

# Sistemas de tracción en los trenes españoles de alta velocidad

IGLESIAS DÍAZ, J. I. (\*); JIMÉNEZ REDONDO, J. A. (\*\*)

**RESUMEN** En este artículo se presentan los sistemas de tracción de los trenes españoles de alta velocidad actualmente en servicio, tanto del tren AVE con tracción mediante el sistema de motor síncrono autopilotado, como de las locomotoras 252 que traccionan los trenes TALGO que circulan por las líneas de alta velocidad y que están basados en motores de tracción asíncronos con control vectorial y convertidores autoconmutados con GTOs. También se presentan los resultados de los estudios conjuntos que sobre esta área llevaron a cabo el CEDEX y RENFE.

## SPANISH HIGH SPEED TRAINS TRACTION SYSTEMS

**ABSTRACT** *This paper presents the traction systems of the Spanish High-Speed Trains that are now in operation. Both the AVE train and the 252 locomotive that powers the TALGO train are presented. The AVE Traction System is based on a Self-synchronous Motor System powered by thyristor naturally-commutated inverters. However the 252 locomotive has asynchronous motors powered by self-commutated GTO's inverters. This paper also presents the studies that jointly CEDEX and RENFE developed in this area.*

**Palabras clave:** Sistemas de tracción; Alta velocidad; Motor síncrono autopilotado; tracción asíncrona.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se produjo una importante renovación de material rodante en el ámbito del transporte ferroviario español con la incorporación de los trenes de alta velocidad. El objetivo del presente artículo consiste en hacer una descripción de los sistemas de tracción implantados en los trenes de alta velocidad, así como de los avances técnicos con relación a los sistemas de tracción anteriores.

En los años 1989-1992, RENFE y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), desarrollaron un proyecto conjunto de investigación con el objetivo de llevar a cabo un estudio sobre los sistemas de tracción que serían implantados en los trenes españoles de alta velocidad, así como desarrollar prototipos de laboratorio que reprodujeran a escala reducida sistemas de tracción similares. La finalidad de este proyecto se centraba en proporcionar a los ingenieros de RENFE un alto nivel de conocimientos, necesario para la negociación en la adquisición del nuevo material. Algunos de los resultados que se obtuvieron en aquel proyecto se presentan en el presente artículo.

En este artículo se presentan los sistemas de tracción que incorporan tanto los trenes AVE como las locomotoras de la serie 252 que sirve de tracción para los trenes TALGO que circulan también por la línea de alta velocidad. Asimismo se hará un breve repaso de los sistemas de tracción antiguos y de las tendencias actuales en lo que a sistemas

de tracción ferroviaria se refiere y que constituyen la tendencia para los modernos sistemas de tracción que serán implantados en las nuevas líneas de alta velocidad.

## 2. SISTEMAS DE TRACCIÓN FERROVIARIA

En los últimos años, los sistemas de tracción ferroviaria han experimentado una transformación considerable, originada por los avances producidos en los campos de la electrónica de potencia y de la regulación de las máquinas eléctricas. Los sistemas de tracción eléctrica del material rodante de RENFE han evolucionado desde la tracción con máquinas de corriente continua, a la tracción con máquinas de corriente alterna, dentro de la cual se enmarcan todos los sistemas modernos de tracción.

El primer tipo de tracción se realizaba con motores de corriente continua y regulación reostática de la velocidad. Posteriormente, se sustituyó ésta por la regulación mediante chopper, de la tensión de inducido de la máquina de corriente continua, solución que permite obtener un ajuste mucho más suave. Como es sabido los inconvenientes de la máquina de corriente continua se centran en el alto coste de mantenimiento, debido al sistema colector-escobillas, así como en un coste inicial superior en comparación con las máquinas de corriente alterna.

En la década de los años setenta se comenzaron a desarrollar sistemas de regulación de velocidad de máquinas de corriente alterna, síncronas y asíncronas, aumentándose paulatinamente la potencia instalada, hasta alcanzar los altos niveles de potencia requeridos en los sistemas de tracción ferroviaria. Dentro de los sistemas con máquinas de corriente alterna, los primeros se llevaron a cabo con máquinas síncronas e inversores conmutados de forma na-

(\*) CEDEX. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Ministerio de Fomento.

