

# Entorno de Simulación para Verificación y Validación de Equipamiento CBTC

Israel Gómez-Rey Romero

CITEF, Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias de la Universidad Politécnica de Madrid, España

Jose Manuel Mera, Emilia Rodrigo, María Luisa Martínez Muneta

CITEF, Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias de la Universidad Politécnica de Madrid, España

## RESUMEN

Debido a sus características de seguridad, los sistemas de señalización ferroviarios requieren una gran cantidad de pruebas para su verificación y validación durante las diferentes etapas de su ciclo de vida, y en particular durante la instalación y puesta en marcha de una nueva línea o rehabilitación de una línea existente, siendo esta última aún más complicada debido a los cortos períodos de tiempo disponibles durante la noche para los trabajos.

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una herramienta para reducir los esfuerzos antes mencionados mediante la simulación de los diferentes subsistemas de una línea equipada con sistema CBTC, el cumplimiento de las interfaces entre los subsistemas y el uso dentro de la simulación de equipos reales. Con estas premisas se desarrolló un entorno de pruebas para equipos y datos de señalización para líneas equipadas con el sistema CBTC.

Los objetivos del proyecto que fueron establecidos en el inicio del desarrollo y han sido cumplidos con el desarrollo que se presenta en este artículo son los siguientes:

- Poder realizar ensayos reales de equipos CBTC y su integración: equipos embarcados, equipos de control de área, etc.
- Poder realizar ensayos reales con otros elementos de señalización y su integración: enclavamientos y ATS.
- Poder realizar validación de datos vía CBTC.

Para lograr estos objetivos se han desarrollado diversas aplicaciones de simulación, de las cuales, los más importantes son las siguientes: infraestructura, trenes automáticos, simulación de sistemas de tren, herramienta de gestión de los escenarios de simulación, etc. Este sistema ha sido desarrollado y está añadiendo actualmente nuevos módulos y funcionalidades para las empresas del Grupo Invensys: Westinghouse Rail Systems en el Reino Unido y Dimetronic Signals en España, y está en uso en las nuevas líneas CBTC bajo su responsabilidad.

## 1 INTRODUCCIÓN.

La creciente expansión de las redes de ferrocarriles suburbanos en los últimos años, debido al aumento en la demanda, ha puesto de manifiesto la necesidad de incorporar nuevos sistemas de señalización y gestión de tráfico ferroviario, tales como el CBTC (Communication Based Train Control) [1, 2], que permitan aumentar la capacidad de las líneas así como la seguridad en la operación de las mismas.

Por otro lado, con el fin de obtener un funcionamiento seguro y fiable, numerosas pruebas deben realizarse en estos sistemas, pero los altos costos de las infraestructuras, así como el material rodante hacen que sea extremadamente difícil inmovilizar estos recursos tanto con el fin de utilizarlos para las pruebas y como para la formación. Por esta razón, adicionalmente de que a veces es imposible crear situaciones de alto riesgo para entrenar en el procedimiento a seguir, el uso de simuladores está más que justificado en el mundo de los ferrocarriles, y en particular de la señalización y el control ferroviario. En el ámbito de los simuladores ferroviarios, podemos encontrar diferentes funcionalidades, como simuladores de conducción y simuladores operacionales, para las pruebas de equipos reales, y el análisis de datos, etc.

Los principales objetivos del proyecto que nos ocupa, son el desarrollo de una herramienta de simulación para reducir el esfuerzo necesario para poner una nueva señalización de una línea en servicio, y al mismo tiempo reducir la utilización de la infraestructura y del material rodante. La herramienta puede incluso ser utilizada para la realización de pruebas previas a la existencia física de la nueva línea.

Con el fin de desarrollar el simulador, todos los elementos del sistema de señalización, así como sus interfaces reales se han simulado, siendo posible reemplazar cada uno de estos elementos por sus equivalentes reales.

Para alcanzar estos objetivos, se ha desarrollado para el sistema CBTC un entorno de prueba basado en simulación para equipos de señalización y de datos de seguridad del sistema. Los objetivos establecidos al comienzo del proyecto, que se está completando con este simulador, son los siguientes:

- Integración y prueba de equipos CBTC reales, como: BP, ATP, etc
- Integración y pruebas de otros elementos de señalización, tales como: Enclavamientos, SCC, etc
- Verificación y validación de datos de seguridad utilizados en cada aplicación real.

