

# Situación actual del Parque de Material Móvil de Metro de Madrid y perspectivas de evolución del Mantenimiento a medio y largo plazo

M<sup>a</sup> Antonia García San Andrés

Ingeniero Industrial

Gerente del Taller Central de Metro de Madrid

Manuel González Márquez,

Subjefe de la Gerencia de Ingeniería de Metro de

Madrid



## Generalidades

**M**etro de Madrid posee, a fecha uno de enero del año 2000, un Parque de 1.322 coches en explotación para el servicio de viajeros. Este Parque se ha incrementado de forma importante en los últimos años, pasando por los valores de 1.076, 1.094 y 1.214 a uno de enero de los años 1997, 1998 y 1999 respectivamente, para alcanzar actualmente el valor citado al principio, en una evolución acorde al importante crecimiento de la red en este mismo intervalo temporal.

Este Parque de Material Móvil está dividido en seis grandes tipos de coches (denominados 300, 1.000, 2.000, 5.000 y 6.000) puestos en servicio en épocas diferentes y con tecnologías también diferentes. Algunos de estos tipos presentan series dentro

de ellos (5000-1<sup>a</sup>, 5000-2<sup>a</sup>, etc.) con diferencias tecnológicas entre sí, acordes con su evolución. Los coches 5.000 y 6.000 corresponden a las líneas de gálibo ancho (6, 7, 9 y 11), mientras que los demás corresponden a las líneas de gálibo estrecho (el resto de la red).

## Tecnologías de Tracción

Los coches más antiguos del Parque que se encuentran en servicio poseen una tecnología de tracción reostática, es decir, motores de corriente continua con regulación de la velocidad mediante la eliminación de resistencias utilizando un combinador de levas y acoplamiento serie-paralelo de los grupos de motores. Comprenden los coches 300, 1.000 y 5.000-1<sup>a</sup> serie, puestos en servicio entre 1965 y 1982. Los más antiguos utilizan un

relé de aceleración para controlar el combinador, mientras que los 5.000-1<sup>a</sup> serie utilizan un regulador electrónico de marcha.

La siguiente generación corresponde a los coches 5.000-2<sup>a</sup> serie (años 1982 a 1984), que utilizan una tecnología de tracción *chopper*. En estos coches se mantiene el motor de colector de corriente continua, pero la regulación de la velocidad se hace ya mediante electrónica de potencia. El empleo de tiristores de potencia permite aplicar a los motores de tracción una tensión de valor medio variable dependiendo del momento de apagado de los tiristores, dentro de una secuencia cuyo encendido se hace a frecuencia fija. Estos coches incorporaron por vez primera el freno eléctrico mixto regenerativo sobre la red y reostático, que posteriormente han adoptado ya todas las siguientes series de coches.

Los coches de la serie 2.000 (puestos en servicio a partir de 1984 y todavía en fase de adquisición) utilizan tecnología trifásica. Están dotados de motores de tracción asíncronos trifásicos con rotor de jaula de ardilla, alimentados mediante un ondulador y un *chopper* que convierten la tensión continua de la catenaria en tensión alterna trifásica de tensión y frecuencia variables. La regulación se realiza mediante una Electrónica que incluye microprocesadores.

La última generación de coches serie 2.000 (puestos en servicio a partir de finales de 1997) disponen



de un sistema informático que controla la mayor parte de las funciones del tren, con transmisión de la información mediante un *bus* de datos. Este equipamiento dispone de un sistema de ayuda a la conducción y al Mantenimiento con un memorizador de los parámetros de la marcha del tren o caja negra.

Los coches de la serie 6.000 han avanzado todavía un paso más en la tecnología de tracción. Poseen motores asíncronos trifásicos pero alimentados mediante onduladores directos de red, que incorporan componentes de potencia IGBT, lo que simplifica de forma importante el equipo eléctrico. También disponen de control mediante microprocesadores y de un sistema informático de a bordo con caja negra. Otras novedades interesantes de estos coches son la incorporación del pasillo de intercircularción entre los dos coches de la unidad, o el dispositivo *anti-climber*, destinado a evitar el *telescopaje* entre las cajas en caso de accidente.

