



Javier Goikoetxea

Basculación SIBI en los 598

Autor: Javier Goikoetxea

Pasado más de un año desde la puesta en marcha de los trenes Serie 598 vamos a tratar en este artículo el equipo SIBI (Sistema Inteligente de Basculación Integral). Este revolucionario sistema de CAF presenta, como veremos, unas claras ventajas frente a sistemas de basculación convencionales, ya contrastadas en las 8 unidades TRD Serie 594 basculantes.

¿Qué es la basculación?

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 aceleración centrífuga. El peralte existente en la vía consigue reducirla, pero no totalmente, quedando una aceleración residual. Una fuerza lateral excesiva haría el viaje nada confortable para los pasajeros pudiendo, además, provocar caídas y golpes. Por todos es conocida esa sensación de bamboleo cuando circulamos

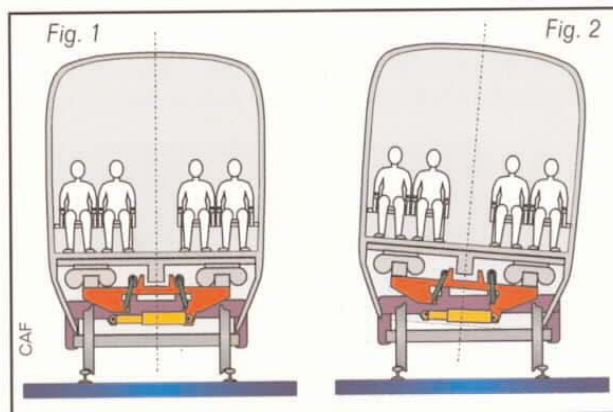
con un coche por un puerto de montaña.

Esta fuerza es mayor cuanto más cerrada sea la curva (menor radio) y cuanto más rápido circule el tren por ella.

Por tanto la solución para ganar velocidad sería, a primera vista, ampliar el radio de las curvas o eliminarlas (empleando túneles, viaductos, etc.). Es decir, convertir trazados convencionales en trazados de alta velocidad. Bien sabemos el alto coste en tiempo y en dinero de dichas obras, haciendo que su construcción sea paulatina y a largo plazo.

Si no cambiamos las vías, ¿por qué no cambiamos los trenes? Si el viajero, por algún mecanismo montado en el tren, sintiera una

menor fuerza lateral se podría circular más rápido por curva y así ganar tiempo. La forma de reducir dicha fuerza es añadir un peralte adicional y artificial, es decir, incorporando una inclinación adicional al piso del coche. En otras palabras, basculando la caja respecto al bastidor de bogie (ver figuras 1 y 2).

