

UN NUEVO SISTEMA DE BASCULACIÓN BASADO EN LA DETECCIÓN DE LA POSICIÓN DEL TREN

J.F. García, L.M. Martín, I. Ibarbia, M. Fossati y J.G. Giménez

Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles, S.A.

J.M. Iturrioz, 26 20.200 - Beasain Gipuzkoa

Teléfono: 943 880100; Fax: 943 189170

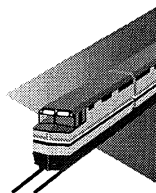
e-mail: ggimenez@caf.es

RESUMEN

La primera causa de limitación de velocidad cuando los trenes circulan en curva es la fuerza lateral sentida por el viajero como consecuencia de la parte de aceleración centrípeta no compensada por el peralte. Los trenes basculantes tratan de eliminar esta limitación mediante la utilización de actuadores que inclinan el vehículo hacia el interior de la curva, generando así un “peralte” adicional.

Los trenes basculantes actuales definen el ángulo de basculación a partir de señales de aceleración medidas en el vehículo. Esta estrategia da lugar a un retraso en la basculación provocado por la necesidad de filtrado y por los tiempos de respuesta del propio vehículo y del sistema de actuación. Por otra parte, la existencia de vibraciones, asociadas a la respuesta dinámica del vehículo ante perturbaciones de la vía, da lugar a oscilaciones en el propio sistema de basculación, tanto mayores cuanto peor es el estado de mantenimiento de la vía.

Se presenta una nueva estrategia de basculación de vehículos ferroviarios que evita los problemas asociados a los trenes basculantes actuales. Se basa en la utilización de la información correspondiente al trazado del trayecto y a la posición del tren en el mismo. Se presentan los diferentes componentes del sistema de basculación



así como los resultados obtenidos en vía con un prototipo experimental.

1. INTRODUCCIÓN

La idea de utilizar trenes basculantes como medio de reducir los tiempos de viaje en recorridos con abundantes curvas se remonta a los años 60 en los que varias administraciones ferroviarias realizaron diferentes experimentos con soluciones activas y pasivas. El estado de la tecnología en aquella época y la necesidad de disponer de una vía con un trazado adecuado y un elevado nivel de mantenimiento dificultó el desarrollo de soluciones activas. De esta forma, al final de los años 70 sólo el tren Talgo se encontraba en servicio comercial como tren pendular, aunque sus prestaciones de pendulación limitadas a 3° quedaban muy por debajo de los 8° que prometían las soluciones activas.

A final de los años 80 los Ferrocarriles Italianos decidieron rentabilizar la inversión tecnológica realizada en el Pendolino desde la primera mitad de los años 70, ordenando la fabricación de una serie bajo el nombre de ETR-450 (Camposano; 1.979). Simultáneamente los Ferrocarriles Suecos pusieron en servicio el X2000, el cual, al contrario del Pendolino, utilizaba una locomotora no basculante y un conjunto de coches remolque con basculación activa (Kühborth y Keil; 1.993). Estas iniciativas fueron el detonante de la utilización de nuevos trenes basculantes en diferentes administraciones europeas. Así, en Alemania se puso en servicio el VT-610 que utiliza un sistema de basculación basado en el ETR-450 (Kottenhahn; 1.993) y posteriormente el VT-611 (Sauer y Kottenhahn; 1.997) el cual incluye como novedad la utilización de actuadores electromecánicos.

Todos los sistemas de basculación citados basan su estrategia en el reconocimiento en tiempo real de las necesidades de compensación de aceleración lateral experimentada por el pasajero. Para ello utilizan diferentes estrategias que, en general, se basan en la medida de aceleraciones laterales o velocidades angulares en algunos puntos específicos del vehículo. La eficacia de estas estrategias resulta muy dependiente del estado de mantenimiento de la vía y de su trazado. Para su aplicación resulta necesario distinguir entre el movimiento necesario en el vehículo para seguir el trazado y su respuesta dinámica debida tanto a la excitación originada por el trazado como por las irregularidades propias de la vía.

La utilización como señal de consigna en el sistema de control de basculación de una señal obtenida de los sensores instalados en el vehículo obliga a un filtrado que elimine la respuesta dinámica y retenga exclusivamente la parte de señal correspondiente al movimiento de seguimiento del trazado. Este filtrado induce un retraso que se suma al de la propia respuesta del vehículo en el seguimiento del trazado. La suma de ambos retrasos más el asociado al propio sistema de actuación da lugar a una basculación retrasada respecto de la necesidad real definida por la posición de cada vehículo en el trazado. El retraso asociado al filtrado será tanto mayor cuanto mayor sea el orden del filtro empleado. El orden del filtro, a su vez, deberá ser mayor cuanto mayor sea el nivel de respuesta dinámica del vehículo y por tanto, cuanto peor sea el estado de man-

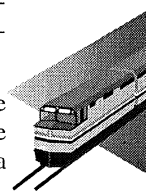


tenimiento de la vía. Como consecuencia, las prestaciones de los sistemas de basculación actualmente en servicio se resienten de forma muy acusada cuando la vía no cumple unos requisitos muy exigentes de calidad de mantenimiento.

