

Doce años de investigación, desarrollo y tecnología ferroviaria en Metro de Madrid

Twelve years of railway research, development and technology in the Madrid Metro

Manuel Melis Maynar. Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, M. Sc. MBA
Catedrático de Geotecnia. ETS Caminos Coruña (Exced.) Catedrático de Ferrocarriles, ETS Caminos Madrid
Presidente del Consejo, Metro de Madrid. mmelism@terra.es

Ildefonso de Matías Jiménez. Ingeniero Aeronáutico
Director Gerente, Metro de Madrid. imatias@mail.metromadrid.es

Javier González Fernández. Prof. Dr. Ingeniero Industrial, Master MBA
Director de Ingeniería, Mantenimiento e I+D de Metro de Madrid. francisco_gonzalez@mail.metromadrid.es

Resumen: Desde hace ya más de doce años, Metro de Madrid tomó la decisión de posicionarse a la vanguardia tecnológica en los diversos campos científicos de su actividad: la construcción civil, las instalaciones y equipamientos, y el material móvil. Ello, gracias a un enorme impulso interno y a la decidida colaboración con un gran número de Universidades, ha hecho posible encontrarse en una situación de referencia mundial en el sector ferroviario, haber aportado su tecnología a otras ciudades españolas, haberla exportado a muy diversos países y haber registrado un buen número de patentes. Salvo, lamentablemente, en la planificación, el proyecto y la construcción de las infraestructuras civiles, que no ha sido posible aplicar en ninguna otra ciudad por comprensibles intereses locales. Sin este esfuerzo innovador habría sido muy difícil realizar los planes de ampliación de la Red con la calidad, costes y plazos en que se han realizado, conteniendo y hasta reduciendo los costes posteriores relativos de explotación. En la actualidad Metro de Madrid tiene 35 proyectos de I+D+i activos y más de 20 Doctorandos entre su plantilla de Ingenieros que están desarrollando sus estudios y Tesis en el campo del ferrocarril. En este breve artículo se pretende aportar un resumen del camino abordado y el que nos queda por recorrer.

Palabras Clave: CBTC: Control de trenes basado en comunicaciones; ATP, ATO: Protección automática y operación automática del tren; SIMPACK, ANSYS y ABAQUS: Programas comerciales de software técnico

Abstract: Over twelve years ago the Madrid Metro took the decision to establish itself at the very forefront of technology in the various scientific fields related to its activities: civil construction, installations and equipment and rolling stock. As a result of great internal drive and very close collaboration with a large number of universities, the Madrid Metro has set an international benchmark in the railway sector and has provided its technology to many other cities both home and abroad and registered a large number of patents. Unfortunately the Madrid Metro has not been able to assist in the planning, design and construction of civil infrastructures in any other city due to understandable local interests. Without this innovating drive it would have been very difficult to conduct the Network extension plan over the periods and at the quality levels and costs that were actually achieved together with the stabilization and even reduction of ensuing operation costs.

The Madrid Metro currently has thirty-five R+D+I projects underway and over twenty postgraduates among the engineering staff conducting studies and doctoral theses in the railway sector. This brief article aims to provide a summary of the ground that has been covered and that still to come.

Keywords: CBTC: Communications based train control; ATP, ATO: Automatic train protection and automatic train operation; SIMPACK, ANSYS and ABAQUS: Commercial technical software programmes

1. Cantón virtual, cantón móvil y nuevos sistemas de señalización ferroviaria avanzada - CBTC

La división de la vía en cantones físicos fué el primer método de puesta en práctica de los sistemas de

protección automática del tren (ATP, automatic train protection). Con este método, si un cantón o tramo de vía está ocupado por un tren el sistema impide que otro tren pueda entrar en él. En el ATP clásico instalado en toda la red de Metro de Madrid desde ha-

Fig. 1. ATP con Códigos de velocidad.



ce varias décadas, se deja también otro cantón de seguridad en el que tampoco puede entrar.

Este sistema se denomina ATP por Códigos de Velocidad. El enclavamiento conoce donde está el tren anterior por la ocupación de su cantón, y va enviando al siguiente tren las velocidades que debe alcanzar en cada uno de los cantones de vía siguientes hasta llegar a él. En la figura 1 puede verse que el primer cantón tras el ocupado tiene los códigos 0/0, que indican que la velocidad máxima en ese cantón es 0, y su velocidad objetivo es 0, de forma que el tren debe estar parado y no puede circular. El cantón inmediatamente anterior tiene códigos 34/0, que indican que la velocidad máxima en ese cantón es 34 km/h, y su velocidad objetivo es 0, de forma que el tren debe ir frenando hasta parar en ese mismo cantón. El anterior tiene códigos 57/34, que indican que la velocidad máxima en ese cantón es 57 km/h, y su velocidad objetivo es 34, de forma que el tren debe ir frenando hasta alcanzar los 34 km/h en ese mismo cantón. El anterior tiene códigos 70/57, que indican que la velocidad máxima en ese cantón es 70 km/h, y su velocidad objetivo es 57, de forma que el tren debe ir frenando hasta alcanzar los 57 km/h en ese mismo cantón. Y el anterior tiene códigos 70/70 que indican que la velocidad máxima en ese cantón es 70 km/h, y su velocidad objetivo es 70, de forma que el tren no tiene restricciones en su movimiento en ese cantón, ya que su velocidad máxima es 70 km/h. Estas magnitudes 34, 57, 70 de las velocidades dependen del

sistema y la forma de transmisión de las señales de la vía al tren, que van sobre los carriles y son leídas por las antenas de ATP que el usuario puede observar.

El sistema da lo más importante que se exige a un ATP, que es la seguridad absoluta de que no hay alcances entre trenes, pero se observa que deja siempre libre el cantón siguiente al ocupado por el tren anterior, y además que en el cantón ocupado deja libre toda la longitud entre el eje final de ese tren y el inicio del cantón. De forma que a efectos de capacidad de la línea en hora punta no es muy eficiente porque hay mucha longitud de línea donde no puede haber trenes.

Partiendo de este sistema ATP por códigos de velocidad se ha venido trabajando en todo el mundo en las últimas 3 décadas en sistemas que, manteniendo la seguridad, permitieran reducir la longitud de vía desocupada.

Un ejemplo clásico es el del ATP "Distance to go" que se muestra en la figura 2. El sistema conoce con exactitud la posición de cada tren, que además de calcularse con los tacogeneradores o ruedas fónicas y otros sistemas se ayuda y se ajusta con balizas que el tren lee y le permiten situarse con toda exactitud en la vía. Con esa situación de cada tren perfectamente conocida se puede comenzar a aplicar la parábola de frenado de forma que el tren pare justamente a la entrada del cantón siguiente al ocupado por el tren anterior. Se gana así entre cada dos trenes un cantón completo que puede ser ocupado por otro tren.

Fig. 2. ATP con Distance to go.

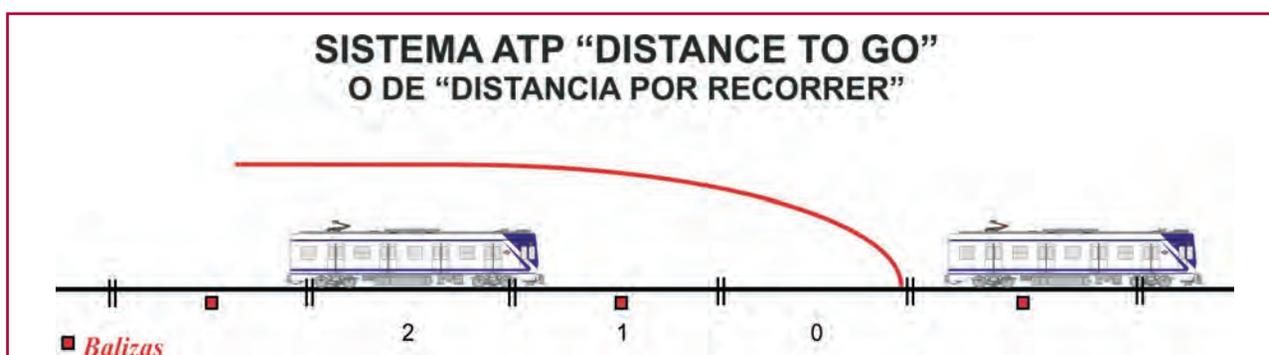




Fig. 3. ATP con Cantón móvil.

El paso final lógico es el llamado cantón móvil. Con esta solución desaparecen los cantones físicos en la vía. Cada tren va enviando su posición exacta al enclavamiento correspondiente, y este a su vez va dando órdenes al resto de los trenes de forma que el siguiente tren puede comenzar a aplicar su parábola de frenado de forma tal que pare totalmente en la cola del tren anterior más una distancia prefijada de seguridad. Es similar a que cada tren fuera rodeado por una burbuja protectora que el tren siguiente no puede penetrar. Todas las transmisiones y comunicaciones entre los trenes y los trenes y tierra son vía radio.

La teoría del cantón móvil es perfecta, y con este sistema podría meterse en la línea el máximo número de trenes en hora punta, que es el objetivo de las empresas ferroviarias. Durante los años 90 en la construcción de la línea Jubilee del Metro de Londres se anunció muchas veces que el sistema de cantón móvil funcionaría perfectamente en su inauguración el 1 de Marzo de 1998. Pero los 16 km de esta línea que cuya construcción había comenzado en 1991 no se pusieron en servicio hasta dos años más tarde de lo previsto, en el 2000, y el sistema de cantón móvil no funcionó, ni aún hoy parece que funciona 8 años más tarde. En el sistema interoperable de señalización de la Alta Velocidad Europea, el tristemente célebre y conocido ERTMS, en su nivel 3 es otro sistema de cantón móvil. Se anunció también durante los años 90 que iba a funcionar perfectamente en el AVE Madrid-Barcelona y los siguientes, pero una década después este sistema tampoco funciona. Se adjudicó en noviembre de 2000 solamente los niveles 1 y 2, y ni siquiera el nivel 2 funciona, y el nivel 1, un sencillo ATP puntual sigue teniendo problemas con la lectura de balizas, el sistema Doppler de posicionamiento y otros varios.

Es muy difícil que el cantón móvil funcione, tal como está planteado hoy. El lector puede comprender que para ir fijando a cada tren su parábola de frenado hasta la cola del tren anterior más su distancia de seguridad el enclavamiento tiene que ir recibiendo de

forma prácticamente continua la posición del tren anterior, e ir enviando al tren siguiente su parábola de frenado correspondiente. Hacer esto para todos los trenes en circulación en el enclavamiento en cuestión y a 100 m/s de velocidad cada uno supone tan enorme volumen de transmisión de información que no puede hoy llevarse a cabo con seguridad. Ni incluso a las velocidades más bajas de los trenes de Metro, del orden de 25 m/s es posible. Y aún menos si por motivos de seguridad y protección ante terrorismo y sabotajes, necesario por la errónea frecuencia elegida para la transmisión del ERTMS (la habitual de nuestra telefonía móvil GSM) es necesario poner en cada mensaje unos códigos cuyo descifrado tarda del orden de 3 a 5 o más segundos que suponen más de medio kilómetro en un tren de Alta Velocidad. Y el lector puede imaginar el problema que ocurre si, por cualquier causa, un tren tiene que retroceder o circular en sentido inverso durante siquiera unos pocos metros.

Al fracasar el cantón móvil en Londres y decidirse allí instalar otras soluciones más clásicas, Metro de Madrid continuó los trabajos en Madrid con el equipo de técnicos que en Londres no lo habían logrado terminar, y durante los años posteriores siguió trabajando en el sistema, hasta llegar a identificar los problemas y encontrar su solución.

La solución desarrollada por Metro de Madrid y en pruebas definitivas hoy en línea 11 es el llamado "Cantón Virtual", que elimina los problemas de la enorme e inabordable cantidad de información a transmitir que exige la solución de cantón móvil. Se basa en la extraordinaria idea de sustituir los cantones físicos de la vía por unos cantones virtuales, que pueden tener la longitud tan reducida como se desee, y que en la práctica actúan como un cantón móvil, pero con la simplificación de que el sistema solamente tiene que enviar a cada tren las parábolas de frenado correspondientes al cantón posterior al tren anterior. El cantón virtual se reduce así a una sencilla base de datos de manejo extraordinariamente sencillo. El sistema se basa en la normati-

va CBTC (Communications Based Train Control), que con otras tecnologías está en servicio en Nueva York, San Francisco y alguna otra ciudad de USA, París, Lyon, Kuala Lumpur, Hong Kong, Singapur y Ankara entre otras ciudades. El sistema CBTC de cantón virtual, que proporciona mayor capacidad que el resto de soluciones, ha sido desarrollado por los jóvenes Ingenieros de Metro D. Carlos Rodríguez y su equipo, de la Unidad de Ingeniería, junto con el equipo de ingeniería de la empresa Dimetronic. Como está siendo objeto de publicaciones detalladas en las revistas especializadas no nos extendremos más aquí sobre el sistema. Baste decir que líneas como la 3 o la 6, en las que hoy hay en hora punta un determinado número de trenes por sentido puede llegarse a poner más del 50% de trenes por sentido en hora punta, con un aumento de capacidad proporcional. El único límite es el tiempo de parada, es decir, la bajada y entrada de viajeros y apertura y cierre de puertas, y obligar a que los trenes nunca esperen en el túnel para comodidad del pasaje.

Independientemente de este sistema de cantón virtual, Metro de Madrid adjudicó a la empresa Bombardier la implantación de otro sistema CBTC en Líneas 1 y 6. Cuando este sistema esté implantado en la línea 6 con los nuevos trenes recientemente pedidos (que sustituyen a los viejos coches 5000 1ª serie de 33 años de edad) y toda la línea funcione con trenes de 1272 viajeros de capacidad, la línea será capaz de mover 47 trenes en total, de transportar 22.700 viajeros/hora/sentido, y el intervalo entre trenes será de 120 segundos aproximadamente.

