



Carlos Rodríguez-Morcillo García
Instituto de Investigación Tecnológica,
Escuela Técnica Superior de Ingeniería,
Universidad Pontificia Comillas de
Madrid.



Sadot Alexandres Fernández
Instituto de Investigación Tecnológica,
Escuela Técnica Superior de Ingeniería,
Universidad Pontificia Comillas de
Madrid.



J. Daniel Muñoz Frías
Instituto de Investigación Tecnológica,
Escuela Técnica Superior de Ingeniería,
Universidad Pontificia Comillas de
Madrid.

Comentarios a:
comentarios@icai.es

Introducción de nuevas tecnologías de comunicaciones en trenes

En este artículo se presentan el estudio y la optimización de los sistemas de comunicaciones embarcados en vehículos de transporte mediante el modelado del canal de comunicaciones y el desarrollo de un sistema de transmisión de gran ancho de banda que aproveche en su totalidad la capacidad disponible del canal. La finalidad de este nuevo sistema de transmisión es disponer de capacidad suficiente para transmitir voz, datos y servicios multimedia de una manera fácil, rápida y cómoda. Este trabajo es fruto de una tesis doctoral desarrollada en el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Escuela de Ingeniería (ICAI) con la ayuda aportada por el Colegio Nacional de Ingenieros del ICAI.

Introducción

El rápido desarrollo y abaratamiento de la tecnología, el aumento de la demanda de servicios en el mundo del ferrocarril y la gran inversión de los gobiernos en Europa ha facilitado el desarrollo de varios sistemas de comunicaciones embarcados en trenes.

Concretamente, desde finales de los 80 y principios de los 90, la *International Electrotechnical Commission* (IEC) y la *Union Internationale des Chemins de Fer* (UIC), como organismos más destacados, han estudiado en profundidad todos los aspectos relacionados con la estandarización de la red de comunicaciones embarcada *Train Communication*

Network (TCN) [1], una de las más empleadas en trenes.

Esta red, con la que se lleva trabajando más de cinco años en el IIT, unifica las comunicaciones embarcadas entre los distintos equipos del tren, permitiendo la comunicación de datos para el control y diagnóstico del tren, así como la información a los pasajeros. Además, al ser un estándar, se facilita la interacción y la intercambiabilidad entre equipos de diferentes fabricantes.

Para la estandarización de TCN se han realizado tres grandes proyectos europeos en los que se ha puesto a prueba la red. El primero de ellos fue el proyecto ROSIN (*Railway Open System Interconnection Network*)

Tabla 1. Comparación de buses industriales

Bus	Tasa de bits [Mbps]	Medio físico	Audio /Video	Ventajas	Inconvenientes
LonWorks EIA-709.3	0,078	Par trenzado Fibra óptica	No	Establecido. Utilizado por Metro de Nueva York y otros	Baja velocidad Ni audio ni vídeo
TCN IEC-61375	1 1,5	Par trenzado	Puede algo de audio	Promovido por Siemens y Adtranz	No ampliable Ni audio ni vídeo
AS-5370	1,25 5	Par trenzado Fibra óptica	Audio	Derivado de LonWorks	Necesita licencia
EI PDH	2,048	Par trenzado	Audio	Establecido. Utilizado por Metro de Nueva York	No ampliable
WorldFIP	2,5	Par trenzado Fibra óptica	Puede algo de audio	Promovido por Alstom	Componentes propietarios
Ethernet 802,3	10,	Coaxial	Sí	Difundido	Precisa acopladores No determinista
Profibus	12	Par trenzado Fibra óptica	Audio, puede algo de vídeo	Rápido	Precisa acopladores

[2], [3], el cual, tras unos años de estudio, comenzó en enero de 1996, y finalizó en marzo de 1999. Su objetivo era construir varias aplicaciones para validar la red en las principales áreas de funcionamiento. Basándose en la red TCN, se probó y validó una red digital para la interconexión de equipos en los vehículos del tren, y se estudió una interfaz para garantizar la interoperabilidad universal de los dispositivos.