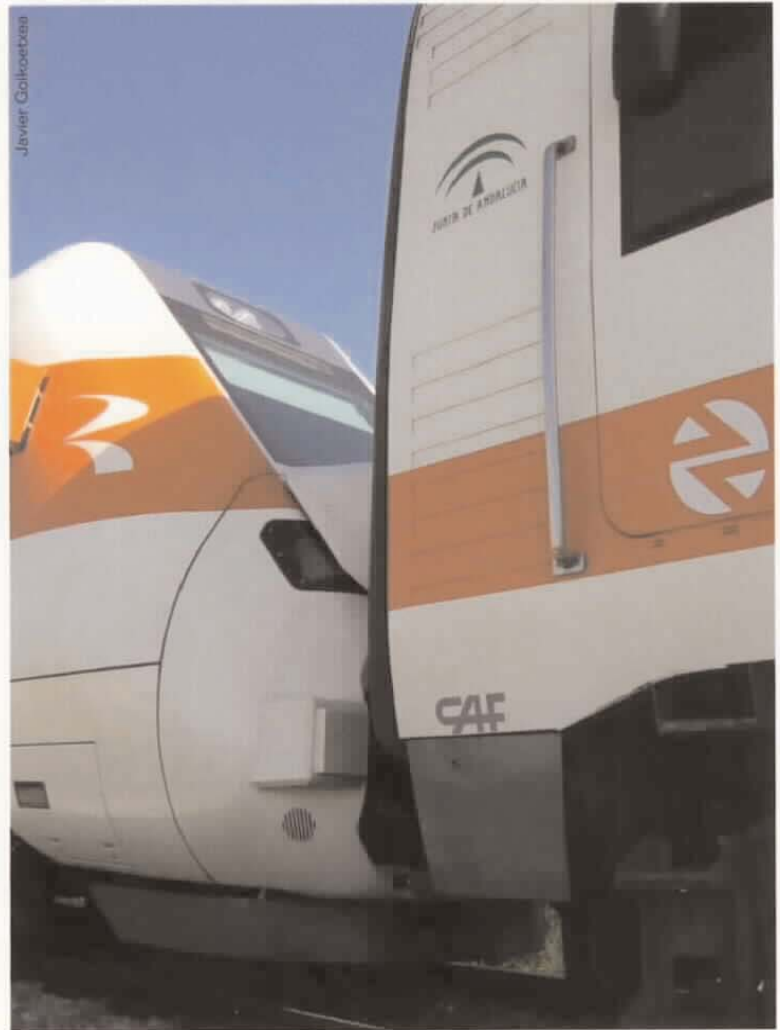


En estos momentos surge la pregunta: ¿es lo mismo basculación que pendulación? La respuesta es no. Se llama pendulación al movimiento giratorio en el que el centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del objeto, en este caso la caja. Es un movimiento natural y por ende, pasivo. A modo de ejemplo pensemos en el péndulo de un reloj de pared o en un columpio. Por el contrario en la basculación, el centro de giro se encuentra por debajo del centro de gravedad y, por tanto, es necesario aplicar una fuerza para que se produzca el giro.

Reseña histórica de la basculación

La idea de utilizar trenes basculantes como medio de reducir los tiempos de viaje en recorridos con abundantes curvas se remonta a varias décadas en las que administraciones ferroviarias, como la italiana, francesa, inglesa y sueca, que 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 dificultaron el desarrollo de soluciones activas (ver foto 1). 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 3º quedaban muy por debajo de los 8º que prometían las soluciones activas.

A final de los años 80 algunas administraciones europeas como 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. 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. Estas ini-



Pruebas de acoplamiento (socorro) entre un 594 y un 598

ciativas 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 y posteriormente el VT-611, el cual incluye como novedad la utilización de actuadores electromecánicos. En la actualidad son varas las series de trenes basculantes circulando o en fase de pruebas. Entre ellas cabe citar el Tren Virgin para West Coast Main Line, fabricado por Alstom, el ICT para DB fabricado por un consorcio alemán, el ICN para SBB fabricado por un consorcio europeo y el VT612 para el servicio regional de DB fabricado por Bombardier (ver foto 2).

Sistemas de basculación convencionales

Todos los sistemas de basculación citados basan su estrategia en detectar, en tiempo real, las curvas por las que circula el tren empleando para ello sensores, acelerómetros y/o giróscopos, instalados en diferentes puntos del vehículo. Para los profanos en el tema, un acelerómetro es un dispositivo que mide aceleración y un giróscopo, la velocidad de giro.

Dado que el tren no tiene conciencia de cómo es el trazado, cada curva es una sorpresa para él, pues



Foto 1
El popular y querido platanito estacionado en los talleres de CAF



Foto 2

nunca se la espera y debe reaccionar. A modo de símil militar, el vehículo recibe ataques por sorpresa que le cogen desprevenido y es por todos conocido que este factor es siempre una ventaja para el atacante y una desventaja para el atacado (en este caso el tren) pues necesita un tiempo de reacción al no estar preparado.

Esta forma reactiva de detectar curvas es muy dependiente del estado de la vía y de su trazado. Como es lógico resulta necesario distinguir entre una curva y el movimiento (respuesta dinámica) producido por las irregularidades propias de la vía (baches laterales). Para ello se emplea un filtrado de las señales recibidas que retenga exclusivamente la parte correspondiente a las curvas, la que interesa.

