



José Antonio Rodríguez Mondéjar
Ing. Industrial del ICAI (1988)
y Doctor en Ingeniería Industrial por
la Univ. Pontificia Comillas (2000).
Profesor del Dpto de Electrónica
y Automática del ICAI e investigador
del IIT.



Yolanda González Arechavala
Lic. en Informática por la EHU-UPV
(1991) y Doctora en Ingeniería
Industrial por la Univ. Pontificia
Comillas (2003). Profesora del Dpto de
Sistemas Informáticos del ICAI e inves-
tigadora del IIT.



Rafael Santodomingo Berry
Ing. Industrial del ICAI (2005).
Actualmente investigador en formación
en el IIT.

Telemandos de energía en los sistemas ferroviarios

Este artículo es una introducción a la arquitectura de los telemandos de energía o de electrificación utilizados actualmente en el sector ferroviario. El aumento de las necesidades del transporte público y su impacto social, ha hecho que no sólo se demande seguridad, sino que además se exija puntualidad. Es en este último aspecto donde juega un papel muy importante el telemando de energía, o también llamado telemando de electrificación. A lo largo del texto se desgranarán los diferentes elementos que forman el telemando como las remotas o el puesto central, haciendo hincapié en sus funciones, sin dejar de lado su previsible evolución en el futuro.

Introducción

Un elemento fundamental en los ferrocarriles electrificados es el sistema eléctrico que garantiza la alimentación del tren y de los sistemas auxiliares situados a lo largo de la vía. Este sistema está formado por las subestaciones eléctricas, los seccionadores de catenaria y la propia catenaria. Las subestaciones eléctricas o de tracción son las encargadas de transformar la energía suministrada por las compañías distribuidoras de electricidad a los niveles de tensión y al modo (continua o alterna) que demanda el tipo de electrificación del tren. La catenaria o línea aérea de contacto, en el argot ferroviario, es el elemento final de donde se alimenta el tren a través del pantógrafo. Entre subestaciones y catenaria se sitúan los seccionadores de catenaria que permiten dividir la catenaria en zonas libres de tensión y alimentarla desde diferentes salidas desde las subestaciones. Los seccionadores de catenaria se suelen agrupar por zonas en las denominadas zonas neutras. Las subestaciones y zonas neu-

tras se sitúan a lo largo de la vía para dar continuidad a la alimentación del tren.

Desde el punto de vista del control, el sistema eléctrico descrito es visto como un conjunto de elementos de corte (seccionadores, disyuntores en subestaciones, interruptores) agrupados en subestaciones y zonas neutras, cuya operación adecuada permite la correcta alimentación del tren. Por supuesto, el control de dicho sistema, se realiza a partir de la información recogida en los elementos que forman el sistema, como los mencionados elementos de corte, los transformadores, los detectores de tensión, etc.

En función del grado de implantación del ferrocarril en un área, el sistema eléctrico puede llegar a ser muy complejo. Como ejemplo, la infraestructura de electrificación de la zona centro de ADIF para líneas convencionales, que comprende Madrid y zonas limítrofes, está formada por unas 150 instalaciones repartidas entre subestaciones y zonas neutras.

Comentarios a:
comentarios@icai.es

La función del telemando de energía (también llamado telemando de electrificación) es permitir el control y la supervisión remota de este sistema eléctrico desde un puesto central de operación. Para ello, el operador situado en dicho puesto central es informado en tiempo real del estado de los elementos que forman el sistema eléctrico, a través de los medios informáticos adecuados. Y además, mediante esos mismos medios informáticos el operador puede enviar órdenes a dichos elementos, como, por ejemplo, la orden de apertura de un determinado seccionador. A estas dos funciones básicas del telemando de energía, hay que añadir la de registrar en una base de datos todos los cambios que ocurren en el sistema eléctrico y sistemas asociados. Estas funciones deben estar operativas en el puesto central con un grado de disponibilidad, fiabilidad, mantenimiento y seguridad muy alto. Estos atributos se conocen de forma conjunta por las siglas RAMS. Un telemando de energía poco fiable, o lento a la hora de realizar las funciones encomendadas, se traduce en el aumento del tiempo que el tren está parado por fallo, y, por tanto, en el aumento del número de horas viajero perdidas. Estas necesidades hacen que el telemando sea un sistema informático y de comunicaciones complejo. Dentro de los tipos de sistemas en tiempo real, el telemando es catalogado como un sistema crítico, aunque sin llegar a las exigencias de los sistemas para control de tráfico.