(\*\*) Dirección Mantenimiento Material Autopropulsado. RENFE.

tural, basados en la utilización de tiristores. Posteriormente la aparición de la teoría de control vectorial de máquinas asíncronas, unida al incremento del rango de potencia en los semiconductores conmutables (concretamente el tiristor apagable por puerta o GTO), dieron lugar a la incorporación de los sistemas basados en la regulación de motores asíncronos, al ámbito de la tracción ferroviaria. Los trenes AVE se encuentran entre los sistemas de tracción con motor síncrono, mientras que las locomotoras de la serie 252 incorporan tracción asíncrona con inversores basados en GTOs.

En los sistemas de tracción de los trenes de alta velocidad españoles, se ha hecho necesaria la implantación de sistemas bicoorriente 25 kV-50Hz corriente alterna y 3 kV corriente continua para adecuarlos a las condiciones de explotación de la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.

### 3. SISTEMA DE TRACCIÓN DE LOS TRENES AVE

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Las características técnicas básicas de los trenes AVE (Figura 1) se encuentran recogidas en la tabla I.

#### 3.2. SISTEMA DE TRACCIÓN DE LOS TRENES AVE

El sistema de tracción de los trenes AVE esta compuesto por dos unidades tractoras, una en cabeza y otra en cola de cada tren. Cada unidad consta de dos bloques motores idénticos, cada uno de los cuales alimenta a los dos motores de tracción síncronos que equipan cada "bogie". Estos motores síncronos están alimentados en serie por dos convertidores de corriente, a base de tiristores. Los tiristores son conmutados en forma natural por la fuerza contraelectromotriz de la máquina síncrona, constituyendo lo que se denomina un motor síncrono autopilotado de doce pulsos. El término autopilotado nace del hecho de que la conmutación de los tiristores se sincroniza con la posición del rotor de la máquina, o dicho de otra manera, es el propio motor síncrono el que genera las ordenes de conmutación de los tiristores. Es un sistema conceptualmente idéntico al sistema de colector-escobillas en una máquina de corriente continua, pero en el cual se

han reemplazado éstas por un sistema electrónico de conmutación a base de tiristores. En la Figura 2 se muestra el esquema del principio de funcionamiento del motor síncrono autopilotado.

El sistema de tracción de los trenes AVE consta de dos motores alimentados en serie por dos inversores u ondulatorios a base de seis tiristores. Los devanados de los motores van desfasados 30° eléctricos ya que de esta forma se consiguen reducir considerablemente las pulsaciones de par en el eje, que se producirían con un solo motor en el que las conmutaciones se realizasen cada 60° eléctricos. A bajas velocidades el motor síncrono no genera una f.c.e.m. suficiente para la conmutación de los tiristores, por lo que el circuito debe ir provisto de un sistema de conmutación forzada en el arranque. Para ello el inversor va provisto de una "cuarta rama" constituida por dos tiristores que descargan un condensador a través de las fases del motor, anulando la co-

Serie:	100
Velocidad Máxima:	300 Km/h
Ancho de vía:	1.435 mm
Tensiones de Catenaria:	25 kV-50 Hz y 3kV cc
Longitud:	200 m
Masa por eje:	17,2 t
Masa en vacío:	393 t
Masa cargado:	421 t
Potencia máxima a 25 kV ca:	8.800 kW (300 Km/h)
Potencia máxima a 3 kV cc:	5.400 kW (220 Km/h)
Motores de tracción:	Trifásicos síncronos

TABLA I.