2. Sistema y algoritmo básico de optimización semiautomática de la capacidad de una línea ferroviaria

El objetivo de este algoritmo consiste en dimensionar de forma semiautomática la distribución de circuitos de vía (en tamaño y número) de una línea, para obtener la capacidad óptima posible en ella. Dotando al sistema de una configuración inicial con las características tanto del tren como del trazado de la línea y de su sistema de señalización, el sistema devuelve una solución, a partir de la cual el usuario puede modificar las variables iniciales y observar la variación de dicha solución. Los cálculos de optimización de la capacidad de la línea contemplan a su vez el estudio de distintos parámetros como:

- Velocidad de los trenes, que debe ser la mayor posible para que el tiempo de recorrido de la línea fuese el menor posible.
- Intervalo entre trenes en las estaciones, que también debe ser el mínimo posible.

Se analiza la influencia de ambos parámetros en la capacidad de la línea. Si el propósito del algoritmo fuese únicamente aumentar la capacidad de la línea, la solución pasaría por minimizar el intervalo entre trenes, pero el óptimo de este planteamiento llevaría a una situación de explotación de la línea absurda, donde la solución consistiría en tener un gran número de trenes en la línea y que éstos fueran lo más despacio posible. De este modo, la capacidad de la línea sería mayor, pero el tiempo de recorrido de la línea sería también mayor, así como el consumo energético y el número de trenes necesario. Si el objetivo fuese que los trenes circularan a la máxima velocidad permitida por los límites de la infraestructura para que el tiempo de recorrido de la línea fuese el menor posible, obviamente se necesitarían menos trenes que irían a mayor velocidad, y por consiguiente, aumentaría el intervalo entre trenes por cuestiones de seguridad en la frenada y disminuiría la capacidad de la línea. Por tanto la optimización de la capacidad de la línea debe llegar a una solución de compromiso entre estos parámetros.

Por otra parte, la situación ideal de explotación de la línea sería que la evolución de los trenes llegara a un estado de régimen permanente estable, para que no hubiera zonas de estancamiento en la línea, donde los trenes se acumularían y tuvieran que estar parados o circular a velocidad reducida. Para resolver el problema el algoritmo pasa a considerar como objetivo inmediato que los trenes no se vean afectados por la circulación de los trenes que les preceden.

El algoritmo tiene en cuenta otros condicionantes tales como la distancia entre estaciones, existencia de agujas o aparatos de vía, circuitos de vía fijados y el número y los tamaños máximos y mínimos de los circuitos de vía. Además el sistema de señalización elegido (ATP por códigos de velocidad, ATP por distancia objetivo, CBTC o cantón virtual) impone sus propios condicionantes. En resumen, este algoritmo está orientado a dar el mejor servicio posible en la línea (conjunción de los dos factores: mínimo tiempo de recorrido e intervalo de línea) con el menor número de trenes posible.

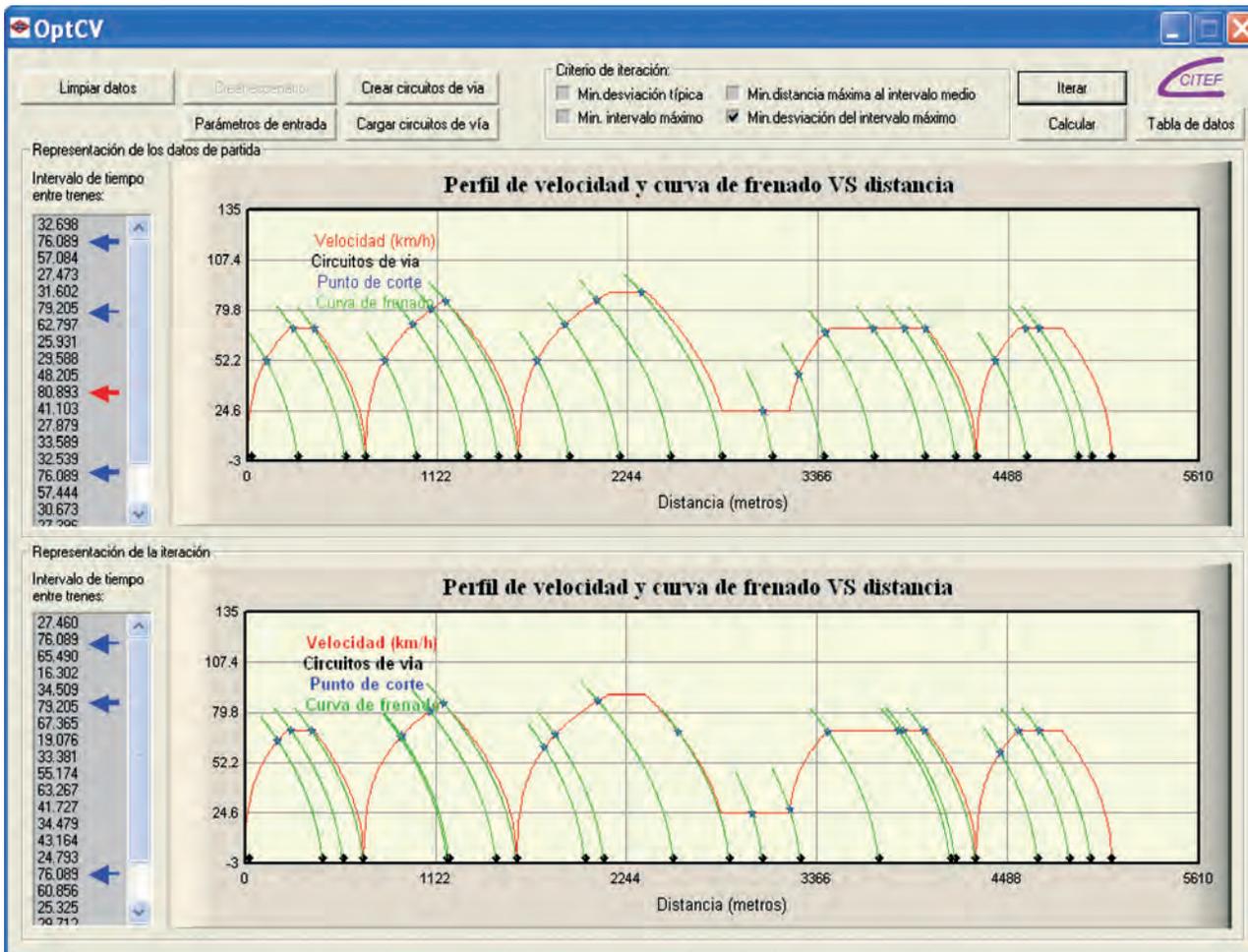


Fig. 4.

3. Auscultación dinámica de vía

Como el lector sabe, las deformaciones y defectos de la vía en balasto deben corregirse inmediatamente, pero para corregirlos hay que conocerlos. La compra de un tren auscultador es una enorme inversión, que hasta la reciente puesta en servicio del tren auscultador de Metro de Madrid en España sólo había realizado RENFE en nuestro país. Pero los defectos más importantes de la vía pueden obtenerse de forma más sencilla sin tener que hacer esta gran inversión, y la forma ideal es hacerlo sin crear ningún obstáculo a la explotación comercial, al movimiento de pasajeros. Por ello las medidas suelen hacerse por la noche, tras el cierre de la red, pero si el último tren entra a dormir en cocheras sobre la 1:30 h de la noche y el primero sale de cocheras al servicio a las 5:00 de la mañana el tiempo de trabajo útil para auscultación y mantenimiento de la infraestructura es demasiado escaso.

Para evitar estos problemas Metro de Madrid desarrolló ya hace 10 años en 1998 con el Catedrático D. Germán Giménez, Director del equipo de ingeniería del fabricante CAF, un sencillo sistema de medida de defectos de vía, montando los sensores de defectos en dos unidades de servicio comercial, una de gálibo estrecho serie 2700 y otra de gálibo grande serie 6000. Estos sensores son fundamentalmente acelerómetros que miden las aceleraciones verticales y horizontales que sufre el tren al circular por la vía, medidas tanto en la caja de grasa del eje como en la caja de pasajeros. Estos sensores, y otros adicionales, mandan la información a un sencillo ordenador portátil a bordo, y el sistema permite así identificar los defectos de vía por métodos dinámicos y prácticamente sin coste. Se conoce así la interacción dinámica vía - tren mediante sistemas de auscultación inerciales y esto permite además conocer el verdadero confort que siente el cliente en condiciones reales de explotación.

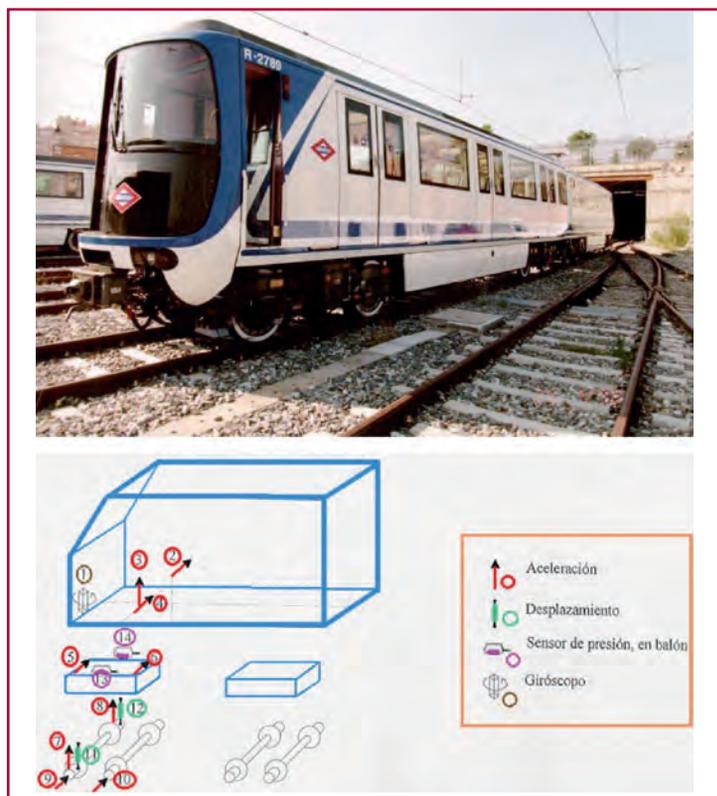


Fig. 5. Sensorización de una unidad comercial. El coste es despreciable, y los resultados obtenidos son similares a los de un tren auscultador dinámico de varios millones de euros.

Actualmente los coches están sensorizados con acelerómetros de tipo piezoeléctrico o capacitivo en los tres niveles de amortiguación siguientes:

Nivel sensorizado	Amortiguación existente
Caja de grasa	Nula
Bogie	Primaria
Caja de viajeros	Primaria + Secundaria

Además, la sensorización se completa con el siguiente equipamiento:

- Sensores de desplazamiento tipo LVDT: Utilizados para medir las deformaciones de la amortiguación primaria.
- Giróscopo: Ubicado a nivel de caja de viajero, identifica la ubicación del tren en la red mediante la comparación de la traza teórica con la señal que aporta.
- Sensores de presión: permite estimar la sobrecarga del coche durante la medida.

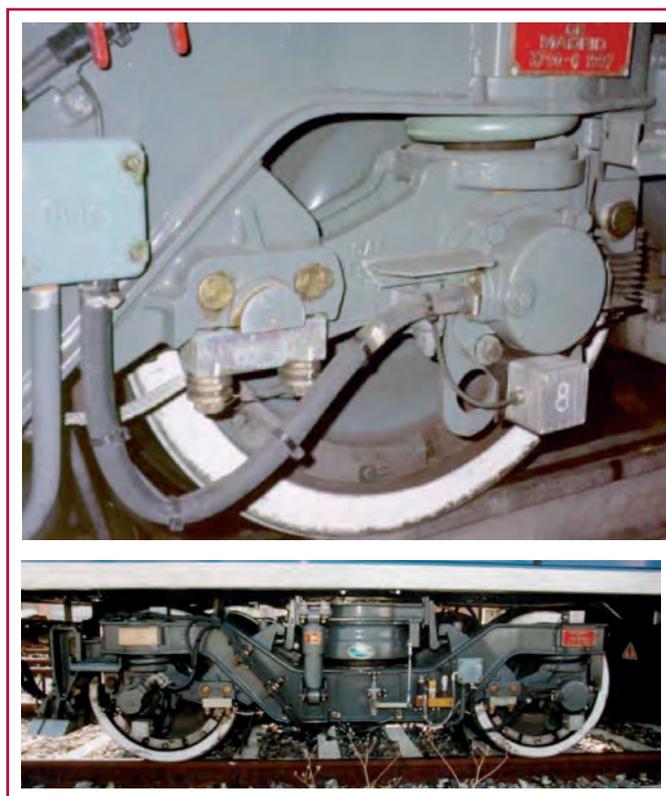


Fig. 6. Detalles de colocación de los sensores.

Los sensores instalados y su rango de medida se indican en la tabla 1.

Todos los sensores están conectados a una tarjeta de conversión analógico - digital, modelo modelo DaqBook 112, con 16 canales y una resolución de 12 bits. Los datos son volcados a PC con cadencia de 1 m., utilizando el programa DasyLab. Estos datos son comparados bien con valores límite permitidos bien con históricos.