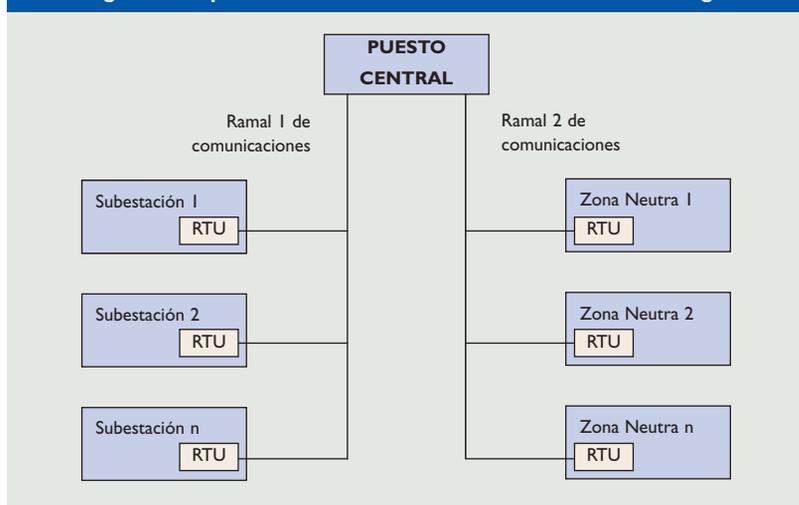
En los siguientes apartados se describe con mayor detalle la función de un telemando de energía, su organización y el rol de cada uno de los elementos que lo forman.

Función

Un telemando de energía en un sistema ferroviario está formado por todos los elementos hardware, software y de comunicaciones necesarios para realizar de forma remota (puesto central en la mayoría de los casos) las siguientes funciones:

- El control y la supervisión de las subestaciones eléctricas y centros de transformación con todos sus elementos asociados: interruptores, seccionadores, grupos rectificadores (en el caso de líneas alimentadas en continua) y servicios auxiliares.
- El control y la supervisión de la línea aérea de contacto y de sus seccionadores (zonas neutras).
- El control y la supervisión de las líneas de señales que alimentan a los sistemas de señalización.

Figura 1. Arquitectura física clásica de un telemando de energía



- El control y la supervisión de todos los sistemas de comunicaciones, ordenadores, etc., necesarios para poder realizar las funciones descritas en los puntos anteriores.
- El mantenimiento de una base de datos con todos los eventos y alarmas acaecidas en el telemando, garantizando su integridad y consistencia.
- La exportación de los datos anteriores hacia otros departamentos de la entidad que administra el sistema ferroviario, como planificación, mantenimiento, control de tráfico, etc., sin comprometer las funciones propias del telemando de energía.