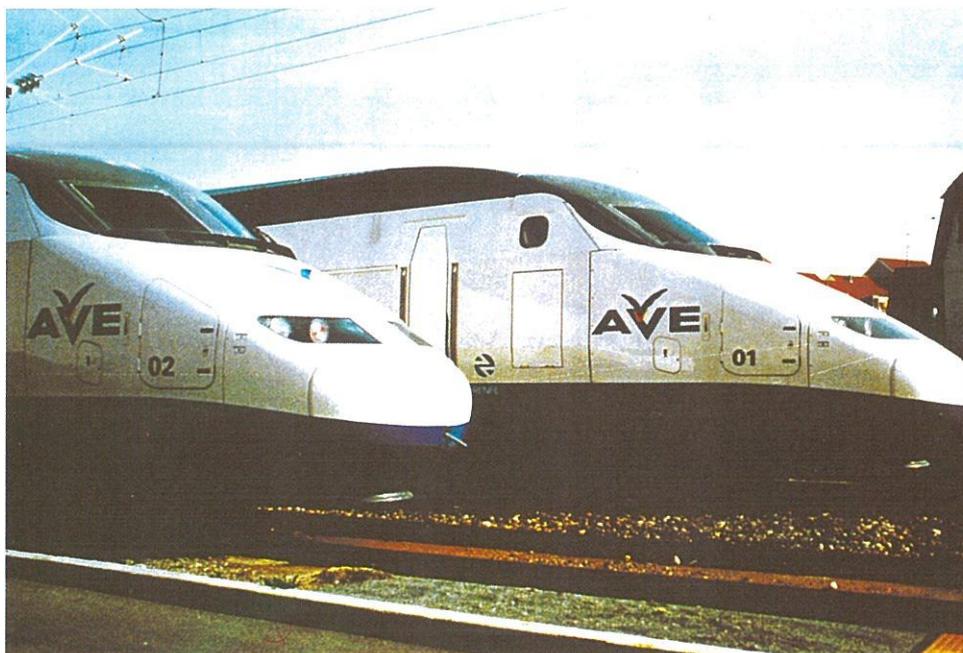


FIGURA 1. Trenes AVE (Cortesía de RENFE).

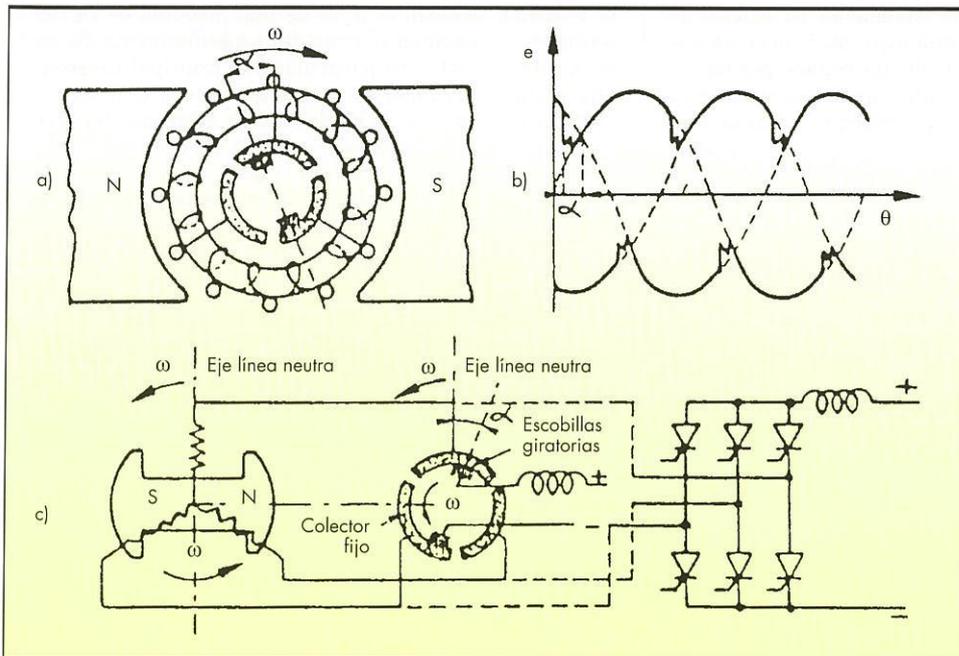


FIGURA 2. Principio de funcionamiento del motor síncrono autopilotado.

