

## CARACTERISTICAS DE DISEÑO DEL NUEVO MATERIAL MOVIL DEL METRO DE MADRID

Aurelio Rojo Garrido

*Director de Operación de METRO DE MADRID, S.A.*

*C/ Cavanilles, 58 - 28007-MADRID*

*Telef. 91/379-88-05 - Fax 91/379-89-95*

*e-mail: dirope@metromadrid.es*

Enrique Wilt García

*Jefe División de Material Móvil de METRO DE MADRID, S.A.*

*C/ Cavanilles, 56 - 28007-MADRID*

*Telef. 91/379-88-08 - Fax 91/379-88-09*

*e-mail: enrique\_wilt@metromadrid.es*

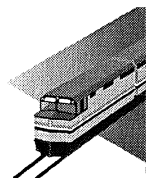
Rafael Royuela Modrón

*Jefe de la Oficina Técnica de Material Móvil de METRO DE MADRID,*

*S.A. - C/Néctar s/n. - 28022 - MADRID*

*Telef. 91/379-88-23 - Fax 91/379-88-24*

*e-mail: rafael\_royuela@metromadrid.es*



### RESUMEN

El METRO DE MADRID está en plena expansión, con un plan actualmente en marcha de más de 30 kms. hasta el horizonte del año 1999. Para atender las necesidades que comporta esta ampliación del servicio, METRO ha contratado la construcción de unidades automotores tipo 6000.

Por otra parte, en la fase inicial del proyecto de este nuevo material móvil, y mediante concurso promovido por la COMUNIDAD DE MADRID, le ha sido concedido a METRO la explotación de una nueva línea de 20 kms., que une la parte sur-este de la capital con el municipio de Arganda. Las condiciones de explotación de esta nueva línea, su unión con la red de METRO y sus caracterís-

ticas topográficas, hace que el diseño inicial del material móvil haya de adaptarse de forma bivalente a las condiciones propias de la red de METRO y a las condiciones de circulación, ocupación, intervalos, etc., de la línea de Arganda.

Estamos ante un material móvil realmente flexible y versátil, que además de incorporar los últimos desarrollos técnicos en los campos de la tracción, informática, seguridad y confort, es capaz de dar las elevadas prestaciones exigidas por las líneas a que va destinado, respeta el medio ambiente en todas sus fases de utilización y queda adecuadamente integrado en el entorno en el que se va a desarrollar su circulación

## 1. INTRODUCCIÓN

La red del METRO DE MADRID se encuentra dentro del grupo de los ferrocarriles metropolitanos más importantes del mundo, teniendo en cuenta los parámetros más característicos.

Longitud:	120,9 km
Nº de Líneas:	10 y un Ramal
Nº de Estaciones:	164
Parque material móvil:	1.064 coches
Nº viajeros año:	420 millones(1997)

Los problemas de congestión de tráfico y de movilidad llevan al Gobierno de la Comunidad de Madrid a planificar el Plan de Ampliación del Metro de Madrid en el cuatrienio 1995/98. El citado plan comprende la construcción de 35,5 nuevos kms de red (figura 1).

A su vez, se ha efectuado una licitación para la explotación de un nuevo FF.CC. Interurbano, de 20 kms de longitud, que unirá en 1998 Madrid con los municipios de Rivas y Arganda, con la particularidad de que esta explotación se efectuará de forma conjunta con la Línea 9. Asimismo, con la nueva Línea 8 se conseguirá el acceso directo al Aeropuerto de Madrid desde la Red de Metro.