Tabla 1

Unidades	Sensores	Parámetro de medida	Rango
V	1	GIROSCOPO	-
m/s ²	2	Acelerómetro Lateral Caja de Viajeros	2 g
m/s ²	1	Acelerómetro Vertical Caja de Viajeros	2 g
m/s ²	2	Acelerómetro Lateral Bogie	2 g
m/s ²	2	Acelerómetro Vertical Caja de Grasa	5 g
m/s ²	2	Acelerómetro Lateral Caja de Grasa	5 g
mm	2	Sensores LVDT amortiguación primaria	+/- 25 mm.
bar	2	Sensores de Presión	10 bar

UNIDAD SERIE 2700



ACELERÓMETRO CAJA DE GRASA



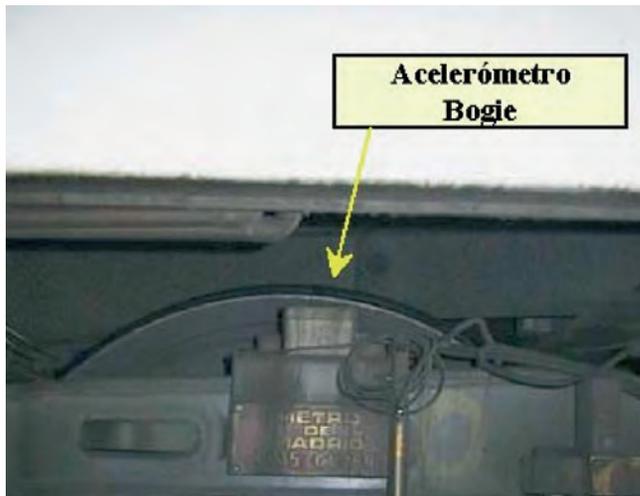
LVDT AMORTIGUACIÓN PRIMARIA



UNIDAD SERIE 6000



ACELERÓMETRO BOGIE



ZONA DE CONTROL EN CABINA



Fig. 7. Otros sensores en unidades comerciales.

4. Auscultación geométrica de vía

Además de la identificación de los defectos de vía por métodos dinámicos, es necesario conocer en detalle la geometría de la vía, fundamentalmente el perfil longitudinal exacto, la geometría de la planta, el ancho de vía y sus variaciones, el peralte y el alabeo. Para ello Metro de Madrid diseñó y patentó también en 1998 un carro de movimiento manual que va recogiendo todos estos parámetros con la precisión necesaria y los vuelca al ordenador portátil que lleva a bordo.

El sistema está constituido por diversos sensores instalados sobre una estructura muy ligera que puede ser fácilmente desplazada de forma manual por la vía, y que registra de forma continua los parámetros geométricos de la vía (ancho de vía, peralte, alabeo, pendiente, inclinación del carril y radio de curvatura) así como la distancia recorrida y la regularidad de la superficie de rodadura del carril. Dispone además de un sistema con el que puede medirse con gran precisión el perfil longitudinal de la cabeza del carril respecto a la cota de inicio de la medida, integrando su pendiente puntual instantánea en el intervalo de distancia o lectura elegido (p.ej, 10 o 25 cm). La ligereza del carro, unido a la posibilidad de ser desmontado en piezas para su transporte, lo hace especialmente útil para la auscultación de vías en las que, por no tener conexión férrea con la Red (zonas de ampliación, etc), no es posible acceder con un vehículo ferroviario. Por otra parte su ligero peso permite comprobar las vías montadas antes de su hormigonado y reajustarlas si es necesario.

El equipo dispone de los 12 sensores para la medida de los distintos parámetros que se reflejan en la tabla 2.

Todos estos sensores están conectados a una tarjeta de conversión analógico/digital de 16 canales,



Fig. 8. Carrito manual de medida de geometría de vía.

Tabla 2

Sensor	Parámetro	Descripción
1	Ancho de vía	Se obtiene mediante un eje telescópico en contacto continuo con los bordes activos del carril. Un LVDT registra las variaciones de ancho de vía con precisión de décimas de milímetro. Sistema similar al clásico de RENFE pero en continuo y registrando los datos.
2	Alabeo	El diseño del carro permite medir el alabeo de forma directa (no como diferencias de peralte, lo que suele ser habitual) mediante la medición con una LVDT de la distancia relativa entre el eje delantero y resto de estructura, que tienen libertad de movimientos.
5	Tilt del carril, 1/20 izquierdo	Es el único parámetro que se obtiene de forma puntual. Una vez detenido el carro se despliega un eje con unas piezas móviles que se ajustan al perfil del carril, según la normativa de RENFE. Está construido de forma que un sensor LVDT mide la distancia a un punto determinado de dicha pieza, obteniendo el ángulo de inclinación del carril.
6	Tilt del carril 1/20 derecho	Igual al anterior.
7	Rugosidad carril lza.	Se obtiene mediante una LVDT que registra el desplazamiento vertical del brazo que sujeta la rueda contadora, al ir ésta apoyada sobre el carril.
8	Rugosidad carril Dcho.	Igual al anterior.
9	Peralte	Se obtiene mediante un inclinómetro de precisión. El programa hace la conversión en mm.
10	Perfil longitudinal	Mide la pendiente longitudinal media de la vía, mediante un inclinómetro de precisión. La aplicación hace la conversión a mm/m.
11	Pendiente carril lzdo.	Mide la pendiente longitudinal del carril izquierdo, mediante un inclinómetro de precisión.
12	Pendiente carril Dcho.	Igual al anterior. La integración de estas pendientes con el intervalo de muestreo permite obtener el perfil longitudinal de los dos hilos con una gran precisión
15	Longitud carril lzdo.	Se obtiene mediante una rueda fónica de 2.048 pulsos por vuelta instalada sobre una rueda calibrada que gira sin deslizar según avanza el carro.
16	Longitud carril Dcho.	Igual al anterior.

SENSORES DE INCLINACIÓN



SENSORES DE RUGOSIDAD Y R. FÓNICA



Fig.9. Detalles del carrito manual de medida de geometría de vía.

siendo la información transmitida al PC portátil (modelo Fujitsu N-600SP) mediante un puerto serie RS-232.

Todo el equipo es alimentado mediante una tensión de 24 v. suministrada por dos baterías de 12 v. conectadas en serie. Las baterías son recargadas mediante un cargador incorporado, que se alimenta directamente desde la red de 220 v.

El equipo lleva asociada una aplicación informática funciona bajo el sistema operativo Windows y que tiene las siguientes posibilidades:

- Salvar en soporte magnético la información registrada para su posterior tratamiento en ficheros tipo ASCII.
- Parametrización y calibración de sensores y proceso de toma de datos.
- Visualización, en tiempo real, de los valores de los distintos parámetros registrados.

5. El nuevo tren auscultador

Desde primeros de 2008, se encuentra en servicio operativo el nuevo tren auscultador de instalaciones de Metro de Madrid, que resume y agrupa los resultados del esfuerzo que Metro de Madrid lleva realizando desde 1995 en Investigación Ferroviaria. Se ha transformado integralmente una unidad serie 2000 MR incorporándole convertidores estáticos de potencia para circular por líneas de 600 y 1500 v, así como doble pantógrafo para auscultar líneas de gálibo ancho y gálibo estrecho.

Este vehículo actualmente se utiliza como sistema de control geométrico y de desgaste del hilo de trabajo

de la catenaria, control geométrico del carril, detección predictiva por termografía de puntos calientes y a lo largo de 2008 se terminará de instalar el sistema de auscultación de señales de ATP y ATO, radiotelefonía y la incorporación de una central termométrica y de análisis de gases a bordo.

Efectivamente, una de las apuestas más importantes que se hizo en Metro de Madrid al tomar posesión el Gobierno de la Comunidad de Madrid en Junio de 1995 fue el desarrollo y el avance tecnológico de la Compañía. Trece años después, la Compañía es uno de los líderes tecnológicos ferroviarios más prestigiados entre los Metros del mundo, y el avance continúa. En el momento de escribir estas líneas, Febrero de 2008, los Ingenieros jóvenes incorporados en los últimos años a la Compañía siguen desarrollando numerosos trabajos de investigación, que se concretarán próximamente en la lectura de 9 Tesis Doctorales en Ingeniería de Caminos y 6 en Ingeniería Industrial en la Universidad Politécnica de Madrid y en la UNED. Estos avances tecnológicos han supuesto una mayor mecanización de los trabajos de

Fig.10. Nueva unidad auscultadora.



demotek



DEMOLICIONS TÈCNIQUES TEL. 937 070 248 / WWW.DEMOTEK.ES

tr *ma*
TECNICAS REUNIDAS
Infraestructuras y Medioambiente



INITEC
INFRAESTRUCTURAS



Tranvía de Campello. Alicante.



Desaladora Rambla Morales. Almería.

AL SERVICIO DE SU CIUDAD

Más de 300 especialistas en las áreas de Aeropuertos y Transporte Aéreo, Puertos y Costas, Transporte Terrestre, Arquitectura, Edificación y Urbanismo, Ecología e Hidráulica

- Con gran diversificación de clientes y proyectos
- Más de 200 millones de euros de construcción de obras en curso
- Más de 100 contratos de servicios de ingeniería en vigor
- Más de 600 millones de euros de cartera de explotación

Rafael Calvo 3-5. 28010 MADRID. Tfno.: (34) 91 592 39 00. Fax: (34) 91 592 39 01/02. www.tecnicasreunidas.es

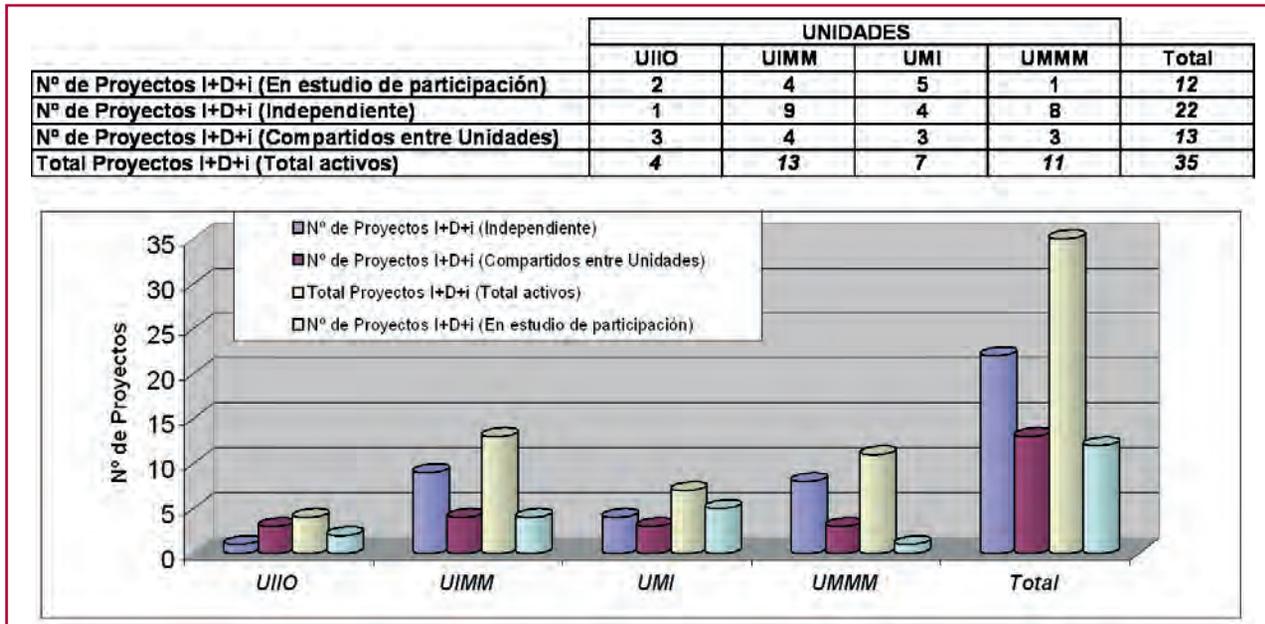


Fig. 11.
Proyectos de investigación de Metro de Madrid.

mantenimiento de instalaciones fijas, y una enorme reducción de los correspondientes costes. Los costes de mantenimiento de instalaciones fijas en 1995, con 120 km de red, fueron de 30,9 millones de euros (unos 39.1 millones en euros de hoy), mientras que en 2003, para 178 km de red (no cuenta Metrosur ni el resto de las últimas ampliaciones por estar aún en garantía) fue de 39.5 millones de euros. En 2007, con cerca de 300 kms de red, han sido de tan solo 59,6 Millones de euros. Estos avances tecnológicos y su aplicación al mantenimiento de las instalaciones suponen por tanto cada año un ahorro de unos 100.000 euros por kilómetro y año.

Los desarrollos más importantes realizados en estos últimos doce años han sido los que se citan a continuación. No se incluyen en esta relación algunos otros desarrollos, como el nuevo e importantísimo tren de materiales compuestos que se está desarrollando en estos momentos para reducir peso y consumo de energía eléctrica, ni los sistemas de detección de fisuras o defectos en los carriles y otros muchos proyectos en curso. En la siguiente tabla se relacionan los proyectos de I+D+i en la actualidad que totalizan 35 en curso y 12 en estudio.

