

# SISTEMA DE RESPALDO BASADO EN COMUNICACIONES INALÁMBRICAS PARA LA GESTIÓN DEL TRÁFICO FERROVIARIO EN SITUACIONES DE EMERGENCIA

*Itziar Salaberria, Fundación Deusto, isalaber@fundacion.deusto.es*  
*Roberto Carballo, Fundación Deusto, rcarball@tecnologico.deusto.es*  
*Asier Perallos, Fundación Deusto, perallos@tecnologico.deusto.es*  
*Unai Gutierrez, Fundación Deusto, unai.gutierrez@gmail.com*

**RESUMEN:** El presente artículo describe un *sistema de apoyo/respaldo para la gestión de tráfico ferroviario en situaciones de emergencia* basado en una arquitectura de comunicaciones inalámbrica de nueva generación, que emplea portadoras de telefonía móvil (GPRS) y de banda ancha (WiFi). Este canal de comunicación, que posibilita la conectividad inalámbrica “tren-tierra”, viene a complementar los sistemas de comunicación ferroviaria tradicionales y por sus prestaciones posibilita el despliegue de nuevos tipos de servicios para este sector. El resultado de este trabajo constituye por sí mismo un framework para la adición de nuevas aplicaciones embarcadas con capacidades de conectividad con los puestos de control, siendo la base de otros nuevos servicios digitales que están siendo desarrollados en el ámbito del ferrocarril.

**Palabras clave:** Comunicaciones Inalámbricas, Gestión Tráfico, Ferrocarril, WiFi, GPRS, GPS

## INTRODUCCIÓN

Desde los orígenes del ferrocarril en el siglo XIX la mayor parte de los esfuerzos en innovación y desarrollo se han centrado en los aspectos relacionados con la gestión de la circulación, el soporte a la conducción y la monitorización del estado de los trenes [1]. Todo ello, para garantizar la seguridad de las personas y el propio tren, y el cumplimiento de los horarios. En definitiva, garantizar el servicio del ferrocarril en condiciones seguras. Para lograr esto ha sido necesario establecer un canal de comunicaciones entre los elementos móviles (trenes, maquinaria de reparación de la infraestructura, vehículos de remolque o emergencia, etc.) y los elementos fijos o de tierra (puestos de mando y estaciones, señales, vías, etc.) [2].

En este artículo se presenta una arquitectura de comunicaciones inalámbrica basada en tecnologías y protocolos de comunicaciones estándar, para establecer un canal de comunicación bidireccional entre los elementos fijos del sistema ferroviario y los móviles, permitiendo establecer un canal de comunicación inalámbrico que permita la comunicación con los trenes en movimiento. Además, se describe un sistema de apoyo/respaldo para la gestión de tráfico ferroviario en situaciones de emergencia, es decir, en caso de fallo del sistema actual que controla la circulación de forma automática. Este apoyo se proporciona mediante una aplicación que gracias a la arquitectura de comunicaciones mencionada anteriormente es capaz de informar

de la posición de los trenes y facilitar las labores de gestión del tráfico, así como establecer un mecanismo para enviar mensajes a los maquinistas.

Una vez introducido el ámbito de trabajo, en el segundo apartado de este artículo se incluye una pequeña revisión del estado del arte de las comunicaciones en el ámbito del ferrocarril, el tercero presenta la arquitectura inalámbrica propuesta y el cuarto describe el sistema de apoyo/respaldo para la gestión de tráfico mencionado; el artículo finaliza con el quinto apartado, donde se detallan las principales conclusiones que se extraen del trabajo que ha servido como base para la realización de este artículo.

## ESTADO DEL ARTE

Las comunicaciones ferroviarias nacieron casi exclusivamente para la gestión del tráfico y la regulación de la circulación a partir de la comunicación de los elementos fijos entre sí. Las tecnologías que comunican los elementos fijos con los móviles (los trenes) son relativamente recientes, y han permitido mejorar y simplificar las labores de explotación del servicio ferroviario. Por lo tanto, se puede decir que existen dos niveles en el ámbito de las comunicaciones ferroviarias: las que involucran a elementos fijos únicamente, y las que se refieren a elementos fijos y móviles (denominadas comunicaciones “tren-tierra”) [3]. Las primeras, las soluciones más eficientes, se basan en sistemas cableados. Las segundas, son las que han sufrido un mayor cambio en los

últimos años, ya que requieren que la comunicación sea inalámbrica y móvil [4].