Emplear filtros induce un retraso que se suma al de la propia respuesta dinámica del vehículo en la inscripción de curvas. La suma de ambos retrasos más el asociado al propio sistema de actuación da lugar a una basculación retrasada respecto de la necesidad real. Es el tiempo de reacción frente al ataque por sorpresa.

Una vez detectada la curva el sistema de actuación debe responder rápidamente para poder recuperar el tiempo perdido, provocando unas velocidades de balanceo de la caja nada confortables.

Cuanto peor sea la calidad de la vía el filtro será más importante (umbral para empezar a bascular más alto) pues ¡no queremos que el tren bascule cuando no debe! Esto provoca que el retraso asociado al filtrado sea aún mayor. Como consecuencia: las prestaciones de los sistemas de basculación convencionales 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 exige al sistema de actuación reacciones muy rápidas que provocan respuestas dinámicas en la suspensión debidas a la propia 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 y dan lugar a los conocidos mareos.

Historia del sistema de basculación de CAF

En lo que respecta a la basculación, CAF comenzó a estudiar soluciones convencionales a partir del año 1989 sobre una unidad de Eusko Tren. Las estrategias de control empleadas se basaban en las señales de acelerómetro y giróscopo. Tras los estudios realizados en el corredor San Sebastián - Bilbao se llegó a la conclusión de que las estrategias de basculación convencional basadas en la compensación, en tiempo real, de la aceleración lateral experimentada por el pasajero no proporcionaba el grado de confort deseado.

Con el fin de mejorar el confort se decidió en el año 1991 poner en marcha el diseño y estudio de una nueva estrategia de basculación basada en la actuación sobre la inclinación de la caja con un conocimiento previo de la vía. Ello permitiría actuar sobre la inclinación del vehículo de una manera suave, con un perfil predeterminado y anticipándose a la curva para poder compensar el comportamiento dinámico del vehículo sometido a dicho movimiento.

La idea se desarrolló durante 3 años y en el verano del año 1994 se instaló un sistema de basculación experimental sobre un coche de pasajeros de la serie 10000 de REN-



Foto 3 Pruebas de basculación en el coche laboratorio

FE dotado de bogies CAF de la serie GC-3 con el objetivo de poner a punto el software de control de la basculación y evaluar sobre un vehículo real las prestaciones alcanzables con el nuevo sistema.

La segunda fase de ensayos se llevó a cabo durante la primera mitad del año 1995 y transcurrió en vía por distintos puntos de la geografía española. El tramo de pruebas de referencia estuvo localizado entre los pueblos de Baidés y Sigüenza dentro del corredor Madrid-Barcelona. Se trata de un recorrido de 17 Km. con 20 curvas de radios que oscilan entre los 400 y 600 m.

Para la realización de estas pruebas de verificación funcional se modificó uno de los coches laboratorio que RENFE tiene destinado para realizar mediciones en vía. El vehículo tiene una caja de la serie 8000 y está dotado de bogies de alta velocidad de la serie GC-4 con una suspensión secundaria similar a la del GC-3. El equipo de control instalado a bordo calculaba la posición del tren, generaba las señales de inclinación de caja, controlaba el sistema de actuación y realizaba la supervisión general del comportamiento del conjunto (ver foto 3).

Los índices de confort obtenidos con la nueva estrategia de bascula-



Actuador montado en el bogie basculante



W. F. Haas

Foto 4

ción resultaron en todos los casos entre 3 y 6 veces mejores que los de un vehículo no basculante.