## Ampliación del Metro de Madrid 1996 - 1999

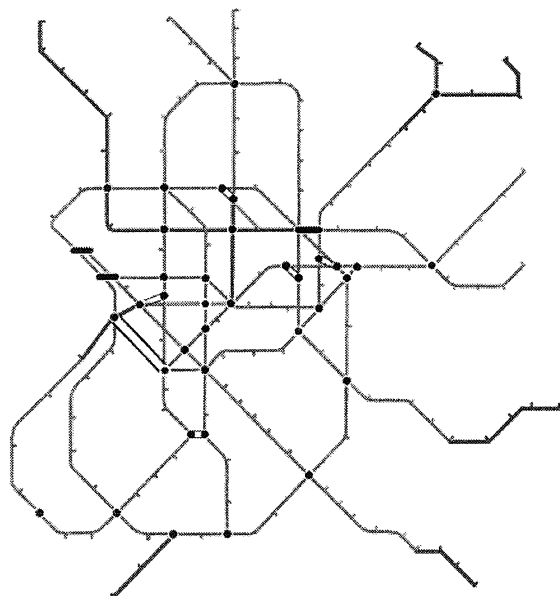


Figura 1

Así pues, para los ingenieros del Metro de Madrid responsables de la definición del nuevo material móvil se planteó un gran reto, pues los nuevos trenes, además de la más avanzada tecnología, deberán estar diseñados bajo el punto de vista de la VERSATILIDAD al tener que prestar servicio simultáneamente en Líneas de Metro subterráneas y con interestaciones relativamente cortas y en un FF.CC. interurbano con interestaciones más largas en las que es necesario alcanzar velocidades punta, muy superiores y con circulación en superficie.



Estamos, pues, ante la necesidad de definir unas nuevas unidades denominadas "tipo 6000", CONCEPTUALMENTE VERSÁTILES.

## 2. CARACTERÍSTICAS ACTUALES DEL MATERIAL MÓVIL

Analicemos este aspecto como punto de partida:

En la actualidad coexisten básicamente 2 tipos de material móvil:

**GALIBO ESTRECHO:** coches de 2,40 m. de ancho por 15 m. de longitud, que circulan en las líneas primeramente construidas.

Existen dos tipos de material:

**Series 300 y 1000.** Tecnología convencional con tracción en corriente continua.

**Serie 2000.** Tecnología con tracción trifásica a base de tiristores.

Para la ampliación de las líneas 1, 4 y 10 se han contratado 63 unidades tipo 2000 modernizadas en los siguientes aspectos:

- Nuevo diseño interior y exterior
- Mejoras en el confort: aire acondicionado.
- Mejoras en la información a los viajeros: Paneles electrónicos y anunciador megafónico de estaciones.
- Equipos de Ayuda a la Explotación y Mantenimiento.
- Caja negra.
- Equipo de TVCC.

**GALIBO ANCHO:** coches de 2,80 m. de ancho por 18 m. de longitud, circulan en las Líneas más recientes, y en función de su equipamiento de tracción, existen 2 tipos de material móvil :

**Serie 5000 1ª generación.** Con tecnología convencional de tracción en corriente continua.

**Serie 5000 2ª generación.** Tecnología con equipos electrónicos de potencia tipo CHOPPER con motores en corriente continua.

### 3. INICIO DEL PROCESO DE DISEÑO DE LOS NUEVOS TRENES

Una vez definidas las necesidades de material móvil de gálibo ancho en 37 unidades Motor-Motor y confeccionados los correspondientes Pliegos de Condiciones Técnicas y Administrativas, se convoca en Octubre de 1996 un CONCURSO INTERNACIONAL, según lo publicado en el B.O.C.A.M. 16-10-96, el B.O.E. 17-10-96 y el D.C.E. 24-10-96, fijándose la fecha de presentación de ofertas para el 12-12-96.

Las características básicas del material solicitado debían corresponder a los ya experimentados en la serie 5000:

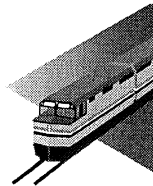
- Distancia media entre estaciones: 750 m.