Tradicionalmente la comunicación entre los elementos fijos y los trenes se ha establecido haciendo uso de sistemas de comunicación analógicos como el teléfono tradicional o sistemas de radio basados en PMR (Private Mobile Radio) [5]. Estos sistemas analógicos se siguen utilizando para las comunicaciones de voz y para cuestiones relacionadas con la señalización, pero presentan grandes limitaciones en cuanto al ancho de banda, lo cual está provocando una migración hacia sistemas digitales, que ofrecen un mayor ancho de banda.

Dentro de las tecnologías de comunicación “tren-tierra”, uno de los avances más importantes de la última década ha sido el sistema GSM-R (Global System for Mobile Communications - Railway) [6]. Este sistema está basado en la telefonía GSM, pero adaptado para el ámbito del ferrocarril. GSM-R está pensado para intercambiar información entre los trenes y los centros de control, y presenta como ventajas fundamentales su bajo coste, y el apoyo que está teniendo a nivel mundial.

Otra tecnología que presenta una gran difusión en el sector ferroviario es el sistema de radio TETRA (Terrestrial Trunked Radio) [7], que es un estándar de comunicaciones móvil digital de voz y datos para grupos cerrados de usuarios. El sistema comprende una serie de terminales móviles, similares a un walkie-talkie, que permiten establecer una comunicación directa entre los centros de control, los maquinistas y el personal de mantenimiento, además de poder establecer comunicaciones con teléfonos fijos y móviles. Al ser un sistema de telefonía móvil privado la implantación en el ámbito ferroviario es muy sencilla, ya que se basa en la colocación de una serie de antenas a lo largo de la vía y en las estaciones o centros de control.

Además de las tecnologías de propósito específico mencionadas hasta ahora, cabe destacar el creciente uso de tecnologías de comunicación inalámbricas basadas en telefonía móvil convencional (GSM, GPRS, UMTS), y las soluciones de banda ancha como WiFi [8] o WiMAX [9]. Las redes de área local inalámbricas WiFi posibilitan el intercambio de información, ofreciendo velocidades y anchos de banda muy superiores comparados con el resto de tecnologías. El coste de despliegue de este tipo de redes es muy bajo, pero tienen una limitación en cuanto a la cobertura o distancia que abarcan. Para hacer frente a esta limitación, ha surgido la tecnología WiMAX, que extiende el alcance de WiFi, y es una tecnología muy adecuada para establecer radioenlaces, dado su gran alcance y

alta capacidad, a un coste muy competitivo frente a otras alternativas [10].

Todas las tecnologías ilustradas hasta ahora tienen por objeto el establecimiento de un canal de comunicación inalámbrico entre elementos fijos y los elementos móviles del ámbito ferroviario, pero ¿qué es lo que ocurre con los servicios que se ofrecen sobre este canal de comunicación?, ¿cómo acceden al canal?, ¿cómo lo comparten? La realidad, es que las aplicaciones o servicios tradicionales del ámbito del ferrocarril pueden agruparse en dos grandes grupos: (1) servicios relacionados con la señalización y control del tráfico; y (2) servicios orientados a la monitorización del estado del tren.

El primer grupo de servicios, se basan en el intercambio de información entre los elementos de la infraestructura (vías, señales, pasos a nivel, etc.) y los centros de control, todos ellos elementos fijos. Además, se utiliza la comunicación de “viva voz” entre los maquinistas y los operadores de los centros de control. Por lo tanto, para este tipo de servicios, los tradicionales sistemas de comunicación basados en tecnologías analógicas todavía siguen teniendo vigencia.