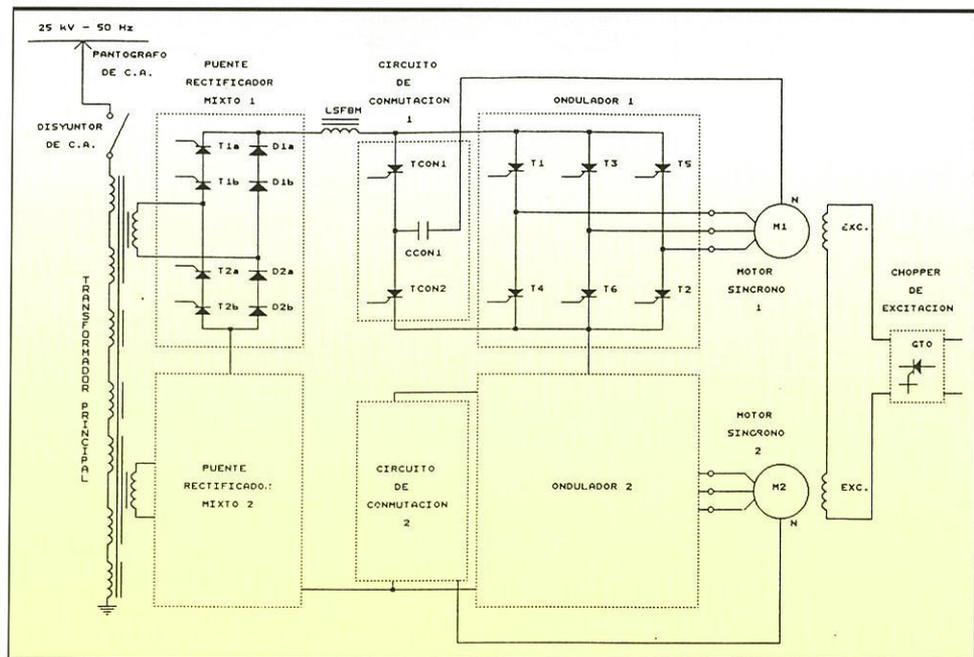


FIGURA 3. Trenes AVE. Sistema de tracción en corriente alterna.

riente en estas y apagando así los tiristores que conducían. Este sistema de conmutación forzada es utilizado en los trenes AVE hasta una velocidad de 80 Km/h.

El sistema de tracción de los trenes AVE ha sido concebido para circular bajo catenarias de 25 kV/50 Hz y 3 kV cc. En las figuras 3 y 4 se muestran los esquemas simplificados de los bloques motores en CA y CC respectivamente. En CA (figura 3) el transformador principal alimenta los dos bloques motores a través de dos puentes rectificadores mixtos (tiristor-diodo) conectados en serie. Tras la inductancia de alisado estos rectificadores alimentan a los dos inversores

de tiristores, también conectados en serie, que alimentan a los dos motores.

En CC los bloques motores (figura 4) se alimentan de la tensión de la catenaria a través del filtro principal (L-FI y CAP-FI). La tensión continua se regula con un chopper de tracción a base de GTO que alimenta a los dos puentes inversores en serie.

### 3.3. PROTOTIPO Y SIMULACIONES

Dentro del proyecto realizado conjuntamente entre RENFE y el CEDEX se desarrolló un prototipo de laboratorio, con el

objetivo de estudiar a fondo el funcionamiento del sistema de tracción de los trenes AVE. Este prototipo consistía en un sistema de motor síncrono autopilotado alimentado por un inversor de seis tiristores, con conmutación forzada en el arranque y con sensor, tanto óptico (arranque) como de tensión, para la sincronización de disparos. Todos los circuitos de control, disparos, sincronización etc., fueron desarrollados específicamente para este proyecto. El sistema de control estaba compuesto por dos microprocesadores uno de los cuales gestionaba los disparos del inversor, mientras que el otro controlaba el sistema en su conjunto, con lazos de control de

la velocidad semejantes a los de una máquina de corriente continua. La máquina síncrona fue específicamente diseñada para este proyecto. Su particularidad principal consiste en una jaula amortiguadora desmontable, con el objetivo de analizar la influencia de los devanados amortiguadores en el comportamiento dinámico del motor. A diferencia de una máquina síncrona convencional, en la que los devanados amortiguadores solamente actúan en periodos transitorios, en el motor síncrono autopilotado actúan continuamente debido al giro discontinuo del campo del estator, siendo por tanto su dimensionamiento una de las características peculiares.