- Velocidad comercial > 30 km/h
- Intervalo < 3'
- Capacidad de carga 215 viajeros/coche (6 viajeros/m<sup>2</sup>)
- Velocidad máxima en explotación comercial 80 km/h.
- Velocidad máxima de cálculo o proyecto 90 km/h.

pero incorporando los avances técnicos que se citan a continuación y los cuales se detallarán posteriormente.

- Tracción trifásica con motores de inducción.
- Equipo de electrónica de potencia con IGBT.
- Equipo de control mediante microprocesadores
- BUS de Datos para la transmisión de información y de órdenes de control.
- Sistema informática de Ayuda a la conducción y al mantenimiento.
- Caja negra.
- Seguridad y operatividad en la circulación ATP/ATO, Radioteléfono y Sistema Antiescalamiento.
- Seguridad Ciudadana (Sistema TVCC y pasillos de intercircularción en el coche)
- Sistemas de Información al Viajero:
  - Teleindicadores interiores y exteriores.
  - Avisos acústicos a los viajeros
  - Megafonía centralizada y local.
- Aire acondicionado.



El concurso internacional fue resuelto en Marzo de 1997 y adjudicado al grupo industrial formado por: CAF / GEC-ALSTHOM / ADTRANZ / SIEMENS

#### 4. DEFINICIÓN DE LOS NUEVOS CONDICIONANTES DE EXPLOTACIÓN

En paralelo al proceso antes señalado se fueron concretando los nuevos condicionantes derivados de la explotación conjunta de Línea 9 - FF.CC. de Arganda y la conexión al Aeropuerto con la Línea 8.

#### CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE EXPLOTACIÓN CONJUNTA L9 - FFCC ARGANDA

- Operación con penetración en Línea 9 (figura 2, Terminal de conexión)
- Velocidad máxima en la explotación: 110 km/h.
- Sistema de Protección ATP compatible para códigos FM (FF.CC. Arganda) y A.M. (Línea 9)
- Distancia media entre estaciones 4.700 m (valores extremos 3.700 y 5.875 m.)
- Tiempo recorrido mínimo en FF. CC. de Arganda 16,2 minuto (velocidad media explotación 74 km/h)

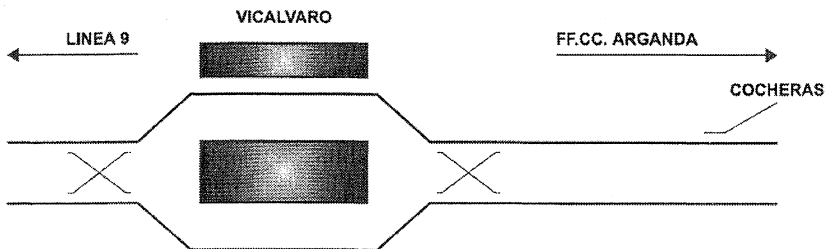


Figura 2. Configuración del Terminal de Vicálvaro



## CONEXIÓN AL AEROPUERTO

La conexión al aeropuerto se efectúa con la construcción de una línea con infraestructura en gálibo ancho (aunque inicialmente se explotará con material 2000). Línea rápida con pocas estaciones y con penetración interior: Barajas - Nuevos Ministerios con un tiempo de trayecto de aproximadamente 20', velocidad de explotación entre 40 y 50 km/h., con coches confortables (mayor número de asientos) y habitáculos para maletas.

## 5. REDEFINICIÓN DEL DISEÑO DE LOS NUEVOS TRENES: VERSÁTILES Y FLEXIBLES

De acuerdo con los nuevos condicionantes antes señalados, fue necesario efectuar, con carácter inmediato, una redefinición del diseño del nuevo material tipo 6000 basado en la VERSATILIDAD exigida.

Para ello simultáneamente se analizaron cuatro vertientes:

### NUEVAS CONDICIONES CINEMÁTICAS

Asegurar el cumplimiento de todas las condicionantes de explotación posibles.