## **2 DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA.**

Los objetivos planteados requieren el desarrollo de una estructura de software basada en módulos independientes, de manera que cada uno de ellos corresponda a un elemento real y por tanto pueda ser reemplazado por éste, según la Figura 1.

El sistema está basado en el simulador ERTMS/ETCS desarrollado para Invensys Rail [4, 6], y comparte con él varios de sus módulos. Los elementos más importantes que se han reutilizado son:

- Planning and Control Desk (PCD): esta aplicación permite al usuario del simulador generar, configurar, poner en marcha, etc, los diferentes escenarios. Ha sido adaptado para ofrecer la posibilidad de generar y trabajar tanto con un escenario ERTMS como CBTC.
- Infrastructure: se genera automáticamente a partir de un archivo de configuración que contiene circuitos de vía, agujas, balizas, señales, etc La lógica de cada uno de estos elementos, así como su funcionalidad tiene también han sido simulados.

- **Automatic Trains:** es posible tener hasta treinta trenes automáticos que se ejecutan en la misma línea. Los elementos de los sistemas del tren son simulados: esto es, el comportamiento neumático y eléctrico están modelados a través de sus respectivos circuitos. La dinámica del vehículo también se ha simulado. Las acciones del conductor se simulan automáticamente. Mediante el uso de los trenes automáticos, tanto el rendimiento de los equipos de abordo y como los propios de la infraestructura se puede comprobar.

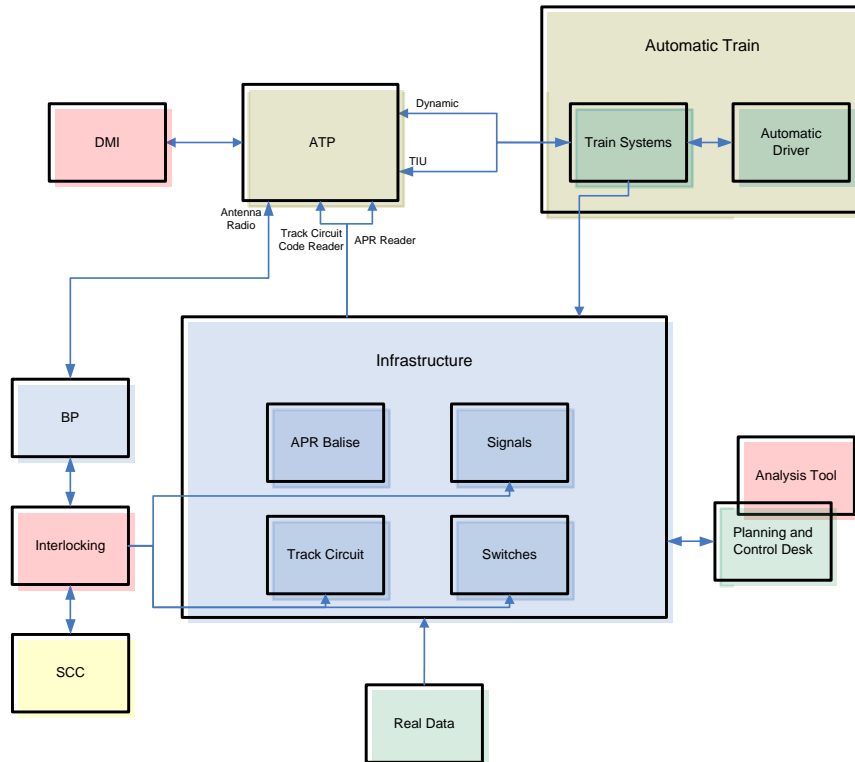


Figura 1: Esquema general del Simulador CBTC.