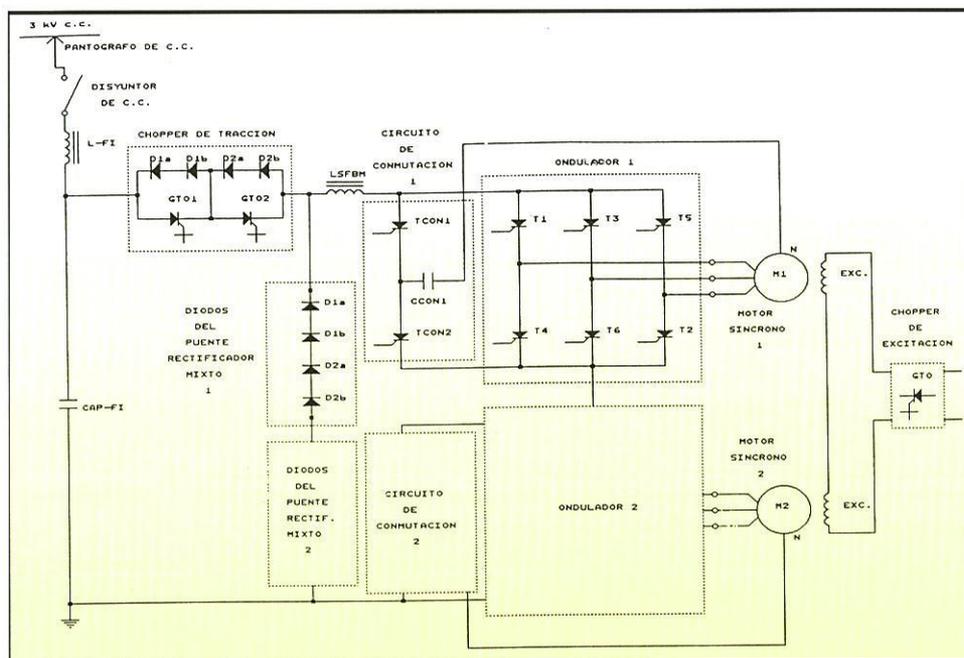


FIGURA 4. Trenes AVE. Sistema de tracción en corriente continua.

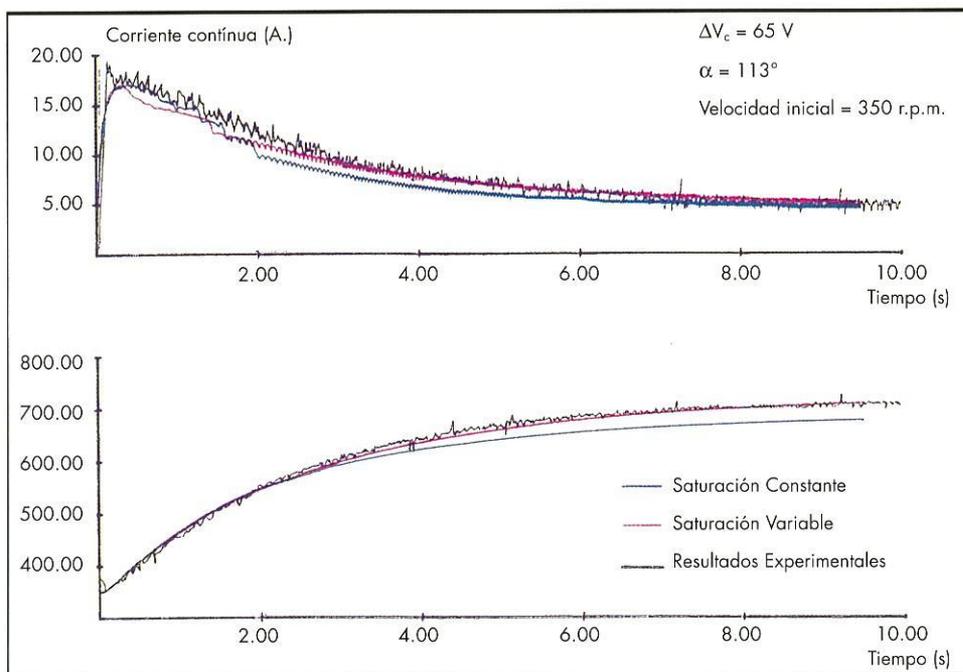


FIGURA 5. Comparación entre los resultados de simulación y los resultados experimentales. Corriente del estator y velocidad.

Paralelamente se desarrolló un programa de simulación dinámica del motor síncrono autopilotado, con un modelo completo de la máquina incluyendo regímenes saturados de la misma, además del convertidor de tiristores y los circuitos de arranque en conmutación forzada. La comparación entre los resultados de la simulación y los del prototipo sirvió para validar los modelos de simulación como se muestra en la figura 5.

Una simulación completa del sistema de tracción de los trenes AVE se realizó mediante la utilización del programa PSPICE. Para llevarla a cabo se desarrollaron modelos específicos de los diodos, tiristores y GTOs de potencia. En este caso dada la complejidad del circuito a simular, se utilizó un modelo simplificado del motor síncrono. En las figuras 6 y 7 se muestra la comparación entre los resultados simulados y los resultados reales de los trenes AVE. En ellas se puede observar que el grado de aproximación entre el modelo y la realidad es muy alta.