6. Auscultación de infraestructura

Metro de Madrid ha desarrollado también hace ya 10 años y está aplicando habitualmente un sistema de inspección de las infraestructuras, túneles, estacio-

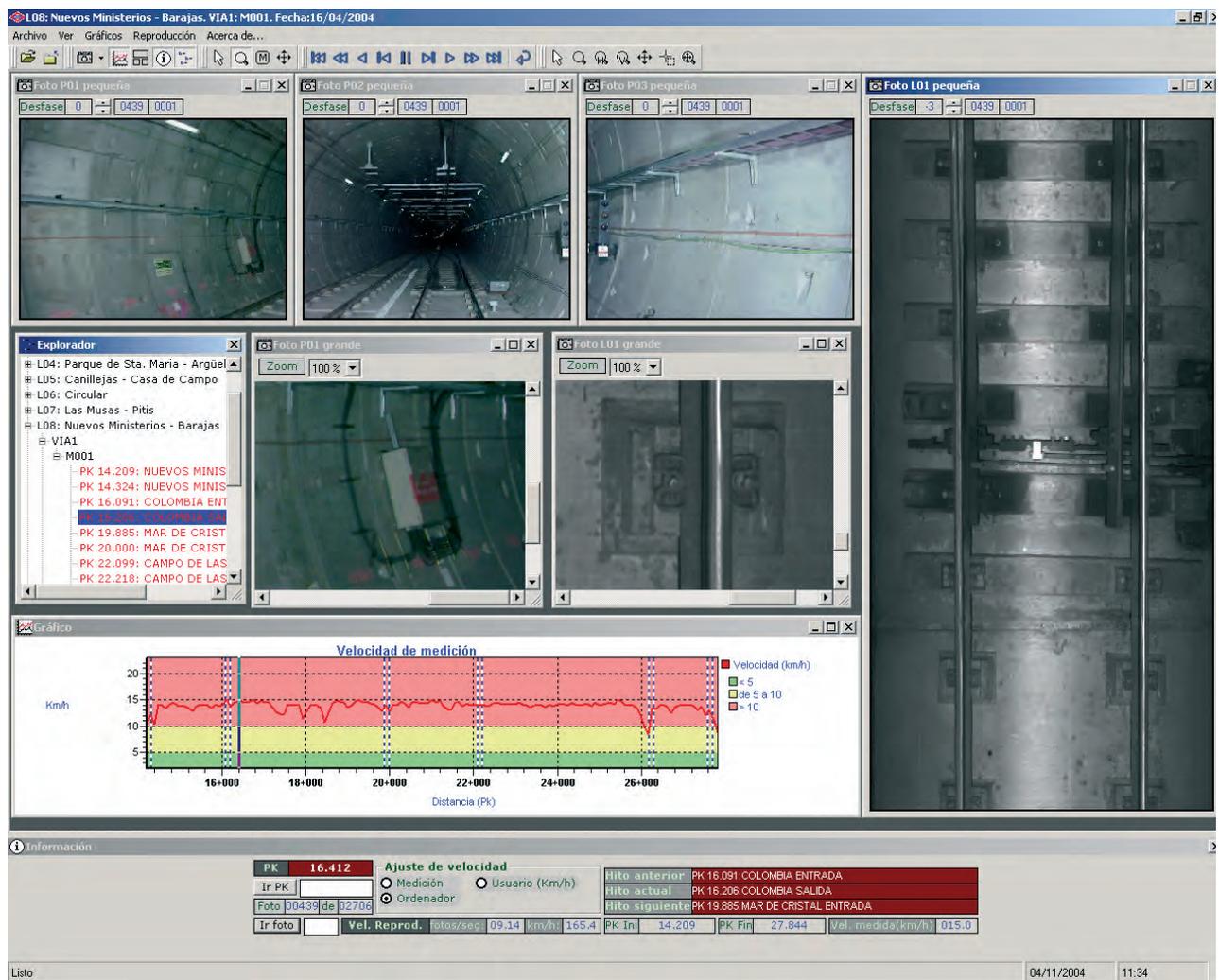
nes y vía, que ligado a un GIS y a un sistema de posicionamiento permite visualizar en la mesa de trabajo cualquier tramo de la red. Las imágenes, frontal e inferior, se recogen en video digital de alta resolución y, una vez procesadas y geocodificadas, permiten estudiar el estado de cualquier tramo de la red en cualquier momento desde el propio despacho.

Los túneles son, sin lugar a dudas, la parte de la infraestructura que se proyecta para que su vida útil sea lo más larga posible. En el caso de Metro de Madrid la acción que más envejece a los túneles es el agua existente en el terreno que, entre otros, es causa de los siguientes problemas:

- Deterioro de la obra de fábrica.
- Desprendimiento de enfoscados.
- Filtraciones que afectan a instalaciones como la línea aérea y la vía

El agua provoca un lento deterioro del túnel, pero además existen otros fenómenos que pueden afectarles a medio o incluso corto plazo. Entre éstos destacan las obras ajenas a Metro, que durante alguna de sus fases constructivas llegan a afectar a los túneles, carbonatación (es decir, ataque de la obra de fábrica por CO₂, al quedar ésta expuesta a la atmósfera por la pérdida del revestimiento del túnel), posibles causas naturales, etc. Por todo ello se decidió en 1996 proyectar y construir una herramienta que permitiera realizar una captación periódica de

Fig. 12. Software de control de las infraestructuras.



imágenes digitales de los túneles para la vigilancia de éstos por personal técnico desde gabinete. El equipo está compuesto por los sistemas de captación de imágenes, el rack de control y el software de proceso. El sistema dispone de tres cámaras, que enfocan a los hastiales, bóveda y vía, respectivamente. Para disponer de una alta calidad de imagen en parada con el fin de poder estudiar detalles se optó por cámaras de vídeo digital no entrelazado. La resolución de estas cámaras, que alcanzan los 1.280 x 960 píxeles, junto con sus 16 millones de colores, hace que ofrezcan una alta calidad de imagen. La iluminación finalmente utilizada se ha obtenido gracias a focos alógenos HMI con un total de 8.000 w. de potencia. Como complemento, el sistema dispone de una cámara lineal de alta resolución que graba una imagen continua de la infraestructura de vía, con una cadencia de 2 mm.

Por su parte, el rack de control (PC + sistema de comunicaciones) está programado para poder registrar imágenes con una cadencia de 10 m., aunque capaz de registrar a menor distancia. Estas imágenes son captadas por cada una de las cámaras de forma continua y guardadas en formato digital en un PC.

Por último, se ha desarrollado una aplicación informática específica para la gestión del total de la información registrada. Esta aplicación dispone de una arquitectura tipo Windows en donde el usuario con ayuda de menús, es capaz de elegir cualquier tramo de la red y visualizar en formato vídeo la secuencia de las imágenes. La aplicación permite, entre otras opciones, efectuar paradas de imagen, ampliaciones de detalle y, por supuesto, copiar imágenes hacia otros programas. Quizá la opción existente de mayor potencia es la ubicación, sobre fotografías aéreas de Madrid, de la topografía de las instalaciones de Metro. Esto es posible gracias

a que se dispone de la topografía de todas las instalaciones en coordenadas UTM. Esta aplicación permite también visualizar de forma conjunta con las imágenes de vídeo, los registros obtenidos con los sistemas de auscultación dinámica de vía.

El poder disponer de la imagen digital de la vía y la infraestructura y ver simultáneamente, por ejemplo, las aceleraciones verticales y laterales en caja de grasa, permite identificar los defectos y ver inmediatamente si se trata de un aparato de vía, de una sujeción dañada o de cualquier otra causa.

7. La catenaria rígida del Metro de Madrid

Entre los diversos sistemas de captación de corriente eléctrica para tracción ferroviaria cabe citarse la captación por tercer carril tradicional, por tercer carril aéreo, por suspensión tranviaria y por línea aérea de contacto –o catenaria– flexible. Realmente

una catenaria ferroviaria clásica, con su cable sustentador, el hilo de contacto, las péndolas que le sostienen y las poleas y contrapesos necesarios hacen que parezca una vieja invención de Julio Verne del siglo XIX más que un método actual y racional de alimentar a los trenes, especialmente en la Alta Velocidad. Ver circular un tren con catenaria clásica permite ver la enorme cantidad de despegues del pantógrafo y las rístras de chispas eléctricas que acompañan su movimiento dañando el hilo y las pletinas del pantógrafo. El lector puede ver muy bien el fenómeno situándose sobre un paso superior de cualquier AVE o estudiando el video del reciente record del TGV Alston V-150 en Abril de 2007. Además el mantenimiento de este tipo de catenaria con su ajuste de las péndolas, el control de todos los cables y sistemas, es de una complejidad y un coste enorme. Por el contrario el sistema de captación por tercer carril aéreo, también conocido como *catenaria rígida*, presenta las ventajas de sencillez, robustez, disminución de incidencias

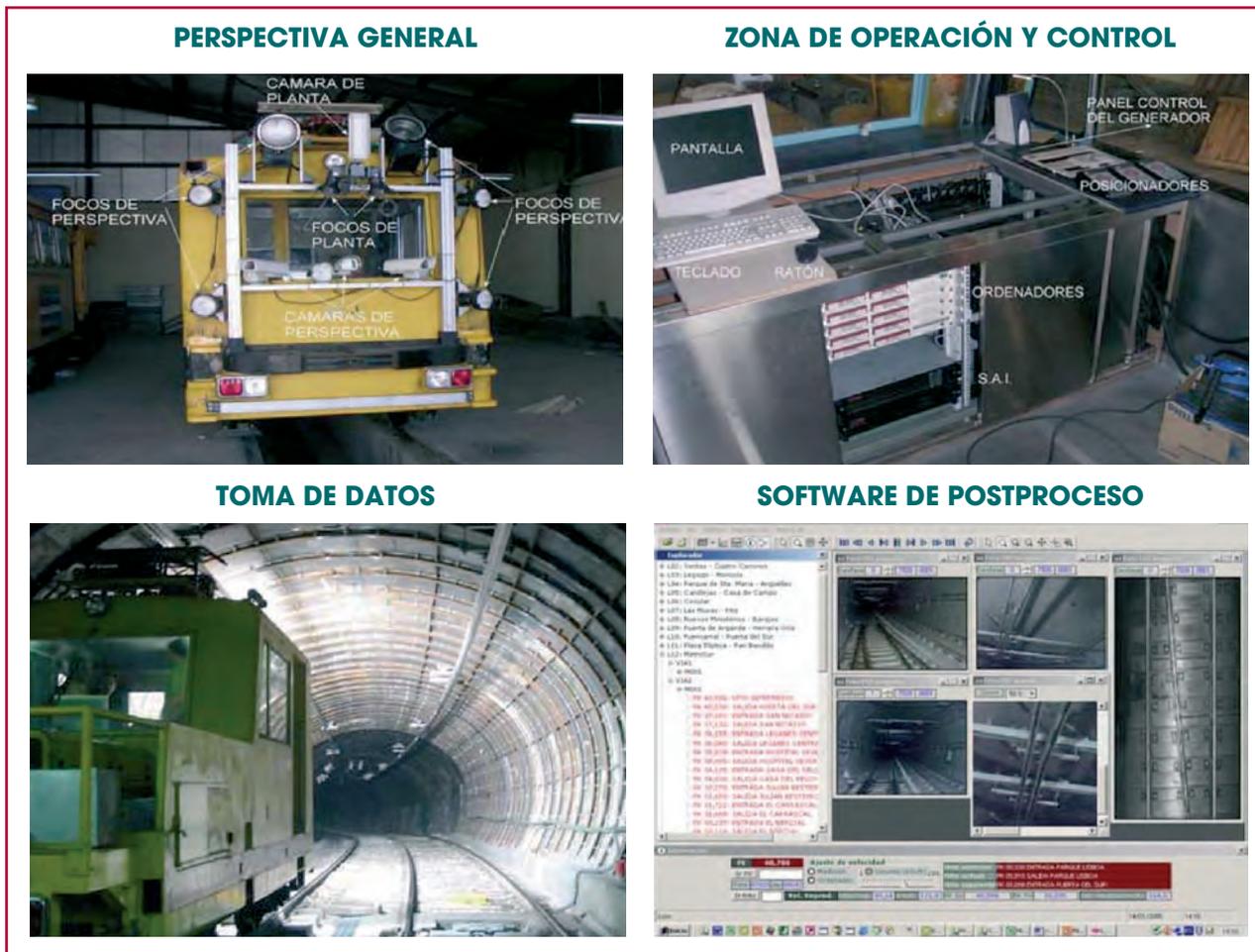


Fig. 13. Sistemas de captación y proceso de imágenes de las infraestructuras.

sobre la explotación, facilidad de mantenimiento y muy bajos costes de mantenimiento, y ello sin los riesgos de contacto accidental que presenta el tercer carril convencional que puede verse en algunos Metros. Debido a estas ventajas desde el siglo pasado se han ido desarrollando distintos tipos de catenaria rígida. A partir de dicho desarrollo, surgen distintos perfiles que básicamente están constituidos por un carril hueco de aluminio extrusionado que sujeta a un hilo de cobre. En la figura se expone una sección del perfil convencional más utilizado hoy en día.

A pesar de las grandes ventajas de este tipo de catenaria, sus inconvenientes siguen siendo importantes y se resumen en: bajas velocidades de circulación, distancia entre los soportes muy pequeña y dificultad para ser instalada en exteriores. Esto, unido a que el coste de mantenimiento de una catenaria clásica es hoy enormemente elevado, llevó a Metro de Madrid ya en 1996 a estudiar el desarrollo, fabricación y montaje de una catenaria rígida que evitara por una parte los elevados costes de mantenimiento de la cate-

naría clásica y por otra el pago de royalties por patentes exteriores de las catenarias rígidas existentes en el mercado. La catenaria se proyectó por Metro de Madrid en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid, se fabricó, ha sido patentada por Metro de Madrid, y está actualmente en servicio en numerosas líneas, y montándose en todas las de nueva construcción. En el próximo año se cambiará la catenaria clásica de toda la línea 6 por este nuevo modelo, dado el inmejorable resultado que se está obteniendo.

El nuevo tipo de perfil proyectado mejora notablemente el comportamiento de los desarrollos anteriores. Se han desarrollado también todas las piezas auxiliares a la catenaria, por lo que se ha aprovechado para mejorar sus características técnicas y mantenibilidad, así como el desarrollo de una pieza de sección o sectorización que ha sido objeto de patente al igual que el perfil de catenaria rígida tratada. Para el desarrollo del nuevo perfil se ha recurrido al uso de modelos de simulación. Se han realizado modelos de alto ni-



Fig. 14. Catenaria rígida comercial.