- Metro
- FF. CC. Interurbano
- Conexión Aeropuerto

Analizando los efectos asociados a:

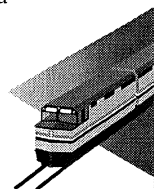
- Motores de tracción y su relación de transmisión
- Electrónica de Potencia y Control especialmente en lo referente a posibilidades técnicas y mecánicas.

### DISEÑO DE UN NUEVO INTERIORISMO

Capaz de dar respuesta a las exigencias demandadas en cada situación en lo referente a niveles de ocupación previstos en cuanto a plazas sentadas y densidad de viajeros de pie.

### ADAPTACION A LA CIRCULACIÓN A INTEMPERIE

- Climatización recinto de viajeros y cabina conducción, incorporando aire acondicionado y calefacción.
- Mejora de estanqueidad para permitir circulación a la intemperie.



## CONDICIONES DE SEGURIDAD

Sistema de Protección Automática de Tren (ATP) compatible en ambas explotaciones. AM/FM

Para ello se efectuó un estudio de compatibilidad donde se analizaron gran cantidad de situaciones en base a velocidades máximas en el rango 80 - 120 km/hora, adaptándose en cada caso las relaciones de transmisión apropiadas utilizando el mismo motor de tracción trifásico.

Especial dedicación se efectuó en el estudio de la capacidad térmica del equipo de tracción (electrónica de potencia y motores de tracción), ya que el nuevo vehículo debe de soportar, con su relación de transmisión “más baja” de la inicialmente prevista, el perfil típico con rampas y cargas, una vez haya penetrado en la red de Metro. El estudio permitió optimizar la relación de transmisión, rechazar algunas opciones y utilizar curvas de regulación específicas.

Se comprobó que la velocidad máxima de 80 km/hora no permitía cumplir los condicionantes de velocidad comercial media exigidos y que era necesario alcanzar al menos 110 km/hora.

Se constató, asimismo, que en la alternativa con un material móvil susceptible de circular a mayores velocidades (120 km/h.) hubiese dado lugar a soluciones mucho más complejas, tanto en la infraestructura del ferrocarril como en el material móvil, donde se deberían efectuar importantes modificaciones en el proyecto inicial en aspectos de la caja (resistencia, formas e insonorizaciones) como en el bogie (guiado de caja a base de pivote, rigideces en las suspensiones, nueva suspensión del motor, etc.)

Estas soluciones no serían compatibles con la circulación en la red de Metro además de encarecer el precio y alargar los plazos de construcción.

Seleccionando, pues, la velocidad máxima de 110 km/h y los parámetros básicos de compatibilidad, se abordó el diseño definitivo.

La flexibilidad cinemática exigida, ha sido posible alcanzarla debido básicamente a tres conceptos constructivos:

- La alta capacidad de carga que admite la nueva electrónica de potencia con IGBT, constituida por un ondulador por bogie y la fiabilidad asociada a esta arquitectura.



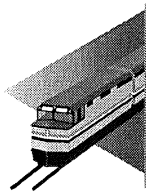


- Utilización de un motor de tracción trifásico de altas prestaciones, capaz de adaptarse en su ciclo térmico-funcional, a los periodos de aceleración y frenado de ambas redes (Metro y Arganda).
- La utilización de una electrónica de control y regulación programable que permite utilizar aquella curva característica (esfuerzo - velocidad limitación de corriente de red), que en cada tramo mejor se adapte a la necesidad del mismo.

Con relación al bogie se tomaron como punto de partida las características del utilizado en el material tipo 5000.