A partir de los resultados obtenidos con este proyecto, se continuó con el proyecto europeo TrainCom (*Integrated Communication System for Intelligent Train Applications*) [4], [5], que comenzó en diciembre de 2000 y finalizó en febrero de 2004. Su objetivo era especificar y desarrollar un sistema completo de comunicaciones en el mundo ferroviario para aplicaciones telemáticas, integrando la red embarcada, por ejemplo TCN, con radio enlaces de telefonía móvil GSM (*Global System for Mobile communications*) y tecnologías de Internet. De este proyecto se ha obtenido una especificación de pruebas para validar la red TCN y se ha desarrollado una arquitectura y algunos elementos básicos de un sistema de soporte para mantenimiento.

Por último, el tercer gran proyecto europeo que ha seguido con el estudio y validación del TCN es EuRoMain (*European Railway Open Maintenance System*) [6], [7], que comenzó en abril de 2002, finalizando en marzo de 2005. Este proyecto tenía como objetivos definir, implementar y validar un completo sistema de soporte para el mantenimiento de ferrocarriles que permitiese la supervisión y el diagnóstico remoto de equipos embarcados en trenes, todo ello mediante un enlace de datos automático y en

tiempo real, recibiendo los datos en un formato estándar desde una base de datos distribuida y presentando la información adecuada al usuario final. También se desarrollaron y validaron prototipos hardware y software, integrándolos en la infraestructura de comunicaciones desarrollada en el proyecto TrainCom.

Pese a la gran extensión en el empleo de TCN en las comunicaciones embarcadas en trenes, existen otros sistemas para desempeñar las mismas funciones, como el LonWorks [8] o el WorldFIP [9]. En la Tabla 1 [10] se resumen las características más importantes de sistemas empleados actualmente y de otros que podrían ser utilizados para conectar los equipos embarcados en el tren.

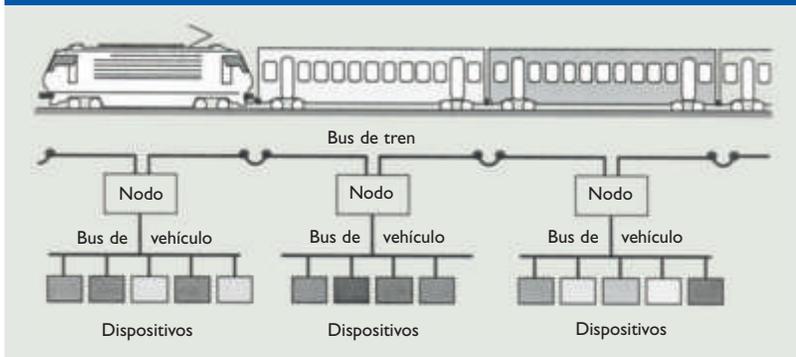
Tras todos estos años de trabajo, se han puesto de manifiesto las limitaciones de capacidad de estos buses. La demanda de más información por los sistemas actuales y la necesidad de instalar nuevos sistemas requieren un volumen de datos que no son capaces de transportar.

Hasta ahora, estos problemas se resolvían instalando cableados exclusivos para los nuevos sistemas o para aumentar los ya existentes, con el coste en material, tiempo y mantenimiento que conllevan.

Sin embargo, la mejor solución para los operadores ferroviarios es un sistema que sea capaz de aprovechar al máximo la capacidad de cada línea de comunicaciones instalada en el tren, sin necesidad de montar más cable para incorporar nuevos sistemas o para aumentar los actuales.

Por este motivo en el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad se ha desarrollado un sistema capaz de transmitir

Figura 1. Arquitectura de buses de TCN



varias decenas de millones de bits por segundo sobre el mismo cableado que emplean los sistemas de comunicaciones embarcados, manteniendo el funcionamiento normal de éstos. Esto se consigue dividiendo el ancho de banda de la línea en subbandas y empleando técnicas de modulación multiportadora, como se detalla más adelante.

