



Antonio Fernández Cardador

Licenciado en Físicas por la UCM (1991) y Doctor en Ingeniería Industrial por la UPCO (1997). Profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Coordinador del Área de Ingeniería de Software del IIT y del Master en Sistemas Ferroviarios de la UPCO.



Paloma Cucala García

Ingeniero del ICAI (1995) y Doctor en Ingeniería Industrial por la UPCO (2003). Profesora del Departamento de Sistemas Informáticos la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) y miembro del Área de Ingeniería de Software del IIT.



Fernando de Cuadra García

Dr. Ingeniero Industrial del ICAI, Director del ICAI, miembro del IIT y Director del Master en Sistemas Ferroviarios de la UPCO.

Modelo integrado de información para la planificación y operación del tráfico ferroviario

Este artículo describe el modelo integrado de información que se ha implementado en el centro de control de tráfico ferroviario de la línea de alta velocidad Madrid-Lérida en Zaragoza. El núcleo del modelo lo constituye el Plan de Explotación, que contiene todos los datos de planificación de tráfico necesarios para la operación de servicios ferroviarios: horarios comerciales, horarios técnicos, limitaciones de velocidad, asignación de personal y vehículos a cada tren, andenes y vías de circulación, datos para facturar los costes de infraestructura que utiliza cada tren, etc. Este Plan se genera mediante una herramienta de planificación off-line, y se exporta al entorno de tiempo real donde se pone a disposición de los distintos sistemas de operación de tráfico (telemando de tráfico, sistema de información al viajero, sistema de supervisión y regulación de trenes, etc.), como única fuente de información planificada. En tiempo de operación, el Plan que se encuentra vigente en el entorno de tiempo real puede ser modificado mediante una herramienta on-line de replanificación, notificando los cambios a todos los sistemas en operación suscritos a dichos cambios. De esta de forma, la consistencia e integridad de la información de tiempo real queda garantizada. Por otro lado, se unifican los modelos y procedimientos de planificación off-line y replanificación on-line como fases del ciclo de vida de un mismo Plan de Explotación.

De manera similar, los eventos generados durante la operación (movimiento de trenes, retrasos, etc.) se notifican a los sistemas que se hayan suscrito a esta información, estandarizando el intercambio de datos entre sistemas de tiempo real y facilitando la integración de futuros sistemas.

Introducción

Actualmente se están llevando a cabo en Europa importantes inversiones en infraestructura ferroviaria, especialmente en España con la construcción de nuevas líneas de alta velocidad. Esto coincide con un proceso de liberalización del mercado ferroviario, que comienza con la separación del Gestor de la Infraestructura de los Operadores de Trenes siguiendo directrices comunitarias (García [1], Friebe [2]).

La separación de los distintos negocios (gestión de infraestructura, operación de trenes, prestadores de servicios, etc.) aumenta las necesidades de gestión, por ejemplo a la hora de imputar los costes por reserva y uso de la infraestructura, o en la planificación eficiente de los surcos comerciales para los distintos operadores para reservar a cada tren su tramo horario-espacial (equivalente a los 'slots' de tráfico aéreo).

Al mismo tiempo, el desarrollo del estándar europeo ERTMS (European Rail Traffic Management System) y el empleo generalizado de comunicaciones tren-tierra vía radio conllevan el empleo de nuevas tecnologías en este sector. En líneas de fuerte demanda, como son habitualmente las de alta velocidad, estas tecnologías colaboran a mejorar la operación del tráfico de trenes, para garantizar los niveles de calidad al usuario que estas líneas requieren en un entorno competitivo.

Por todo lo anterior, los modernos centros de gestión y operación de tráfico ferroviario aumentan su complejidad, y los sistemas que lo componen tienden a estar cada vez más integrados al compartir información común (Rumsey [3]), tanto de tiempo real (movimiento de trenes, incidencias, alarmas, etc.) como de gestión off-line (planificación de horarios, parámetros económicos, históricos, etc.).