En estas condiciones, las características básicas del bogie eran:

- Tipo: Monomotor
- Accionamiento: Doble eje, mediante árboles cardánicos de doble reducción
- Reductor: De doble reducción
- Posición del motor: Longitudinal. Apoyado
- Guiado de ejes: Susp. Primaria doble campana
- Guiado de caja: Corona de bolas y amortiguación transversal

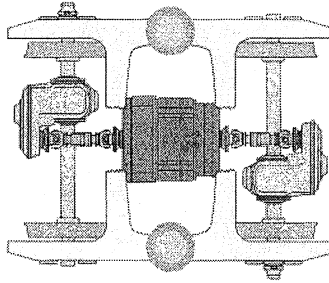
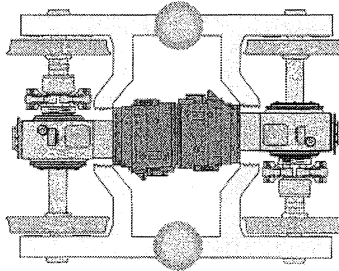
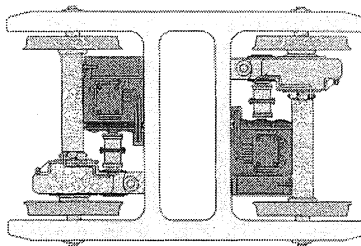


Esta solución de bogie no es apropiada para las nuevas necesidades, requiriendo cuidados específicos (exactitud en el diámetro de ruedas), debido básicamente a la rigidez mecánica de la cadena cinemática formada por el motor de tracción-transmisiones-reductores y ambos ejes del bogie.

En comparación con esta arquitectura de bogie, los nuevos requerimientos cinemáticos para circular a 110 km/h. exigen una estructura de bogie que garantice la estabilidad en la circulación y minimice la agresividad rueda-carril. Así las nuevas características o variaciones comparativas a introducir son:

- Tipo: Bimotor
- Accionamiento: Directo motor-acoplamiento-reductor
- Reductor: De un solo escalón
- Posición del motor: Longitudinal. Suspenido (la posición exacta está actualmente en fase de estudio)
- Guiado de ejes: Suspensión primaria de doble campana y mayor rigidez
- Guiado de caja: Corona de bolas y amortiguadores transversales y topes de guiado.

En la figura nº 3 puede observarse la evolución del accionamiento del bogie de la actual serie 5000 a la futura serie 6000.

**SOLUCION DE BOGIE TIPO 5000****ALTERNATIVA 1. DE BOGIE TIPO 6000****ALTERNATIVA 2. DE BOGIE TIPO 6000***Figura 3*

El resultado fue la adaptación de las características reflejadas en los siguientes parámetros técnicos que exponen junto a los del material 5000 para su comparación.

	<b>5000</b>	<b>6000</b>
ESFUERZO DE TRACCIÓN EN RECTA Y HORIZONTAL	110 kN/unidad	178 kN/unidad
VELOCIDAD MÁXIMA DISEÑO	90km/h.	110 km/h
ACELERACIÓN DE EXPLOTACIÓN	1 m/sg <sup>2</sup>	1 m/sg <sup>2</sup>
ACELERACIÓN MEDIA HASTA 80 km/h	0,25m/sg <sup>2</sup>	0,86 m/sg <sup>2</sup>
RELACIÓN DE TRANSMISIÓN	1 : 6,349	1 : 5,888
INTENSIDAD TERMICA EQUIVALENTE (en % I permitida máquina)	92%	78%
CÓDIGOS ATP	34/57/70	34/57/70/95/110

En la figura nº 4 y las curvas características en tracción y freno para

- MÁXIMAS PRESTACIONES (AZUL)
- CONDICIONES NOMINALES DE AJUSTE (ROJO)
- SIMULACIÓN DE COCHE 5000 (VERDE)