El segundo grupo de servicios requieren el intercambio de información en forma de “datos” entre los trenes y los centros de control. En este caso, los nuevos servicios hacen uso de alguna de las tecnologías inalámbricas mencionadas hasta ahora, pero de manera exclusiva, es decir, cada aplicación embarca en el tren el hardware necesario para las comunicaciones inalámbricas, con lo que los trenes están llenos de dispositivos de comunicaciones dedicados que posiblemente estén infrutilizados. Además, todavía son muchas las aplicaciones que requieren de la conexión física “mediante un cable” entre los dispositivos del tren y un equipo informático para el volcado de información o realizar labores de actualización.

Por otro lado, está surgiendo un nuevo grupo de servicios que giran en torno al usuario final del ferrocarril (pasajeros o empresas que contratan un servicio de transporte). Estos servicios están orientados a ofrecer un servicio de transporte de mayor calidad que no sólo es seguro y llega a la hora, sino que ofrece al usuario servicios adicionales como pueden ser: mayor información acerca de la ubicación de los trenes y horarios, servicios de publicidad contextual, video bajo demanda, etc. Todos estos servicios se caracterizan por necesitar un canal de comunicaciones inalámbrico con un gran ancho de banda y una cobertura amplia.

Como conclusión se puede decir que es necesario, (1) uniformizar la forma de comunicar

el tren con los centros de control de tierra para las aplicaciones relacionadas con la monitorización del estado del tren; y por otro lado, (2) definir una arquitectura de comunicaciones inalámbrica que se adapte de forma adecuada a los nuevos servicios que giran en torno al usuario final del ferrocarril [11].

## ARQUITECTURA DE COMUNICACIONES INALÁMBRICA

Para dar respuesta a las dos cuestiones relativas a la necesidad de un nuevo canal de comunicación de propósito general y con un gran ancho de banda y cobertura para el ámbito ferroviario, pasamos a continuación a presentar el resultado de nuestro trabajo llevado a cabo en colaboración con empresas del sector ferroviario de nuestro entorno: EuskoTren y ETS (País Vasco), y Renfe Operadora (España).

En este sentido, se ha definido un canal de comunicación inalámbrico de propósito general, que permite comunicar el tren (en general los trenes) con “tierra”, de manera que las aplicaciones o servicios se desprecupen de todas las cuestiones referentes a la comunicación como son: establecimiento y cierre de la comunicación, gestión del estado de las conexiones, asignación de prioridades a la información, etc.

La nueva arquitectura de comunicaciones inalámbrica tiene que dar respuesta a la demanda de comunicación y transmisión de información de cualquier aplicación, por lo tanto tendrá que tener muy en cuenta la naturaleza de la información que se envía. La información intercambiada entre dos aplicaciones (una en tierra y otra embarcada en un tren) puede tener más o menos urgencia dependiendo de la finalidad o el tratamiento que dichas aplicaciones le den a la información intercambiada.

En el ámbito del ferrocarril, existe información que precisa ser transmitida en el momento en que se genera, como puede ser el caso de la información de posicionamiento o alarmas de algún elemento crítico para el funcionamiento del tren. Por otro lado, puede haber información menos urgente cuya transmisión puede ser pospuesta y no es necesario su envío una vez generada, como pueden ser las imágenes del CCTV del interior del tren, o los ficheros de audio utilizados por el hilo musical. Además, la información urgente o prioritaria suele tener un volumen muy pequeño comparado con la información no prioritaria.

Por esta razón, la arquitectura de comunicaciones propuesta diferencia dos tipos de comunicaciones:

- **Comunicaciones “ligeras”**: este tipo de comunicación es la que permite el intercambio de información en tiempo real. Se denominan comunicaciones “ligeras” dado que el tamaño de la información transmitida será pequeño (del orden de bytes o unos pocos Kbytes). La información que se transmite utilizando este esquema de comunicación suele ser prioritaria o urgente, por lo tanto debe transmitirse en cuanto se produce, ya que deja de tener validez o importancia si no se transmite en tiempo real. Por ejemplo, en una aplicación de posicionamiento de trenes las posiciones que no se pueden transmitir en cuanto se obtienen, dejan de ser relevantes.
- **Comunicaciones “pesadas”**: hay información muy voluminosa o que no es prioritaria, y por lo tanto no es necesario que se transmita y procese en tiempo real. Para este tipo de información se definen las comunicaciones “pesadas” que involucran la transmisión de grandes cantidades de información (del orden de Mbytes).