A continuación se describe la red TCN, que es sobre la que se ha centrado el sistema desarrollado.

Estándar IEC 61375 / IEEE 1473-T

El objetivo del estándar de la *International Electrotechnical Commission* IEC 61375, relativo al *Train Communication Network*, es permitir la compatibilidad y la comunicación entre los dispositivos instalados en el mismo o en diferentes vehículos. Los servicios digitales principales que ofrece son, entre otros: el control de la tracción y del coche (puertas, luces...), y la centralización de la gestión y supervisión de todos los dispositivos auxiliares del tren.

La comunicación entre los equipos embarcados se realiza mediante una arquitectura de buses jerarquizada en dos niveles: el **bus de tren** que conecta los vehículos entre sí, y el **bus de vehículo** que conecta el equipo embarcado en un vehículo o grupo de vehículos (véase la Figura 1). Ambos utilizan un protocolo Maestro-Esclavo.

El bus de tren especificado en el estándar TCN es el *Wire Train Bus* (WTB), el cual permite la comunicación entre los equipos de diferentes vehículos del mismo tren, a 1 Mbps. Este bus se conecta a los **nodos** localizados en los vehículos, que son dispositivos que actúan como puertas de enlace entre el bus de tren y los diferentes buses de vehículos de cada coche.

El bus de vehículo especificado en el estándar TCN es el *Multifunction Vehicle Bus* (MVB) que es un bus de comunicaciones serie que permite el intercambio de información entre los equipos instalados en un entorno local, a 1'5 Mbps. A él se conectan los dispositivos de los sensores y actuadores instalados en el vehículo, así como los dispositivos de control y supervisión.

Un vehículo puede tener uno, varios o ningún bus de vehículo. Éste puede alargarse por varios vehículos, como en el caso de unidades de tren de transporte masivo (unidades múltiples) que no se separan durante su uso diario.

Para aumentar la capacidad de estos buses, se ha desarrollado el sistema digital de comunicaciones, el cual se expone a continuación.

Sistema de comunicaciones

El sistema digital de comunicaciones desarrollado permite transmitir gran cantidad de información por un único canal de comunicaciones, optimizando el ancho de banda disponible en comparación con la transmisión en banda base.

Está basado en el funcionamiento de sistemas como PLC (*Power Line Communication*), WLAN (*Wireless Local Area Network*), DVB-T (*Terrestrial Digital Video Broadcasting*), ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), entre otros, en los cuales se emplea la modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Para conseguir el aumento de capacidad comentado anteriormente, el ancho de banda de la línea se reparte entre el sistema TCN y el sistema OFDM desarrollado, como se muestra en la Figura 2. De esta forma, conectando nuevos equipos al cable de TCN y mediante el empleo de filtros, pueden funcionar simultáneamente aumentando notablemente el volumen de información que es capaz de transmitir el sistema completo y aprovechando al máximo la capacidad de la línea.

Los resultados obtenidos tras los estudios realizados en la tesis concluyen que el ancho de banda del cable empleado en las redes TCN es de unos 30 MHz para un coche ferroviario (con una longitud aproximada de 30 metros de cable). La banda de TCN se puede acotar en los 12 MHz más bajos, dejando alrededor de 15 MHz libres para el sistema OFDM, que los puede emplear en una única banda o en varias

