

# **Implantación de un sistema de control óptimo en un centro de control de tráfico de líneas de metro**

Antonio Fernández Cardador, Fernando de Cuadra García

*Instituto de Investigación Tecnológica (IIT)  
Universidad Pontificia Comillas (UPCO)  
Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid, Spain  
EMail: antoniof@iit.upco.es, cuadra@iit.upco.es*

## **Resumen**

Este artículo presenta los resultados de la implantación de un sistema de control óptimo para líneas cerradas de metro. El sistema ha estado funcionando con éxito más de un año en algunas líneas de metro de Barcelona y Madrid, mejorando sensiblemente la regularidad de paso de los trenes y reduciendo el consumo de energía. También se describen en este artículo otras características interesantes del sistema, que lo convierten en una herramienta integral de regulación, monitorización, operación y gestión de la explotación.

## **1 Introducción**

La cooperación entre el Instituto de Investigación Tecnológica (Universidad Pontificia Comillas) y la compañía de señalización y sistemas ferroviarios Dimetronic S.A. ha permitido el desarrollo de herramientas y sistemas informáticos aplicados al entorno ferroviario. Las aplicaciones incluyen herramientas de simulación y análisis (de Cuadra et al[1], Fernández et al[2]), optimización *off-line* (de Cuadra et al[3]) y control óptimo (Fernández et al[2], Fernández et al[4]). La mayoría de estos trabajos están recogidos en Fernández[7], tesis doctoral desarrollada en el IIT.

Este artículo describe los resultados obtenidos por la implantación de la herramienta de regulación descrita en Fernández et al[4] en un entorno de control de tráfico centralizado (CTC) desarrollado por Dimetronic (véase Fontela et al[5]). El sistema de regulación lleva funcionando con éxito ya más de un año en líneas de metro de Barcelona y Madrid. Los datos numéricos que se presentan aquí han sido proporcionados directamente por Metro de Madrid S.A., y son el resultado de un estudio sistemático llevado a cabo por la propia compañía para analizar el funcionamiento del sistema. Como datos más importantes cabe destacar la mejora en un 43% de la regularidad de paso de los trenes y el ahorro de un 18% de energía.

La sección 2 del artículo describe la arquitectura externa y funcionalidad del sistema global; en la sección 3 se presenta brevemente el enfoque seguido para desarrollar el sistema de regulación automática; la sección 4 está dedicada a la presentación detallada de los resultados numéricos obtenidos como herramienta de regulación, mientras que las secciones 5 y 6 describen otras características adicionales del sistema que lo hacen una herramienta integrada de monitorización, operación y gestión.

## 2 Descripción del sistema

La figura 1 muestra la arquitectura externa básica del sistema. La herramienta de regulación, llamada SIRAT en Metro de Madrid (y SIRO en su versión para Barcelona), conoce el estado de cada línea de metro a través de eventos de línea, fundamentalmente relacionados con el movimiento de trenes. La herramienta regula la línea mediante órdenes que modifican la velocidad de los trenes en cada interestación y el tiempo extra de parada de cada tren en cada estación.

La velocidad de los trenes se puede controlar con precisión gracias al sistema de conducción automática (ATO, Automatic Train Operation) a bordo del tren, que es capaz de ejecutar distintos tipos de marcha según el mensaje codificado que reciba del CTC. Cada vez que un tren sale de una estación, se le comunica de forma remota qué marcha debe aplicar en su recorrido hasta la siguiente estación. Estas marchas han sido optimizadas off-line para cada interestación, consiguiendo el mínimo consumo posible para cada tiempo de marcha deseado.