Así, al igual que se han diferenciado dos tipos de comunicaciones, también se distinguen dos medios de transmisión, uno por cada tipo de comunicación descrita anteriormente. De esta manera, las comunicaciones “pesadas” se enviarán utilizando la tecnología WiFi mientras que para las comunicaciones “ligeras” se ha seleccionado la tecnología GPRS, que permite una comunicación en tiempo real haciendo uso de los medios de comunicación ofrecidos por los proveedores de telefonía sin tener que realizar ningún tipo de instalación de elementos de infraestructura física.

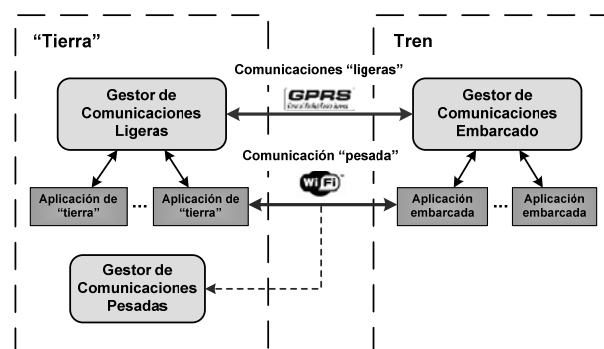


Fig. 1. Arquitectura de Comunicaciones Inalámbrica

La elección de las tecnologías WiFi y GPRS no garantiza la disponibilidad de cobertura para la comunicación en el 100% de los casos (por ejemplo, no suele haber cobertura GPRS en muchos túneles o zonas montañosas a menos que los operadores de telefonía instalen antenas específicas), pero es suficiente para las necesidades de comunicación que demandan los servicios que serán desplegados sobre la

arquitectura, ya que combinando las tecnologías WiFi y GPRS, se puede decir que prácticamente se puede alcanzar el 100% de la cobertura, puesto que los trenes realizan recorridos conocidos, es decir, las vías son fijas. Pese a que la elección tecnológica inicial se ha decantado por las tecnologías WiFi y GPRS, como la arquitectura estará basada en estándares, podría migrarse con facilidad a otras tecnologías de transmisión como pueden ser WiMax o una red TETRA, que podrían aumentar la cobertura de comunicación acercándola al 100%.

### SISTEMA DE RESPALDO/APOYO PARA LA GESTIÓN DE TRÁFICO FERROVIARIO

En el sector ferroviario la gestión de tráfico se ha ido realizando de forma automática gracias a sensores y diferentes elementos fijos instalados en la vía. Se trata de un modo de comunicación cableado que permite hacer llegar al centro de control información sobre la circulación permitiendo representar en tiempo real en un sinóptico tanto la situación de tráfico, como el de los diferentes elementos relacionados (señales, agujas, etc.). Sin embargo, hay circunstancias muy excepcionales (atentados, averías, cortes de suministro, etc.) que hacen que este sistema falle, haciendo que durante un cierto periodo de tiempo los centros de control dejen de recibir información sobre el estado de tráfico de partes o totalidad de la línea. Así, durante el periodo de tiempo en el que el sistema principal falla, los centros de control desconocen la ubicación de los trenes, teniendo que recurrir a la comunicación verbal con los maquinistas de estos para poder llevar un control, manualmente y habitualmente sobre papel, del posicionamiento y situación de los trenes.

Teniendo en cuenta las cuestiones mencionadas anteriormente, de nuestro trabajo con empresas del sector ferroviario como son ETS y EuskoTren nace un *Sistema de Respaldo/Apoyo para la Gestión de Tráfico Ferroviario* que sirve de apoyo al operador en esos casos en los que el sistema principal falla. Así, durante el periodo en que parte o totalidad del sistema primario esté caído, el objetivo de este nuevo sistema de respaldo es suplir esta carencia de información y asistir a los operadores en tareas relacionadas con el posicionamiento y la gestión del tráfico.