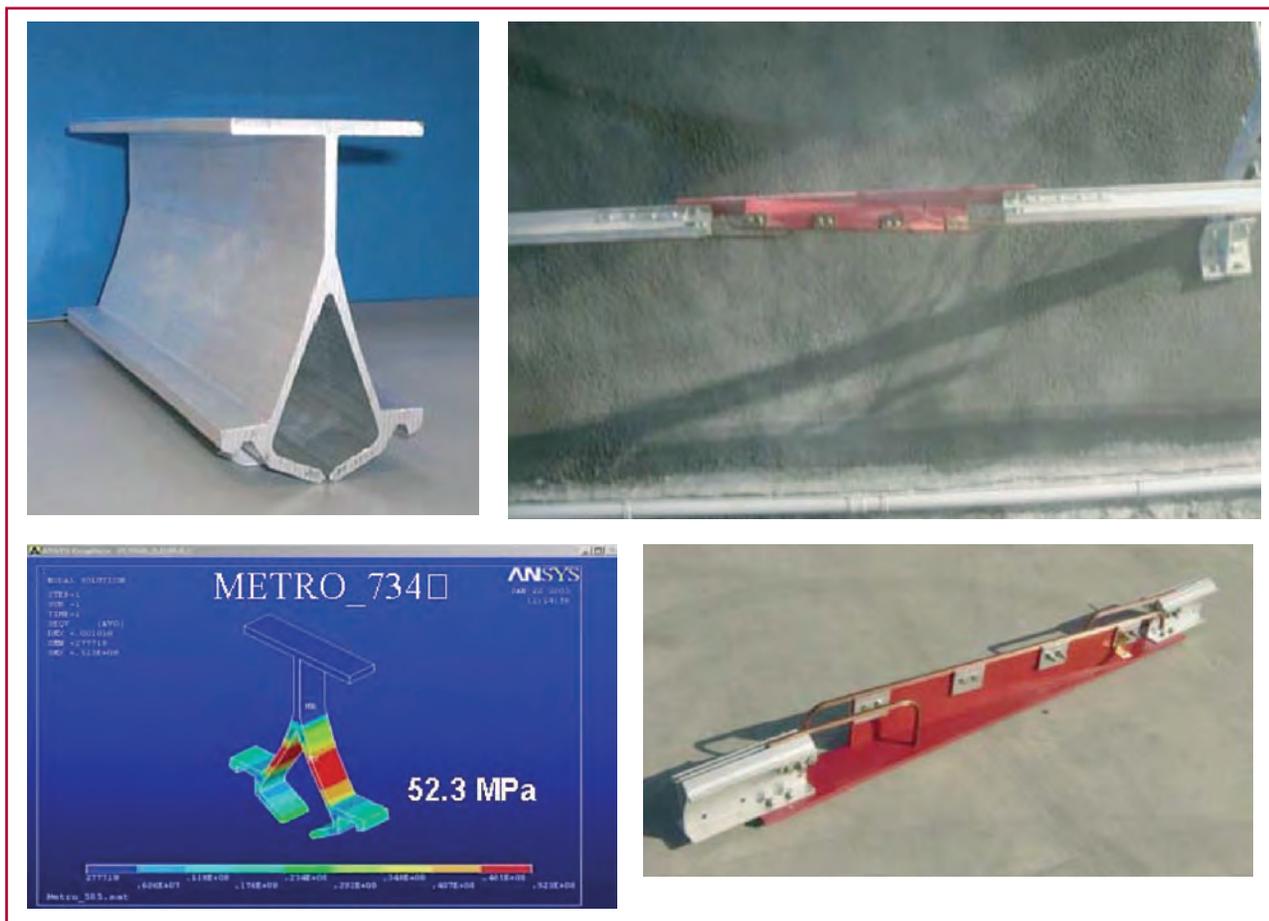


Fig. 15. Nueva catenaria rígida de Metro de Madrid.

vel de detalle de los posibles perfiles de catenaria así como de los pantógrafos y se ha realizado una validación de los modelos en perfiles de catenaria reales. El nuevo perfil de Metro ha permitido aumentar la velocidad de circulación en un 25 % y la distancia entre apoyos en un 20 % comparándolo con una catenaria rígida convencional.

En cuanto a los principales desarrollos de piezas auxiliares, cabe destacar las bridas de sujeción de los perfiles de forma que para su montaje correcto no es preciso el uso de llaves dinamométricas, realizándose el centrado de pieza de forma automática. Así mismo se ha desarrollado un nuevo aislador de sección mucho más simple que los existentes en el mercado, por lo que se reduce el coste de adquisición, montaje y mantenimiento del mismo.

Esta catenaria rígida de Metro de Madrid ha sido objeto de una brillante Tesis Doctoral por la Dra. Ingeniera Industrial Jennifer Paulin, quien recientemente ha recibido por ello el Premio Comsa a la Investigación ferroviaria en la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Naturalmente, una vez probada y en servicio satisfactorio, esta nueva catenaria rígida fué puesta por el primer autor ⁽¹⁾ a disposición completa del Ministerio de Fomento (RENFE y ADIF) sin coste alguno, por ser un desarrollo pagado con el dinero de los contribuyentes españoles. Este ofrecimiento se hizo tanto al anterior equipo directivo como al actual antes y después de 2003, pero lamentablemente no se ha recibido ni siquiera un acuse de recibo ni contestación, y pese a tener disponible este desarrollo propio, en las obras del Ministerio como en el túnel del AVE de Sants se ha instalado una catenaria comercial por la que se pagan royalties y en la que por tener menor inercia vertical, el número de cuelgues es más elevado.

Esta catenaria de nueva concepción puede evolucionar muy fácilmente para utilizarse en velocidades superiores a 220 y hasta 300 km/h.

8. Auscultación de catenaria

Metro de Madrid ha desarrollado y patentado también en estos últimos años un sistema de medida del desgaste del hilo de contacto que evita el tener

(1) Escritos de 2 de diciembre de 2004 con muestra, 24 de enero de 2007 y otros anteriores.

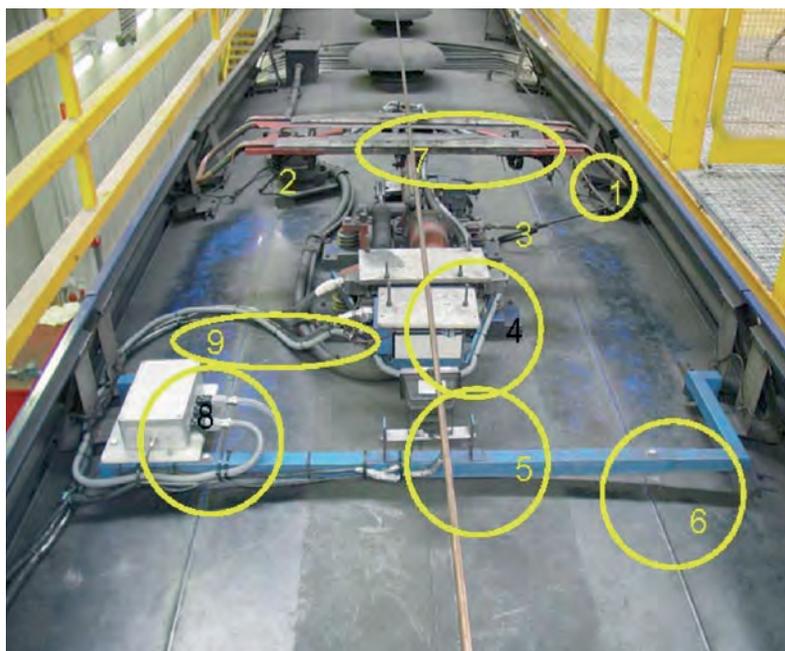


Fig. 16. Auscultación de catenaria en Metro de Madrid. 1. Células de carga. 2. Acelerómetros de mesilla. 3. Sistema potenciómetro. 4. Acondicionador de techo + batería + acelerómetro de caja. 5. Cámara + foco infrarrojos. 6. Soporte de cámara. 7. Sistema de detección de desgaste. 8. Acondicionador del desgaste. 9. Comunicaciones del techo con cabina.

que hacerlo manualmente como se venía haciendo tradicionalmente. En paralelo al desarrollo del nuevo perfil de catenaria rígida, se ha desarrollado un pantógrafo completamente sensorizado. El objetivo de dicho desarrollo era dotar a un pantógrafo convencional de los sistemas apropiados para poder evaluar el comportamiento del contacto pantógrafo – catenaria y posteriormente suministrar información al departamento de mantenimiento acerca del estado de la interacción de la catenaria con el pantógrafo. Dicho pantógrafo está preparado para la toma de los siguientes parámetros:

- Medición de la vibración de la mesilla. Para ello se dota al pantógrafo de acelerómetros en la mesilla.
- Medición de la fuerza de contacto pantógrafo–catenaria, para lo cual se han montado células de carga en la suspensión de la mesilla.
- Medición de la altura de la mesilla mediante el uso de un potenciómetro de precisión montado en la base del pantógrafo.
- Grabación con cámara infrarrojos.

Al objeto de aislar eléctricamente el pantógrafo y resto del tren, se ha montado una batería y un pequeño rack en el mismo pantógrafo, de forma que las se-

ñales se transmiten a la cabina de conducción, mediante el uso de fibra óptica. Esto ofrece además la ventaja adicional de que la señal es completamente inmune a las interferencias electromagnéticas.

Se han desarrollado además una serie de acelerómetros, dotados de salida en fibra óptica, destinados a ser montados sobre los perfiles de catenaria rígida. Estos acelerómetros se utilizan para analizar las vibraciones inducidas de la catenaria al paso del tren. La sensorización de pantógrafo ha sido parte asimismo del proyecto de "tren inteligente" desarrollado en una de las tesis doctorales antes citadas.

9. Determinación del desgaste de la pletina de Pantógrafo

La pletina o frotador del pantógrafo de los trenes está en contacto con la catenaria constantemente excepto cuando el tren se encuentra en depósito. Debido a la fricción entre la pletina en movimiento y la catenaria, se produce un desgaste en la superficie de la pletina, lo cual obliga a reemplazarlas cada cierto tiempo. La primera fase de este proyecto se ha centrado en la determinación del desgaste en los pantógrafos correspondientes a la serie 7.000. En estas líneas y con este tipo de trenes la catenaria puede oscilar $\pm 20\text{cm}$. del centro, produciéndose un desgaste en forma de V. En una instalación de las cocheras que Metro de Madrid dispone en Cuatro Vientos, se ha montado una instalación basada en una luz fluorescente y una cámara. La ubicación del punto de iluminación y la cámara, permite obtener una imagen del reflejo de la parte superior de la pletina, bastante diferenciada del resto de los elementos del tren.

El proceso de tratamiento de imágenes consiste en varios pasos:

- Captura de la imagen
- Filtrado y umbralizado de la imagen
- Heurísticas de detección del pantógrafo en la imagen (en caso de no detectarse, no se continúa el proceso)
- Detección del área de interés (zona de la pletina, mediante máscaras)
- Filtros de obtención de contornos
- Filtro de obtención de bordes (determinar bordes de la pletina)

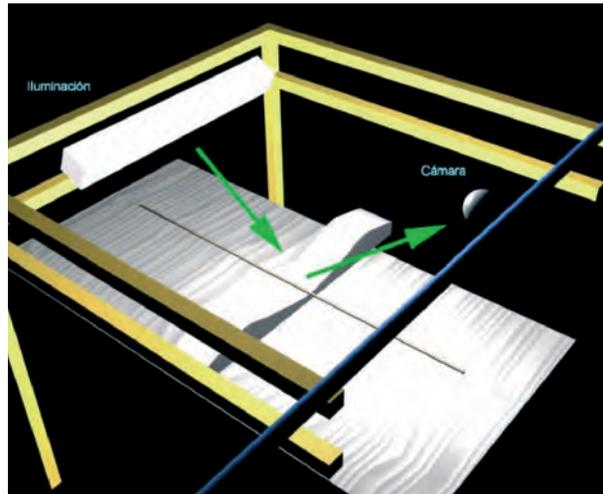


Fig. 17. Estudio de desgaste de pletinas de pantógrafo en Metro de Madrid.



Fig. 18. Estudio de desgaste de pletinas de pantógrafo en Metro de Madrid.

- Filtrado de ruidos y zonas de huecos (en los laterales y en la posición de la catenaria)
- Cálculo de geometría del perfil, y cálculo aproximado del desgaste (una imagen)
- Cálculo de desgaste con múltiples contornos (varias imágenes del mismo pantógrafo)

El programa procesa una serie de fotogramas antes de dar una medida de desgaste, por lo que en la ventana de análisis aparece una indicación de la detección del paso de pantógrafo, o el resultado del cálculo de desgaste. El análisis realiza varias medidas, tanto de un sólo fotograma, como de varios fotogramas del mismo pantógrafo, obteniendo finalmente un valor de desgaste estimado en milímetros en el punto central de la pletina. En este punto, es donde se produce el desgaste máximo en la superficie.

10. Análisis dinámico del bogie y caja del tren

Para aumentar el conocimiento sobre el material móvil y disponer de la una herramienta adecuada para el análisis de distintos parámetros del mismo, actualmente, Metro de Madrid tiene a un equipo trabajando junto con los fabricantes de material móvil mediante las aplicaciones informáticas más avanzadas del mercado (SIMPACK, ANSYS, ABAQUS, etc), realizando modelos de todo el material móvil así como de sus distintos componentes. El análisis dinámico por ordenador es una interesante alternativa a las complejas medidas experimentales y a la construcción de costosos prototipos, con la consiguiente reducción de costes. En general, esta técnica proporciona resultados suficientemente próximos a la realidad, una vez ajustados convenientemente los modelos. Existen además muchas situaciones en las que no es posible la utilización de métodos experimentales, como es el caso, por ejemplo, de la reconstrucción de accidentes. Los resultados de las simulaciones y los cálculos por variación paramétrica pueden considerarse como una potente herramienta, que permite alcanzar un profundo entendimiento del papel de cada uno de los componentes del vehículo en el comportamiento dinámico del sistema completo. Este mejor entendimiento del funcionamiento del vehículo encuentra un excelente campo de aplicación en el proceso de diseño e incluso de compra de nuevo material rodante.