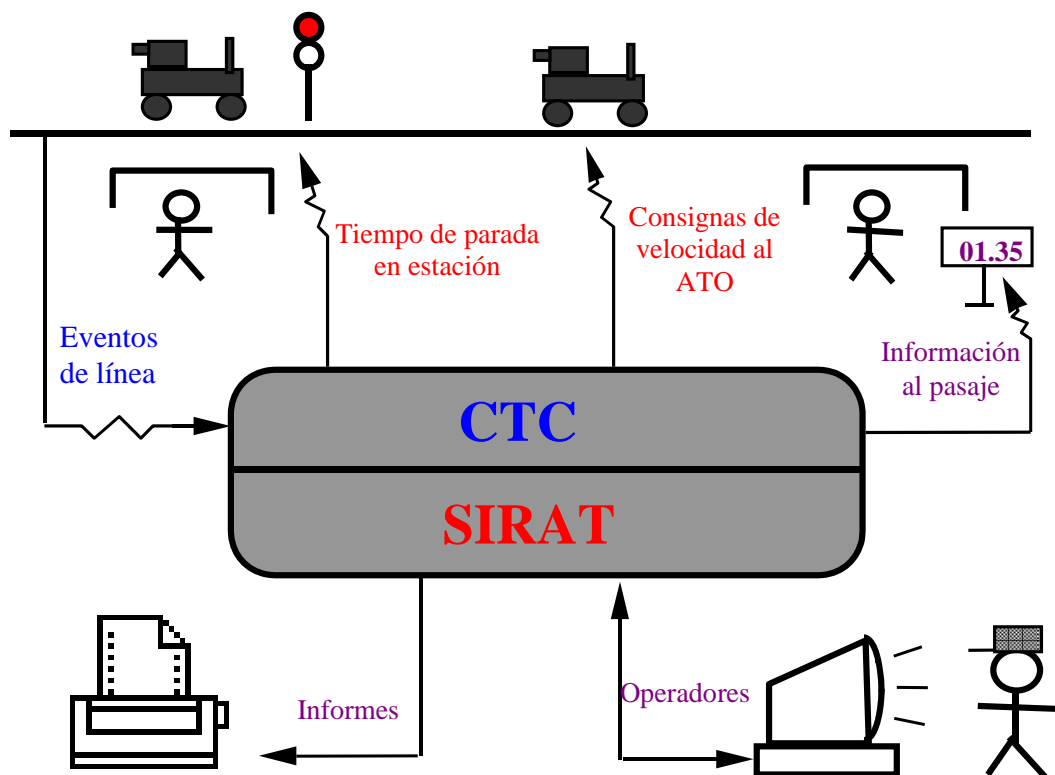


Figure 1. Arquitectura del sistema

Para retener los trenes en las estaciones se actúa directamente sobre las señales de salida de estación, o bien se emplean carteles de regulación que indican al conductor del tren el instante de salida mediante un dispositivo de cuenta atrás.

En el sistema instalado en Barcelona se cuenta además con carteles de información a los pasajeros que esperan en cada andén, en los que se muestra el tiempo que falta hasta la llegada del próximo tren mediante dispositivos de cuenta atrás.

También aparecen en la figura los intercambios de información con los operadores y con el administrador del sistema. A pesar de que en los proyectos de investigación y desarrollo suelen relegarse a un segundo plano, estas funciones de tipo interfaz han sido muy importantes para conseguir que la herramienta sea realmente práctica y se utilice intensivamente.

### 3 Descripción del sistema de control

La inestabilidad natural de las líneas ferroviarias cerradas es un problema bien conocido (véase por ejemplo Van Breusegem et al[6]). El sistema de control aplicado puede describirse como control óptimo, jerárquico y basado en simulación. Dado que la simulación se intenta adaptar automáticamente al comportamiento real de trenes y pasajeros, puede también etiquetarse el sistema como predictivo-adaptativo.

Esta técnica ha demostrado ser muy adecuada para resolver los dos dificultades principales que presentan este tipo de sistemas: la influencia de los comportamientos no lineales y la compensación de grandes perturbaciones.

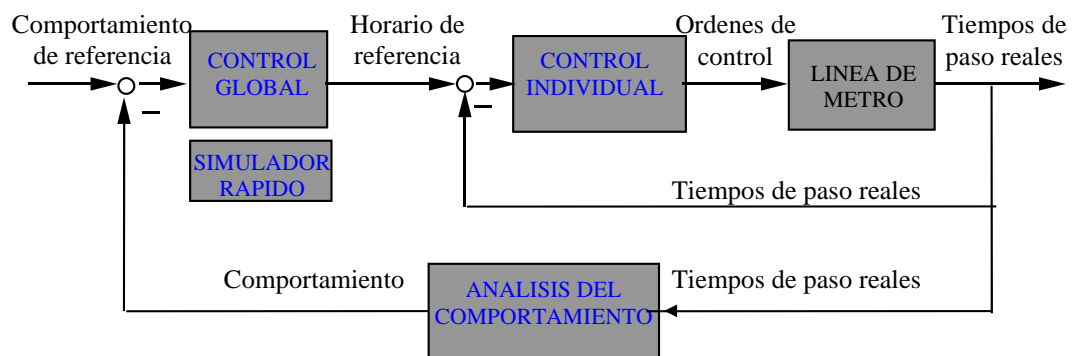


Figura 2. Control structure

La figura 2 muestra la arquitectura básica del sistema de control. El “comportamiento de referencia” puede representar tanto el mantenimiento de un intervalo regular como el de un horario establecido. Además puede también imponer una transición suave en la retirada o incorporación de trenes en la línea, o entre distintos tipos de explotación (intervalo-horario).