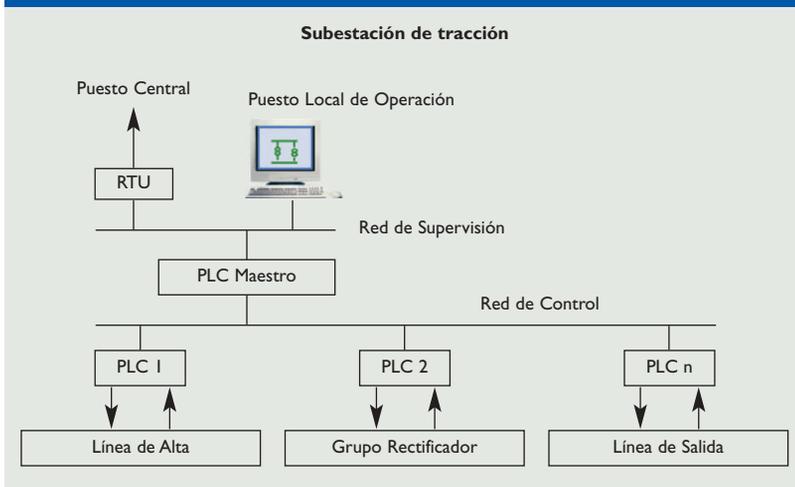
Arquitectura

Para realizar las funciones anteriores el telemando está constituido por tres tipos de elementos [1]: las remotas (RTU, siglas en inglés), el puesto central y el sistema de comunicaciones que los une. La Figura 1 muestra la arquitectura física clásica de un telemando. En cada instalación eléctrica existe una remota que recoge los eventos que ocurren en la instalación y los envía al puesto central. También es la encargada de recibir las órdenes que envía el puesto central y enviarlas a los elementos de control del aparato correspondiente (seccionador, disyuntor, etc.). En una arquitectura clásica, las remotas se conectan al puesto central a través de ramales de comunicaciones. Las remotas que dan servicio a instalaciones de un mismo tipo se suele agrupar en un mismo ramal. Si el número de remotas es alto, las remotas se agrupan en varios ramales siguiendo la disposición geográfica de las vías del tren. El número de remotas por ramal no suele ser superior a 15.

Figura 2. Arquitectura funcional de un telemando de energía



Figura 3. Esquema simplificado del control distribuido de una subestación de tracción



Los ramales de comunicaciones son gestionados desde los sistemas informáticos que forman el puesto central.

La incorporación de nuevos medios de comunicación entre remotas y puesto central, y las necesidades desde otros departamentos hace que el esquema de la Figura 1 evolucione. Sin embargo, la arquitectura funcional y de niveles que hay detrás del telemando, y que recoge la Figura 2, no varía. En cualquier telemando de energía, incluidos los de electrificación aparecen los siguientes niveles funcionales:

- Instalaciones eléctricas.
- Remotas.
- Comunicaciones entre puesto central y remotas.
- Puesto central. Junto con comunicaciones y remotas forman el telemando propiamente dicho. En los siguientes apartados se detallan estos niveles.

- Red corporativa de la entidad que administra la infraestructura. A través de ella se conectan otros departamentos que necesitan información de la base de datos pública del telemando de energía.

Remotas

Como ya se ha dicho anteriormente, la función principal de la remota es hacer de puente entre el elemento eléctrico (disyuntor, seccionador, transformador, equipo de protecciones) y el puesto central. En función del tipo de instalación, esta función básica se amplía con otras de supervisión y control de la propia instalación en local. En la propia instalación eléctrica debe haber siempre medios informáticos que permitan al operador la supervisión y el control manual de dicha instalación. En las instalaciones pequeñas, como las zonas neutras, las funciones de remota, puesto local de operación, registro local de eventos e, incluso las de control directo del elemento eléctrico, se unen en el mismo aparato.

En las instalaciones grandes, como las subestaciones de tracción, la remota es un elemento más del sistema de control distribuido de la instalación. La Figura 3 muestra un ejemplo de control distribuido formado por dos redes: red de control y red de supervisión. La red de control conecta el autómatas maestro con los autómatas programables (PLCs) que controlan directamente los elementos eléctricos. La red de supervisión conecta el autómatas maestro con el puesto local de operación y con la remota. A través del puesto local de operación, se realiza la operación en local de la instalación y se guarda un histórico de los últimos eventos ocurridos. En algunos casos la remota está incluida dentro del PLC maestro como un módulo más de comunicaciones.