Actualmente, se están realizando estudios de confort, estabilidad y riesgo de descarrillo de todo el material móvil así como estudios comparativos de las ruedas elásticas frente a ruedas enterizas. Para los estudios de confort se están aplicando los criterios recogidos tanto en las normas UIC 518 como la ISO 2631. Pa-

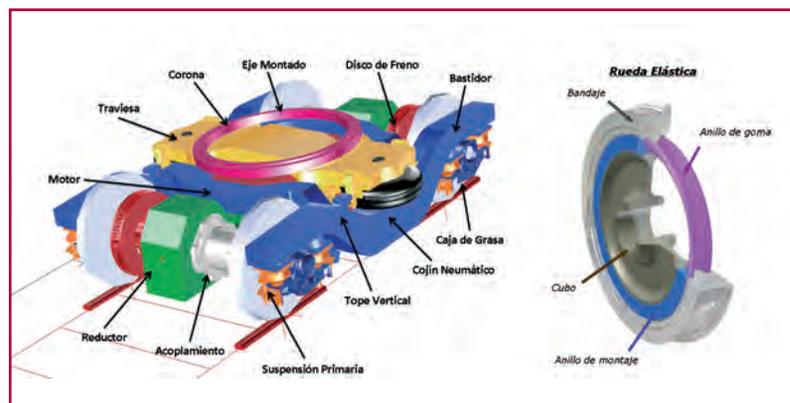


Figura 19.- Modelo SIMPACK de un bogie de Metro de Madrid.

ra la aplicación de dichos criterios, se han colocado de forma virtual una serie de sensores en las distintas posiciones y orientaciones que indican las normas. En el caso de los estudios de estabilidad y descarrillo, se están obteniendo para cada material móvil los diagramas de bifurcación que permiten conocer la velocidad a partir de la cual el tren se vuelve completamente inestable. Así mismo, se están realizando simulaciones del material móvil sobre líneas reales y determinando los parámetros y esfuerzos en cada una de las ruedas.

11. Desvíos y diagonales sin mantenimiento en la vía en placa

El movimiento de la vía en balasto debido al paso de los trenes exige un mantenimiento constante y muy caro. Por ello la vía que monta Metro de Madrid desde 1995, y en algunos tramos incluso antes, es siempre hormigonada, la llamada vía en placa, que no se mueve. Japón desde 1982 no monta vía en balasto para sus trenes de Alta Velocidad, debido precisamente al enorme coste de mantenimiento de esa vía, sino que monta también siempre vía hormigonada, vía en placa. Lo mismo hacen Alemania desde 1994, Taiwan, y Corea desde la apertura de su primera línea de Alta Velocidad en balasto que no va a volver a utilizar.

Pero en Metro de Madrid los aparatos de vía, comúnmente llamados cambios de vía, quedaban siempre en balasto y su mantenimiento era caro y complicado. Por ello Metro de Madrid ha desarrollado un sistema para que los aparatos de vía puedan también hormigonarse, de forma que ya no sufren movimientos ni deformaciones con el paso de los trenes.

Para conseguir unos aparatos de vía de la misma calidad que la vía general en placa, se han diseñado desvíos y diagonales normales y de corazón también móvil con las características básicas siguientes:

- Trazado tangente de la aguja y la contraaguja, con lo que se elimina la discontinuidad producida en los trazados secantes de aparatos de vía anteriores, mejorando el confort y reduciendo el desgaste prematuro de las agujas en su parte más débil (punta).
- Radio único (140 m.) en la vía desviada, siendo la aceleración transversal no compensada igual en



Fig.20. Aparato de vía hormigonado, sin mantenimiento, en Metro de Madrid.

todo su recorrido y una velocidad en la desviada de 34 km/h. y de 110 km/h. en la general

- Fijación elástica indirecta en todo el aparato de vía, incluso en el cambio, al disponer de agujas de perfil bajo asimétrico que permiten el montaje de resbaladeras huecas donde se alojan los clips que fijan elásticamente la contraaguja por el interior.
- Resbaladeras de rodillos en el cambio que facilitan el deslizamiento de las agujas en las maniobras.
- Sistema de seguridad de apertura del cambio con enclavamiento a través de cerrojo de uña.
- Cruzamiento de tg.0.125 de acero moldeado al manganeso con antenas de carril 54 E1, soldadas por chisporroteo y presión, eliminando las uniones embridadas y posibilitando la construcción en taller de las juntas aislantes encoladas tipo IVG 30° que en caso de utilizarse quedan incorporadas al propio aparato.
- Apoyo del aparato de vía sobre traviesas de hormigón pretensado y fijación elástica indirecta SK- L12, mejorando la estabilidad y consolidación del aparato de vía.
- El aparato de vía es soldable a la vía general con soldadura aluminotérmica.

Se ha previsto que los componentes de estos aparatos de vía sean, en lo posible, comunes o compatibles, de modo que puedan ser utilizados en distintos aparatos. Con este criterio los cambios son iguales para desvíos, diagonales y bretelles. Así mismo el cruzamiento de tg.0.125 es común para todos salvo para las bretelles que tienen ángulos de desviación en los cruzamientos diferentes

12. Diagonal con cruzamiento de corazón en punta móvil

Todos los elementos constitutivos de este aparato de vía son comunes al resto de los descritos anteriormente a excepción del cruzamiento y la junta de expansión, cuyas características básicas son:

- Corazón de punta móvil con dos componentes principales, cuna y punta, fabricadas en acero moldeado al manganeso. La cuna incorpora cuatro antenas soldadas, dos de las cuales realizan la función de patas de liebre. La punta móvil, alojada en el interior de la cuna, también está dotada de antenas soldadas, de modo que todo el aparato puede ser monolitizado mediante soldadura aluminotérmica, y así puede ser incorporado en vía de barra larga soldada sin necesidad de aparatos de dilatación. Se eliminan en toda la vía –incluso en los aparatos– las juntas embridadas. La utilización de cruzamientos de punta móvil, elimina además la necesidad de utilizar contracarriles, al desaparecer la laguna tradicional de los cruzamientos monobloque. Se instalan rodillos en el cruzamiento de punta móvil para facilitar la maniobra de la punta móvil.
- Junta de expansión. Dada la corta longitud de estos corazones, las tensiones de deformación longitudinal de los carriles extremos de la punta no podrá ser absorbida por el propio carril, por lo que se incorpora un aparato de dilatación que absorba este desplazamiento manteniendo la alineación de los bordes de rodadura.

Fig.21. Sustitución de la diagonal del piñón de entrada a la estación de Gregorio Marañón L-10 por el prototipo de diagonal de corazón de punta móvil.





Fig. 22. Premontaje en taller de diagonal de corazón de punta móvil.

13. Auscultación de la interacción rueda carril

El profundo conocimiento de la interacción vía-rueda es de gran utilidad para estudiar con detalle la rodadura del tren. Los parámetros principales que intervienen en este fenómeno son los siguientes: tipo de carril y llanta, velocidad de circulación del tren, alineación vertical y lateral de la vía, sistema de amortiguación de los trenes, posibles desgastes en rueda o vía y existencia de contracarril. Debido a la elevada complejidad de modelización de dicha interacción, resulta conveniente disponer de un sistema que permita visualizarla y grabarla para poder estudiarla posteriormente en gabinete por personal especializado.

El análisis de esta información permite optimizar las operaciones de engrase de vía, localizar zonas con defectos geométricos, comprobar la calidad de rodadura en cada una de las series del material

Fig. 23. Estudio del contacto rueda-carril en Metro de Madrid.

móvil que operan actualmente en la red, determinar los movimientos reales de lazo, etc. Con el análisis digital de la imagen que se ha desarrollado se puede medir además de manera automática el juego real de la vía en cualquier punto.

Los componentes principales del sistema son:

- Dos cámaras capaces de trabajar a 120 imágenes/segundo, para captura simultánea y sincronizada de imágenes del contacto rueda-carril de ambas ruedas de un mismo eje, con una frecuencia mínima de una imagen por cada 25 cm de recorrido de rueda.
- Sistema de iluminación mediante focos halógenos con un total de 4.000 w.
- Sistema electrónico de detección de balizas externas para referenciar las imágenes con el pk del túnel.
- Equipo informático industrial con discos duros SCSI de alta velocidad.

Para la toma de datos los equipos se instalan en estructuras metálicas ancladas al bastidor del bogie delantero del tren. Se han diseñado juegos de soportes para los coches de las series 2000, 5000, 6000, 7000 y 8000. La aplicación de explotación y análisis dispone de las siguientes funcionalidades:

- Visualización de las imágenes de las dos ruedas de un eje de forma sincronizada y simultánea.
- Medición automática del juego de la vía.
- Almacenamiento en base de datos de los valores correspondientes al juego de la vía, con posibilidad de volcado de datos a otras aplicaciones.
- Capacidad de gestionar velocidades de trabajo de 120 imágenes/segundo.

ESQUEMAS DEL SISTEMA

• Cámaras

• Iluminación

DETALLE ILUMINACIÓN

SOFTWARE DE ANÁLISIS

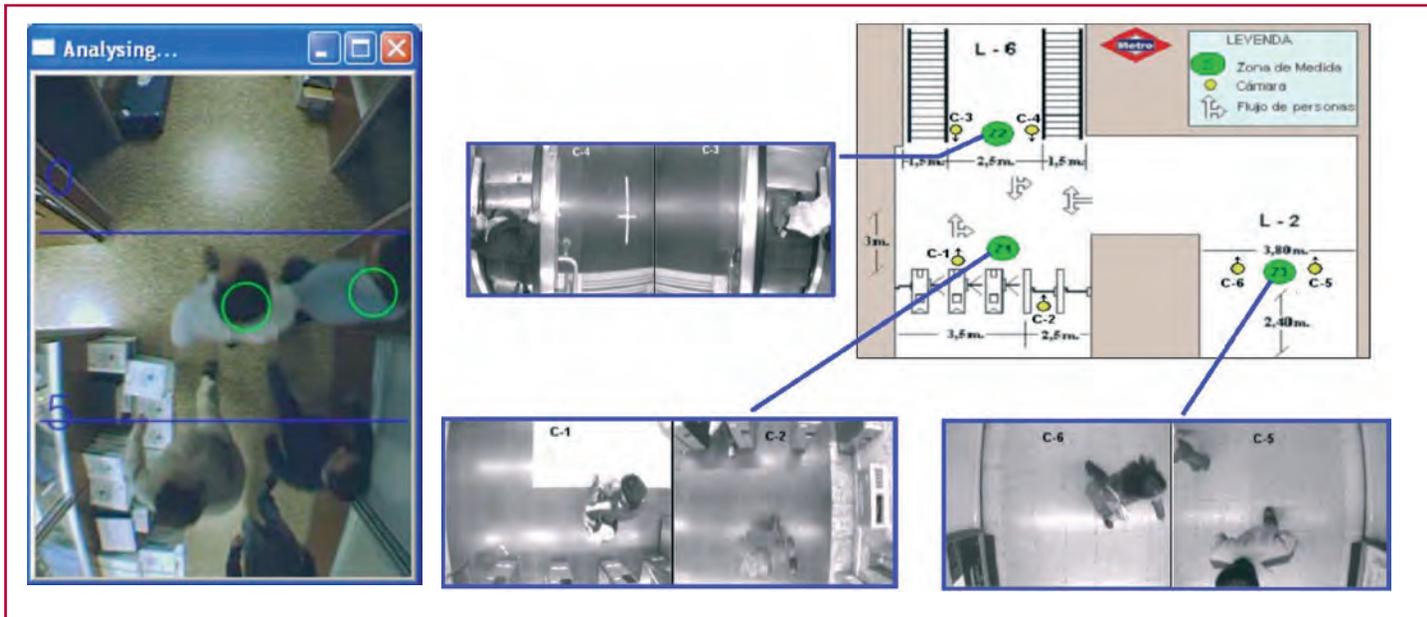


Fig. 24. Estudio del conteo automático de viajeros en Metro de Madrid.

14. Conteo automático de viajeros

El problema del seguimiento de personas por medio de técnicas de visión artificial ha sido extensamente debatido en un gran número de artículos y estudios. Normalmente se resuelve el problema sustrayendo a la escena capturada en cada instante un modelo de fondo tomado en un cierto momento en el que no existen objetos móviles en la escena. Este enfoque es válido en situaciones en las que la cámara está a una gran distancia de los objetos móviles a seguir y cuando la densidad de los objetos no es excesivamente grande. En los análisis realizados por el sistema desarrollado por Metro de Madrid en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid, se realizan de forma simultánea un doble análisis estático y un análisis dinámico. En relación al análisis estático se realiza el procedimiento de sustracción de fondo complementado con una detección de sombras, ya que estas pueden ser confundidas en ciertos momentos con objetivos móviles.

El objetivo de este proyecto de investigación es el uso de visión artificial para determinar el número de transeúntes que pasan de una zona a otra de un pasillo, dentro del campo de visión de una cámara de montaje cenital. El primer paso consiste en identificar el paso esporádico de personas de un lado a otro de la cámara, en una región con sólo 2 direcciones posibles, discriminando las zonas de sombras, reflejos y otros artefactos en la imagen, mientras en los actuales desa-

rollos se trabaja para contar con mayor densidad de personas y condiciones poco favorables. Actualmente, se ha desarrollado un prototipo instalado en oficinas de Metro de Madrid y se está procediendo a realizar un montaje en la estación de Pacífico. El procesado dinámico apoya al estático en aquellos momentos en los que su información es demasiado pobre. Estas situaciones son aquellas en las que, por ejemplo, dos o más objetivos móviles se juntan y separan a lo largo de su trayecto en el campo visual de la cámara.