El módulo “control global” compara periódicamente el comportamiento de referencia con el comportamiento actual, y elabora un “horario de referencia”. Este horario de referencia representa una evolución factible y óptima de todos los trenes de la línea a lo largo del tiempo. La optimización se realiza mediante técnicas de búsqueda directa usando un “simulador rápido” para la evaluación detallada de alternativas.

El módulo de “control individual” fuerza a cada tren a seguir su evolución óptima prevista, aplicando las acciones de control más adecuadas (marchas de ATO y esperas forzadas en estación).

Tanto en la optimización global como en las decisiones tomadas por el control individual se consideran simultáneamente varios criterios de optimización: máxima regularidad, mínimo consumo de energía, mínima molestia al pasajero y mínima desviación de la velocidad nominal de la línea.

## 4 Resultados de la regulación de tráfico

Los datos numéricos que se presentan en esta sección han sido proporcionados directamente por Metro de Madrid S.A., y son el resultado de un estudio sistemático llevado a cabo por la propia compañía para analizar el funcionamiento del sistema.

El estudio se llevó a cabo sobre la Línea 1 durante noviembre de 1997. La línea tiene 46 paradas en estación, y llega a tener hasta 30 trenes circulando en hora punta. Los parámetros que se han empleado para medir la calidad del servicio son:

- Error de regulación. Es la desviación estándar del intervalo entre trenes, medido en segundos.
- Tiempo de vuelta. Es la media de los tiempos que han tardado los trenes en recorrer completamente la línea por última vez, medido en minutos. Se actualiza cada vez que un tren pasa por una estación cabecera de línea.
- Consumo de energía: Medida real tomada en aquellas subestaciones que alimentan únicamente a la Línea 1.

### 4.1 Selección de la marcha de ATO nominal

Se han definido cuatro marchas de ATO posibles para cada interestación. La “marcha 0” corresponde a la máxima velocidad permitida por los sistemas de protección del tren (ATP). La “marcha 1” perdería unos 5 segundos aproximadamente con respecto a la “marcha 0”, y así sucesivamente. En modo de operación manual los trenes circulan normalmente a máxima velocidad, pero el sistema SIRAT permite definir cualquiera de las cuatro como velocidad nominal de la línea.

La tabla 1 muestra la influencia de tres velocidades nominales distintas (0, 1 y 2) en el comportamiento de la regulación de tráfico. Las cifras entre paréntesis representan la mejora (+) o el empeoramiento (-) porcentual de cada opción respecto a la velocidad máxima. Las cifras corresponden a la media obtenida a lo largo de un día completo de operación.

	MARCHA 0	MARCHA 1	MARCHA 2
<b>ERROR DE REGULACIÓN (s)</b>	44.6	37.2 (+16.60%)	40.3 (+9.73%)
<b>TIEMPO DE VUELTA (min)</b>	77.8	78.7 (-1.16%)	80.2 (-3,08%)
<b>CONSUMO DE ENERGÍA (kW h)</b>	55047	52656 (+4.34%)	50505 (+8.25%)

Tabla 1. Comparación de distintas velocidades nominales

La conclusión que se extrae de estos resultados es que la marcha 1 es mejor que las marchas 0 y 2, por conseguir un equilibrio mejor entre regulación y tiempo de vuelta. Por tanto se toma la marcha 1 para las comparaciones entre la regulación manual y la automática.

## 4.2 Regulación automática frente a regulación manual

La tabla 2 muestra los resultados comparativos entre la regulación de la herramienta SIRAT y la regulación manual habitual. La operación manual consiste normalmente en retener determinados trenes en estaciones, preferentemente en estaciones cabecera.

Los resultados numéricos se han obtenido promediando las medidas tomadas en tres días consecutivos con SIRAT (19, 20 y 21 de noviembre de 1997) y en tres días de similares características con operación manual (24, 25 y 26 de noviembre). La columna de resultados indica la mejora (+) o el empeoramiento (-) porcentual obtenido mediante el uso del SIRAT.