Con los resultados satisfactorios conseguidos con esta nueva estrategia de basculación se inició la industrialización del producto, tanto a nivel del hardware de control como del sistema de actuación. Y en paralelo con ella se puso en marcha el diseño de un nuevo bogie basculante compatible con los instalados en la nueva serie de 16 TRD 594 que CAF había diseñado y fabricado para la U.N. de Regionales de RENFE. Las 16 unidades de la primera serie TRD fueron diseñadas para que en un futuro pudieran ser convertidas en basculantes. La U.N. de Regionales decidió experimentar esta nueva tecnología de basculación y accedió a instalar en verano de 1.998 el sistema de basculación prototipo sobre un tren de la serie (594.003). El 15 de diciembre de 1.998 el tren prototipo circuló por primera vez en vía basculando entre Zumárraga y Vitoria, abriendo así la fase de experimentación en vía. Los ensayos en vía se efectuaron principalmente entre las ciudades de Vigo y La Coruña en donde se obtuvie-

Foto 5
Un 594 basculando en plena curva



W. F. Haas

ron ahorros de tiempo de viaje de un 20%. Para no interrumpir el servicio comercial, el tren de pruebas prestaba servicio con pasajeros durante el día y a la noche era utilizado para las pruebas de basculación.

Finalizadas estas pruebas, que transcurrieron a lo largo de 1999, la U.N. de Regionales decidió adquirir la segunda serie de TRD 594 (ver fotos 4 y 5), compuesta por 7 unidades, dotándola del sistema de basculación de CAF. Los buenos resultados obtenidos así como las claras ventajas demostradas del SIBI fueron determinantes para que dicha decisión fuera tomada. La unidad prototipo 594.003 también fue transformada renumerándose a 594.108 como vehículo de segunda serie.

Posteriormente y como confirmación del éxito del producto, la misma U.N. adjudicó a CAF una nueva serie de trenes diesel basculantes de nueva generación, los 598. Esta revista publicó hace algunos números un artículo descriptivo de dichos trenes.

Basculación SIBI

Como se comenta, el sistema de basculación de CAF, el SIBI, se basa en el conocimiento previo del trazado y en la posición y velocidad exactas del tren en la vía. Con toda esa información el sistema puede aplicar leyes de basculación óptimas para el confort pues se conoce de antemano las características, no sólo de la vía, sino del propio vehículo.

Mediante esta nueva estrategia de basculación se alcanzan los siguientes resultados:

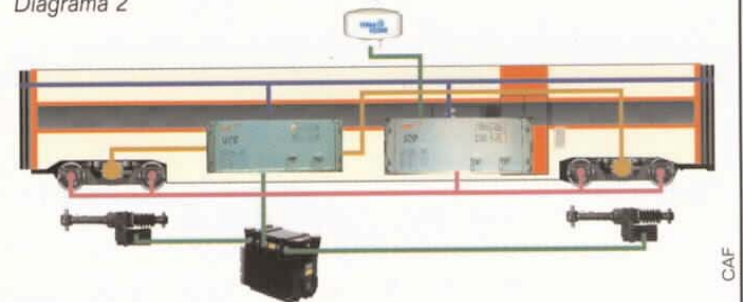
- La actuación sobre la inclinación de la caja no experimenta retrasos. Incluso, dicha actuación se programa con anticipación a la curva para que compense el retraso en la respuesta del sistema.
- Antes de llegar a la curva, el sistema de basculación conoce todos los parámetros de la misma, lo que permite 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 parame-

Diagrama 1



CAF

Diagrama 2



CAF

Diagrama 3



CAF

trizada que ha sido obtenida mediante simulaciones dinámicas 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 sistema de basculación se divide en 4 subsistemas (ver diagramas 1, 2 y 3):

- 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. Almacena en su memoria un modelo de la vía previamente registrado y cuenta con la ayuda de un receptor GPS y de 4 odómetros. Este sistema, patentado por CAF, puede tener otras aplicaciones diferentes que requieran el conocimiento de la posición exacta del tren en la vía.
- 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. Emplea la información (posición, velocidad y vía) que le transmite el SDP. Se instala un equipo por coche.
- Visualizador de cabina: Es el interfaz con el maquinista. A través de este visualizador es posible conocer el estado de la basculación y anularla si fuera necesario. Además presenta al maquinista los límites de velocidad del tipo D (aceleración lateral no compensada a nivel de vía de 1.8 m/s²), que no existen en los cartelones de vía.
- 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 de potencia y de dos actuadores electromecánicos, uno para cada bogie. Los trenes de la serie 598 montan un sistema de actuación mejorado con respecto a los TRD 594 basculantes en cuanto a fiabilidad y mantenimiento. El