Comunicaciones

En el nivel de comunicaciones aparecen dos aspectos importantes a resaltar: el medio físico y el protocolo de comunicaciones utilizado.

Actualmente los medios físicos, ateniéndose al uso que se está haciendo de ellos, se clasifican en:

- Dedicados basados en cobre. Son los medios físicos tradicionales que utilizan una tecnología similar a la telefonía fija. Como máximo se pueden alcanzar velocidades de 9600 bit/s. Este medio físico, que discurre paralelo a la vía, ha sido una de las diferencias con los telemandos de energía de las redes de transporte (comunicación en alta tensión mediante portado-

ra o a través del cable de tierra mediante fibra óptica), además de la gestión de la catenaria.

- Dedicados basados en fibra óptica. Frente al cobre ofrecen un ancho de banda casi ilimitado. En contra tienen el coste de mantenimiento.
- Compartidos. La capacidad casi ilimitada de la fibra óptica, y la necesidad de abaratar su coste de explotación, ha hecho que en algunas administraciones el uso de la fibra óptica sea compartida entre el telemando de energía y la red corporativa. En este caso las redes se diseñan con suficientes mecanismos de seguridad y redundancia, que a la larga aseguran una disponibilidad y una fiabilidad mayores que en las redes dedicadas. Además se aprovecha que la red de los telemandos de energía con tecnología TCP/IP [2][3] tiene un grado de utilización muy bajo. La generación de eventos en las instalaciones es a ráfagas, tal como muestra el caso real de la Figura 4. Los medios de encaminamiento en las redes actuales permiten compartir el ancho de banda y a la vez dar prioridad a quién lo necesite, como en el caso de los canales virtuales de comunicación de los telemandos.

Como protocolos de comunicaciones se utilizan:

- IEC 60870-5-101 [4] (en adelante, 101). Es un protocolo maestro-esclavo pensado para líneas dedicadas. Como maestro actúa el puesto central y como esclavo las remotas. El puesto central va preguntando remota a remota si tiene alguna información para él. Cuando la remota es interrogada, si tiene algún evento en espera, lo transmite. El tiempo entre la generación del evento y la llegada al puesto central depende del momento en que la remota es interrogada. Por tanto, este tiempo depende de la velocidad del ramal de comunicaciones, del número de remotas conectado y de las necesidades de comunicación del resto de remotas. En la Figura 5 se muestra cómo se distribuye este tiempo en un caso real para un ramal de 20 remotas a 9600 bit/s.
- IEC 60870-5-104 [5] (en adelante, 104). Este protocolo sustituye el nivel de enlace maestro-esclavo del 101 por el protocolo TCP/IP. Desde el punto de vista del nivel de aplicación 101 y 104 son iguales: se transmite la misma información con la misma codificación. Gracias al protocolo TCP/IP y las tecnologías físicas que lo soportan, en vez de haber un maestro (puesto central) que pregunta de forma cíclica a las remotas, ahora las remotas, en el momento que tienen un evento, lo transmiten directamente al puesto central, sin apenas retardo.

Figura 4. Comportamiento a ráfagas en la generación de eventos en un telemando de energía