Por otra parte, aunque el estado de mantenimiento de la vía sea bueno, si el trazado presenta curvas con transiciones cortas, se exigen al sistema de actuación reacciones muy rápidas que son origen de respuestas dinámicas en la suspensión del vehículo no ya a la excitación que proviene de la vía, sino al propio sistema de basculación. El resultado es un deterioro apreciable de la calidad de marcha.

Desafortunadamente, las vías en las que los sistemas de basculación resultan más eficientes no se distinguen normalmente por su buen estado de mantenimiento ni por disponer de un trazado ideal en que las transiciones sean largas y bien trazadas. Por el contrario, en una gran parte de las vías en que la basculación puede ser más eficiente las transiciones son muy cortas (a veces inexistentes) y las irregularidades de vía alcanzan amplitudes importantes. En esta situación los sistemas de basculación habituales no resultan efectivos.

El sistema de basculación desarrollado por CAF que se presenta en este artículo trata de evitar los inconvenientes anteriores haciendo que sus prestaciones resulten mínimamente dependientes del trazado y totalmente independientes del estado de mantenimiento de la vía.



Por otra parte, el sistema de actuación, parte fundamental de cualquier sistema de basculación, cobra gran importancia en las prestaciones de fiabilidad, mantenibilidad y en su facilidad de instalación en el tren. En este sentido, los actuadores electromecánicos presentan grandes posibilidades de mejora respecto de la utilización más habitual de actuadores hidráulicos en esta aplicación.

En los apartados que se presentan a continuación se describirá la estrategia de basculación desarrollada por CAF y que, como se demuestra, presenta importantes ventajas respecto de otras estrategias actualmente en servicio. Asimismo se presentará el bogie basculante que ha sido desarrollado para el primer vehículo-prototipo. Posteriormente se describe el sistema de actuación desarrollado por MOOG para el sistema CAF de basculación y sus ventajas de sencillez y mínimo número de componentes, lo que redundará en unas prestaciones ventajosas de fiabilidad y mantenibilidad. Finalmente se presentará el vehículo-prototipo y los resultados obtenidos en ensayos realizados en vía con el nuevo sistema de basculación.

2. NUEVO CONCEPTO DE BASCULACIÓN

El sistema de basculación que ha desarrollado CAF está basado en el conocimiento previo del recorrido y en una actuación de basculación optimizada que consigue el mayor nivel de confort en el pasajero. Mediante esta nueva estrategia de basculación se alcanzan los siguientes resultados:

- La actuación sobre la inclinación de la caja no experimenta retrasos. Incluso, dicha actuación se programa con anticipación a la curva que compense el retraso en la respuesta del sistema.
- Antes de llegar a la curva, el sistema de basculación conoce todos los parámetros de la misma, lo que permite adecuar la ley de actuación al perfil de curva y a las condiciones de circulación.
- La inclinación de la caja en las transiciones de entrada y salida de las curvas sigue una ley parametrizada que ha sido obtenida mediante simulaciones teóricas del comportamiento dinámico del vehículo. Esta ley es la óptima para conseguir sobre el pasajero los mejores niveles de confort.
- El conocimiento previo del recorrido permite una basculación suave, incluso por tramos con curvas consecutivas, curva contra-curva o curvas con transiciones cortas.
- El sistema de basculación no inclinará la caja en recta, ni su funcionamiento se verá empeorado por la aparición de perturbaciones dinámicas sobre el vehículo procedentes del mal estado de la vía.

El nuevo sistema de basculación se divide en tres subsistemas:

- SDP: sistema de detección de la posición del tren en el trazado. Es el responsable de identificar el trayecto que se está recorriendo y de determinar en cada instante la velocidad y el punto kilométrico instantáneo del vehículo sobre la vía. Se instala uno por unidad y se comunica con el resto de los equipos del sistema de basculación.
- UCB: unidad de control de basculación. Es la responsable de generar la señal de consigna para los actuadores de basculación instalados en un coche y controlar su seguimiento. Se instala una unidad por coche.
- Sistema de actuación. Es el encargado de convertir las señales de consigna en inclinación relativa de la caja del vehículo respecto de los bogies. El equipo por coche consta de un regulador y de dos actuadores, uno para cada bogie.

En la figura 1 se detalla la distribución de los equipos del sistema de basculación en una unidad compuesta de dos coches. Lo aplicado al ejemplo es extensible a cualquier composición con mayor número de coches. Por cada unidad se cuenta con un sistema detector de la posición que, preferiblemente, va instalado en uno de los coches extremos. Cada vehículo incorpora una unidad de control de basculación que actúa localmente sobre un coche. Esta, a su vez va conectada al sistema de actuación que está compuesto por un regulador que modula la energía eléctrica suministrada a los dos actuadores instalados en los bogies del coche. Tanto el SDP como la UCB llevan sensores incorporados que permiten completar su funcionalidad y ayudar a la supervisión de la operación de basculación.



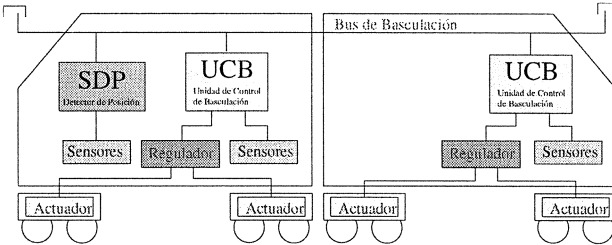
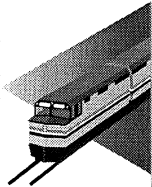


Fig. 1 Diagrama de bloques del sistema de basculación y su distribución en el tren

El modo de funcionamiento del sistema es el siguiente. El SDP (sistema de detección de la posición) instalado en la unidad detecta el trayecto, la dirección de marcha, la velocidad y el punto kilométrico instantáneo que se está atravesando.