Foto 6
Bogie basculante

suministrador, la empresa alemana ESW (Extel Systems Wedel), es líder mundial en el mercado de actuadores electromecánicos y sistemas de control, no sólo para el mundo ferroviario sino también para las aplicaciones militares como el tanque Leopardo (adquirido por el Ejército Español) para el que suministra el sistema de estabilización del cañón.

¿Qué pasa si el tren circula por una vía no modelizada? El sistema de basculación de CAF está también preparado para poder bascular en el caso de que el tren circule por recorridos que no han sido registrados en la memoria del equipo. En esta situación se activa un algoritmo de basculación convencional basado en la detección de las curvas mediante la utilización de sensores. A pesar de que esta estrategia de basculación no alcanza las prestaciones de la basada en el reconocimiento

del recorrido, permite mantener niveles de velocidad superiores a la de los trenes no basculantes. En tal caso el tren circula a tipo B (aceleración no compensada a nivel de vía de 1.2 m/s²) como el resto de unidades pendulares (TALGO) o basculantes (Alaris) del parque nacional.

Bogie basculante

Toda esta tecnología que aquí se expone no serviría de nada de no existir una parte mecánica que convierta el movimiento del actuador en el giro de la caja. Dicho elemento es el bogie basculante que, como es habitual en CAF, ha sido diseñado y fabricado en la misma empresa (ver fotos 6 y 7).

El bogie, para 160 km/h, se compone de una traviesa basculante que se encuentra por debajo de la sus-



Foto 7



Fotos 8, 9, 10 y 11

Foto 12
Receptor del sistema GPS que va montado en el techo del vehículo

pensión secundaria y suspendida del bastidor de bogie por medio de cuatro bielas. Es precisamente el movimiento rotatorio de estas bielas el que genera el 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 del mencionado actuador que se monta entre el bastidor de bogie y la traviesa basculante. Aunque el propio actuador informa a los equipos de control del SIBI sobre su extensión en cada momento, el bogie cuenta con un equipo independiente de medida. Éste sirve como verificación adicional del giro de la traviesa basculante con respecto al bastidor.

Además existen unos topes que limitan mecánicamente y de manera externa el ángulo máximo de basculación al propio actuador.

Como la suspensión secundaria está por encima del sistema de basculación, los esfuerzos laterales a los que se ve sometida son similares a los que experimentan los viajeros. En cambio en soluciones de bogie basculante en las que la suspensión secundaria se encuentra por debajo del sistema de basculación, ésta se ve sometida a un nivel de aceleraciones laterales similares a las que sufre el bastidor de bogie y los ejes (mucho mayores), obligando a incorporar sistemas activos adicionales de centrado lateral de la suspensión y evitar que la caja del vehículo se vaya a topes cuando se circula por curva.

El sistema de suspensión secundaria se compone de dos resortes neumáticos convencionales por bogie, complementados por topes laterales progresivos de caucho. Se dispone de amortiguadores hidráulicos verticales y transversales para amortiguar al máximo las oscilaciones de la suspensión.

El aumento de la velocidad de paso por las curvas no debe menoscabar el confort de los viajeros ni la seguridad de marcha. Por ello, 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 de servicio. Con tal fin, se ha diseñado un sistema de guiado de bieletas con articulaciones elásticas en sus extremos para unir la caja de grasa con el bastidor de bogie. La suspensión primaria se complementa con dos muelles helicoidales a ambos lados de cada caja de grasa.

Finalmente el bogie monta 2 amortiguadores antilazo activos de

dos etapas (on y off) que únicamente funcionan a alta velocidad. De esta forma se garantiza la estabilidad a gran velocidad y en tramos rectos o con curvas de amplio radio y, al mismo tiempo, una suave inscripción en curva en tramos sinuosos y de media-baja velocidad.