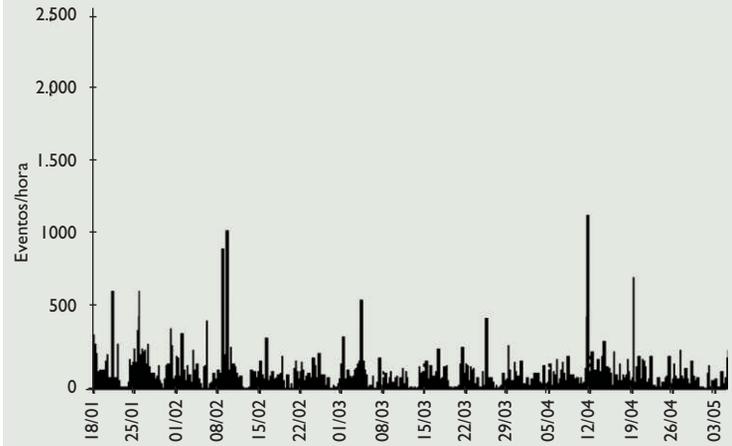
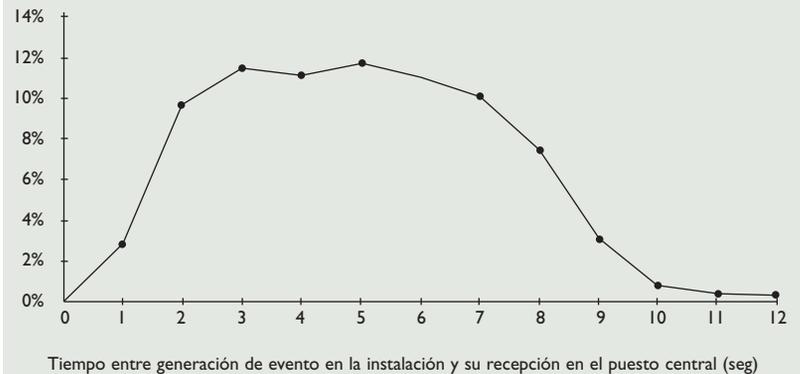


Figura 5. Distribución del tiempo que media entre la generación de un evento y su llegada al puesto central



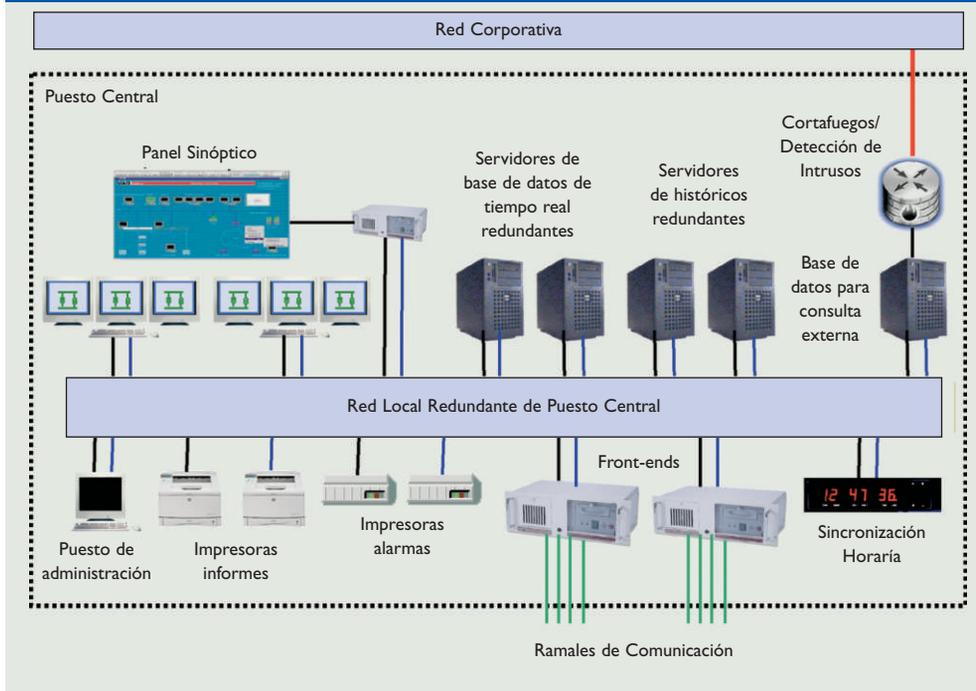
- Propietarios. En el pasado, ante las necesidades de comunicación y al no haber un estándar, cada empresa creó su propio protocolo de comunicaciones. Estos protocolos condicionan fuertemente el suministro de la remota y del puesto central. Hoy están totalmente en desuso para nuevas obras. Sólo se mantienen los ya existentes, por el coste que supone la sustitución de las remotas.