A través del bus de basculación, el SDP envía a todas las UCB instaladas en la composición dicha información. Cada UCB recibe la información y actúa localmente en el coche mediante los actuadores instalados en los bogies.

Asimismo, el SDP está conectado con el equipo de información y mando de tren. Mediante esta comunicación es posible, por una parte, informar al maquinista del estado del sistema de basculación y; por otra, recoger órdenes de activación/desactivación procedentes del maquinista.



3. SDP, SISTEMA DE DETECCIÓN DE POSICIÓN

El sistema de detección de la posición calcula la posición instantánea del tren sobre la vía mediante el uso de dos fuentes de información:

- Información del trazado almacenada en la memoria del equipo
- Información procedente de los sensores y demás equipos de detección

El diagrama de bloques así como sus interconexiones se han representado en la figura 2.

Básicamente, el SDP calcula la posición recorrida por el tren mediante la información recogida por 4 sensores de velocidad colocados en los extremos de los 4 ejes del mismo coche. La señal proveniente de los 4 sensores permite realizar el cálculo de distancia relativa.

La posición calculada de esta manera es referenciada al trazado con la ayuda de la información proveniente de un lector de balizas pasivas. Cuando el tren a su paso detecta una de estas balizas conoce un punto kilométrico absoluto.

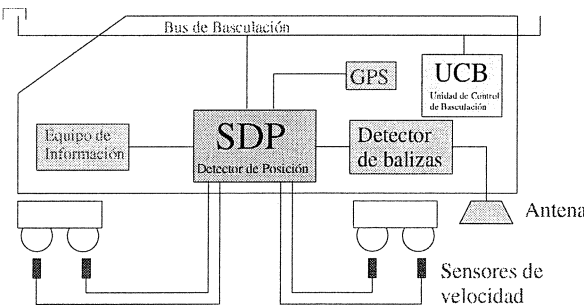


Fig. 2 Diagrama de bloques del SDP

to del trazado que le permite referenciar y validar la posición calculada con los sensores de velocidad. En el caso del explotador de este primer tren basculante, RENFE, se dispone ya de un conjunto de balizas instaladas en la red ferroviaria. Estas balizas están colocadas en las entradas y salidas de estaciones y en todas las bifurcaciones. Debido a ello, la detección de balizas aporta una información doble: el tramo del trazado que se está recorriendo y la referencia absoluta de un punto de la vía.

La posición relativa calculada por los sensores de velocidad está sometida a perturbaciones que, principalmente, provienen del patinaje/deslizamiento entre ruedas y carriles, provocado por el equipo de tracción y de freno; y al desgaste continuado de los perfiles de rodadura de las ruedas. Los algoritmos de tratamiento de la señal de estos sensores tienen en cuenta los estados de operatividad del equipo de tracción y del de frenado para compensar los adelantos/retrasos producidos por los mismos. Además, el SDP cuenta con un algoritmo adicional que corrige y verifica la posición del tren. Se trata de un mecanismo mediante el cual se compara el perfil de vía del trazado teórico grabado en la memoria del equipo con la medición en tiempo real de parámetros dinámicos del vehículo. Dicha comparación permite un ajuste continuo de la posición calculada y la comprobación de que se está circulando por el itinerario previsto.

Aunque por el momento no se ha instalado, existe la posibilidad de utilizar en el SDP la información procedente de un detector de posición vía satélite (GPS). A pesar de que su precisión es pobre para las exigencias del sistema de basculación y su operatividad está limitada a zonas abiertas, su utilización es muy interesante a efectos de supervisión de la posición calculada.

Los elementos que constituyen el SDP se montan en un rack de 19" y de altura normalizada 4U. La arquitectura de hardware está basada en el bus estándar VME. La actualización continua de productos VME permitirá una evolución futura de la arquitectura del equipo con mínimo esfuerzo de desarrollo adicional. En la figura 3 se aprecia el SDP durante los ensayos de emisividad/susceptibilidad a RF.

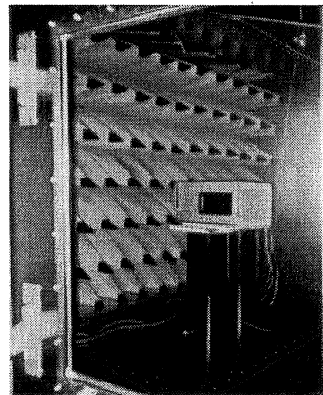


Fig. 3 SDP durante las pruebas de emisividad/susceptibilidad de RF

4. UCB, UNIDAD DE CONTROL DE BASCULACIÓN

La misión de la unidad de control de basculación es generar la consigna de basculación de acuerdo con una ley previamente parametrizada, y garantizar su seguimiento. El diagrama de bloques de la UCB se recoge en la figura 4.