En el momento actual se encuentra en fase de contratación otra nueva generación de coches de gálibo ancho, denominada serie 7.000, y destinada a las ampliaciones de la red en curso (líneas 8, 10 y Metrosur). Utilizarán composiciones de tres o seis coches, según la línea (seis coches en línea 10 y tres en línea 8 y Metrosur), pero con pasillo de intercircularción entre todos los coches del tren. Además, la tensión de alimentación nominal será de 1.500 V. cc. en lugar de los actuales 600 V. cc. aunque podrán circular también bajo esta última tensión.

### Componentes mecánicos

Los coches de las series 1.000 y 300 están dotados de bogies bimotores, con motores de tracción en posición transversal. La suspensión es por bloques *sandwich* de metal-caucho en los coches 1.000, y por resortes cónicos de caucho y muelles helicoidales en los 300. Las ruedas son enterizas y

los enganches de tracción son **Tomlinson**.

Los coches 5.000 poseen bogies monomotores con el motor de tracción colocado en posición longitudinal. La suspensión primaria es de resortes cónicos de caucho y la secundaria, neumática. La mayoría tienen ruedas elásticas y los enganches de tracción son **Scharfemberg**.

En los coches 2.000 se mantiene la posición longitudinal del motor de tracción, pero éste se encuentra dividido en dos semimotores independientes. Esto es necesario para que los coches se puedan inscribir correc-

de caucho y la secundaria, neumática. Las ruedas son enterizas insonorizadas. Los enganches son **Scharfemberg**, permitiendo un acoplamiento mecánico con los coches 5.000 para situaciones excepcionales pero no eléctrico ni de mando.

### Equipos de ATP y ATO, y de comunicaciones

Todo el Material Móvil del **Metro de Madrid** está dotado de equipos ATP, que impiden el rebase de semáforos en rojo y limitan la velocidad del tren en función de las peculiaridades del trazado o de la