	SIRAT OFF	SIRAT ON	RESULTADOS
<b>ERROR DE REGULACIÓN (s)</b>	71.0	40.4	+43.0%
<b>TIEMPO DE VUELTA (min)</b>	77.6	79.0	-1.8%
<b>CONSUMO DE ENERGÍA (kW h)</b>	63199	52100	+18.0%

Tabla 2. Regulación automática frente a regulación manual

Las conclusiones que se extraen de estos resultados son que la pequeña degradación en el tiempo de vuelta está claramente compensada por la mejora en la regulación y en el consumo de energía. No obstante, en las nuevas versiones del SIRAT se va a controlar explícitamente el tiempo de vuelta de cada tren para reducir este efecto negativo (a costa de empeorar ligeramente la regulación).

Las figuras 3, 4 y 5 muestran la evolución temporal de los tres parámetros de calidad, promediada entre los tres días de estudio. Los picos en el error de regulación son debidos a cambios programados en el número de trenes y a cambios en el tipo de explotación (intervalo-horario). El sistema SIRAT hace que estos cambios sean más suaves, fundamentalmente por su capacidad para controlar con la suficiente antelación las transiciones (se trata de un control predictivo basado en simulación).

En los días en que se tomaron las medidas las horas punta corresponden a 30 trenes (09.30) y 26 trenes (20.00), mientras que sólo circulan 20 trenes a las 12.00 y 12 trenes a las 22.00.