De los nuevos elementos desarrollados para la adaptación a CBTC cabe destacar los siguientes:

- **APR Balise:** estos elementos contienen los telegramas de las balizas APRs de la línea y envían su contenido cuando son estimuladas por el tren simulado.
- **Track Circuit with Speed Codes:** estos elementos simulan su ocupación, tanto si es intempestiva como por avance de tren, y además cargan un código de velocidad de acuerdo a las condiciones que contenga el enclavamiento, y se lo envían al tren cuando lo invade.
- **Interfaces con los módulos reales:** al tener que integrar diversos equipos reales, como el ATP o el DMI, se han tenido que desarrollar elementos capaces de enviar y/o recibir, según el caso, la información que cada uno de estos equipos debe intercambiar con la parte simulada.
- **Analysis Tool:** esta herramienta permite analizar los datos cargados en el BP. A partir de los mensajes intercambiados entre un tren automático y el BP, se generan una serie de gráficas y chequeos en las que se puede comprobar fácilmente si se cumplen las reglas de ingeniería con las que se ha diseñado la señalización, así

como determinar si el comportamiento del BP es el adecuado en las circunstancias especificadas para el análisis.

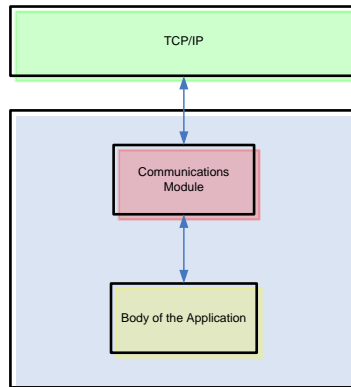


Figura 2: Esquema general de una aplicación.

Los módulos reales que se han integrado se detallan a continuación:

- ATP / ATO: el equipo embarcado del tren se ha integrado en su versión Host, es decir, en su versión software para ser ejecutada en un PC, así como en la versión Target, es decir con el hardware final.
- DMI: la interfaz con el conductor también se ha integrado en versión Host y Target.
- BP: el Block Processor Host y Target ha sido incluido asimismo en el simulador.

El sistema sigue utilizando la misma idea de separar las comunicaciones en un módulo independiente dentro de cada aplicación, como se muestra en la Figura 2. De esta manera se consigue una capacidad máxima de integración de equipos reales, pues se asegura que el diseño no cambia cuando un equipo real es introducido. La comunicación entre distintas aplicaciones se consigue a través de un 'Host' que se encarga de controlar las comunicaciones y decirle a cada aplicación dónde puede encontrar la información que necesita.

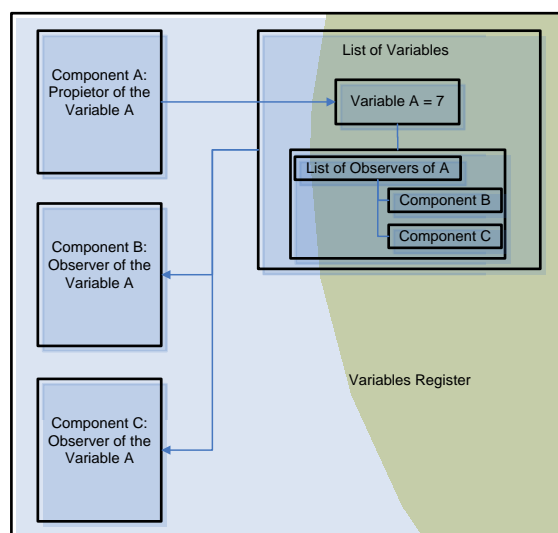


Figura 3: Mecanismo de comunicación entre los componentes.

También se conserva respecto al sistema base el uso de la Tecnología de Componentes desarrollada por CITEF. Un componente es una DLL (Dynamic Linked Library) que tiene

una función específica. Por ejemplo, una baliza debe enviar su contenido al tren cuando este la estimula. Cada elemento real tiene su equivalente en un componente. Los componentes involucrados en cada aplicación, son almacenados en un Contenedor de Componentes denominado Variables Register, que permite la comunicación entre ellos mediante el intercambio de variables, tal y como se esquematiza en la Figura 3.

### 3 INTERFACES CON LOS EQUIPOS REALES

Se ha tenido que desarrollar un nuevo modo de comunicación entre aplicaciones para conseguir interactuar con equipos reales tales como el ATP Host y el DMI Host. Estas comunicaciones están basadas sockets.