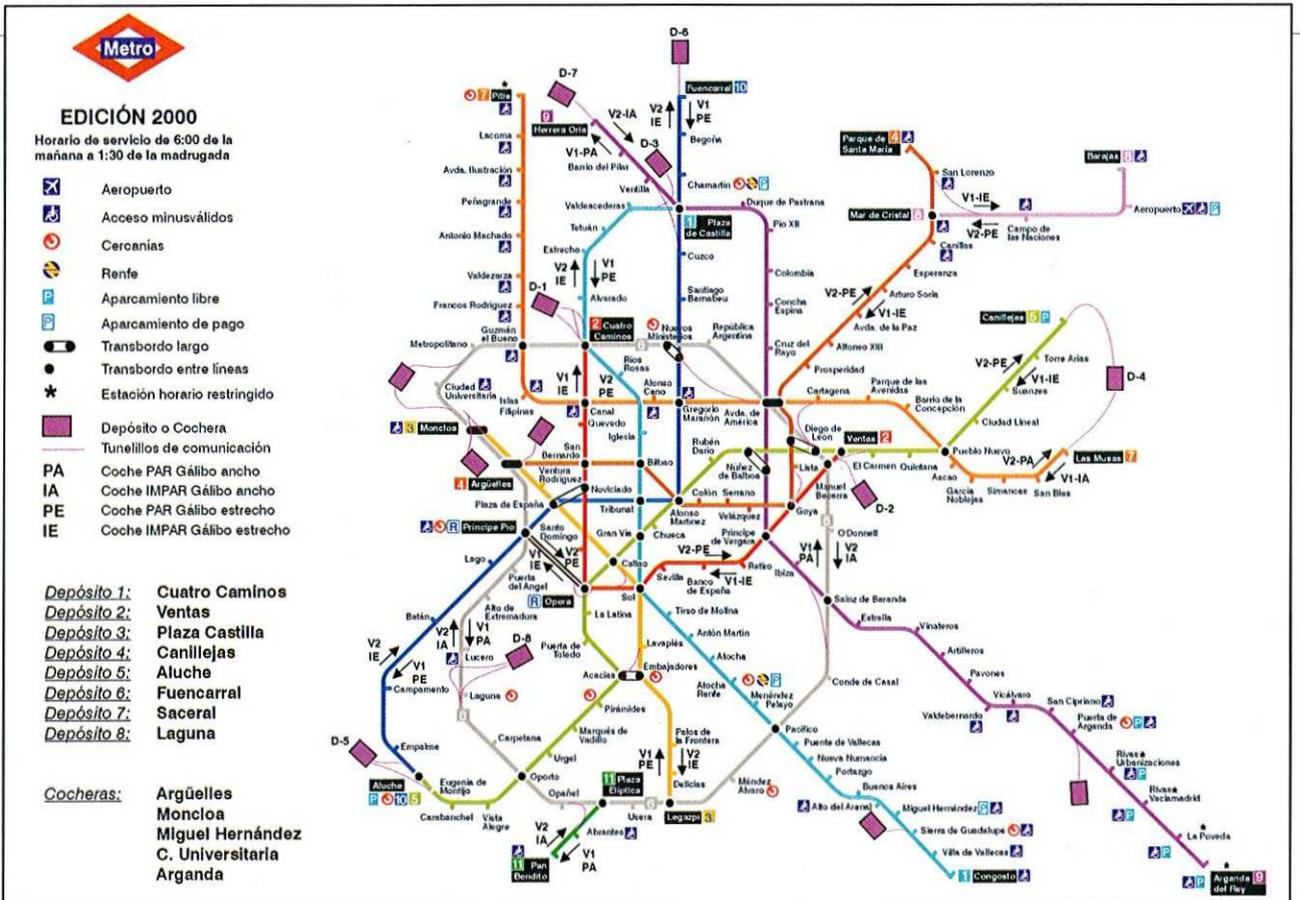


tamente en las curvas de radio reducido de la red antigua. La suspensión primaria es de resortes cónicos de caucho en los coches motores y de resortes helicoidales en los remolques; la secundaria es neumática en ambos casos. Las ruedas de los coches motores son elásticas, mientras que las de los remolques son enterizas dotadas de un sistema de amortiguación de ruidos. Los enganches de tracción son **Scharfemberg**.

En cuanto a los coches 6.000, se ha mantenido una disposición similar a los 2.000 de dos semimotores de tracción longitudinales. La suspensión primaria es de resortes cónicos

proximidad del tren anterior. Además, la mayor parte del Parque está dotado de equipos de conducción automática, en la cual el conductor solamente abre y cierra las puertas y da la orden de arranque del tren. Existe la previsión de ampliar este sistema a todo el Parque y a todas las líneas en los años próximos.

Los primeros equipos de ATP y ATO se pusieron en servicio en el **Metro de Madrid** en 1976, en los coches 5.000-1ª serie. Conforme ha ido evolucionando la tecnología, estos equipos han ido mejorando notablemente en diseño y prestaciones. Los coches 5.000-2ª introdujeron a partir



de 1984 equipos de ATO con micro-procesador, primera vez que estos elementos se utilizaban a bordo del Material Móvil. También entre 1984 y 1987 se dotó de equipos de ATP a los trenes entonces existentes de las serie 300 y 1.000, mientras que, a partir de estas fechas, todo el nuevo material ha venido dotado de origen de ambos equipos.

Actualmente se están implantando sistemas de ATP cuya transmisión de señales por la vía se hace mediante códigos de frecuencias FM en lugar de AM como anteriormente. Ello permitirá próximamente la implantación del sistema de velocidad objetivo y para el futuro está en estudio un sistema con cantones móviles. Todo ello permitirá incrementar el número de trenes en cada línea, reduciendo los intervalos y manteniendo unas totales condiciones de seguridad en la circulación.

En cuanto a los equipos de comunicaciones, todos los trenes están dotados de radiotelefonía con el puesto de mando y de megafonía que

permite establecer comunicación entre el conductor y los viajeros. En los trenes más modernos (series 2.000 y 6.000), además, el puesto de mando puede emitir mensajes a los viajeros directamente. Los equipos de radiotelefonía (que trabajan en la banda de 160 MHz) van a ser sustituidos por otros con tecnología digital del sistema Tetra y frecuencias de la banda de 410-430 MHz, lo que permitirá la radiotelefonía selectiva, transmisión de datos y mejora de la fiabilidad del sistema, entre otras ventajas.

### Situación actual del Mantenimiento

El Mantenimiento del Material Móvil de Metro de Madrid se basa en la actualidad (como en la mayoría de las explotaciones ferroviarias) en un Mantenimiento llamado de "Segunda generación", por detrás de otros sectores más innovadores como es el de la aviación.