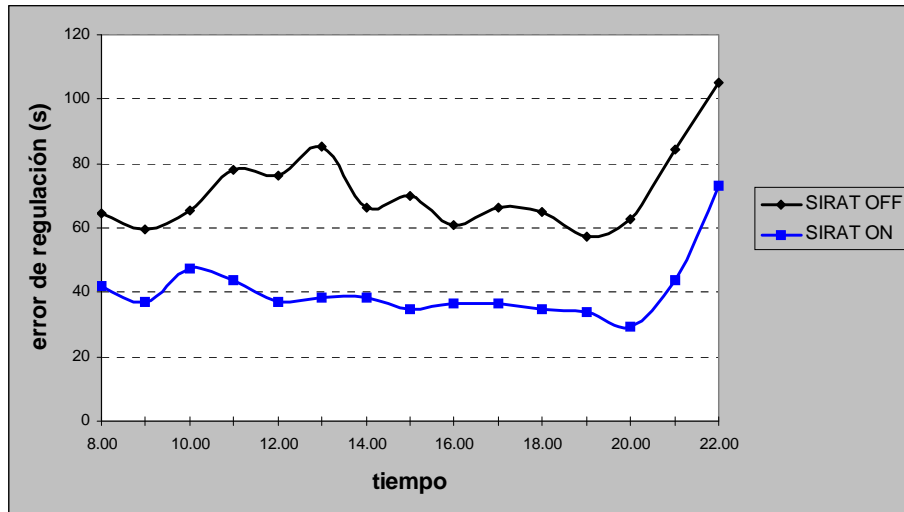


Figura 3. Error de regulación medio con y sin SIRAT

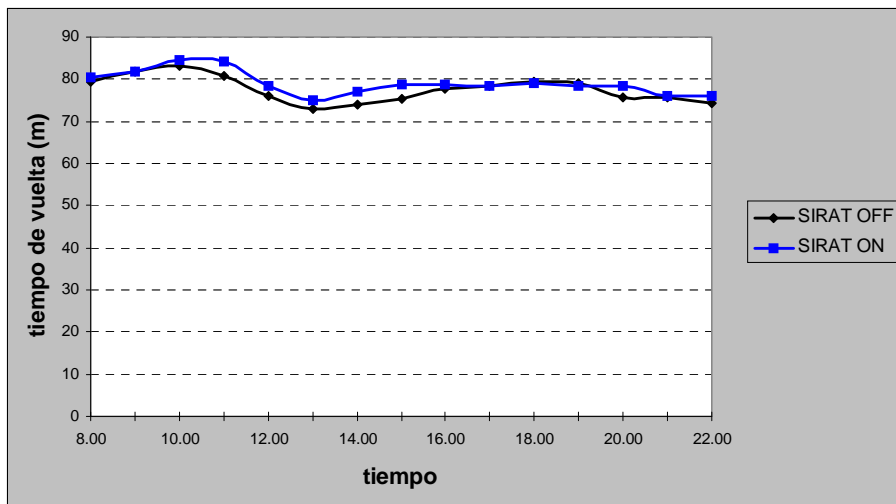


Figura 4. Tiempo de vuelta medio con y sin SIRAT

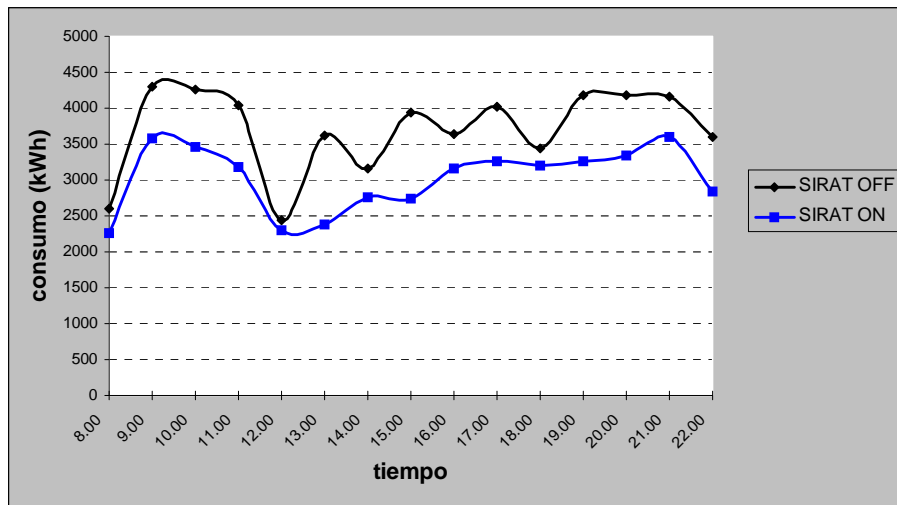


Figura 5. Consumo de energía medio con y sin SIRAT

### 4.3 Mejora de comportamiento en los transitorios

Las perturbaciones más importantes en una línea de metro son debidas a los transitorios de operación. El sistema SIRAT es muy eficaz en la reducción del efecto de estos transitorios, debido a su capacidad de anticipación y a la optimización continua del comportamiento de la línea con respecto a cualquier comportamiento de referencia.

La figura 6 recoge dos transitorios consecutivos realizados con y sin la herramienta de regulación. El primer transitorio consiste en la reducción de 28 a 22 trenes (desde las 19.30 a las 21.00). El segundo consiste en la reducción de 22 a 10 trenes, y simultáneamente en el cambio de explotación por intervalo a explotación por horario (desde las 21.00 a las 22.00).

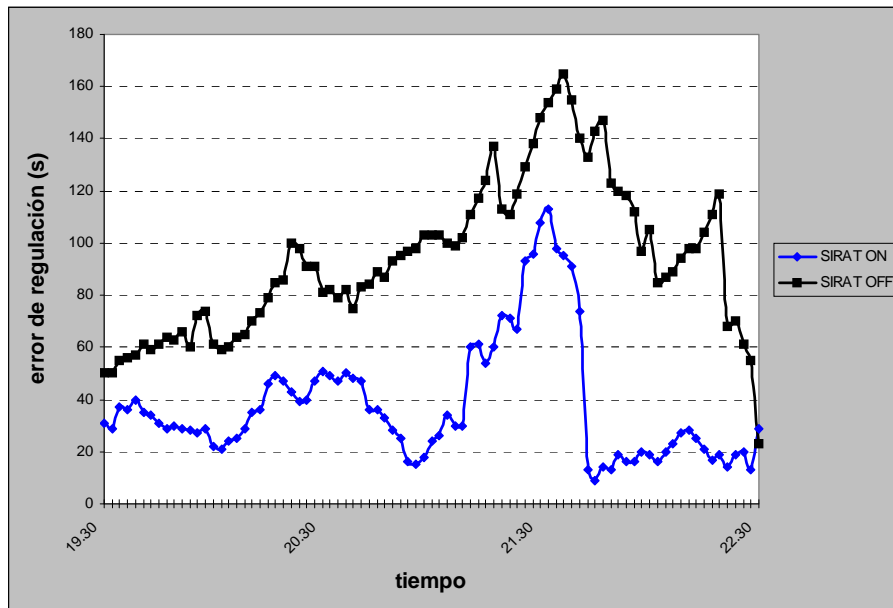


Figura 6. Error de regulación en transitorios con y sin SIRAT

Los resultados que muestra la figura 6 merecen dos comentarios importantes. Primero, el sistema SIRAT es capaz de restablecer el nivel normal de regulación después del primer transitorio, en contraste con la operación manual. Segundo, ambos transitorios son considerablemente más cortos y suaves con la regulación automática.