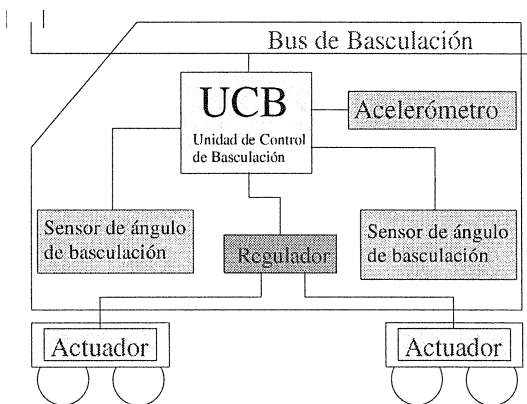
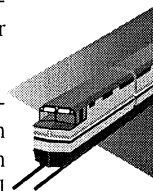


Fig. 4 Diagrama de bloques de la UCB

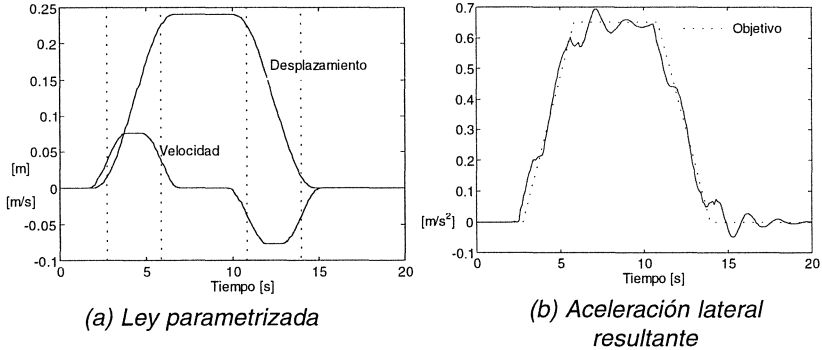
A través del bus de basculación, cada UCB recibe la información referente al sentido de marcha, velocidad y punto kilométrico instantáneo. Después de la adaptación de esta información en cada coche, la UCB consulta la base de datos contenida en su memoria y toma los datos de vía correspondientes al punto actual. Si éste se acerca a una curva en la que el vehículo debe bascular, la UCB genera una señal de consigna de ángulo relativo caja-bogie que debe ser seguida por los actuadores.



Esta ley de consigna es generada a partir de una ley parametrizada que ha sido establecida en fase de diseño en función de las características del vehículo. Dicha ley se adapta en cada curva en función de la velocidad de marcha y de la aceleración para conseguir en todo momento que el perfil de aceleración lateral no compensada que experimenta el pasajero sea óptimo.

En la fase de diseño del vehículo se realizan un conjunto de simulaciones encaminadas a determinar la señal de consigna que se debe enviar a los actuadores para asegurar un perfil objetivo de aceleraciones laterales de pasajero. El uso de la técnica de Dinámica Inversa, utilizada también en el campo de la robótica, permite calcular esta consigna para cualquier tipo de curva (Suescun et al.; 1.996). El paquete de simulación dinámica SIDIVE, desarrollado íntegramente en CAF y utilizado en este proyecto, contempla la simulación de problemas mecatrónicos y la utilización de técnicas de Dinámica Inversa en la generación de leyes de control (Giménez et al.; 1.993).

Como ejemplo de aplicación, en la figura 5.a se recoge la ley parametrizada de consigna de posición para los actuadores de basculación del primer prototipo experimental que se utilizó en el año 1.995. Después de aplicar dicha ley parametrizada en un caso concreto se obtiene el perfil de aceleraciones objetivo representado en la figura 5.b. En este caso la ley objetivo de aceleración lateral de pasajero es un trapecio de 0.65 m/s^2 de amplitud. En la figura 5.b se aprecia la diferencia entre el perfil ideal (trapecio) y el resultante de la simulación. Las diferencias apreciadas entre las dos señales están dentro de los niveles de perturbación admisibles. Es importante resaltar que, una actuación predeterminada como ésta, evita la generación de perfiles de velocidad de giro de basculación y de jerk lateral con grandes oscilaciones; y, por lo tanto, la calidad de la marcha (ride quality) se mantiene en un nivel aceptable, incluso durante las transiciones de entrada y salida ("Railway Applications Ride Comfort ...; 1.993).



(a) Ley parametrizada
(b) Aceleración lateral resultante

Fig. 5 Ley parametrizada de desplazamiento de los actuadores (a) y aceleración lateral resultante (b)

La señal de consigna de posición generada es enviada al equipo de potencia de los actuadores, previa transformación de ésta en consigna de intensidad de los motores. La UCB también incorpora el control local de los dos actuadores del vehículo.

La funcionalidad de la UCB queda completada con las tareas de supervisión y seguimiento de la actuación. Para ello se utiliza la información procedente de otros sensores como acelerómetros que miden la aceleración lateral no compensada de caja; encoders, que miden el giro relativo caja-bogie, etc.

La arquitectura de hardware de las UCB está basada en la misma tecnología estándar que la de los SDP.

5. ACTUACIÓN

Hasta hace un año los sistemas de basculación europeos en explotación comercial, concretamente el Pendolino de Fiat y el X-2000 de ADtranz, han utilizado tecnología hidráulica para inclinar la caja del vehículo respecto al bogie. La alta relación potencia/volumen de los actuadores hidráulicos hacen que su instalación en un bogie sea muy atractiva. Pero por otra parte, el volumen del equipo hidráulico de potencia ocupado en la caja del vehículo es grande.