En el ejemplo de la Figura 4, se observa que las aplicaciones A y B están conectadas mediante un socket que une los puertos Port2 de las IPs IP1 e IP2. Se suele asemejar un socket a una tubería directa entre dos aplicaciones para que una vierta la información que la otra necesita recibir.

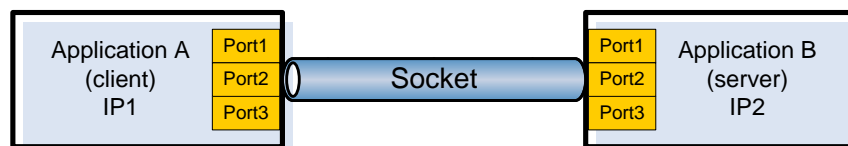


Figura 4: Esquema de un socket.

Los equipos reales integrados van acompañados de una capa de simulación, que permite la implementación de sockets en ella, y sirve de interfaz de intercambio de la información en un formato adecuado con el núcleo del equipo real.

En la Figura 6 se muestra el esquema general de comunicaciones con los equipos reales integrados. El ATP y el DMI son los elementos para los que se ha tenido que emplear sockets.

El diseño desarrollado por CITEF en el simulador incorpora nuevos componentes cuya función es replicar la información que manejan los equipos reales mediante la comunicación con un componente central denominado Router ATP, que es el que está conectado con el ATP y con el DMI a través de sockets. Los elementos desarrollados con este fin en el simulador se detallan a continuación, indicando que tipo de información intercambian con el Router ATP:

- Socket TIU: envía/recibe las señales discretas para el ATP. Cuando por ejemplo, el conductor activa el freno de emergencia, la TIU recibe esta información, que es recibida por el SocketTIU, que la transmite al Router ATP para su envío al ATP.
- Socket Dynamic: envía la información de velocidad y avance que calcula la dinámica para que el Router ATP se la transmita al ATP.
- Socket APR: envía los telegramas de las balizas que va pasando el tren en su avance para su transmisión al ATP.
- Socket Speed Codes: envía los códigos de velocidad que el ATP debe recibir cuando el tren va ocupando circuitos de vía.

El Router ATP establece los siguientes sockets con el DMI y el ATP:

- Socket de envío al ATP: a través de él se envía toda la información que debe recibir el ATP, a saber, telegramas de balizas, códigos de velocidad, discretas, dinámica, mensajes del BP y mensajes del DMI.
- Socket de envío DMI: envía al DMI la información de lo que se debe mostrar o pedir al conductor en cada momento tal y como el ATP indique en cada momento.
- Socket de recepción del DMI: de él se recibe las acciones que el conductor realiza sobre el DMI para ser transmitidas al ATP.
- Socket de recepción del ATP: se reciben tres tipos de información, los mensajes que el ATP envía al BP, las discretas que el ATP manda activar o desactivar a la TIU, y la información que el ATP envía al DMI para mostrar al conductor.