#### 4. SISTEMA DE TRACCIÓN DE LAS LOCOMOTORAS DE LA SERIE 252

##### 4.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Las características técnicas básicas de las locomotoras de la serie 252 (Figura 8) se encuentran recogidas en la tabla II.

Serie:	252
Tipo de locomotora:	B' o B' o
Velocidad Máxima:	220 Km/h
Ancho de vía:	1.435 mm/1.668 mm
Tensiones de Catenaria:	25 kV-50 Hz y 3kV cc
Longitud entre topes:	20,380 m
Masa de la locomotora:	90 t
Potencia continua:	5.600 kW
Esfuerzo tractor máximo:	300 kN
Régimen continuo:	290 kN a 70 km/h
Parque de locomotoras:	15 en ancho AVE 60 en ancho RENFE
Motores de tracción:	Trifásicos asíncronos
Freno eléctrico:	Mixto: Regenerativo y reostático

TABLA II.

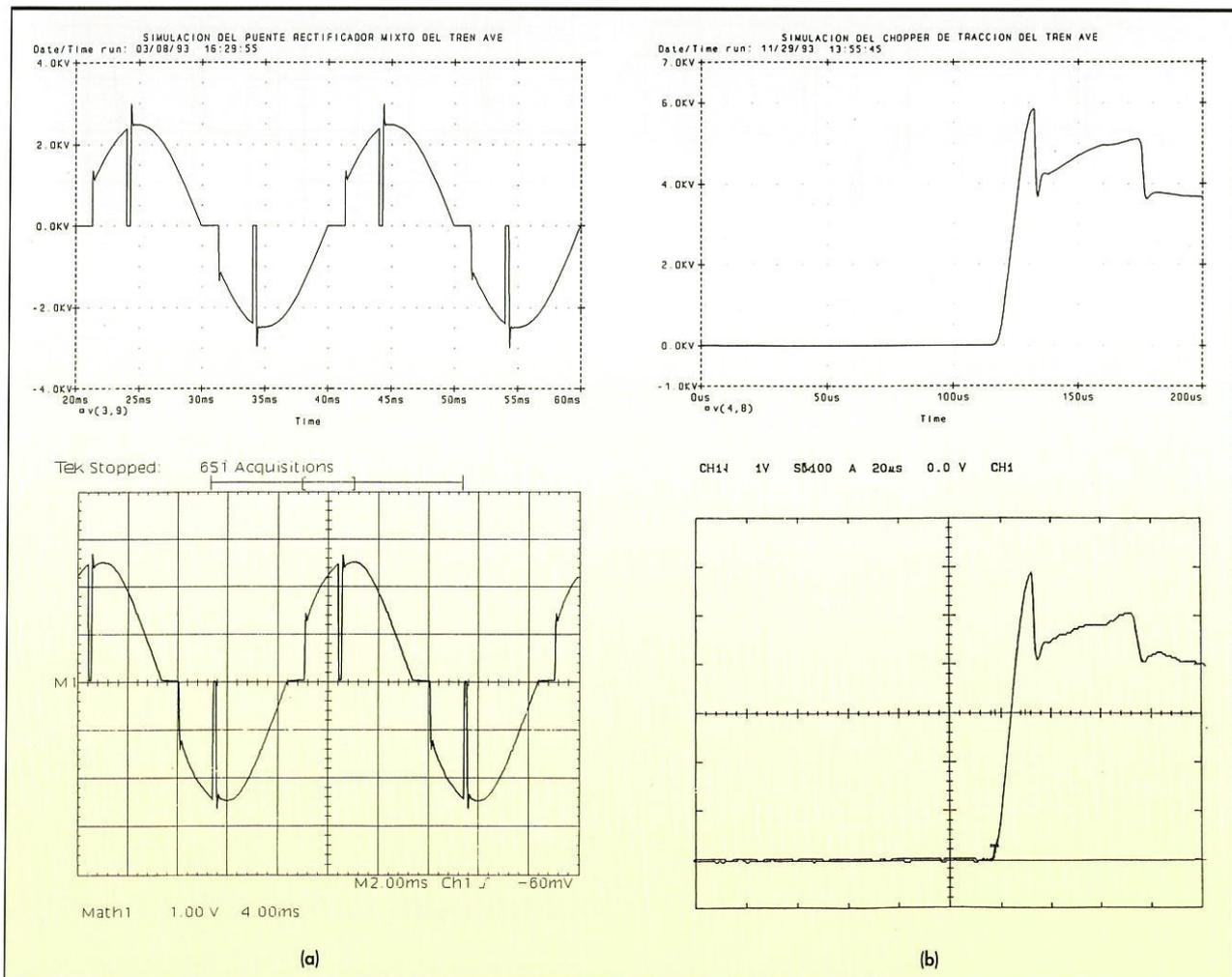


FIGURA 6. a. Puente rectificador mixto. Tensión del secundario del transformador. b. Chopper de tracción. Tensión de la rama de tiristores GTO.