El estado del arte de esta tecnología de actuación está permitiendo reemplazar las aplicaciones que hasta la fecha han sido primordialmente hidráulicas por otras que son de tipo electromecánico. Actualmente se está utilizando en algunos sistemas de basculación, concretamente en Alemania (Sauer et al.; 1.997) y en Suiza (Huber; 1.997). Este tipo de accionamientos ofrece las siguientes ventajas respecto a los sistemas hidráulicos:

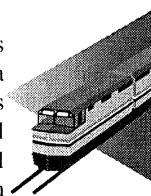
- Sencillez de instalación y montaje
- Disminución de peso y volumen del vehículo



- Mayor fiabilidad
- Más respetuoso con el medio ambiente (no hay pérdidas de aceite, menores niveles de emisión de ruido)
- Mejor mantenimiento

Los sistemas electromecánicos utilizados en los trenes basculantes consisten básicamente en un servomotor síncrono que acciona directa o indirectamente, a través de una etapa reductora, un husillo de rodillos. Mediante el husillo se convierte la rotación del motor en un desplazamiento lineal de los extremos del actuador. La alimentación eléctrica de los motores es modulada mediante un regulador que genera una intensidad proporcional a la señal de consigna suministrada. En otros casos, el regulador recibe una señal de consigna de velocidad y éste se encarga de generar la intensidad de los motores adecuada en función de sensores de velocidad instalados en los actuadores.

Aunque el sistema de basculación CAF es abierto y admite la utilización de diferentes tipos de actuador, para el prototipo se ha elegido un sistema de actuación fabricado por la empresa MOOG. A diferencia de otros actuadores utilizados en basculación, todos los elementos del mismo se encuentran alineados. Los imanes permanentes del rotor del motor así como la parte móvil del medidor de velocidad están embebidos en el eje del husillo. De esta manera se consigue utilizar el menor número de piezas, con lo que la fiabilidad del conjunto aumenta considerablemente.



La medida de posición se realiza mediante el medidor de velocidad instalado en el eje del husillo y un captador inductivo de proximidad instalado en el punto medio de la carrera de actuador. El medidor de velocidad utilizado es un resolver que da información absoluta sobre una vuelta completa del eje del husillo. Mediante la señal proporcionada por el captador de proximidad se tiene la referencia absoluta de posición del actuador.

El actuador incluye un tubo de protección exterior y un fuelle entre las dos partes móviles para evitar el impacto del balasto sobre las partes vitales del mismo.

El sistema de actuación puede funcionar en dos modos:

- Modo Activo:** Es el modo de funcionamiento normal del sistema de basculación. La UCB envía una señal de consigna de fuerza y el regulador la convierte en intensidad en los motores. Los actuadores aplican una fuerza proporcional a la consigna.
 - Modo Pasivo:** Este es el modo de funcionamiento por defecto y en caso de fallo del sistema. En este modo el motor está conectado directamente a unas resistencias de frenado y el actuador se comporta como si se tratase de un amortiguador. De esta manera, los actuadores contribuyen a suavizar los posibles movimientos de balanceo generados por la excitación dinámica del vehículo. Este modo entra en funcionamiento automáticamente en el caso de falta de suministro eléctrico.
-

Los datos más representativos del actuador se indican en la siguiente tabla.

Fuerza máxima	= 90 KN
Velocidad máxima (carrera)	= 110 mm/s
Velocidad de basculación máxima	= 5 °/s
Carrera total	= ± 220 mm
Fuerza estática máxima soportada por el actuador	= 400 KN
Tipo de motor	= síncrono de imanes permanentes
Medición de posición	= resolver y sensor de paso por cero

Tabla 1. Datos técnicos del sistema de actuación

6. PRUEBAS EXPERIMENTALES CON EL PROTOTIPO

Las pruebas de verificación funcional de la nueva estrategia de basculación se realizaron en dos fases. La primera fase, hardware-in-the-loop (HIL), tuvo lugar en verano de 1.994 y consistió en una verificación funcional de la estrategia en laboratorio. La segunda fase se llevó a cabo durante la primera mitad del año 1.996 y transcurrió en vía por distintos puntos de la geografía española. El tramo de pruebas de referencia estuvo localizado entre los pueblos de Baides y Sigüenza dentro del corredor Madrid-Barcelona. Se trataba de un recorrido de 17 Km con 20 curvas de radios que oscilan entre los 400 y 600 m de radio de curvatura.

Para la realización de las pruebas de verificación funcional se modificó un vehículo de pasajeros que RENFE tiene destinado para realizar mediciones en vía. El vehículo está dotado de bogies de alta velocidad de la serie GC-4. Debido al diseño del bogie existente, y a diferencia de la solución adoptada para el prototipo pre-serie, se diseñaron y fabricaron actuadores de tipo hidráulico especiales que inclinaban el coche por debajo de la suspensión secundaria. Debajo del bastidor de caja se instaló la central hidráulica de potencia. Con el diseño de los actuadores se podía aplicar un ángulo relativo caja-bogie de hasta 7.2°, pero durante las



Fig. 6 Vehículo de pruebas



pruebas en vía este ángulo fue limitado ya que la sección transversal de la caja interfería con el gálibo. Durante la primera fase en la que se realizaron únicamente pruebas en laboratorio, el equipo SDP fue sustituido por un simulador de recorrido que proporcionaba a la UCB los datos de posición y velocidad. Las pruebas en vía, en cambio, se desarrollaron con el sistema completo. En la figura 6 se presenta una imagen del vehículo de pruebas de RENFE durante una simulación en parado en una estación.