Durante la operación del tráfico, el intercambio de datos entre sistemas de tiempo real típicamente se ha venido realizando mediante comunicaciones punto a punto a medida de cada sistema del centro de control, dependiendo de la tecnología empleada por cada fabricante (Olsen [4]).

Por otro lado, cada sistema de operación en tiempo real necesita sus propios datos de planificación como horarios, vehículos, o personal a bordo (Dreier [5]), que generalmente son generados mediante herramientas de planificación off-line específicas de cada sistema. Algunos de estos datos son comunes a varios sistemas, por lo que tienen que ser almacenados y gestionados en paralelo

por distintas herramientas de planificación. Esto ocurre por ejemplo con los horarios comerciales, que son necesarios para el sistema de control de tráfico y también para el sistema de información al viajero. Esta situación puede llevar a importantes inconvenientes:

- Se debe introducir la misma información en distintas herramientas de planificación, lo que puede producir inconsistencias durante la operación.
- Cuando se modifican los datos de tráfico durante la operación (replanificación), de nuevo es necesario introducir cada cambio en todos los sistemas de operación afectados.
- Además, la información puede estar almacenada y ser presentada al usuario de estos sistemas (operador de tráfico) en diferentes formatos y niveles de detalle, lo que dificulta la comprensión y mantenimiento coherente de los datos, y la formación del operador.

Lo anterior lleva a la necesidad de realizar traducciones a medida al intercambiar datos los sistemas de tiempo real, y a desarrollar funciones de comprobación y consistencia para minimizar el riesgo de operar con datos incoherentes.

De manera similar, cuando la herramienta de planificación es suministrada por un fabricante distinto a la herramienta de operación correspondiente, son necesarias traducciones de datos entre ambos sistemas al exportar los datos del entorno de planificación al entorno de tiempo real.

En conclusión, con el aumento de complejidad de los centros de control de tráfico, en el que conviven múltiples sistemas de gestión y operación suministrados por diferentes fabricantes, se hace ineficiente la solución descrita basada en múltiples integraciones a medida punto a punto, debido a que dificulta tanto el mantenimiento como la incorporación o sustitución de sistemas en el centro de control.

En este artículo se propone un nuevo modelo de integración de la información en los modernos centros de control de tráfico ferroviario. Este modelo estandariza el formato y los métodos de acceso a la información de planificación y operación de tráfico (integración), unifica la información planificada eliminando duplicidades, y establece un ciclo de vida de la información para dar continuidad a las fases de tratamiento de datos (planificación off-line, replanificación on-line y gestión de históricos).

Modelo integrado de información

El modelo de información que se propone estandariza tanto los eventos de operación de tráfico en tiempo real como los datos de planificación que utilizan estos sistemas de operación, mediante el lenguaje de etiquetado estructurado XML. Dicha información es compartida por los distintos sistemas de operación a través de un bus de mensajería (MOM, Middleware Oriented Message) utilizando el método de publicación y suscripción de los datos. El citado bus de integración es la única vía de comunicación existente entre los sistemas del centro de control, de manera que sustituye las comunicaciones punto a punto típicas de las soluciones de integración tradicionales.

Todos los datos publicados en el bus se almacenan como información histórica, y se pueden utilizar posteriormente para reconstrucción de secuencias de escenarios pasados del centro de control, generación de informes, e imputación de costes a los operadores de trenes por la reserva y uso de la infraestructura ferroviaria.

Integración de los eventos de tiempo real

Los eventos generados en tiempo de operación en el centro de control de tráfico se pueden clasificar en eventos externos, generados en campo y que llegan al centro de control (como las ocupaciones de los circuitos de vía por los trenes, utilizados para localizar a los trenes y realizar su seguimiento) y eventos internos, generados por los distintos sistemas de tiempo real (como las alarmas de mal funcionamiento de los sistemas de operación). Para cada sistema de operación en tiempo real se han tipificado y estandarizado en formato XML los eventos relevantes para el resto de sistemas del centro de control. Estos eventos se publican en tiempo real en el bus de integración, de manera que cualquier sistema que previamente se haya suscrito a dicha información lo recibirá automáticamente.