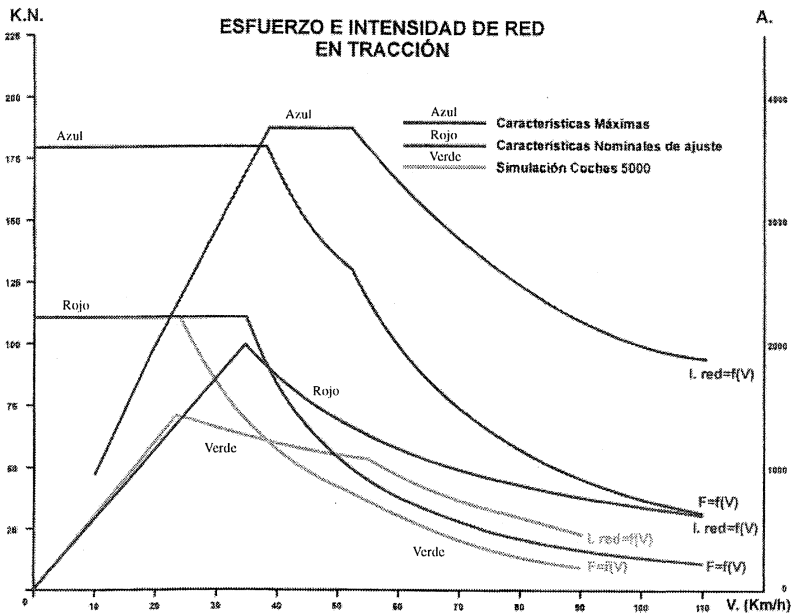
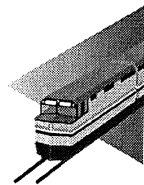


Figura 4

El proyecto de interiorismo inicialmente previsto, ha sufrido una profunda adaptación, dada la disparidad entre las exigencias de ocupación en la red de Metro y en Arganda (6 viajeros/m<sup>2</sup> y 2 viajeros/m<sup>2</sup>, respectivamente).

A la distribución inicial prevista de asientos longitudinales (al objeto de aumentar la superficie destinada a viajeros de pie y típica de Metro), siguieron nuevas distribuciones a base de asientos transversales fijos y abatibles (transportines).

## **6. EQUIPAMIENTOS Y SEGURIDAD PASIVA**

Además de los ya citados anteriormente, cabe indicar los siguientes aspectos:

### **ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

El actual desarrollo de componentes electrónicos de altas prestaciones, ha permitido la utilización de IGBT's para este proyecto, al trabajar METRO en la gama de las pequeñas tensiones (600 V.cc. en catenaria) y potencias medias (aproximadamente 600 kW/coche).

El empleo de esta técnica, su modulación y refrigeración, permite importantes ahorros de peso, volumen y equipos asociados por bogie, si bien han quedado compensados por otras exigencias de los Pliegos (posibilitar el freno regenerativo y reostático, elevada impedancia del filtro de entrada, etc.).

### **ARQUITECTURA INFORMÁTICA**

El desembarco de las técnicas informáticas y el empleo masivo de microprocesadores en el campo ferroviario del material móvil, es un hecho ya asentado. En el nuevo material móvil y a nivel de tren, se forma una red informática, para la cual se utilizan buses y códigos de transmisión específicos, mediante las cuales las funciones, ordenes, controles, memorización de eventos, etc., se potencian enormemente con respecto al mando convencional.

A esta situación, se añade la monitorización en cabina de los principales parámetros y condiciones, que en tiempo real, se están produciendo en el tren, lo que facilita la toma de decisiones del Conductor, y/o del Puesto de Mando.

Otras aplicaciones, asociadas a los desarrollos informáticos, y ampliamente utilizadas en otros medios de transporte, también han sido incorporadas en estos coches, como es el caso de la "caja negra" y los denominados sistemas de "ayuda a la conducción y mantenimiento".



## POTENCIACIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN E INFORMACIÓN AL VIAJERO

Además de los ya conocidos sistemas de megafonía interior y radiotelefonía para la comunicación tren-tierra (Puesto de Mando), se dispone en este nuevo material móvil de subsistemas para la emisión de mensajes hablados (interfonía viajero-conductor; mensajes pregrabados; indicación de próxima estación y correspondencias; destinos; indicaciones de servicio) y mensajes escritos (paneles interiores y exteriores, con textos fijos y en scroll con información semejante a las ya citadas anteriormente).