## 5 Comportamiento como herramienta de operación

Los operadores del sistema tienen a su disposición diversas pantallas gráficas que muestran en detalle el estado actual de la línea y, lo que es muy importante, su evolución prevista. También cuentan con un interfaz de comandos integrado en el CTC para introducir órdenes y modificar parámetros de la regulación. En esta sección se comentan tres aspectos distintos de las prestaciones de la herramienta desde el punto de vista del operador: como sistema de regulación, como sistema de monitorización y como herramienta de predicción.

### 5.1 Como sistema de regulación

Tanto en explotación por intervalo como en explotación por horario, el operador prácticamente queda liberado de aplicar acciones de control. Su papel se limita a realizar tareas de supervisión, ayudado por un juego muy completo de avisos y alarmas.

Durante los transitorios asociados a la retirada de trenes, el operador introduce órdenes de alto nivel, como por ejemplo qué tren se va a retirar en qué estación. El SIRAT se encarga entonces de ir reduciendo gradualmente el intervalo de dicho tren respecto del tren anterior, para que cuando se produzca la retirada sea fácil restablecer el equilibrio. La introducción anticipada de trenes funciona de un modo análogo, indicando qué tren debe ampliar su intervalo para que en cierta estación se incorpore sin problemas un nuevo tren.



El operador puede además cambiar en tiempo real ciertos parámetros que afectan a la regulación, como por ejemplo la velocidad nominal, el tipo de explotación, los límites máximos de espera en estación y el tipo de horario de referencia vigente.

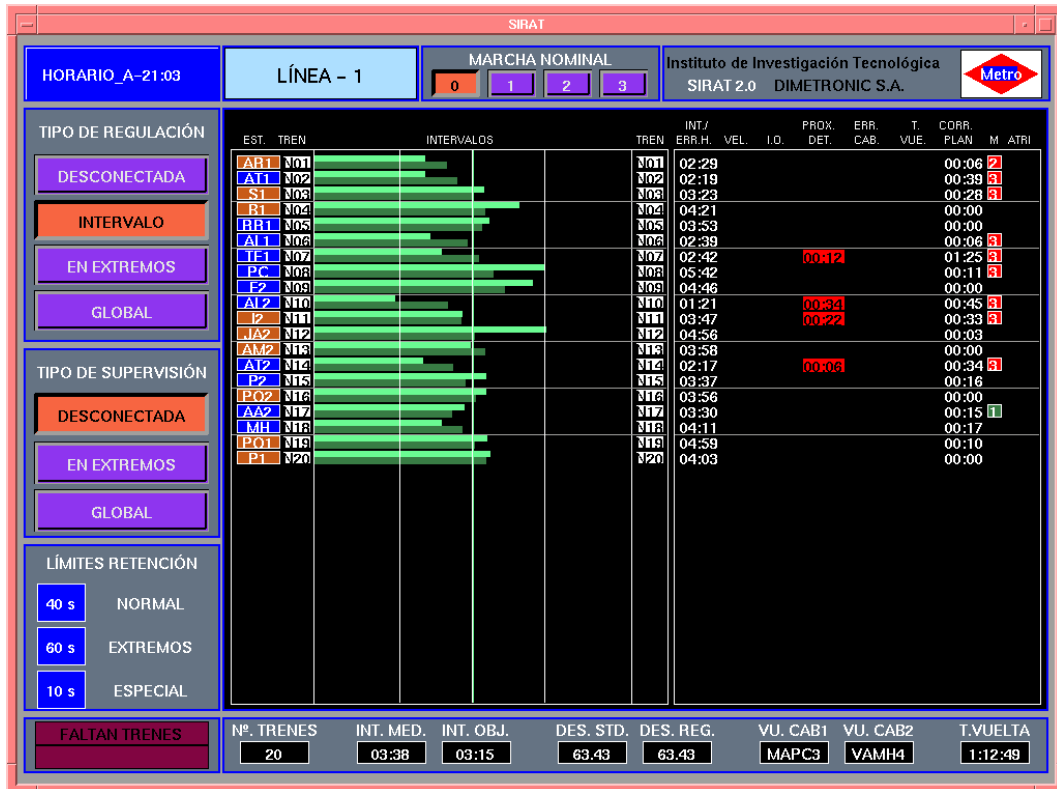


Figura 7. Pantalla principal del SIRAT

## 5.2 Como sistema de monitorización

El operador dispone de gran cantidad de información gráfica y numérica para conocer en todo momento el estado actual de cada línea. La figura 7 muestra la pantalla principal del SIRAT. Las bandas izquierda y superior de la pantalla están dedicadas al estado actual de los mandos, como son la marcha nominal, el horario actual de referencia y el modo de regulación vigente. La parte inferior muestra información numérica importante, como por ejemplo el número actual de trenes, el error de regulación actual y el tiempo de vuelta.