15. Nuevos simuladores de conducción

Para las enormes ampliaciones de la red de la pasada década y la adecuada formación de conductores, Metro de Madrid instaló los actuales simuladores de conducción de Canillejas y Cuatro Vientos, y debido a la adquisición de otros tipos de coches tipo 3000, 9000 y Metros ligeros se decidió el desarrollo interno de estos simuladores de Conducción y Averías en colaboración con el Citef de la ET-SII. Estos simuladores estaban orientados en un primer momento a la formación del personal destinado a las nuevas líneas y al entrenamiento en la resolución de averías. El uso de este tipo de herramientas proporciona un entorno dinámico y libre de riesgos que permite reproducir de forma controlada diferentes situaciones reales que requieran ser ejercitadas bajo la supervisión de un instructor.



Fig. 25. Simuladores de conducción desarrollados por Metro de Madrid.

De esta manera, la formación de los conductores destinados a nuevas líneas se mejora de forma importante y por otro lado se consiguen reducir el impacto de las averías de los trenes en la operativa de la línea. Actualmente se dispone de simuladores correspondientes a las series 7000 y 8000, mientras que están en fase de desarrollo los correspondientes a las series 3000 (ya se ha realizado una primera entrega), 9000 y Metro Ligero. Los nuevos Simuladores disponen de los medios necesarios para realizar una formación de acuerdo a la normativa y requerimientos de calidad que establece Metro de Madrid. Para ello dispone de los siguientes puestos:

- *Puesto de Formación:* Dotado de interfaces fotorealistas que reproducen los elementos que constituyen una unidad, así como de un sistema representación del entorno, permite la reproducción del comportamiento de las unidades de la serie 3000, 7000, 8000, 9000 y Metro Ligero, la señalización, el entorno visual, las comunicaciones, etc. de la forma más realista posible.
- *Puesto de Instructor:* Utilizando interfaces virtuales permite el diseño, seguimiento y evaluación de la formación en los diferentes Puestos de Formación. Incluye un servidor de Base de Datos centralizado que gestione la formación realizada con los simuladores.
- *Cabina de conducción:* Se dispondrá de cabinas de conducción idénticas a las reales así como un visual de alta calidad que permite realizar una formación completamente realista.

El diseño de los nuevos Simuladores permite la ampliación de funcionalidades para adaptarse a las futuras necesidades de Metro de Madrid (introducción de

nuevos materiales rodantes, aumento de averías e incidencias controladas, ampliación y/o sustitución de los equipos a bordo modelados, ampliación de las infraestructuras simuladas,...). Las funcionalidades que se pueden desarrollar con los nuevos simuladores permiten:

- Entrenamiento de alumnos en labores de conducción de la Series 3000, 7000, 8000, 9000 y Metro Ligero en circulación por las líneas 3, 9, 10, 12 y líneas de Metro Ligero.
- Entrenamiento en reconocimiento y resolución de averías de los sistemas que componen la Unidad Tren.
- Entrenamiento en el manejo de los equipamientos de a bordo, por medio de la reproducción virtual del Pupitre de Conducción y de los Armarios existentes a lo largo de la unidad.
- Entrenamiento en las comunicaciones.
- Realización del diseño y seguimiento de la formación

El simulador permite generar un nuevo plan de formación adaptado a las características de las unidades que garantiza las siguientes ventajas en la formación de los conductores de Metro de Madrid:

- Reducción significativa del tiempo de formación.
- Reducciones de la utilización de las Unidades Tren reales para formación.
- Entrenamientos intensivos en situaciones críticas o de emergencia, hasta su completo dominio.
- Reducción del estrés de formación en Unidad real.
- Posibilidad de adaptación de los niveles de formación conforme a varios niveles predefinidos de formación.

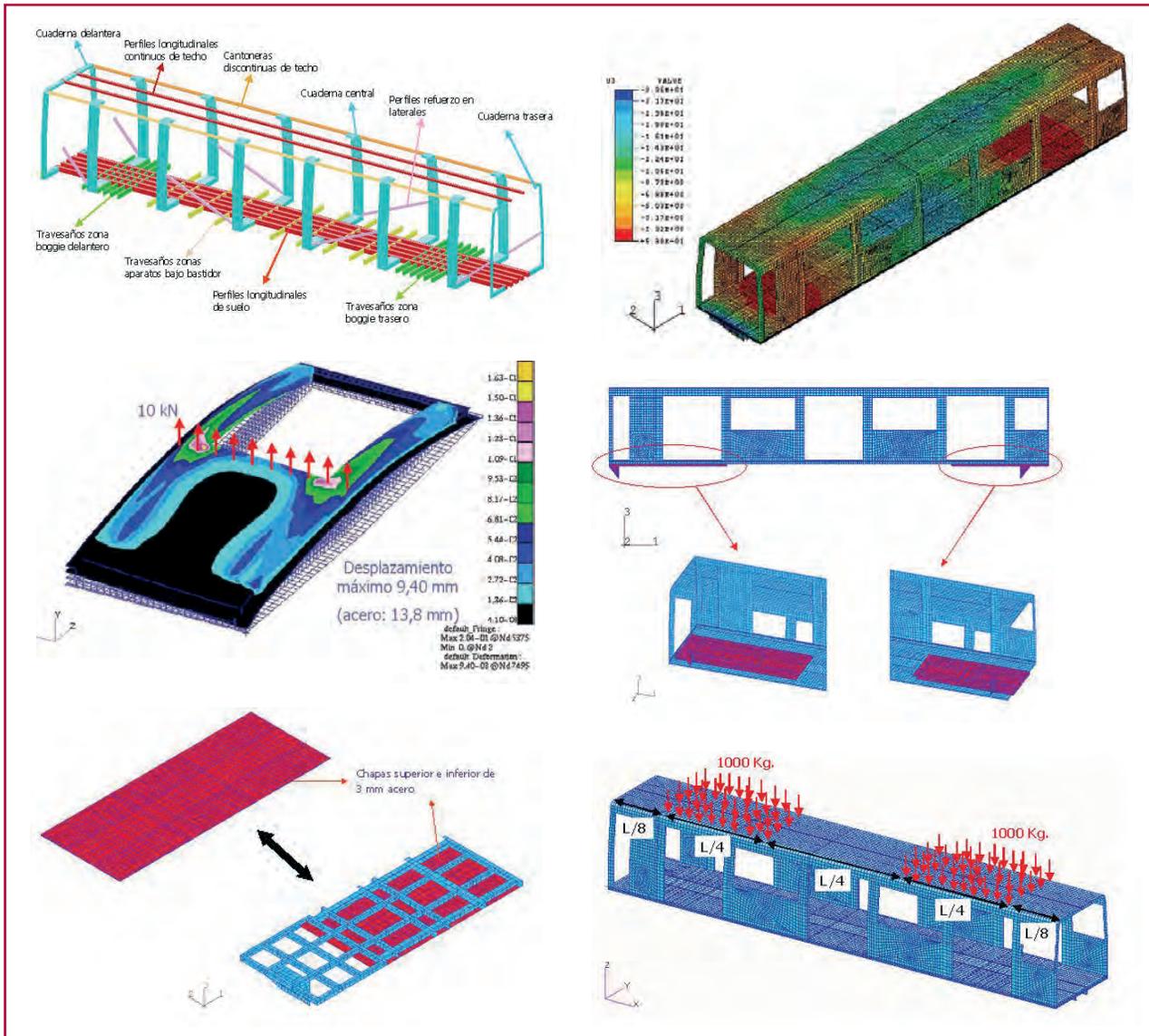


Fig.26. Algunas fases del diseño del coche en materiales compuestos (composites).

- Posibilidad de evaluación conjunta con el alumno una vez finalizado el ejercicio.

16. Nuevos coches ferroviarios en materiales compuestos

La Oficina de Prospectiva Tecnológica e Industrial (OPTI) ya elaboró en el año 2000 su segundo informe sobre el futuro tecnológico hasta el año 2015 en el que, entre otras muchas iniciativas (algunas de ellas en marcha como el ERTMS, el ancho variable, etc.), contempló en su proyecto clave N° 14 el uso práctico de vehículos ferroviarios construidos en materiales ligeros para reducir el peso del vehículo.

Metro de Madrid, en el año 2001 se planteó el desarrollo de un nuevo vehículo cuya estructura, con las mismas características resistentes, fuese un 50% menos pesada. El proyecto se ha abordado en diversas fases, en colaboración con la entidad SISPRO dependiente de la Universidad de Zaragoza. Gracias a esta colaboración, con el inestimable empuje del Catedrático D. Antonio Miravete, se ha conseguido desarrollar un diseño de una estructura en composites un 49,2% menos pesada que su homóloga en acero. En la siguiente figura se representan algunos de los subconjuntos más importantes: estructura, suelo o bastidor y puertas. Además del diseño y fabricación de probetas y subconjuntos que ya se han caracterizado mecánicamente y respecto a fuego y humos se han diseñado los ensayos a tracción y com-

presión y de deformabilidad ante choque. En próximas fases se abordará la fabricación real de un coche en materiales compuestos.

17. Eficiencia energética

Metro de Madrid está involucrado en varios proyectos de investigación en relación con la eficiencia energética, tanto de forma independiente como asociada a empresas y universidades en el marco de diversos proyectos nacionales.

Independientemente de las mejoras en este campo que producen la fabricación del material móvil en materiales ligeros, aluminio, composites, etc, la versatilidad tecnológica que proporcionan los trenes e instalaciones de última generación que incorporan potentes sistemas de software permiten crear plataformas integradas de gestión de tráfico y energía conjuntamente, pudiendo sincronizar de este modo los arranques y frenadas de la totalidad de los trenes en circulación en una línea. Asimismo se diseñan marchas económicas que aprovechan las pendientes de la línea para realizar un trayecto óptimo energéticamente sin menoscabar el confort del viajero ni la velocidad comercial en hora valle.

Otro campo de mejora en estudio se centra en la acumulación a bordo del tren de su propia energía de

frenado mediante diversos dispositivos acumuladores de energía entre los que se citan los volantes de inercia, supercondensadores, baterías de carga rápida, etc.

18. Proyecto Tebatren, visualización continua del interior del tren

Como extensión de este satisfactorio ensayo hay un proyecto de extensión de este servicio a otras líneas de la Red denominado SCSS (Servicio coordinado de sistemas de seguridad).

Se encuentra en marcha el Proyecto piloto de I+D+i para la instalación en la **Línea 8** (Barajas, Aeropuerto, Campo de las Naciones, Mar de Cristal, Colombia y Nuevos Ministerios) de Metro Madrid de un Sistema de transmisión tierra-tren-tierra bidireccional de Banda Ancha integrado en la red IP/ATM Multiservicio, y la puesta en marcha en 10 unidades 8000 de L8 de los siguientes servicios:

- Visualización desde un puesto central de las cámaras ubicadas en el interior de los trenes
- Visualización desde la cabina del conductor de tren de las cámaras interiores del tren en calidad 4CIF, y tiempo real.
- Grabación continua de las cámaras interiores del tren durante un tiempo mínimo de 6 días a una