Así, las funciones principales de este nuevo sistema son:

- Representar la situación de aquellos tramos para los que el sistema principal falle (tramos *en modo de emergencia*). La idea es que la aplicación represente los tramos afectados de manera que los diferentes trenes ubicados en

dicho tramo se encuentren posicionados a partir de la información de posicionamiento recibida de los trenes en tiempo real, gracias al canal de comunicaciones inalámbrico mencionado anteriormente.

En este punto, cabe mencionar que en cada tren se embarca un módulo hardware/software que a partir de los datos GPS obtenidos a bordo y cierta lógica de aproximación a la tabulación de la vía, es capaz de generar información de posicionamiento del tren que es enviada al centro de control en tiempo real, para que la aplicación de respaldo sea capaz de representar en un sinóptico la ubicación de los trenes.

- Proporcionar al operador del centro de control un entorno que le asista en las tareas relacionadas con la gestión de tráfico a partir de las posiciones de las unidades en situaciones en las que el sistema principal no funciona total o parcialmente.
- Realizar un análisis de los datos almacenados y generar estadísticas a partir de ellos.
- Permitir que el operador interactúe con la aplicación de forma que se puedan enviar mensajes al maquinista del tren.

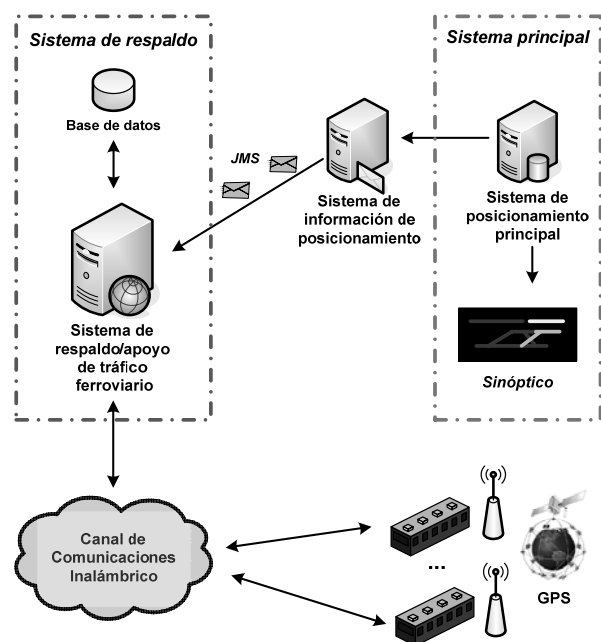


Fig. 2. Sistema de respaldo/apoyo para la gestión de tráfico ferroviario

Por lo tanto, este sistema tiene como finalidad proporcionar un mecanismo de apoyo para la gestión de la circulación de trenes en caso de fallo del sistema actual que controla la circulación de forma automática. Este apoyo se proporciona mediante una aplicación que informa de la posición de los trenes y facilita las labores de

gestión del tráfico, así como un mecanismo para enviar mensajes a los maquinistas.

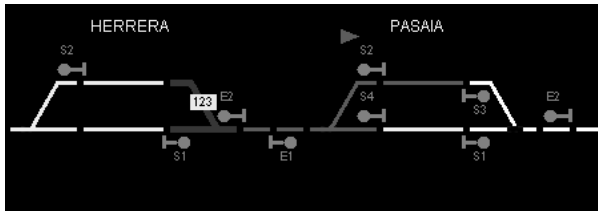


Fig. 3. Sinóptico en el Sistema de Respaldo

Cabe destacar, que mientras no se produzca error en el sistema convencional, el sistema de respaldo almacena los datos recibidos de los sistemas embarcados en los trenes para su posible explotación por otras aplicaciones; y analiza la coherencia entre los datos recibidos y los proporcionados por el sistema primario.