Por ejemplo, de la ocupación de un determinado circuito de vía se puede inferir la llegada de un tren a una estación. Este evento, compuesto por el identificador del tren, la hora, el identificador del circuito de vía que corresponde a una estación, y el sentido de circulación, es tratado por los siguientes sistemas:

- El Telemando de Enclavamientos de Tráfico (CTC), que recibe del campo el evento de ocupación de circuito de vía, y se encarga de publicarlo en el bus para el resto de sistemas de operación. Además, el CTC utiliza estos

eventos para realizar el seguimiento de los trenes.

- El Sistema de Información a Viajeros (SIV), que lo utiliza para dar los correspondientes avisos automáticos de llegada del tren a un determinado andén.
- El Sistema de Ayuda a la Regulación (SAR), que lo utiliza para calcular y enviar la consigna de salida de estación al maquinista a través, por ejemplo, de carteles situados a pie de vía.
- El Sistema de Enrutamiento Automático, para enviar automáticamente a los enclavamientos de tráfico la petición de itinerario de salida de estación.
- El Sistema de Supervisión y Gestión del tráfico (GSE), que lo utiliza para calcular el retraso del tren y actualizar la información de seguimiento en el gráfico espacio-temporal de movimiento de trenes en la vía (mallas).
- Los sistemas de supervisión de sensores de campo (detección de obstáculos en vía, fuego en túnel, etc.), que lo utilizan para identificar a los trenes que pueden estar afectados por alarmas, por ejemplo para mostrar al operador de tráfico el teléfono del maquinista.

Otros ejemplos de eventos externos publicados en el bus son los que llegan de los sistemas de supervisión de sensores. Las alarmas de campo detectadas llegan así, por ejemplo, al CTC para poder bloquear la circulación de trenes en la zona de vía afectada.

Los eventos internos que generan los distintos sistemas de operación de tráfico son también publicados de forma similar en el bus de integración. De esta forma, cualquier sistema del centro de control suscrito a esta información puede monitorizar y reaccionar ante alarmas y avisos de otros sistemas, por ejemplo ante caída de equipos, mejorando así el funcionamiento integrado del centro de control.

También se publican en el bus de integración eventos internos con la información introducida por el operador de tráfico a través del interfaz-hombre-máquina para su almacenamiento en la base de datos histórica, y permitir así reconstruir posteriormente la operación con las herramientas adecuadas.

Integración de los datos de planificación: el Plan de Explotación

La integración de los datos de planificación se basa en dos puntos: la estandarización de su formato XML y método de acceso (publicación y suscripción), y en la unificación de toda la información en un único fichero XML denominado Plan de Explotación. El Plan de

Explotación contiene todos los datos de planificación que necesitan los distintos sistemas de operación en el centro de control de tráfico (CTC, SIV, SAR, GSE, etc):