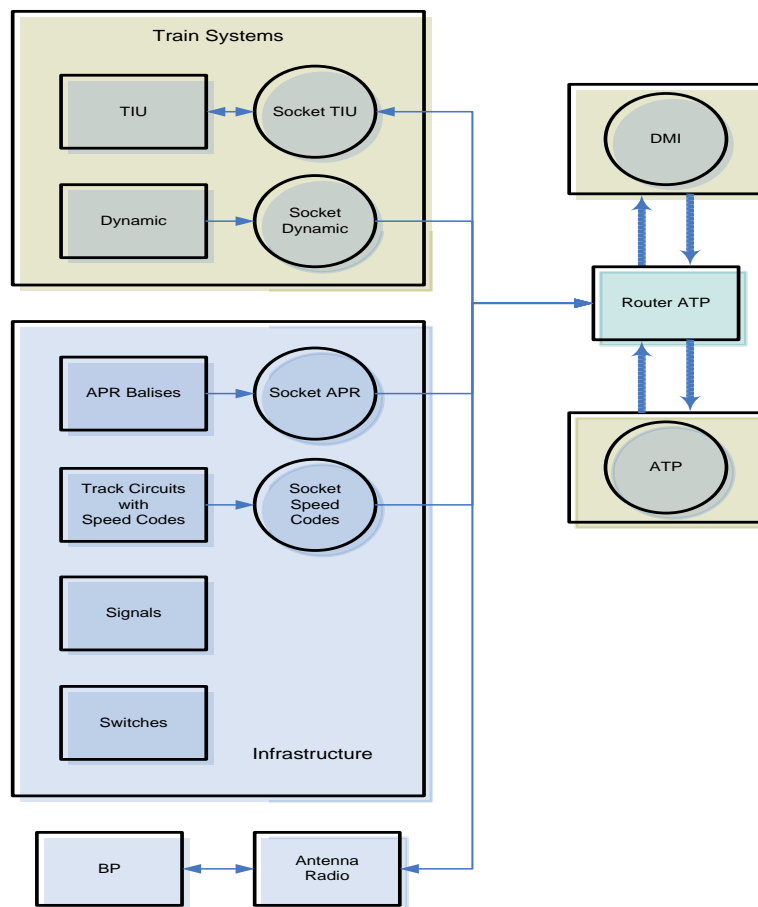


Figura 5: Comunicaciones con equipos reales.

#### 4 ANÁLISIS DE DATOS DE SEGURIDAD

Una de las partes más importantes del desarrollo realizado es la Analysis Tool. Con esta herramienta se puede programar análisis de la información intercambiada entre BP y ATP. El proceso que se sigue para conseguir este propósito se describe a continuación:

- Se parte de un escenario sin trenes automáticos, y sin rutas establecidas.
- El usuario establece en el SCC real la ruta que va a ser objeto del análisis.
- El enclavamiento recibe la orden de establecer la ruta, manda a los elementos de campo que se posicionen como corresponde, y cuando las condiciones establecidas se cumplen, el enclavamiento le manda al BP una señal que le indica que la ruta

está autorizada. La Analysis Tool está escuchando esta comunicación y de esta manera es capaz de detectar qué ruta se ha establecido.

- Cuando la ruta se ha autorizado, el usuario puede solicitar el análisis de la ruta en cuestión, seleccionando las opciones de análisis que sean requeridas.
- Automáticamente se inserta un tren en el simulador delante de la ruta establecida y se comienza a andar. El tren debe recibir 2 balizas APR antes de entrar en la ruta. Al recibir la primera baliza el tren debe iniciar comunicaciones con el BP, y después de la segunda APR, podrá enviarle al tren una autorización de movimiento.
- Durante toda la simulación, los mensajes intercambiados por el tren y el BP son escuchados por la Analysis Tool, y por tanto, ésta puede determinar cuándo se han cumplido las condiciones establecidas para realizar el análisis.
- La Analysis Tool analizará los mensajes que ha ido escuchando durante la simulación y generará las gráficas y chequeos solicitados por el usuario.

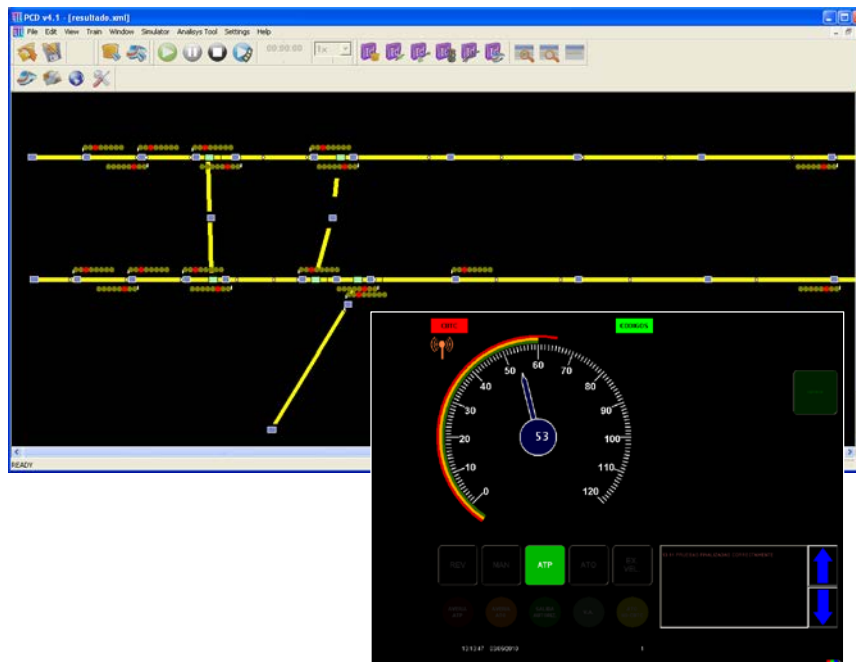


Figura 6: Algunas imágenes del sistema de simulación.