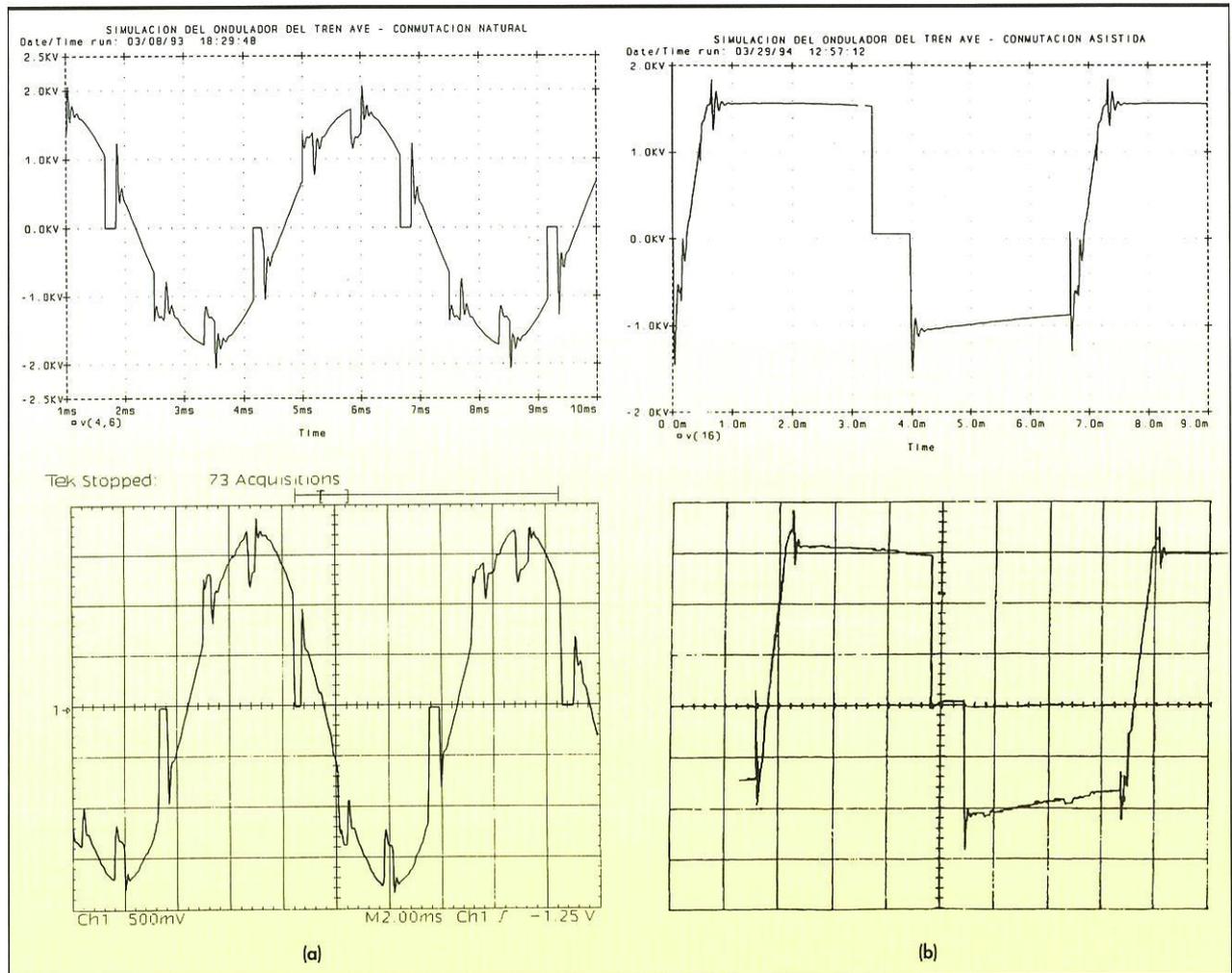


FIGURA 7. a. Ondulador en conmutación natural. Tensión en bornes del motor. b. Ondulador en conmutación forzada. Tensión del tiristor de conmutación.