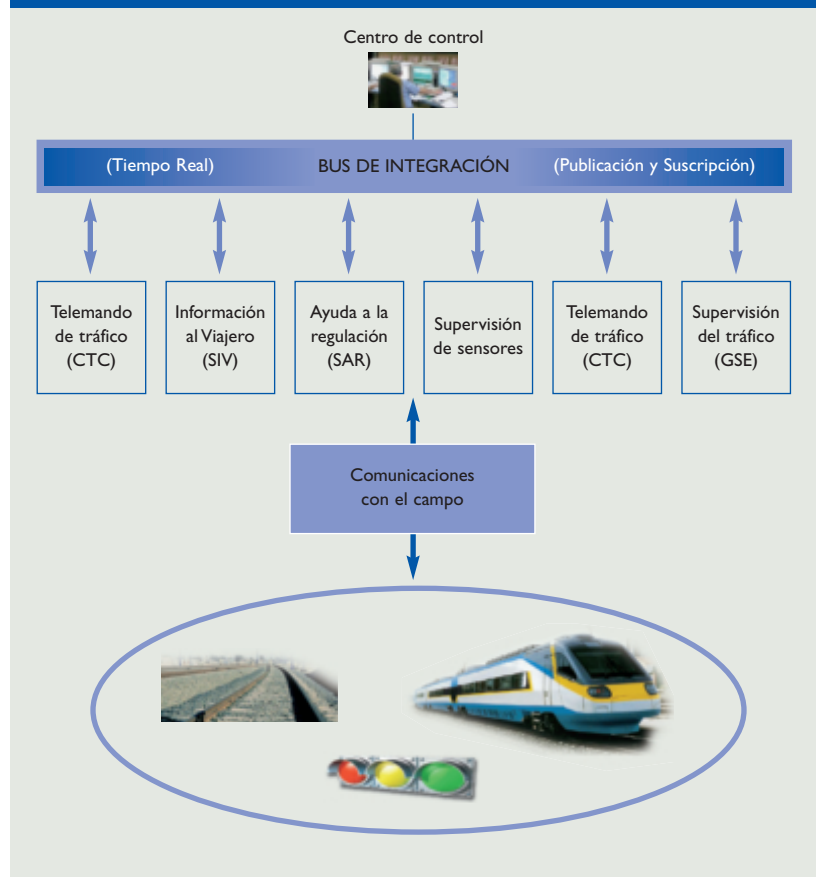
- Información comercial del tren: identificador comercial, tipo, andenes de parada en las estaciones, horario comercial, correspondencias, servicios al viajero, etc.
- Número de circulación técnica y horario técnico de paso por los puntos de control en su recorrido.
- Información planificada de vías de circulación, incluyendo rutas alternativas entre dos puntos de control consecutivos.
- Identificadores y tipo de vehículo que componen el tren.
- Personal a bordo.
- Parámetros económicos necesarios para la imputación de costes por reserva y uso de la infraestructura.
- Información relativa al seguimiento y control de retrasos: velocidad máxima y mínima admisibles entre puntos de control, tiempos mínimos de paradas en estaciones comerciales, retrasos máximos admisibles antes de generar alarmas al operador de tráfico, etc.
- Restricciones en la infraestructura: andenes y vías fuera de servicio, limitaciones temporales de velocidad en determinados tramos (por ejemplo debido a trabajos de mantenimiento), etc.
- Restricciones entre trenes, por ejemplo debido a que compartan vehículos o personal a bordo, o porque haya viajeros que realicen una conexión entre ambos. Esta información permite predecir cómo se van a propagar los retrasos a otros trenes.

El Plan de Explotación permite almacenar la información de operación de cualquier periodo temporal (un día, un mes, periodo de verano, etc.). Para optimizar el almacenamiento y gestión de la información, los trenes que circulan de manera periódica (diarios, laborables, etc.) se introducen una sola vez con calendario asociado. Para que este enfoque cubra toda la casuística (trenes en composición doble ciertos días, estación sin parada en fin de semana, etc.) el modelo se completa con un calendario de excepciones y el detalle de las mismas.

Ciclo de vida del Plan de Explotación

El proceso de planificación de tráfico ferroviario se puede dividir en tres fases: planificación a largo, medio y corto plazo, según el horizonte temporal del Plan de Explotación:

Figura 1. Sistemas de Operación de Tráfico del Centro de Control



- **Planificación a largo plazo.** Los trenes de circulación periódica y ofertados de manera estable se planifican a largo plazo con sus números comerciales, horarios, conexiones, etc. En esta fase, el Plan de Explotación refleja el Acuerdo Marco de asignación de surcos comerciales del Gestor de la Infraestructura con los distintos Operadores de Trenes. El horizonte temporal es de aproximadamente 6 meses. Este Plan se utiliza para imputar a los Operadores de Trenes los costes por asignación y reserva de la capacidad de la línea.