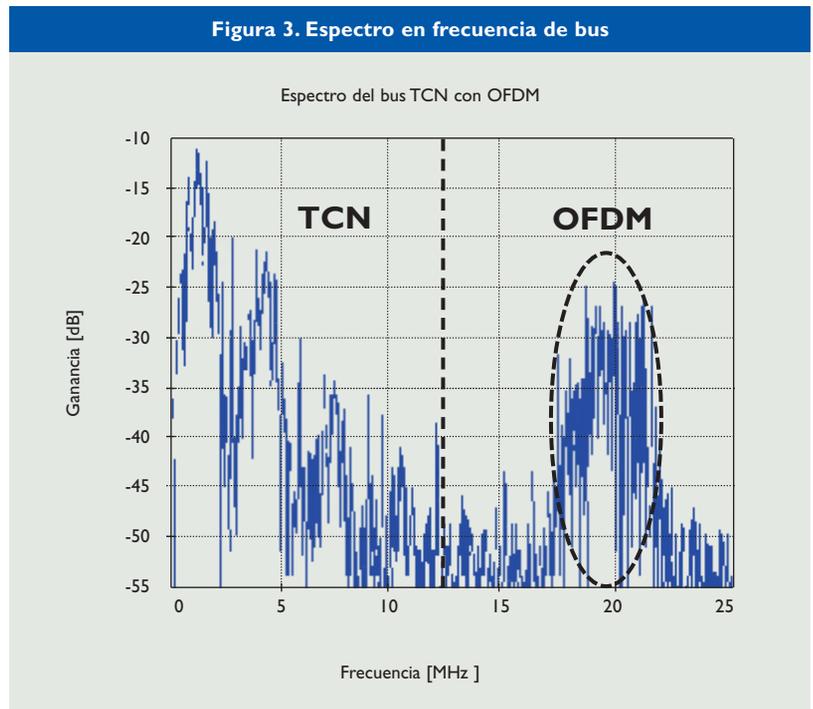
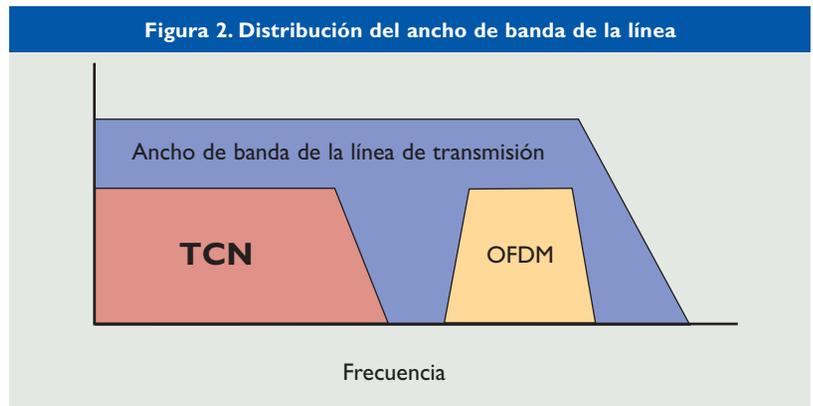
bandas más pequeñas para permitir la comunicación bidireccional. Con estos valores es necesario insertar repetidores en las uniones entre vehículos contiguos para permitir la comunicación a lo largo de todo el tren.

Para validar el sistema se ha desarrollado un prototipo basado en lógica programable con FPGA (*Field-Programmable Gate Array*), el cual se ha conectado a un banco de pruebas de TCN para estudiar la compatibilidad. En la Figura 3 se muestra el espectro en frecuencia del bus, obtenido en el banco de pruebas. Como se puede observar, la información de TCN está filtrada a unos 12 MHz mientras que OFDM se transmite entre 18 y 22 MHz, con una tasa de 8 Megabits por segundo, usando modulación 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

Ventajas del sistema desarrollado

Además de las ventajas propias de los sistemas OFDM, enumeradas en el siguiente apartado, el sistema desarrollado tiene las siguientes aportaciones frente al sistema global del tren:

- **Mayor capacidad.** Permite aumentar notablemente la capacidad de la línea de transmisión respecto al funcionamiento de TCN. Haciendo un uso total y óptimo del ancho de banda de la línea, permite mantener el funcionamiento actual de TCN e incluir bandas de datos independientes por las cuales se pueden transmitir varias decenas de millones de bits por segundo.
- **Menor cableado,** ya que utiliza como medio de transmisión el mismo cable por el que se transmiten las tramas de TCN. Esto implica no incrementar el peso del tren, lo que supone un menor consumo de energía, y reducir el coste del material de la instalación.
- **Menor gasto en tiempo** de instalación y parada del tren. Al no tener que instalar un nuevo cableado, el tren puede aumentar su capacidad de transmisión de datos en menos tiempo, lo que reduce el gasto en personal instalador y las pérdidas por tener el tren detenido en el taller.
- **Menor gasto de mantenimiento.** Como consecuencia de lo anterior, es menor el material que hay que mantener, lo que reduce el personal cualificado, el material y el tiempo de inspección en las labores de mantenimiento, traduciéndose en un menor coste económico.
- **Menor probabilidad de fallos.** Al haber menos material que en una instalación com-