Este Mantenimiento, a semejanza de la mayoría de explotaciones fe-

roviarias, se basa en la realización de actividades de dos tipos: Mantenimiento preventivo "hard time" y Mantenimiento correctivo. Las actividades preventivas se dividen, a su vez, en dos: intervenciones preventivas de ciclo corto e intervenciones preventivas de ciclo largo.

- El de ciclo corto o de primer nivel, se lleva a cabo en nueve depósitos distribuidos por la red de Metro (fig.1) y se basa en una serie de inspecciones de seguridad y comprobaciones funcionales denominadas (*visitas*) y en unas operaciones de ciclo medio, en el entorno de la periodicidad anual, que, aunque actualmente se encuentran subdivididas en módulos, se llevan a cabo a ciclos fijos. El Mantenimiento correctivo consiste en la reparación de las averías que se producen durante el servicio de los trenes en las líneas de la Red.

Este Mantenimiento se ha venido optimizando en los últimos años mediante la modularización de las intervenciones periódicas y, en cuanto al Mantenimiento correctivo, inten-

tando una localización rápida del equipo averiado a través de técnicas avanzadas de diagnosis y realizando su sustitución inmediata; el equipo averiado sustituido se envía al Taller Central de Mantenimiento de segundo nivel para su reparación y posterior investigación de las causas de los fallos.

- Las actividades de Mantenimiento preventivo de ciclo largo, junto con las reparaciones de los componentes del Material Móvil averiados en la explotación, y las grandes transformaciones de las unidades tren, los repintados integrales, así como el segundo nivel de Mantenimiento de las Instalaciones Fijas de la Red - reparación de los componentes averiados en operación - se lleva a cabo en el Taller Central de Canillejas.

Este Mantenimiento (al igual que el de ciclo corto con excepción de las limpiezas) se lleva a cabo con personal propio, consiguiéndose una notable optimización de la utilización de los recursos disponibles (a pesar de la paulatina reducción de

mano de obra experimentada en los últimos años), a través de la implantación de nuevos sistemas organizativos de planificación y control informatizados, la mejora de rendimientos individuales, y la implantación de nuevos sistemas de Aseguramiento de la Calidad. Concretamente, el Taller Central de Canillejas ha conseguido la acreditación UNE-EN ISO 9002 para el conjunto de sus instalaciones y la totalidad de sus procesos productivos, otorgada por la empresa SGS ICS Ibérica AEIE (*International Certification Services*) acreditada por ENAC.

### Perspectivas de evolución a corto y medio plazo

Una vez conseguida una aceptable optimización del Mantenimiento preventivo basado en operaciones rutinarias sistemáticas, mediante la utilización de herramientas informáticas para el control y programación de las operaciones, incrementando la productividad de la mano de obra e implantando sistemas de aseguramiento

de la calidad, se alcanzan unos niveles de estabilización en cuanto a los índices de fiabilidad, disponibilidad y costes en todas las explotaciones ferroviarias que continúan aplicando técnicas de Mantenimiento de Segunda generación.

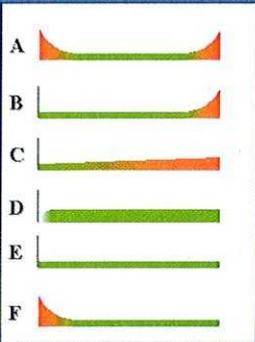
Para salir de estos niveles de relativo estancamiento existen varias vías que, lógicamente, habría que adoptar de forma simultánea y que se enmarcan dentro de lo que se ha convenido en llamar "Técnicas de tercera generación":

- **Vías tecnológicas:** en las que Metro de Madrid viene avanzando desde hace años bien a través del Mantenimiento predictivo basado en el análisis de aceites, o bien a través del Mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones implantado hace seis años en los coches 5.000 y 2000 con enorme éxito.

- **Sistemas organizativos:** que cambian la filosofía del Mantenimiento tradicional como el RCM (*Reliability Centred Maintenance*), mantecnología basada en la defini-



### La Realidad de los Fallos



**Curvas A, y B :**  
En estos casos existe una evolución en el aumento del índice de fallos desde una determinada edad.

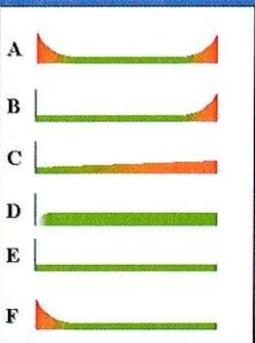
En estos equipos puede resultar beneficiosa la realización de operaciones de mantenimiento preventivo.

