large Scale System, Warsaw, Poland 1983.

Z

[Zhang, 89]

Z. Zhang, "**A Model of Conceptual Mechanical Engineering Design for Automated CAD**", Ph.D. Thesis, University of Central Florida, Orlando (Florida), 1989.