La parte central de la pantalla es intercambiable, y en el caso de la figura 7 muestra el estado detallado de cada tren: identificador, posición actual, intervalo actual y futuro (al final del plan de regulación óptimo vigente), próximas acciones de control que se le van a aplicar, y otros datos de interés.

Otra pantalla alternativa muestra gráficos sobre la evolución temporal de los parámetros de calidad (regularidad, tiempo de vuelta). En la versión instalada en Barcelona hay otras dos pantallas disponibles, que muestran el grado de acoplamiento entre trenes y horarios, y el valor instantáneo de los carteles de regulación e información al pasaje.

El sistema SIRAT genera además distintos tipos de alarmas y mensajes de aviso, como por ejemplo retrasos puntuales significativos de trenes en estaciones e interestaciones.

También supervisa el funcionamiento correcto del sistema de ATO, comparando en todo momento los tiempos de marcha reales y los esperados.

### **5.3 Comportamiento como herramienta de predicción**

Dado que el sistema de control es predictivo y basado en simulación, la información sobre el futuro esperado está siempre disponible. Muchos de los datos que aparecen en las pantallas son estimaciones sobre la situación futura, que están actualizándose constantemente (véase la figura 7).

Esta información incluye intervalos al final del plan óptimo vigente, acciones de control previstas y errores previstos de horario de cada tren en su próxima estación cabecera.

Un operador experimentado puede emplear estos datos para tomar decisiones adecuadas sobre qué tren debe retirarse en cada estación, o cuál es la mejor forma de encajar una explotación por intervalo con una explotación por horario. También le ayuda a seleccionar en cada momento la velocidad nominal de línea más apropiada

## **6 Prestaciones como herramienta de gestión**

Las tareas de gestión (o administración) de un sistema ferroviario incluyen la preparación y ajuste de datos, la supervisión constante de la explotación (lo que implica la elaboración de informes de seguimiento) y la toma de decisiones sobre inversiones y mejoras adecuadas. SIRAT ha sido equipado con funcionalidades a medida para facilitar estas tareas.

La herramienta emplea distintos juegos de datos que deben ser proporcionados por el administrador del sistema. Hay ficheros que describen la estructura de cada línea, con sus estaciones, circuitos de vía relevantes, señales y tipos de vuelta automática en las estaciones cabecera. Otros ficheros recogen los horarios oficiales para cada línea y cada tipo de día de explotación (laborable o festivo, verano o invierno, etc.) También se necesitan ficheros con los tiempos esperados de las distintas marchas de ATO de cada interestación (un fichero para cada línea).

El fichero de entrada más importante desde el punto de vista del administrador es el fichero de configuración, en el que se recogen los parámetros de control y ajuste del funcionamiento de la regulación para cada línea. Algunos de estos parámetros son los pesos relativos de los criterios de optimización, los umbrales para avisos y alarmas y los valores por defecto de los variables de control del operador.

Los informes diarios de seguimiento comprenden distintos tipos de ficheros de salida. Se generan ficheros de calidad de servicio (evolución cronológica y estadísticas globales) y ficheros de incidencias. Otro fichero recoge las órdenes enviadas a las señales de salida de estación, para detectar posibles errores en estas acciones de control tan importantes.

Un fichero “log” adicional almacena todos los eventos de entrada al SIRAT a lo largo del día. Esto permite reproducir fielmente *off-line* el comportamiento de cada línea, trabajando en modo “moviola” con velocidad de simulación ajustable.

## **7 Conclusiones y futuros desarrollos**

El sistema SIRAT ha demostrado ser una herramienta fiable, eficaz y rentable. Su eficacia se hace patente tanto en la mejora de la calidad del servicio como en la ayuda real a la

operación y a la gestión. De ser una alternativa a la operación manual ha pasado rápidamente a ser la herramienta habitual de explotación.

En cuanto a su rentabilidad, cabe distinguir entre el corto y el medio plazo. A corto plazo, el ahorro de energía justifica ampliamente la inversión realizada. A medio plazo, dado que el incremento de la regularidad permite una distribución más uniforme de los pasajeros en los trenes y un servicio en general más satisfactorio, cabe esperar un aumento en el número de usuarios habituales.

Por otro lado el trabajo diario de operadores y del administrador del sistema es más fácil y productivo, al contar con las herramientas adecuadas. En el caso del operador la diferencia es especialmente notable en líneas largas y muy congestionadas, puesto que su regulación manual es excesivamente compleja.