- **Planificación a medio plazo.** En esta fase se introduce en el Plan de Explotación la información técnica necesaria para poder operar. Incluye vías de paso, andenes, personal, vehículos, tiempos técnicos, restricciones de infraestructura, etc. El Plan de Explotación se va enriqueciendo con esta información a medida que se dispone de la misma, exportando Planes completos para su operación con un ciclo típicamente semanal.

Además, en esta fase se introducen los cambios que se hayan producido respecto del Plan a largo plazo: cancelaciones, nuevos trenes, cambios de horario comercial, etc.



- **Planificación a corto plazo.** En tiempo de operación, la planificación a corto plazo permite introducir en el Plan modificaciones que se producen en tiempo real unas horas antes o durante la circulación de los trenes (replanificación). Estos cambios de última hora se pueden producir por cancelaciones, trenes especiales, cambios en el personal de a bordo o en la composición de los trenes, restricciones de la infraestructura por incidencias, etc.

El Plan de Explotación a largo plazo se genera con una herramienta off-line que ha sido desarrollada a medida, y que está disponible desde el entorno informático de planificación y gestión del Gestor de la Infraestructura. Durante el medio plazo el Plan se actualiza con la misma herramienta. Con un periodo aproximado de una semana, el Plan de Explotación se exporta del entorno de planificación al entorno de operación en tiempo real, en formato estándar XML a través de comunicaciones seguras. Cada vez que esto ocurre, se informa a los sistemas en operación que se pone en servicio un nuevo plan como Plan Vigente.

En el entorno de operación, la herramienta de replanificación on-line permite introducir los cambios de última hora e incidencias del Plan Vigente, generando versiones consecutivas del mismo. Estas versiones se van almacenando como información histórica en el entorno de operación, y se envía una copia al entorno de planificación y gestión para su procesamiento posterior (generación de informes, imputación de costes de infraestructura, etc.). Cada vez que se introducen cambios en el Plan Vigente, se informa de los

mismos a todos los sistemas en operación, publicando dichos cambios en formato XML.

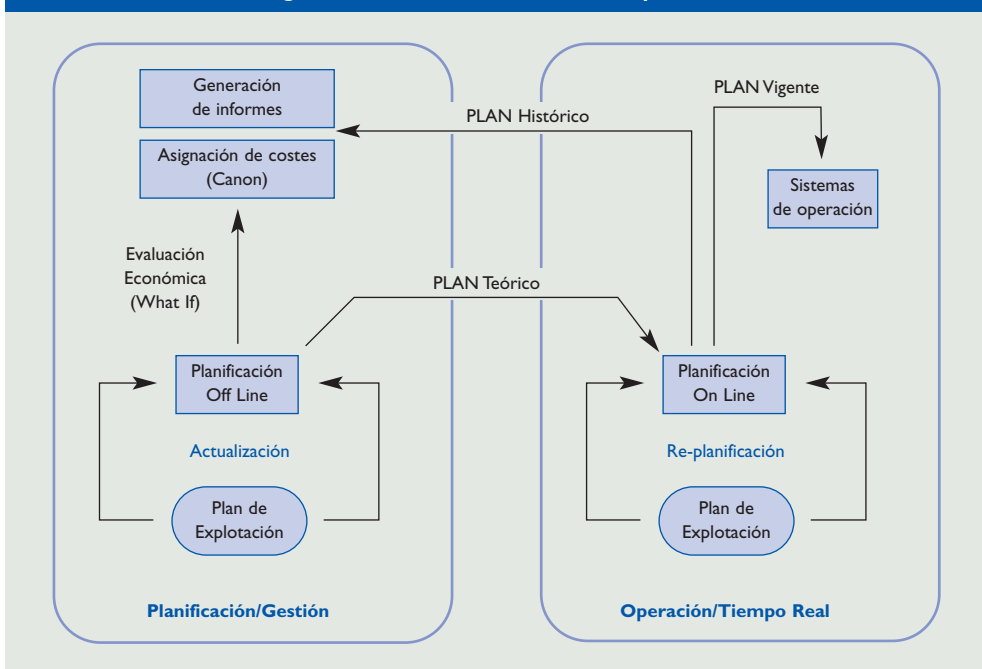
De forma similar, todos los eventos que circulan por el bus de integración del entorno de operación quedan almacenados como información histórica, y una copia de los mismos se envía al entorno de planificación y gestión. Estos eventos, junto con los planes de explotación históricos, quedan así disponibles para la elaboración de informes, cálculo de costes de los trenes por uso de infraestructura y reconstrucción histórica de la operación. Por ejemplo, la herramienta de reconstrucción de secuencias de operación puede reproducir automáticamente una sucesión de alarmas procedentes de distintos sistemas, consiguiendo así una reproducción integrada de los datos históricos muy importante a la hora de analizar incidencias.