Una de las actividades que se contempló en el programa de pruebas en vía fue obtener los niveles de confort para distintas estrategias de compensación de la aceleración no compensada de pasajero. Se probaron situaciones en las que el nivel máximo de aceleración lateral era una cantidad constante e independiente de la misma, por ejemplo 0.65 m/s^2 y 0 m/s^2 (compensación total). También se experimentaron estrategias en las que el sistema de basculación compensaba un porcentaje de la aceleración lateral.

En la figura 7 se presentan las señales de aceleración lateral experimentada por el pasajero, $\ddot{y}(t)$, y la velocidad angular de lazo de la caja, $\omega_\lambda(t)$ para un caso de circulación por curvas y contra-curvas con el sistema de basculación desactivado. En la figura 8 se presenta lo mismo pero para un caso en el que el sistema de basculación compensa la tota-

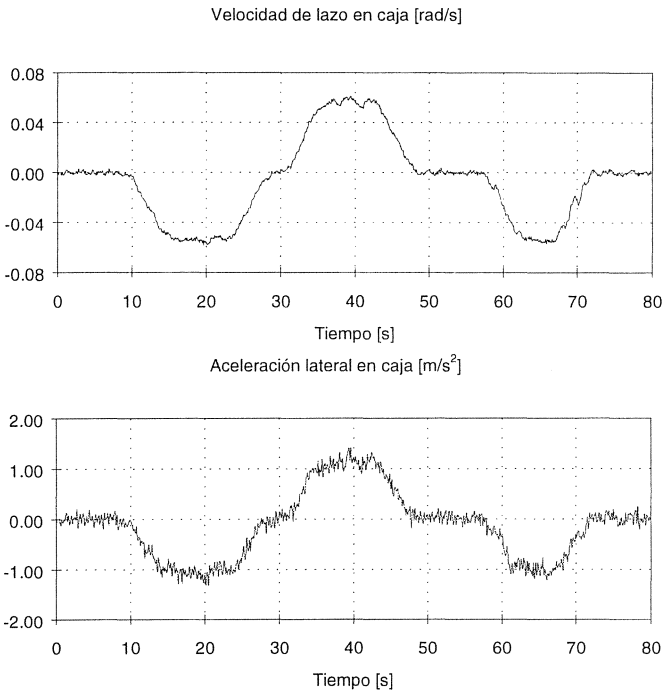
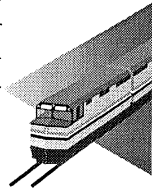


Fig. 7 Negociación de curvas y contra-curvas sin basculación.

lidad de la aceleración lateral del pasajero. Como se observa, el sistema de basculación presentado consigue circular por las transiciones de entrada y salida, incluso en las peores condiciones como la expuesta, sin que ello de lugar a alteraciones en el perfil de aceleraciones.

Con los resultados obtenidos se han analizado las mejoras en confort obtenidas con el sistema de basculación. Esto se ha efectuado comparando dos circulaciones en curva efectuadas a la misma velocidad, una de ellas con la basculación activada y la otra sin activar. El confort durante las curvas de transición de entrada y salida ha sido calculado mediante el índice P_{CT} introducido por Harborough (Harborough; 1.986) el cual se ha convertido en el índice de referencia incluido en el borrador de norma europea "Railway Applications

Ride Comfort for Passengers. Measurement and Evaluation". Este índice representa el porcentaje de pasajeros insatisfechos y su valor depende de la aceleración lateral de caja

(\ddot{y}_{max}), el valor de la sobreaceleración ("jerk") (\dddot{y}_{max}) y de la velocidad de balanceo

de caja ($\dot{\theta}_{max}$). La norma establece dos índices de confort, uno para pasajeros sentados y otro para pasajeros de pie. Sus expresiones son:

☐ Pasajeros de pie:

$$P_{CT} = (2.80 \ddot{y}_{max} + 2.03 \dddot{y}_{max} - 11.1) + 0.185 \dot{\theta}_{max}^{2.283} \tag{1}$$

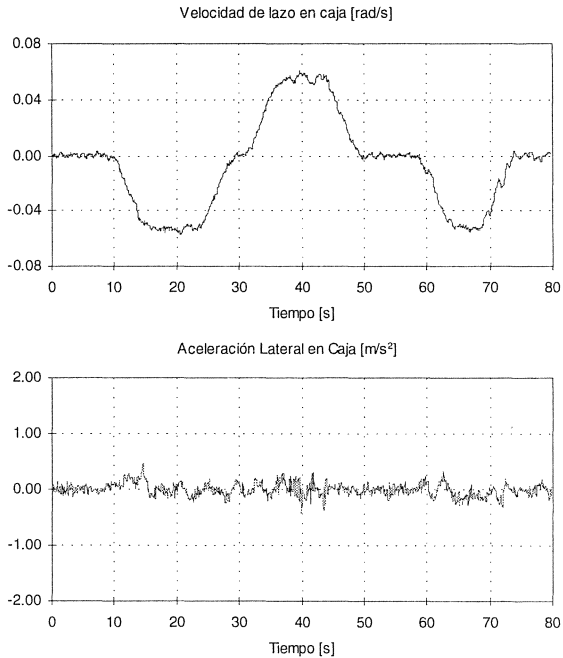


Fig. 8 Negociación de curvas y contra-curvas con la basculación activada y compensación total de la aceleración lateral de pasajero.