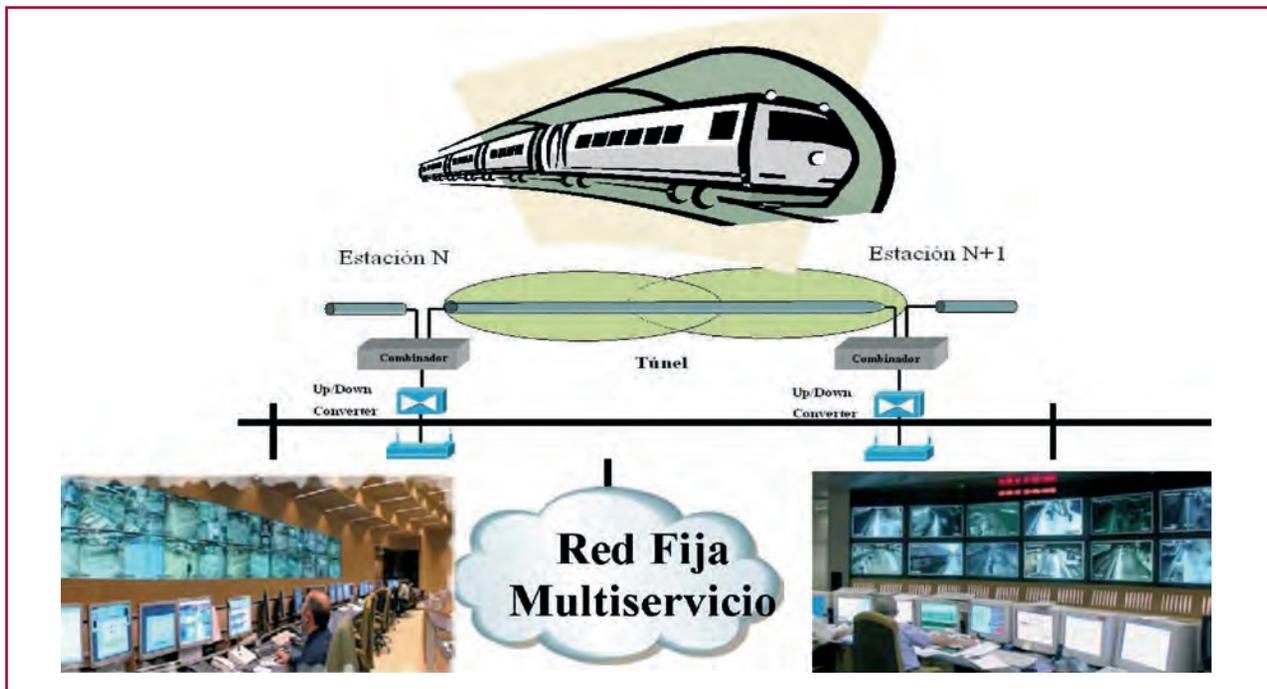
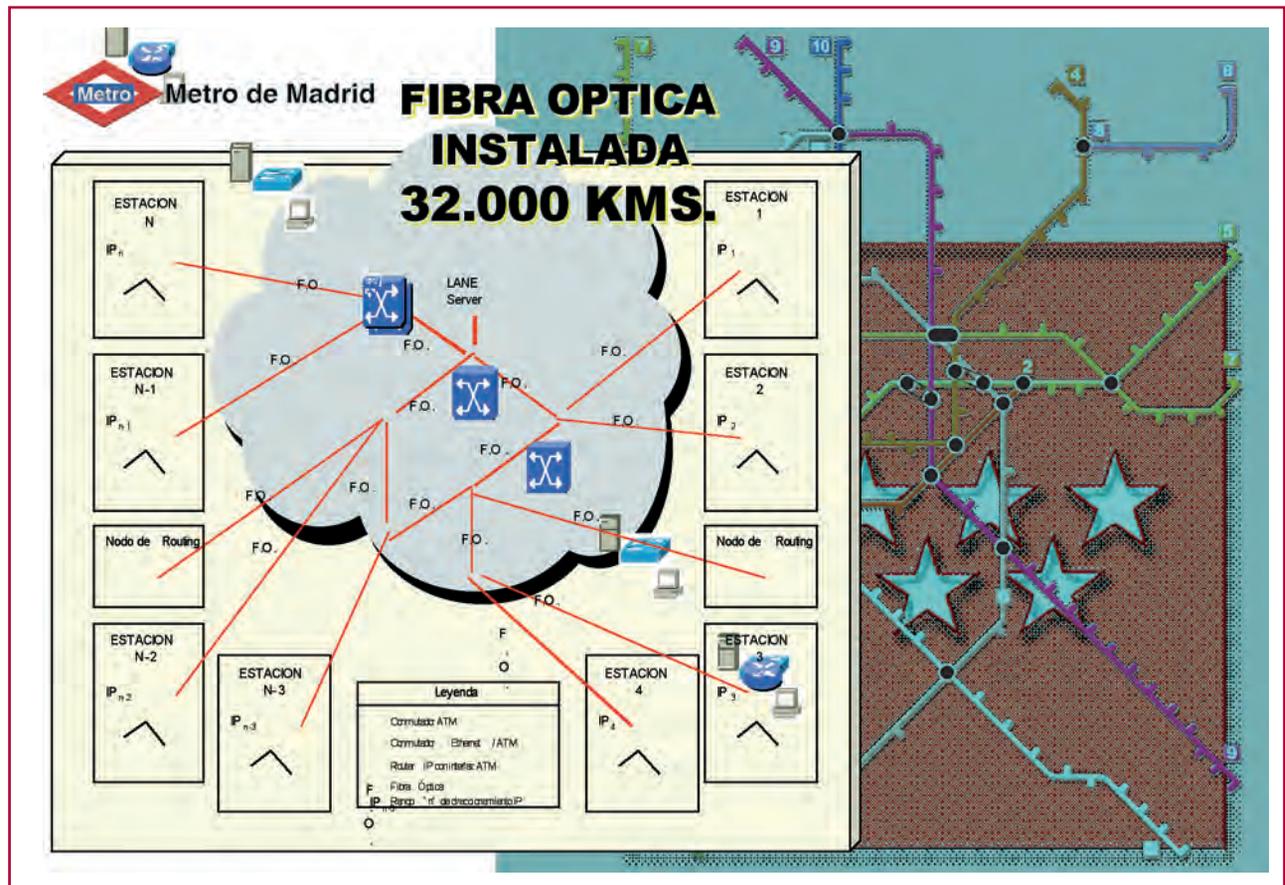


Fig.27. Visualización continua del interior del tren en Metro de Madrid.

Fig. 28. Red ATM basada en la red de fibra de Metro de Madrid.



- grabación mínima de 12,5 imágenes /sg y calidad CIF.
- Visualización desde la cabina de conductor del tren de las cámaras situadas en los andenes 100 metros antes de llegar el tren al andén de la estación.
- Comunicaciones telefónicas Tren-Tierra empleando tecnologías de Voz sobre IP

La puesta en marcha de este proyecto ha supuesto también el desarrollo tecnológico necesario para poder proyectar, definir, instalar y poner en marcha la infraestructura de comunicaciones necesaria para la comunicación Tren-Tierra-Tren Bidireccional, lo que ha supuesto la instalación y puesta en marcha de:

- Estaciones Base de Red Inalámbrica T-T para túnel/andén en la banda de 700MHz para garantizar cobertura sin interferencias aprovechando la instalación existente en línea 8 de hilo radiante .
- Equipamiento de Integración de señal de cable radiante (combinadores, splitters...)

- Sistemas de Gestión de Comunicaciones embarcadas, realizando el montaje en los sistemas embarcados de la red Ethernet,
- Suministro e instalación y Puesta en Marcha de la infraestructura de comunicaciones en Tren (Sistema Embarcado)
- Comunicaciones Tren-Tierra-Tren Bidireccionales
- Integración de los servicios móviles de explotación en la Red (Sistemas de gestión para la operativa de una red de transporte integrando la flota de trenes)
- Sistema de CCTV interna en los sistemas embarcados, escalable al Puesto de Seguridad de Línea y en el Puesto Central

19. Red ATM y red Gigabit

Ante el incremento en la demanda interna de transmisión de datos, Metro de Madrid se vio ya en 1998 en la necesidad de decidir un soporte de banda ancha para cubrir las necesidades existentes datos, imágenes y voz y prever un posible crecimiento futuro.

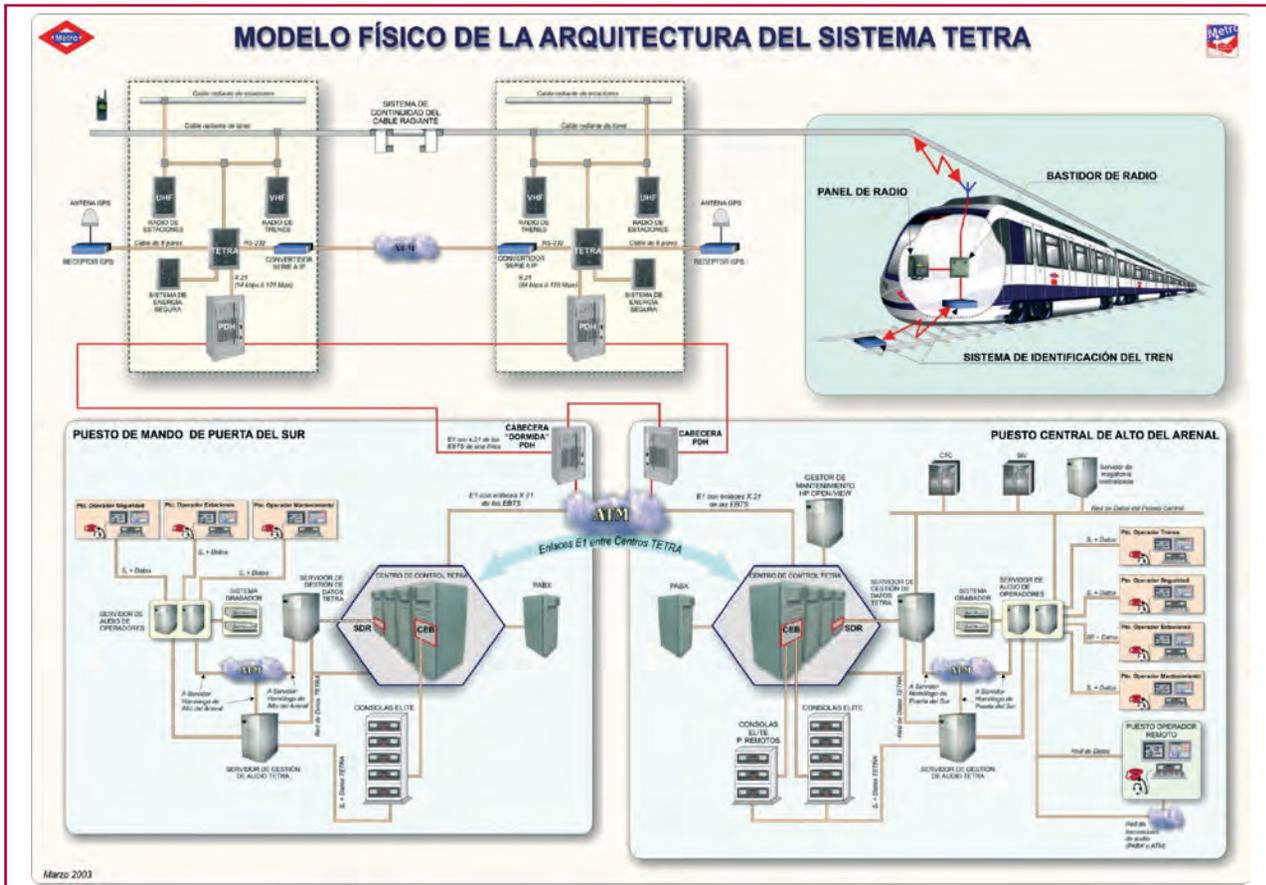


Fig. 29. Esquema del sistema TETRA de Metro de Madrid.

De estas, se prevé un mayor crecimiento en datos y sobre todo en transmisión de imágenes con proyectos que acometan la centralización de imágenes en un único punto de la red (Puesto de Mando). Dicho incremento se acometió mediante la instalación de una tecnología ATM que posteriormente ha ido migrando a tecnología Gigabit, siempre con el esfuerzo de adaptar productos comerciales a un entorno Metropolitano. Con estas tecnologías se ha creado una red de comunicaciones en la que se incluyen todas las estaciones y depósitos, teniendo como punto fundamental el Puesto de Mando, lugar donde converge la mayoría del tráfico.

El soporte físico para este tipo de comunicaciones es la fibra óptica de la que hay más de 32.000 Km. instalados en la red.

20. Radiotelefonía TETRA

El sistema utilizado por Metro de Madrid para las comunicaciones vía radio consistía antes de realizar

estos proyectos en dos sistemas analógicos convencionales, uno en banda UHF y otro en VHF y utilizando como soporte cable radiante. Además existían varios tipos de radio (Trenes y Estaciones-Seguridad) que funcionaban de forma independiente lo que hacía inviable la comunicación entre ellos en situaciones de necesidad. Otra necesidad urgente era la de enviar datos a través del sistema de radio desde los trenes y portátiles o PDA. En el primer caso, por ejemplo, para poner las unidades en marcha de forma automática, para activar un sistema de extinción de incendios, para transmitir al Puesto de Mando la situación del tren ante posibles averías o informar sobre la situación de viajeros en estaciones, etc,...

Se estudiaron varias tecnologías digitales, fundamentalmente GSM-R y TETRA, decidiendonos finalmente por TETRA. Dada la magnitud del cambio y hasta su total implantación, se exigió la compatibilidad del nuevo sistema TETRA con el existente, de manera que con el mismo soporte de cable radiante se pudiesen mantener comunicaciones con ambos sistemas.

21. Sistema de guiado de invidentes en estaciones

El Sistema de Guiado de Invidentes mediante una antena transmisora-receptora tiene las siguientes aplicaciones:

- Guiado de Personas Invidentes a través de las Instalaciones, con aviso de la situación de las diferentes Instalaciones (escaleras, ascensores, etc.) y las posibles direcciones a tomar en función del recorrido que realizan.
- Anuncio de Incidencias en el servicio y averías de las diferentes instalaciones a través del Concentrador de Estaciones del Puesto Central.
- Control de la presencia de Invidentes en las Instalaciones para casos de Incidencias e información de Alternativas de Transporte.



22. Equipamiento de material moderno

Las innovaciones en este nuevo tipo de trenes que comenzó con las Series 7000 (Linea 10) y 8000

(Linea 8) son interesantísimas y enormes, y serán objeto de un trabajo aparte.

El desarrollo comenzado con estos trenes y que abarcan varios frentes y líneas de investigación (pasillos de evacuación, sistemas de protección contra incendios embarcados mediante agua nebulizada, buses de comunicación, sistemas de ayuda al mantenimiento mediante sensorizaciones predictivas, etc.) se ha seguido aumentando e incentivando con los nuevos trenes recientemente adquiridos tipo 9000 (líneas 7, Metroeste y Metronorte) y tipo 3000 (Líneas 2, 3 y 4) y están siendo un ejemplo a seguir en el mundo ferroviario, no sólo por el nivel de innovación que incorporan sino por la rapidez en su suministro y puesta a punto y su fiabilidad y disponibilidad. ♦

Referencias :

- "Ferrocarriles Metropolitanos", 3º ed. M. Melis y J. González. Colegio Ingenieros de Caminos, 2008.
- "Modern Railway Track". Esveld, C. MRT Ed, 2001.
- "Railway Management and Engineering", Profillidis, V, Ashgate, 2000.
- "Manual de vía, Lichtberger, B. Eurail Press, 2007.



A. BIANCHINI, Ingeniero, S.A.

Nuevo revestimiento
GALFAN®

gaviones metálicos
gaviones recubrimiento
enrejados triple torsión
alambres y fibras



Comercial: Gran Vial, 8 · Tel. 93568 65 15 · Fax 93 568 65 11 · 08170 · Montornès del Vallès
Diputació, 279, 1.º, 3.ª · Tel. 93 496 13 00 · Fax 93 496 13 01 · 08007 Barcelona
E-mail: bianchini@abianchini.es - comercial@abianchini.es www.abianchini.es