pleta, también se reduce el número de conexiones a realizar, lo que minimiza los fallos del sistema. Esto implica un funcionamiento óptimo del tren durante su vida útil, reduciéndose el gasto en material de repuesto y las pérdidas por detener el tren para su arreglo.

- **Servicios de control, seguridad y confort.** Debido al aumento de capacidad de transmisión se pueden ampliar los sistemas embarcados en el tren, como por ejemplo la vídeo-vigilancia, aumentando de calidad las imágenes captadas por las cámaras, y se pueden instalar nuevos sistemas para incrementar el control, la seguridad y/o el confort del pasajero, por ejemplo, permitiendo que cada pasajero pueda visualizar la película que desee de entre una lista de varias películas transmitidas simultáneamente.

Con esto es evidente la mejora que el sistema desarrollado puede suponer en las redes embarcadas y la reducción de costes directos e indirectos frente a la instalación de un nuevo sistema.

Además este sistema no está limitado al mundo ferroviario, sino que se puede instalar en cualquier otro medio de transporte.

A continuación se describen brevemente las características de la modulación OFDM, sobre la que se basa el funcionamiento del sistema desarrollado.

Introducción a OFDM

OFDM es una técnica basada en una transmisión multi-portadora, donde la información a transmitir se reparte entre muchas portadoras de baja tasa de bits.

Es muy eficiente ante sistemas de caminos múltiples, de atenuación selectiva o con interferencias de banda estrecha, aunque en la aplicación en trenes no aparece ninguno de estos problemas porque se trabaja con un cable de par trenzado y apantallado. Sin embargo se ha escogido esta técnica porque su versatilidad en la configuración permite apro-

vechar al máximo el ancho de banda disponible del canal.

En los sistemas basados en una única portadora, la atenuación o una interferencia puede provocar el fallo de todo el canal de comunicaciones, lo que los hace poco eficientes.

En un sistema clásico de transmisión de datos paralelo, el ancho de banda del canal se divide en N portadoras sin solapamiento –véase la Figura 4 (a)–, que se multiplexan en frecuencia, separadas una pequeña banda de guarda para evitar interferencias entre sí. La recepción se realiza mediante filtros selectivos a las frecuencias de las portadoras. El inconveniente de esta técnica es que cada portadora requiere mucho ancho de banda.

Por el contrario, en OFDM se emplean portadoras solapadas –véase la Figura 4 (b)– seleccionadas de tal forma que sean **matemáticamente ortogonales**. Esto se consigue escogiendo frecuencias que tengan un número entero de ciclos en la duración del símbolo OFDM. De esta forma, si se observa el espectro en frecuencia de las portadoras de la señal OFDM –véase la Figura 5 (b)–, en el centro de cada una de ellas no hay interferencia de ninguna otra. Esto permite, mediante técnicas basadas en la transformada de Fourier, recuperar los datos transmitidos de forma íntegra y sin efectos de las demás portadoras.

La ventaja de esta técnica es que para N portadoras, el ancho de banda requerido es mucho menor que en el sistema clásico o, visto de otra forma, para el mismo ancho de banda se pueden utilizar un mayor número de portadoras, lo que aumenta la tasa de datos notablemente.

En la Figura 6 se muestra gráficamente la máxima capacidad de transmisión teórica del sistema desarrollado en función del ancho de banda utilizado y del tipo de modulación empleada.