Funcionamiento del SIBI

Aunque las electrónicas de control (SDP y UCB) se encuentran operativas desde el mismo instante en el que se enciende el tren, no es hasta los 30 km/h cuando el sistema de basculación arranca. Esto es así porque durante el proceso de arranque tienen lugar unas pequeñas oscilaciones de chequeo y centrado de la caja que pueden resultar molestas para el viajero si se realizasen en parado o incluso peligroso si ocurrieran, de manera no controlada, en el depósito.

Hasta dicho momento, y dado que el sistema se encuentra deshabilitado, la marcha del tren será del tipo A (unidad convencional), y así se marcará al maquinista en el visualizador (ver foto 8).

Una vez arrancado el sistema y mientras el equipo detector de la posición (SDP) no tenga certeza plena de la localización exacta del tren se aplicarán estrategias de basculación convencionales (basadas en sensores) circulando la unidad en tipo B. Mientras dure dicha situación la lámpara "B" del visualizador se iluminará indicando al maquinista la marcha que debe seguir (ver foto 9).

Ayudado por el GPS (ver foto 12) y por unos algoritmos de detección de curvas en tiempo real, al equipo detector de la posición (SDP) le bastará confirmar la localización del tren circulando por tres curvas para que la estrategia SIBI basada en el conocimiento de la posición se active. En ese instante se avisará al maquinista de la nueva condición de marcha: el tipo D (ver foto 10).

Con su máxima funcionalidad ya activada, el SIBI calcula en tiempo real el ángulo que debe girar la caja con respecto al bastidor de bogie, intentando en todo momento eliminar la aceleración lateral que siente el viajero. Este cálculo se realiza, como se ha dicho, basándose en la información que se posee de la vía,





J. Colloretvea

Seguridad

de la posición y velocidad del tren y, no menos importante, en las características dinámicas (inercias, centro de gravedad, etc.) del vehículo. Y como resultado: el máximo confort.

Dado que no existen cartelones de limitación de velocidad para el tipo D en la vía, el SIBI informará al maquinista a través del visualizador de dichos límites, tanto los de avances como los ejecutivos. Dado que el sistema conoce tanto la posición del tren como la de los cartelones, se hará coincidir la aparición de la velocidad límite en el visualizador con el paso del tren junto a las señales instaladas en la vía (ver foto 11).

La primera "I" del nombre SIBI viene de Inteligente. El sistema de CAF es capaz de compensar los pequeños errores de posición que se puedan producir por patinajes, desgaste de ruedas o variaciones de sensibilidad de los sensores por cambio de temperaturas. De esta forma logra que el error medio de posición sea cero con una desviación típica inferior a tres metros.


Un concepto que el SIBI no olvida es la seguridad. Los datos de posición y velocidad son continuamente verificados para garantizar en todo momento que el vehículo bascula únicamente cuando debe hacerlo.

Todos los sensores se encuentran duplicados y hasta cuadruplicados, como lo odómetros. La información del ángulo girado es obtenida de 3 fuentes diferentes por bogie y comparada continuamente.

Finalmente, existen por coche 2 acelerómetros de seguridad, que son empleados para asegurarse que la aceleración residual en caja (la que al final siente el viajero) es la esperada.

Toda la información del sistema queda registrada en la caja negra del tren (equipo CESIS) dado que datos como los límites de velocidad mostrados al maquinista (en tipo D) podrían ser revisados en caso de accidente.

Por último, en caso de avería del SIBI, el sistema pasa a un estado pa-

sivo, en el que los actuadores funcionan como amortiguadores eléctricos, evitando bruscas oscilaciones de la caja. Un completo sistema de diagnóstico basado en PC y el elevado nivel de sensorización permiten entonces determinar las causas de la avería para su rápida solución. 

Unidad 598 junto al Centro Tecnológico del Ferrocarril en la factoría de CAF en Beasain



ESW

Actuador electromecánico de basculación del 598



ESW

Regulador de potencia de actuadores del 598