## 5 VENTAJAS Y FUNCIONALIDADES DEL SISTEMA

Puede, por tanto, afirmarse que las principales ventajas y funcionalidades del sistema que se describe en este artículo son las siguientes:

- Reducción de los esfuerzos que se requieren para poner líneas equipadas con el sistema CBTC en servicio.
- Ofrece la posibilidad, de probar diferentes configuraciones de un mismo escenario, para ver qué opción puede ser la más ventajosa.
- Dado que ni la infraestructura ni el material rodante reales son necesarios para llevar a cabo las pruebas, se obtiene una reducción considerable de los costes.
- Dado que las mismas interfaces se utilizan tanto con los elementos simulados como con el equipo real, esto significa que las pruebas funcionales se pueden realizar en

este simulador incluyendo equipos reales, con la posibilidad de incluir simultáneamente una o más piezas de equipo real.

- Se puede utilizar para verificar los datos de seguridad de una línea antes de ser instalados, y además, si es necesario, obtener resultados que muestran donde se encuentran los posibles errores.

## 6 CONCLUSIONES.

Dado que el entorno de simulación de prueba CBTC desarrollado por CITEF implementa exactamente las mismas interfaces integradas en equipo real, se puede garantizar que el comportamiento de los equipos simulados y reales es absolutamente idéntico.

Por otra parte, si tenemos en cuenta que el uso de simuladores en un entorno ferroviario ha sido plenamente justificada en este artículo, y más aún en este ejemplo particular de un entorno CBTC, se puede afirmar que el uso de esta herramienta de banco de pruebas es una garantía primordial para poner nuevos sistemas CBTC en servicio, así como garantizar que los diferentes equipos de abordo y de vía funcionarán sin problemas bajo absolutamente ninguna circunstancia.

También es una herramienta muy valiosa para la preparación de los datos, la prueba y la detección de posibles fallos en los datos de seguridad.

Podemos afirmar que a pesar de los costos de desarrollo de este tipo de herramientas, el costo de las pruebas en vía se reduce considerablemente gracias a este entorno de simulación, ya que se reduce el número de pruebas en vía, lo que reduce el uso de la infraestructura y del material rodante destinado para este propósito. Este ahorro de costes se hace más latente si se tiene en cuenta que se trata de un sistema polivalente, puesto que puede ser utilizado para cualquier línea que implemente CBTC.

Este sistema está en la actualidad en utilización por las empresas de Invensys Rail en el Reino Unido y en España, en líneas en España, Singapur, Brasil, Venezuela, Turquía ...

## 7 REFERENCIAS

- [1] 1474.1 IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements
- [2] 1474.2 IEEE Standard for User Interface Requirements in Communications-Based Train Control (CBTC) Systems
- [3] Gómez-Rey, A, Mera, JM, et al. ERTMS Driving and Operation Simulator under Distributed Architecture in a Virtual Reality Environment. *Proceedings of ITEC'2001*. Lille, France. April 2001.
- [4] Mera, JM, Gómez-Rey, I, et al. ERTMS/ETCS TEST SIMULATION BENCH. *10th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in Railway and other Advanced Mass Transit Systems. COMPRAIL X*. Prague, Check Republic. June 2006.
- [5] Mera, JM, Gutiérrez, LM, et al. Simulation of the ERTMS / ETCS Railways Control and Protection System; Levels 0, 1 and 2. *8th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in Railway and other Advanced Mass Transit Systems. COMPRAIL VIII*. Lemnos, Greece. June 2002.
- [6] Mera, JM, Gómez-Rey, I, et al. CBTC TEST SIMULATION BENCH. *12th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in Railway and other Advanced Mass Transit Systems. COMPRAIL XII*. Beijing, China, September 2010.