Las ventajas de la modulación OFDM son:

- En sistemas de caminos múltiples, la complejidad de implementación es significativamente menor que en un sistema basado en una única portadora con equalizador.
- En canales que varían poco con el tiempo, se puede adaptar dinámicamente la tasa de datos de cada portadora individualmente según su relación señal-ruido. Esto permite optimizar la capacidad de datos del canal.

Figura 4. Distribución de portadoras: (a) sistema clásico, (b) OFDM

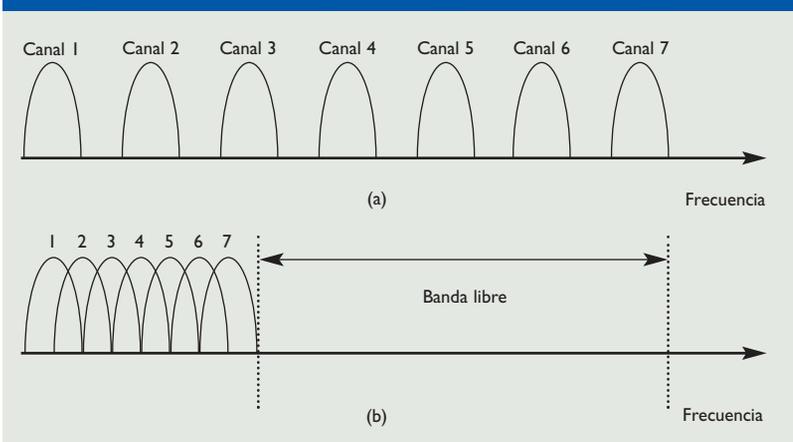
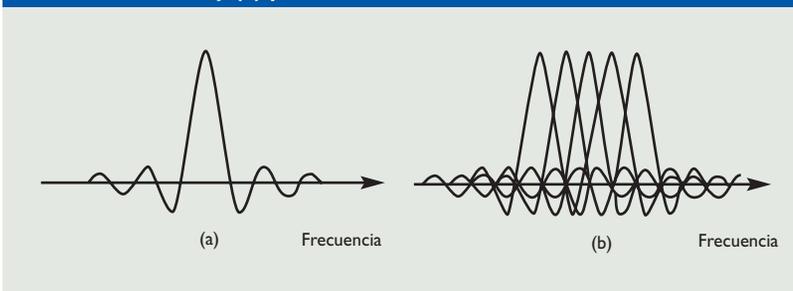


Figura 5. Espectro de (a) una portadora OFDM y (b) portadoras de una señal OFDM



- Permite anular ciertas portadoras de la señal si se ven afectadas por interferencias de banda estrecha o selectivas.

- Se pueden repartir las portadoras entre varias fuentes de información (multiplexación). Esto es especialmente útil para aplicaciones de difusión.

Pero también tiene inconvenientes como los que se enumeran a continuación:

- Es más sensible al desplazamiento de frecuencia y al ruido de fase.
- Tiene una relación de potencia pico-media relativamente alta, lo que reduce la eficacia energética del amplificador de línea.

Además de las ventajas expuestas anteriormente esta técnica de modulación se puede implementar digitalmente en un circuito de lógica programable, lo que ha facilitado el desarrollo del prototipo del sistema.

Toda esta información se ha obtenido de [11], donde el lector puede profundizar en la modulación OFDM.

Conclusiones

Ante la necesidad de los operadores ferroviarios de instalar nuevos sistemas embarcados y debido a las limitaciones de los sistemas actuales, en el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad se ha desarrollado, como tesis doctoral, un nuevo sistema digital de comunicaciones basado en OFDM, el cual permite aumentar la tasa de transferencia del sistema en varios millones de bits por segundo compartiendo el mismo cableado de los sistemas actuales.

Esto minimiza los costes de instalación y aumenta notablemente la transferencia de información, cubriendo así las necesidades de los nuevos sistemas.