### SISTEMA DE TVCC

Destinado a incrementar la seguridad de los usuarios mediante la disuasión que produce la captura de imágenes del interior de los coches.

La funcionabilidad del sistema está asegurada por la incorporación de dos cámaras por coche situadas en los extremos del mismo y con capacidad y calidad adecuada para la identificación de personas, objetos y colores.

En cabina, las imágenes se presentan en un monitor de forma secuencias. Sin embargo, el sistema está preparado para condiciones especiales como es el caso de parar la imagen en casos de accionamientos de emergencia, problemas en puertas, etc. Asimismo, es posible la grabación digital en anillo, diversas velocidad de grabación e incluso la posibilidad futura de conmutar las imágenes interiores por las del andén, en las proximidades de aquél.

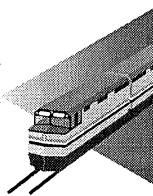
Su funcionabilidad, capacidad de registro y manipulación del sistema, estará sometido a las prescripciones legales sobre la materia.

### CONFORT

Tanto los aspectos estéticos del interiorismo (colores, formas, texturas) han sido cuidadosamente tratados con el fin de alcanzar un entorno agradable, como los parámetros técnicos a alcanzar en cuanto a niveles de iluminación, empleo de materiales que eviten reflejos, niveles de ruido admisibles, incorporación de aire acondicionado, consecución de los parámetros de confort de marcha contemplados en la ficha *UIC* aplicados a aceleraciones, vibraciones y frecuencias de los sistemas de suspensión.

### PROTECCIÓN AL FUEGO. ANTIGRAFFITI

Especial cuidado imponen los Pliegos de Condiciones, en la selección de materiales (sobre todo de interiorismo) de cara a su reacción al fuego. Así se exigen calificaciones específicas M y F en suelos, paramentos laterales, asientos, cubierta, etc. Por vez primera se utilizarán resinas fenólicas en paneles donde anteriormente se utilizaba poliéster RFV.



Otra exigencia típica es la referida al empleo de cables con aislamientos y cubiertas libre de halógenos, no propagadores de llama e incendio y elevada transparencia de humos.

Por otra parte, y tras multitud de experiencias en el campo de los recubrimientos antigraffiti se ha optado por incorporar en pinturas exteriores agentes antigraffiti que si bien no lo impiden o repelen, su limpieza posterior se simplifica sin apenas efectos sobre la pintura base.

## **PROTECCIÓN ESTRUCTURAL**

En el diseño de las cajas, estas se han concebido como sólidos de deformación progresiva, de forma que ante posibles impactos, choques o alcances, se dispone de diversos escalones que van agotando sus deformaciones elásticas y plásticas, antes de que estas últimas alcancen el recinto de viajeros. Así se dispone de acoplamientos con sus respectivas carreras a tracción y compresión, utilización de cápsulas con fluidos especiales de gran absorción energética, fijaciones mecánicas con esfuerzos de rotura controladas y por último, elementos anticolidión que impiden el trepado y penetración de las cajas en caso de accidente.

Pese a que desde el punto de vista de diseño y construcción se contempla la posibilidad del siniestro, ha de recordarse que toda la explotación comercial de METRO se realiza con protección automática ATP y en consecuencia el conductor está permanentemente vigilado por un sistema de seguridad fail-safe, de aquí que la posibilidad de accidente se reduzca prácticamente de forma absoluta.

## **7 EL MATERIAL MOVIL Y EL MEDIO AMBIENTE**

Los dos grandes principios de desarrollo que sustentan la relación del material móvil con su entorno, son:

- Todas las soluciones técnicas o estéticas, han de estudiarse también bajo el punto de vista de su posible impacto en el medio ambiente.
- Este análisis se extenderá a lo largo de la vida del material móvil.