**Curvas C, D, E y F:**  
Para estos componentes no aportan ninguna ventaja las acciones preventivas.

- **Curva tipo C:** en este caso no existe una edad identificable en la que comience a aumentar el índice de fallos, por lo que es oportuno efectuar una sustitución preventiva después de que el componente alcance una edad determinada
- **Curvas D, E y F:** en estos casos al aumentar la edad de los componentes se mantiene constante el índice de fallos, por lo cual no es aplicable una sustitución preventiva.

RCM

### La Realidad de los Fallos



**Curva A: "La curva de bañera"**  
Alta mortalidad infantil, seguida de un bajo nivel de fallos aleatorios, terminando en una zona de desgaste.

**Curva B: "El tradicional punto de vista"**  
Pocos fallos aleatorios, terminando en una zona de desgaste.

**Curva C:**  
Un constante incremento en la probabilidad de fallo.

**Curva D:**  
Un rápido incremento en la probabilidad del fallo, seguido de un comportamiento aleatorio.

**Curva E: Fallos Aleatorios**  
No hay relación entre la edad funcional de los equipos y la probabilidad de que fallen.

**Curva F:**  
Alta mortalidad infantil, seguida de un comportamiento aleatorio de la probabilidad de los fallos.

RCM

ción de unas nuevas consistencias de Mantenimiento más fundamentadas en la fiabilidad, seguridad y experiencia de los mantenedores que en prescripciones o manuales de los propios constructores de las unidades de tren. Se trata de un sistema complejo, de difícil implantación, pero que, a la postre, siempre lleva asociado un incremento de la fiabilidad y una reducción de los costes de Mantenimiento.

Esta última alternativa puede constituirse en el medio y largo plazo como una de las vías que nos permita salir del estancamiento de nuestros índices actuales, por tratarse de una de las *mantecnologías* de tercera generación en la que estamos profundizando en el momento actual. (Fig. 2).

### Mantenimiento basado en fiabilidad

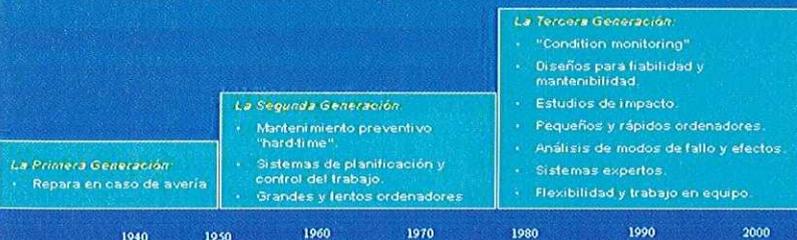
Es a partir de los años 70 en el campo de la aviación y a partir de la década de los 80 en el resto de las industrias, especialmente en el sector de centrales nucleares, cuando se plantea la necesidad de abordar un nuevo cambio en la filosofía de Mantenimiento, identificándose el citado RCM como una posible nueva técnica de tercera generación útil, e iniciándose los correspondientes estudios piloto.

*El RCM es una técnica usada para establecer los requerimientos de Mantenimiento de cualquier componente de un sistema en su contexto operacional, reconociendo que el objetivo de las tareas de Mantenimiento que se aplican a un sistema es el de asegurar que éste continúe manteniendo su funcionalidad y fiabilidad inherentes.*

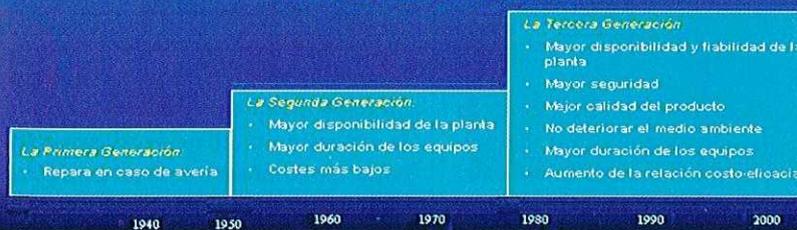
RCM también reconoce que equipos idénticos tendrán diferentes requerimientos de Mantenimiento en diferentes contextos operacionales. Esta filosofía resulta novedosa con respecto a la visión tradicional en la que el Mantenimiento se orientaba al componente considerándolo como un elemento aislado y no como un integrante de un todo con una función a realizar.