□ Pasajeros sentados:

$$P_{CT} = (0.80 \ddot{y}_{max} + 0.95 \ddot{y}_{max} - 5.9) + 0.120 \theta_{max}^{1.626} \quad (2)$$

Como ejemplo, en la siguiente tabla se comparan los niveles de confort correspondientes a diferentes estrategias de basculación con los obtenidos sin ella. La tabla 2(a) presenta los resultados de varias circulaciones a 112 Km/h con un objetivo de aceleración lateral no compensada de viajero de 0.65 m/s². La tabla 2(b) presenta los obtenidos para una circulación a 103 Km/h y con una estrategia de basculación con compensación total de la aceleración lateral de pasajero.

Circulación a 112 Km/h		Basculación activada $\ddot{y}_{max} = 0.65m/s^2$	Basculación no activada
PCT [% de pasajeros]	De pie	15.3	42.3
	Sentados	3.5	12.5

(a) $\ddot{y}_{max} = 0.65m/s^2$



Circulación a 103 Km/h		Basculación activada $\ddot{y}_{max} = 0.0m/s^2$	Basculación no activada
PCT [% de pasajeros]	De pie	4.7	25.6
	Sentados	1.0	6.8

(b) $\ddot{y}_{max} = 0.0m/s^2$

Tabla 2. Niveles de confort en las transiciones de curva

(a) con $\ddot{y}_{max} = 0.65m/s^2$ y (b) con $\ddot{y}_{max} = 0.0m/s^2$

A pesar de que el índice P_{CT} analiza las curvas de transición y de que en las mismas, el vehículo basculante añade a la excitación de la vía la correspondiente a la acción de basculación, de los resultados se desprende que los índices de confort de las estrategias de basculación basadas en el conocimiento previo del recorrido han superado apreciablemente las correspondientes al tren no basculante. Los índices P_{CT} obtenidos con la nueva estrategia de basculación resultan en todos los casos entre 3 y 6 veces mejores que los del vehículo no basculante.

7. NUEVOTREN BASCULANTE

En la actualidad esta técnica se está implantando en una unidad prototipo pre-serie que va a funcionar en el servicio REGIONAL de RENFE. Las 16 unidades de la serie TRD

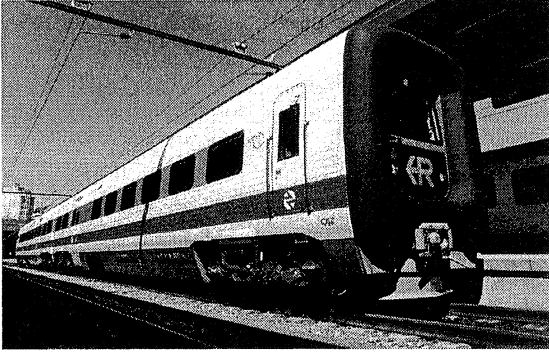


Fig. 9 Vista del tren basculante prototipo para RENFE

(Tren Regional Diesel) que ha adquirido RENFE están preparadas para ser convertidas en basculantes. El último tren de la serie incorporará un sistema completo de basculación con el que se efectuarán las primeras pruebas en servicio. La fase de ensayos con este prototipo se llevará a cabo durante el segundo semestre de 1.998. En la foto de la figura 9 se recoge una vista de la unidad en la que se está incorporando el sistema de basculación pre-serie.

Para este primer prototipo pre-serie se ha diseñado un bogie basculante representado en la figura 10 cuyas características principales pueden resumirse en la siguiente tabla:

Empate	2700 mm
Diámetro de rueda (nueva / último retorneo)	850 / 790 mm
Ancho de vía	1668 mm (RENFE)
Separación entre manguetas	2170 mm
Separación entre resortes neumáticos	1800 mm
Número de discos de freno	4 (2 por eje)
Velocidad máxima	160 km/h

El sistema de basculación está preparado para alcanzar 8° de inclinación entre caja y bogie.

El bogie se compone de una traviesa basculante que se encuentra por debajo de la suspensión secundaria y suspendida del bastidor de bogie por medio de cuatro bielas. Es precisamente el movimiento rotatorio de estas bielas el que define la cinemática del movimiento basculante del tren.



El montaje de estas bielas se realiza por medio de casquillos autolubricantes libres de mantenimiento.

La posición relativa caja/bogie queda fijada por medio de un actuador electromecánico que se monta entre el bastidor de bogie y la mencionada traviesa basculante por debajo de esta última.

Además existen unos topes que limitan mecánicamente y de manera externa al propio actuador el ángulo máximo de basculación. Éste es seleccionado en función del objetivo de compensación para la aceleración lateral experimentada por el pasajero.