Así, dentro del Sistema de Respaldo/Apoyo para la Gestión de Tráfico Ferroviario descrito, se pueden identificar los siguientes módulos: (1) sistema de posicionamiento, (2) análisis de datos almacenados y generación de estadísticas, y (3) envío de mensajes a los trenes.

### Sistema de posicionamiento

El Sistema de Respaldo, independientemente de que el sistema principal se encuentre funcionando o no, recibe y almacena información sobre los posicionamientos generados a partir del hardware (acelerómetros, giróscopos, odómetros, etc.) y el módulo GPS embarcados en el tren. Además, gracias a la existencia de un sistema de información de posicionamiento externo (llamado CTC – Control de Tráfico Centralizado), provisto por la operadora de infraestructura, el sistema de respaldo recibe la información de posicionamiento generada por el sistema primario de gestión del tráfico.

Este módulo almacena, por tanto, la información que recibe tanto desde el sistema primario como de los sistemas embarcados (de respaldo). Dicha información es almacenada aun cuando los datos provenientes del sistema embarcado no son coherentes con la información recibida del sistema primario, ya que con estos datos se pueden generar estadísticas sobre el grado de fiabilidad del sistema de respaldo, de cara a la realización de los ajustes oportunos en el desarrollo. Además, estos datos podrán ser explotados por futuras aplicaciones.

### Análisis de datos almacenados y generación de estadísticas

Haciendo uso de la información almacenada en la base de datos por el Sistema de posicionamiento

se genera una serie de estadísticas que permiten valorar tanto el grado de fiabilidad del sistema de respaldo frente al sistema principal, como el análisis de la cobertura, tanto GPS como GPRS.

Por tanto, uno de los objetivos principales de este módulo es comparar la información recibida, determinando si el posicionamiento indicado por el sistema embarcado concuerda con la información generada por el sistema principal.

### Envío de mensajes a los trenes

Este módulo sirve para transmitir al sistema embarcado alarmas de procedimiento que indican situaciones anómalas: fallo del sistema principal, autorización de rebase de señal hasta un determinado punto como consecuencia de un fallo de algún elemento electro-mecánico de la vía, etc.

Además, teniendo en cuenta las diferentes circunstancias que se pueden dar, y las notificaciones que se dan a los maquinistas de las unidades, se han definido dos tipos de mensajes:

- **Mensaje puntual del operador:** el operador selecciona de forma manual el mensaje que ha de ser enviado al tren de forma inmediata. Estos mensajes precisan de confirmación por parte de los maquinistas.
- **Limitaciones temporales de velocidad:** se trata de mensajes predefinidos que son creados por un inspector y tienen una validez mayor que los anteriores. Una vez creado el mensaje, es enviado a todas las unidades.

### CONCLUSIONES

En la industria ferroviaria las comunicaciones nacieron casi exclusivamente con el propósito de gestionar el tráfico y regular la circulación, requiriendo por la naturaleza móvil de este sector dos modalidades de comunicación: aquellas que se dan entre los elementos fijos de la infraestructura ferroviaria, las cuales están basadas mayoritariamente en sistemas cableados; y aquellas en las que participan elementos fijos y móviles (denominadas comunicaciones “tren-tierra”), las cuales requieren un canal de comunicación inalámbrico y que tradicionalmente se han materializado en base al uso de sistemas de comunicación analógicos como el teléfono tradicional o la radio.

Dichos canales de comunicación se han empleado tradicionalmente en este sector para proveer servicios principalmente relacionados con la señalización y el control del tráfico y para dotar de servicios orientados a la monitorización del estado del tren. A día de hoy, a pesar de la

madurez del sector y de los espectaculares avances en lo que a comunicaciones inalámbricas se refiere, la industria del ferrocarril sigue basando sus servicios primarios de funcionamiento en este tipo de sistemas de comunicación del pasado. Concretamente, las tecnologías de comunicación inalámbricas de nueva generación, como las basadas en tecnología móvil convencional (léase GSM, GPRS o UMTS), o las soluciones de banda ancha (como WiFi o WiMAX), tienen innumerables posibilidades de aplicación en un sector como el del ferrocarril, ya que el coste de su despliegue es muy bajo, complementan perfectamente a los sistemas de comunicación tradicionales, y por su gran ancho de banda y amplia cobertura posibilitan el despliegue de nuevos servicios en este ámbito, como son todos aquellos que giran en torno al usuario final y van encaminados a ofrecer un servicio de transporte de mayor calidad.