La filosofía RCM plantea, partiendo de un objetivo de fiabilidad, disponibilidad y seguridad, el establecimiento del programa de Mantenimiento óptimo desde el punto de vista técnico-económico,

### EL CAMBIANTE MUNDO DEL MANTENIMIENTO: NUEVAS TECNICAS



### NUEVAS EXPECTATIVAS



orientado a los componentes considerados como críticos para el funcionamiento de los sistemas, eliminando tareas de Mantenimiento preventivo improductivas o superfluas que se aplicaban a los componentes no críticos en el Mantenimiento tradicional.

### La realidad de los fallos

El punto de vista acerca de los fallos ha ido evolucionando a medida que lo hacían las técnicas de Mantenimiento y la tecnología de los equipos.

En un principio, y durante la llamada "Primera generación", el punto de vista acerca de los fallos era simplemente que cuando los elementos físicos envejecen tienen más probabilidades de fallar, mientras que un conocimiento creciente acerca del desgaste por funcionamiento durante la "Segunda generación" llevó a la convicción general en la llamada "curva de bañera".

Sin embargo, la investigación llevada a cabo por la "tercera generación" de Mantenimiento ha revelado que, debido a la evolución tecnológica que han experimentado los equipos en las últimas décadas, sólo una parte de ellos ajusta su modo de fallo a la citada "bañera" existiendo hasta un total de seis modos de fallo diferentes.

La aplicación de un Mantenimiento preventivo sistemático de segunda generación a equipos que no reproducen ese patrón de fallo, no hará más que encarecer las actividades de Mantenimiento, induciendo los lógicos fallos por manipulaciones que no aportan valor añadido salvo en los equipamientos puramente mecánicos. (Figs. 3 y 4).

### Cuestiones básicas del RCM

El RCM utiliza un proceso de decisión homogéneo y estructurado para la selección de las tareas de Mantenimiento más adecuadas.

La metodología RCM identifica las **funciones de los equipos, los fallos posibles, las causas de estos fa-**

**llos y sus consecuencias** y, a continuación, a través de la ejecución de un proceso sistemático y homogéneo basado en matrices de decisión, establece la selección de las tareas de Mantenimiento que se consideran técnicamente más eficaces y económicamente más rentables para tratar de impedir la aparición de dichas causas de fallo.

RCM usa un nuevo marco estructurado para responder a las siguientes cuestiones sobre un equipo seleccionado dentro de su contexto operacional:

- *¿Cuáles son las funciones y los rendimientos estándar de funcionamiento deseados?*
- *¿De qué forma puede fallar para dejar de satisfacer un estándar de funcionamiento?*

grama de tareas eficientes de Mantenimiento que prioriza la aplicación de técnicas de Mantenimiento predictivo frente a tareas rutinarias periódicas que impliquen la indisponibilidad del equipo y mayores costes de Mantenimiento, así como los procesos de búsqueda de fallos cuando éstos no son evidentes para los operadores.

### Resumen y conclusiones

Metro de Madrid, si bien ha alcanzado unos índices muy positivos en cuanto al Mantenimiento de su Material Móvil (considerando los parámetros de fiabilidad, disponibilidad y coste del Mantenimiento de su Parque), sigue decididamente apostando por la mejora continua a través de nuevos métodos de Mantenimiento



- *¿Qué causa cada fallo funcional?*
- *¿Qué sucede cuando ocurre un fallo funcional?*
- *¿De qué manera puede fallar?*
- *¿Qué se puede hacer para prevenir los fallos?*
- *¿Qué sucede si no se puede prevenir el fallo?*

El análisis sistemático de cada una de las cuestiones planteadas, siguiendo la metodología establecida por RCM, permite obtener un pro-

avanzado, tanto en los campos puramente tecnológicos (Mantenimiento predictivo), como en los organizativos con la implantación de métodos rigurosos, estructurados y auditables basados en la fiabilidad como es el RCM, albergando firmes expectativas de que, con el esfuerzo del equipo humano de que dispone, junto con las técnicas citadas, se alcanzarán en los próximos años mejoras importantes. ■