Como la suspensión secundaria está por encima del sistema de basculación, los esfuerzos laterales que soporta son los correspondientes a una aceleración lateral no compensada similar a la que experimentan los viajeros, esto es, mucho menor que la que correspondería a la misma velocidad de paso por curva con un sistema convencional no basculante. Esto hace que empleando un sistema de suspensión secundaria relativamente convencional los resultados a nivel de confort de viajero sean lo suficientemente buenos como para no necesitar de dispositivos adicionales de suspensión lateral activa como ocurre con otras configuraciones de bogies basculantes en los que el sistema de basculación actúa por encima de la suspensión secundaria.

El sistema de suspensión secundaria previsto se compone de dos resortes neumáticos para la suspensión vertical y transversal, complementados en este último caso por topes laterales progresivos de caucho.

Se dispone de amortiguadores hidráulicos verticales y transversales para amortiguar al máximo las oscilaciones de la suspensión en todas las direcciones.

Como uno de los objetivos de la basculación es aumentar la velocidad de paso por las curvas sin menoscabo del confort de los viajeros, resulta especialmente importante en este tipo de vehículos adoptar un sistema de suspensión primaria y guiado de ejes optimizado para conseguir una correcta estabilidad de marcha y una baja agresividad a la vía en todo el rango de velocidades a las que es capaz de prestar servicio el tren. Para ello, se ha previsto un sistema de suspensión primaria de bieletas que consta de muelles helicoidales a ambos lados de cada caja de grasa (encargados de la suspensión vertical) y de dos bieletas también a cada lado de la misma que tienen articulaciones elásticas de

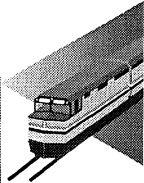
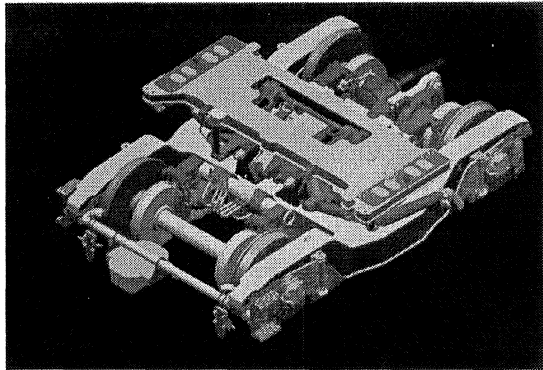


Fig. 10 Vista general del bogie basculante para el prototipo pre-serie

caucho libres de mantenimiento con rigideces estudiadas de acuerdo con los criterios anteriormente mencionados.

8. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas con el prototipo experimental han demostrado que la nueva técnica de basculación basada en el reconocimiento del recorrido resuelve, por una parte, los problemas asociados a las estrategias clásicas de actuación por compensación; y, por otra, mejora los niveles del confort experimentado por los pasajeros en las transiciones. El hecho de que la estrategia de basculación sea independiente del estado de la vía hace que esta solución sea idónea para aquellos trazados sinuosos con un nivel de mantenimiento de vía no muy elevado, haciendo efectivo el incremento de la velocidad de circulación al paso por curvas.

La tecnología de actuación electromecánica que se utiliza ofrece claras ventajas respecto a las soluciones hidráulicas tradicionales. El aumento de los niveles de fiabilidad, unido a la reducción del peso y del volumen ocupado por los equipos, hacen esta solución muy atractiva para las aplicaciones ferroviarias, en las que la reducción de los tiempos de viaje y ahorro energético son requerimientos cada vez más importantes.

9. REFERENCIAS

Camposano, P. - "Italy's Pendolino: a successful experiment", *International Railway Journal*, June (1.979).

Giménez, J.G.; Martín, L.M.; Sobejano, H. - "Dynamic Vehicle Simulation. SIDIVE Program", *Multibody Computer Codes in Vehicle System Dynamics*, Suplemento de *Vehicle System Dynamics*, nº 22 (1.993).

Harborough, P.R. - "Passenger Comfort during High Speed Curving. Summary Report", *British Rail research*, Report Ref. TR DPS 018 (1.986).

Huber, B. H. - "Laufwerke neuester Generation mit aktiver Neigetechnik", *ZEV+DET Glas. Ann.* 121 nº 2-3 (1.997).

Kottenhahn, V. - "Der Dieseltriebzug VT 610, der "Deutsche Pendolino"", *Schweizer Eisenbahn Revue*, nº 1-2 (1.993).

Kühborth, K.; Keil, H. - "Der ABB X2000 - Der Kurvensprinter", *ETR* 42, nº 11 (1.993).

"Railway Applications Ride Comfot for Passengers. Measurement and Evaluation", 4th draft of CEN European Pre-Standard TC/256 WG-7, 8/9/1.993.

Sauer, B.; Kottenhahn, V.; Lang H. - "Schneller reisen mit moderner Neigetechnik - Die Baureihe 611 der Deutschen Bahn AG", *ZEV+DET Glasser Annalen* 121, nº 2-3 (1.997).

Suescun, A.; Martín, L.M.; Giménez, J.G.; Vinolas, J. - "Use of the Inverse Dynamics in the Development of Tilt Control Strategies for Rail Vehicles", *Suplemento de Vehicle System Dynamics*, nº 25, (1.996).