Se están desarrollando actualmente dos líneas de trabajo paralelas como continuación del sistema SIRAT. Por un lado, se preparan nuevas versiones del SIRAT con mejoras interesantes, como por ejemplo el control directo del tiempo de vuelta de cada tren como criterio de optimización. Por otro lado, la estrategia de control aplicada al SIRAT se está extendiendo a sistemas ferroviarios de topología general, es decir, sistemas con distintos servicios superpuestos, distintos tipos de trenes y problemas de cruces y vía única.

## Referencias

- [1] de Cuadra, F., Fernández, A. & Granados, J.C., *Train Simulation and Headway Calculations: an Approach Based on Parametrised Continuous Curves*. T.S.K. Murthy, B. Mellit, C.A. Brebbia, G. Sciutto, S. Sone (eds.) Computers in Railways IV - Vol. 1 - Railway Design and Management. Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 411-418, 1994.
- [2] Fernández, A., de Cuadra, F. & Montes, F., *Traffic Regulation and Simulation- a Predictive Adaptive Control System*. T.S.K. Murthy, B. Mellit, C.A. Brebbia, G. Sciutto, S. Sone (eds.) Computers in Railways IV - Vol. 1 - Railway Design and Management. Computational Mechanics Public., Southampton, pp. 419-428, 1994.
- [3] de Cuadra, F., Fernández, A., de Juan, J. & Herrero, M.A., *Energy-Saving Automatic Optimisation of Train Speed Commands Using Direct Search Techniques*. J. Allan, C.A. Brebbia, R.J. Hill, G. Sciutto, S. Sone (eds.) Computers in Railways V - Vol. 1 - Railway Systems and Management. Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 337-346, 1996.
- [4] Fernández, A., de Cuadra, F. & García, A., *SIRO: an Optimal Regulation System in an Integrated Control Centre for Metro Lines*. J.Allan, C.A.Brebbia, R.J. Hill, G. Sciutto, S. Sone (eds.) Computers in Railways V - Vol. 2 - Railway Technology and Environment. Computational Mechanics Publications, Southampton, pp.299-308, 1996.
- [5] Fontela, J.L., Martínez, C. & García, A., *Integrated Control Centre*. T.S.K. Murthy, B. Mellit, C.A. Brebbia, G. Sciutto, S. Sone (eds.) Computers in Railways IV - Vol. 2 - Railway Operations. Computational Mechanics Public., Southampton, pp. 199-204, 1994.
- [6] Van Breusegem V., Campion G. & Bastin G. *Traffic modelling and state feedback control for metro lines*, IEEE Transactions on automatic control, vol. 36, No. 7, July 1991.
- [7] Fernández, A. *Modelado, simulación y control de sistemas ferroviarios*, Tesis doctoral, Universidad Pontificia Comillas, 1997.

## **BIOGRAFÍAS**

### **ANTONIO FERNÁNDEZ CARDADOR:**

Antonio Fernández Cardador nació en Madrid en 1968. Se licenció en CC. Físicas en 1991 por la Universidad Complutense de Madrid, en la especialidad de Electrónica. En 1997 se doctoró en Ingeniería Industrial por la Universidad Pontificia Comillas. De 1991 a 1995 fue Investigador en Formación del Instituto de Investigación Tecnológica (ICAI-UPCo), y desde 1996 es Investigador del mismo centro y profesor del departamento de Ingeniería Mecánica de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI). Sus áreas de trabajo son: modelado, análisis y simulación de grandes sistemas; aplicación de técnicas de simulación a problemas de optimización y control; diseño, explotación y regulación automática de sistemas ferroviarios.

### **FERNANDO DE CUADRA GARCÍA**

Fernando de Cuadra García nació en Madrid, España, en octubre de 1961. Obtuvo el título de Ingeniero Industrial, especialidad de Electrotecnia, en 1985, y el de Doctor Ingeniero Industrial en 1990, ambos por la Universidad Pontificia Comillas de Madrid (ICAI). Es Profesor Propio Agregado de la E.T.S. de Ingeniería (ICAI). Está adscrito al Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), y colabora en los departamentos de Electrónica y Control (DEA) y Sistemas Informáticos (DSI). Actualmente es Jefe de Estudios de la titulación de Ingeniería Informática. Sus áreas de trabajo son: optimización por búsqueda directa, simulación y control de sistemas complejos, ingeniería de software y desarrollo de herramientas CASE.