Esta oportunidad ha motivado precisamente la realización del trabajo descrito en este artículo: una arquitectura de comunicaciones inalámbricas de nueva generación para la industria ferroviaria y un sistema de apoyo al posicionamiento de trenes y la gestión del tráfico basado en tecnologías inalámbricas. Esta arquitectura de conectividad inalámbrica constituye un canal de comunicación único entre todas las aplicaciones embarcadas y las de los centros de control, uniformizando de esta forma la transmisión de datos entre éstas. Así, este canal constituye un recurso compartido por todas, liberándolas de los detalles inherentes a las comunicaciones (por tanto simplificándolas), proveyendo este canal de servicios avanzados orientados a la comunicación, tales como el tratamiento selectivo de los envíos en función de la naturaleza de la información a transmitir (urgencia) y su volumen, la localización de destinos de los mensajes en base a mapeos de direcciones IP, la gestión de prioridades y arbitraje de los turnos de envíos de información, la gestión de reintentos, etc. Esta arquitectura posibilita además la adición de nuevos servicios alrededor de ella, constituyendo un marco muy adecuado para la habilitación de nuevos tipos de servicios orientados al usuario, los cuales normalmente requieren movilidad y anchos de banda muy superiores a los ofrecidos por los sistemas de comunicación tradicionales.

Además del servicio de posicionamiento y gestión del tráfico descrito, actualmente otros nuevos servicios digitales se están desarrollando, siendo su naturaleza u objetivo muy diverso: desde servicios para la monitorización del estado del tren, como servicios para los usuarios finales, hasta servicios orientados a asistir en la conducción al maquinista. Como líneas de trabajo futuras, destacamos: (1) el desarrollo de estos

nuevos servicios digitales y (2) la adopción de buenas prácticas de Ingeniería del Software y estándares de interoperabilidad que posibiliten que la adición e integración de estos nuevos servicios y aplicaciones en la arquitectura sea fácil de llevar a cabo.

## Referencias

- [1] Shafiullah, G. & Gyasi-Agyei A. & Wolfs, P. J. (2007) "Survey of Wireless Communications Applications in the Railway Industry", *2nd International Conference on Wireless Broadband and Ultra-Wideband Communications (AusWireless)*, pp27-30
- [2] Berrios, A. (2007) "Las comunicaciones ferroviarias: avances y reto", *Anales de mecánica y electricidad*, Vol. 84, Fasc. 1, pp64-69
- [3] Network rail. (2007) <http://www.networkrail.co.uk/asp/3606.aspx>
- [4] Laplante, P. A. & Woolsey, F. C. (2003) "IEEE 1473: An open source communications protocol for railway vehicles", *IEEE Computer Society*, Vol. 5, pp12-16
- [5] ETSI (European Telecommunications Standards Institute). (2008) "Digital Mobile Radio Technologies", <http://www.etsi.org/WebSite/Technologies/DigitalMobileRadio.aspx>
- [6] UIC (Union Internationale des Chemins). (2008) "GSM-R Specifications", <http://www.uic.asso.fr/uic/spip.php?rubrique851>
- [7] Cordón, N. (2007) "TETRA apuesta por una comunicación crítica y segura", *COMPUTERWORLD*, <http://www.idg.es/ComputerWorld/articulo.asp?id=184625>
- [8] IEEE 802.11. IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (2007)
- [9] IEEE 802.16.2. IEEE Recommended Practice for Local and metropolitan area networks. Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems (2004)
- [10] Aguado, M., et al. (2008) "WiMax on Rails: A Broadband Communication Architecture for CBTC Systems", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 3, No. 3, pp. 47-56.
- [11] Aguado, M. (2005) "Railway signalling systems and new trends in wireless data communication", *Veh. Tech. Conference*, pp1333-1336