Conclusiones

En este artículo se ha presentado un modelo integrado de información de gestión y operación de tráfico ferroviario, que ha sido implementado en el centro de control de la línea de alta velocidad de Zaragoza. El modelo se basa en la estandarización de los datos de planificación y de tiempo real, y de los métodos de acceso a los mismos a través publicación y suscripción en un bus de integración.

Además de la estandarización de datos y su acceso, el modelo unifica en el Plan de Explotación la información de tráfico necesaria para los sistemas en operación (CTC, GSE, SAR, SIV, supervisión de sensores), y establece un ciclo de vida para el Plan que abarca

Figura 2. Ciclo de vida del Plan de Explotación



las fases de planificación: a largo plazo (Acuerdo Marco del Gestor con los Operadores de Trenes), planificación a medio plazo (información técnica para la circulación), corto plazo (cambios de última hora, replanificación) y tratamiento de la información histórica a través de planes de explotación históricos.

Las principales ventajas de la solución propuesta son:

- La normalización de los datos de tiempo real y los métodos de acceso a los mismos permite compartir información a los sistemas en operación de manera estándar y mantenible, evitando las comunicaciones punto a punto a medida y las traducciones de datos entre sistemas.
- Esta estandarización facilita la integración en el centro de control de nuevos sistemas de operación de tráfico, o la sustitución de los ya existente. De esta forma se independizan los nuevos desarrollos de los sistemas y suministradores ya existentes.
- La misma solución de estandarización de datos se aplica a los datos de planificación (Plan de Explotación), permitiendo establecer un ciclo de vida coherente que abarca todo el proceso de gestión y operación de tráfico, sin necesidad de traductores de datos en cada fase.
- El Plan de Explotación es único para todos los sistemas de gestión y operación, y su formato (texto XML) permite mantener la consistencia de la información a lo largo de las

distintas fases, y facilita el intercambio de información entre el Gestor y los Operadores de Trenes.

- El bus de datos permite almacenar planes de explotación y eventos históricos de operación de los distintos sistemas en operación de forma integrada, en una base de datos única.

Actualmente se trabaja en la ampliación del modelo descrito para permitir incorporar nuevos sistemas de operación, como el nuevo sistema de señalización continua vía radio de las nuevas líneas de alta velocidad en España, que se encuentra en fase de implantación. ■

Referencias

- [1] García Álvarez, A., Propuesta de estrategias, estructura organizativa y económica y diseño de operación del transporte de viajeros por ferrocarril en el nuevo escenario competitivo, Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid, Junio de 2004.
- [2] Friebe, G., Ivaldi, M. & Vibes, C., Railway (de)regulation: a European efficiency comparison. Proc. of the First Conference on Railroad Industry Structure, Competition and Investment, Toulouse, November 2003.
- [3] Rumsey, A.F., Systems integration-the key to successful implementation of advanced technology train control systems Proc. of the VIII COMPRAIL Conference, Lemnos, Greece, p.p. 3-12, June 2002.
- [4] Olsen, P.B., Integrated railway traffic management and control. Proc. of the IV COMPRAIL Conference, Madrid, p.p. 161-169 vol.2, September 1994.
- [5] Dreier, J. & Brockmann, U., Integrated system planning for railways Proc. of the V COMPRAIL Conference, Berlin, p.p. 155-168 vol.1, August 1996.