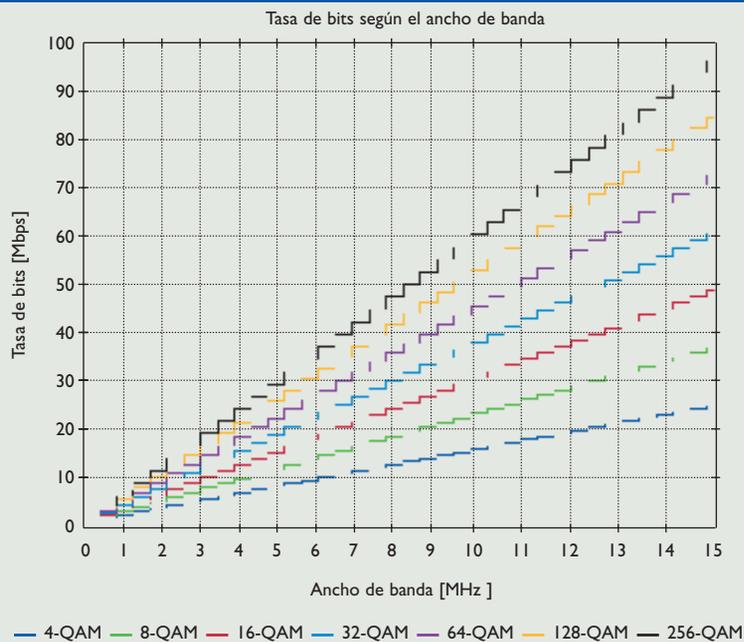
Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la ayuda aportada por el Colegio Nacional de Ingenieros del ICAI a la tesis doctoral "Modelado y validación de un sistema digital de comunicaciones de gran ancho de banda de aplicación en vehículos de transporte" del IIT.

También quieren agradecer a las empresas SEPSA, Adif y VAC el material facilitado para el estudio y a Altera por su ayuda en el programa de universidades.

Este trabajo ha sido en parte desarrollado con una ayuda del Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto DPI2004-06940-C02-02 del Plan Nacional de I+D+i. ■

Figura 6. Máxima tasa de bits teórica del sistema en función del ancho de banda y del tipo de modulación



Referencias

- [1] IEC Standard 61375-1, *Electric railway equipment—Train bus Part 1: Train Communication Network*. 1999, Comisión Electrotécnica Internacional: Génova (Italia), p. 705.
- [2] Umiliacchi, P., C. Pentimalli, and A. Piazza, *ROSIN – TR 1045 – Summary of the Specification and Development Work*. 1997. p. 40.
- [3] Rosin Consortium. *ROSIN: Railway Open System Interconnection Network 1996-2000* 10.Ene.2001 [cited 2006 06.Dic]; Available from: <http://www.labs.it/rosin/default.htm>
- [4] Renner, E., *Integrated Communication System for Intelligent Train Applications*. 2001. p. 8.
- [5] TrainCom Consortium. *TrainCom. Integrated communication System for Intelligent Train Applications*. 2001-2004 14.Oct.2004 [cited 2006 06.Dic]; Available from: <http://www.traincom.org/>
- [6] Umiliacchi, P. and R. Shingler, *EuRoMain. European Railway Open Maintenance System*. Final Report. 2006. p. 116.
- [7] EuRoMain Consortium. *EuRoMain. European Railway Open Maintenance System 2002* [cited 2006 06.Dic]; Available from: <http://www.euromain.org/>
- [8] Echelon Corporation. *LonWorks*. 2002 [cited 2006 06.Dic]; Available from: <http://www.smarthomeforum.com/lonworks.asp?ID=17>
- [9] WorldFIP International HQ. *WorldFIP Fieldbus*. 2003 26.Jun.2003 [cited 2006 06.Dic]; Available from: <http://www.worldfip.org>
- [10] Neff, G., *Tunneling Routers for Trainline Networks*, in *LonWorld2000*. 2000: Orlando, FL (Estados Unidos). p. 14.
- [11] Nee, R.v. and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. 1ª ed. 2000: Artech House Publishers. 260.