Puesto Central

El puesto central es el corazón del telemando de energía. A él corresponden las siguientes funciones:

- Presentar al operador de forma adecuada mediante sinópticos el estado de las instalaciones eléctricas que se controlan desde el telemando, y de los sistemas que forman el propio telemando (elementos del puesto central, elementos de las comunicaciones y remotas). Un sinóptico es una representación mimética de una instalación.

Figura 6. Arquitectura del puesto central



- Permitir al operador enviar órdenes de manera cómoda y segura a los elementos susceptibles de recibirlos en las instalaciones eléctricas, y a los elementos que forman el telemando.
- Guardar en un histórico todos los eventos que llegan de las instalaciones eléctricas, los generados en el propio puesto central y los generados en la red de comunicaciones y sistemas auxiliares.
- Permitir la exportación de datos hacia otros departamentos de manera rápida y segura para el telemando.

Para realizar las funciones anteriores y con la tecnología disponible, los puestos centrales tienen una arquitectura semejante a la mostrada en la Figura 6. Los elementos que forman el puesto central son los siguientes:

- Puestos de operación. Desde ellos realizan sus labores los operadores. Suelen ser estaciones de trabajo u ordenadores personales de gama alta con dos o tres pantallas de tamaño grande y alta resolución.
- Panel sinóptico. Es una pantalla de grandes dimensiones donde se muestra el estado del conjunto del sistema eléctrico que controla el telemando. Desde el punto de vista tecnológico es un reto por sus dimensiones y por su mantenimiento. Actualmente se suele montar a partir de pantallas tipo DLP de 50", aunque no es la única solución.
- Impresoras de informes e impresoras de alarmas. En el pasado, cuando los medios de

almacenamiento eran muy pobres, todo evento que llegaba al puesto central, era impreso en papel continuo en la impresora de alarmas. En caso de incidente, este documento jugaba un papel crucial para un análisis forense. Aunque ha caído en desuso, todavía se sigue instalando la impresora de alarmas. Desde el punto de vista medio ambiental y de ruido es un elemento a prescindir. En algunos casos se está sustituyendo por la grabación en DVD con firma digital para garantizar la autenticidad e integridad de la información.

- Servidores de tiempo real. Guardan una imagen en tiempo real del estado del telemando y del sistema eléctrico asociado, así como de las órdenes en curso. Los puestos de operación parten de esta imagen para construir los sinópticos que muestran al operador.
- Servidores de históricos. Guardan los eventos que llegan desde las remotas y desde todos los elementos que forman el telemando, incluido el puesto central. Desde los puestos de operación se puede consultar estos históricos, mediante filtros avanzados.
- Base de datos de consulta externa. Pone a disposición del resto de departamentos autorizados de la entidad gestora parte de los datos guardados en los servidores de históricos. Mediante un cortafuegos y la separación física entre redes, se blinda el puesto central ante cualquier ataque informático desde la red corporativa.

- Front-ends de comunicaciones. Son los encargados de gestionar las comunicaciones con las remotas a través de los ramales de comunicación. En el caso del protocolo 101 y de los protocolos propietarios, son los que ejercen el rol de maestro.

- Reloj maestro. El fechado de los eventos en el puesto central y la distribución de la hora a todas las remotas es otro de las funciones básicas del puesto central. La generación de la hora con suficiente exactitud descansa sobre un reloj patrón que, mediante protocolo NTP, es distribuida al resto de subsistemas que forman el puesto central. Desde los concentradores utilizando protocolo 101 o 104 también es distribuida a las remotas.

Todos los elementos críticos del sistema (red local, servidores de tiempo real, servidores de históricos y front-ends) están en configuración redundante para conseguir la máxima disponibilidad. Como valor de referencia, actualmente se está exigiendo una disponibilidad mensual mayor del 99,98%. El software que corre sobre estas máquinas y que permite las labores de supervisión, control y registro suele recibir el nombre de SCADA.