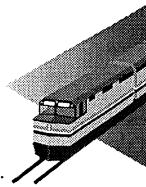
Las exigencias concretas contempladas en los Pliegos, abarcan las tres fases de la vida de los coches :

- Diseño y construcción.
- Operación.
- Retirada del servicio.



## DISEÑO Y CONSTRUCCION

- Minimizar el consumo de energía.  
Altos rendimientos de la cadena de tracción.  
Utilización de frenado regenerativo.  
Optimización en el cálculo de las masas de caja y bogie.
- Materiales y procedimientos.  
Definición y prohibición de materiales tóxicos  
Asbestos. Arsenicos. Cianuros. PVC. Halógenos. Freones. Plásticos no biodegradables. Metales pesados excepto en usos específicos (Ni; Cr; Cd).
- Materiales reciclables.  
Marcado e identificación.  
Recuperación de materiales metálicos.  
Procedimiento físico-químico de reciclado.
- Análisis toxicológicos.  
Todos los fluidos a utilizar irán precedidos de estos análisis (aceites, grasas, etc.).



## OPERACIÓN

- Programas de marcha económica, reduciendo el consumo energético.
- Niveles de ruido.
- Protección al fuego.

## RETIRADA DEL SERVICIO

- Reciclado de materiales.  
Materiales separables e identificados. Posibilidad de molturado o troceado.  
Procesos de manipulación en presencia de fuego que no produzca toxinas.

## 8. EL MATERIAL MÓVIL Y SU CONSERVACIÓN

Las especificaciones de los Pliegos, tratan de obtener un material móvil fiable y con los menores gastos de conservación asociados. Sin embargo, y al objeto de cumplir estos objetivos desde los puntos de vista técnico y contractual son definidos valores concretos en los campos de la:

- Fiabilidad.
  - Disponibilidad.
  - Mantenibilidad.
-



Figura 5

Parámetros que por otra parte son habituales en todas las explotaciones ferroviarias.

Sin embargo, por vez primera y conforme a las inquietudes generadas en este sector del transporte, también se solicita el *LCC (Life Cycle Cost)* de forma que puedan deducirse los costes a lo largo de la vida del vehículo, y con ello tener elementos de juicio comparativos entre oferentes o alternativas técnicas y

por otra parte planificar con éxito los posibles costes de conservación.

## CONCLUSIÓN

El nuevo material tipo 6000 del Metro de Madrid es, por los condicionantes de operación existentes, un ejemplo claro de la **VERSATILIDAD** que debe poseer el material móvil para un servicio mixto Metro - Interurbano diseñado con el horizonte del año 2000. (Figuras nº 5 y 6).

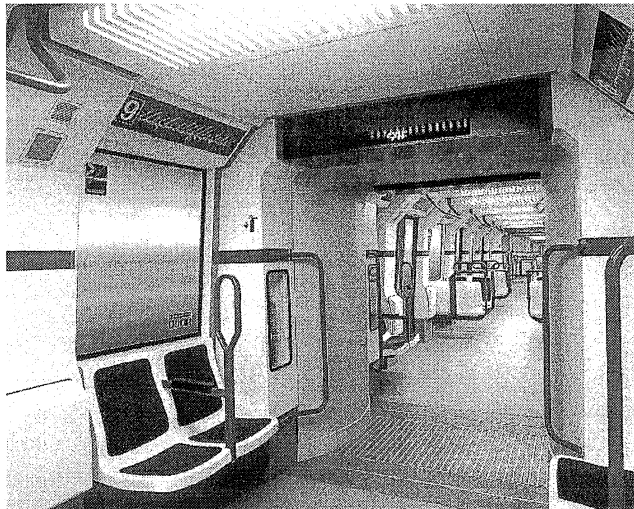


Figura 6. Metro Madrid 6000; MM6000 4/98-13