Conclusiones y retos futuros

En este artículo se ha presentado una panorámica de los telemandos de electrificación actuales. Su importancia en la disponibilidad del servicio de trenes y la necesaria contención en los costes, tanto a la hora de la inversión como del mantenimiento, hacen que estén en continua evolución. Sin pretender ser exhaustivos, a continuación se presenta una lista de retos que se plantean en los telemandos de electrificación:

- Mejora de la ingeniería del telemando. Una pequeña ampliación en una instalación eléctrica, como es la incorporación de una señal de alarma, significa cambios en todos los niveles (instalación, remota, puesto local de operación, front-ends, sinópticos, etc.). En muchos telemandos actuales resulta una labor muy costosa, aunque se hayan previsto las necesarias reservas. A nivel de subestaciones eléctricas, se está introduciendo un nuevo protocolo (IEC 61850) que permite aligerar esta labor. Se busca una solución cercana al PLUG&PLAY.

- Mejora y gestión de las comunicaciones. La utilización de fibra óptica y la incorporación del sistema de comunicaciones del telemando como un canal más de la red corporativa mejora a priori la velocidad y la disponibilidad de las comunicaciones. Sin embargo, se plantean nuevos retos, como es la

suficiente robustez y seguridad [6] ante ataques informáticos o la responsabilidad compartida con otros departamentos.

- Un mejor aprovechamiento de la información guardada en los históricos. Además del seguimiento de incidentes, el histórico es una fuente de información valiosísima para la planificación o para el mantenimiento, además del análisis forense. Por desgracia, la mayoría de las herramientas que hay en el mercado para el tratamiento de históricos no van más allá de un filtrado avanzado.

- La garantía de los índices RAMS del telemando [7][8]. Conseguir que estos índices tengan los valores adecuados en la instalación y mantenerlos a lo largo de la vida del telemando es un reto muy importante. La degradación de estos índices significa directamente el aumento del número de horas/viajero perdidas. El alcance y mantenimiento de estos índices comienza con la concepción del proyecto.

Por último, el puesto central es un sistema informático que puede quedar tecnológicamente obsoleto mucho antes del tiempo de vida mínimo esperado para un sistema de estas características. Las necesidades de mantenimiento y ampliación constituyen un reto para el puesto central durante su tiempo vida, no menor de 10 años. ■

Bibliografía

- [1] Shahidehpour M. and Wang Y.: *Communication and Control in Electric Power Systems*. Wiley-IEEE Press, 2003.
- [2] Lars Nordström Göran Ericsson: *A Broadband Wide Area Network as an Enabler of Improved Power System Maintenance*. IEEE transactions on power delivery, pp 108-112, January 2006.
- [3] R. H. McClanahan: *SCADA and IP: is network convergence really here?* IEEE Industry Applications Magazine, vol. 9, no. 2, pp. 29-36, March-April 2003.
- [4] IEC 60870-5-101. *Telecontrol Equipment and Systems—Part 5—101: Transmission Protocols—Companion Standard for Basic Telecontrol Tasks*. Febrero 2003.
- [5] IEC 60870-5-104. *Telecontrol Equipment and Systems—Part 5—104: Transmission Protocols—Network Access for IEC 60870-5-101 Using Standard Transport Profiles*. Junio 2006.
- [6] Jacques S. Gansler and Hans Binnendijk: *Information Assurance Trends in Vulnerabilities, Threats, and Technologies*. National Defense University Center for Technology and National Security Policy. Washington, d.c. 2004.
- [7] UNE-EN 50126. *Aplicaciones Ferroviarias. Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS). Parte I: Requisitos básicos y procesos genéricos*. 2005.
- [8] UNE-EN 50128. *Aplicaciones Ferroviarias. Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Software para sistemas de control y protección de ferrocarril*.