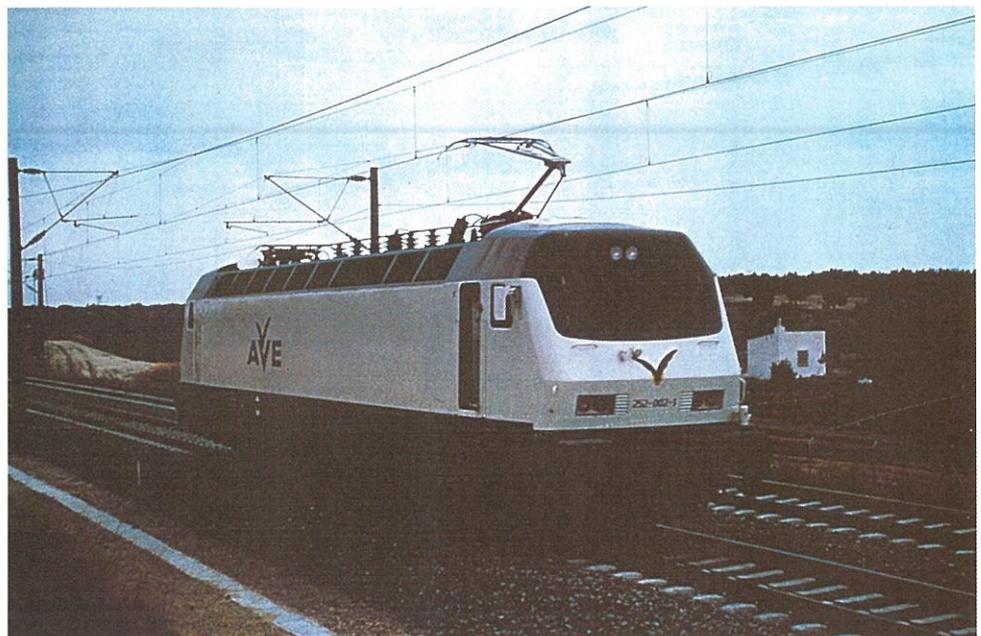


FIGURA 8. Locomotora de la serie 252 (Cortesía de RENFE).

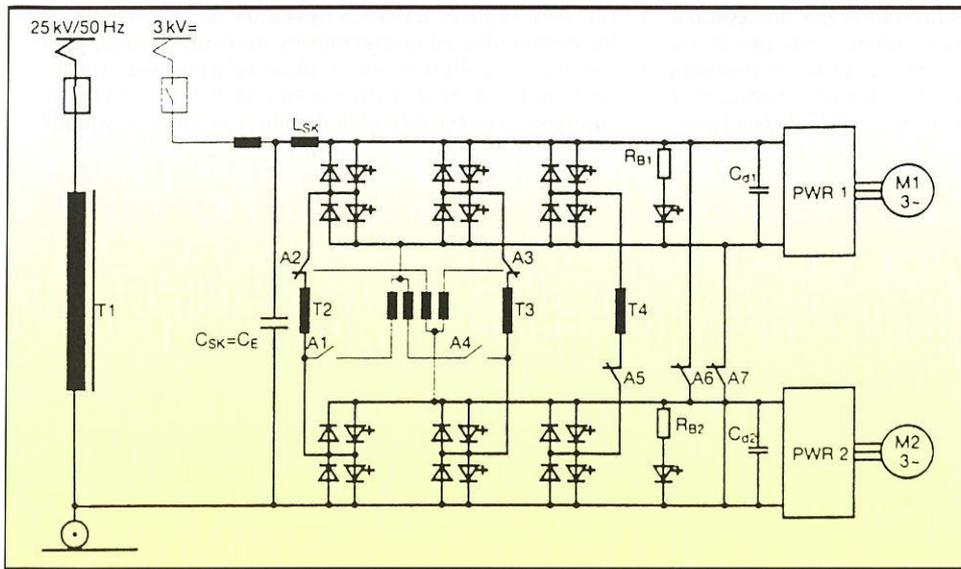


FIGURA 9. Circuito de potencia de las locomotoras de la serie 252 en corriente alterna.

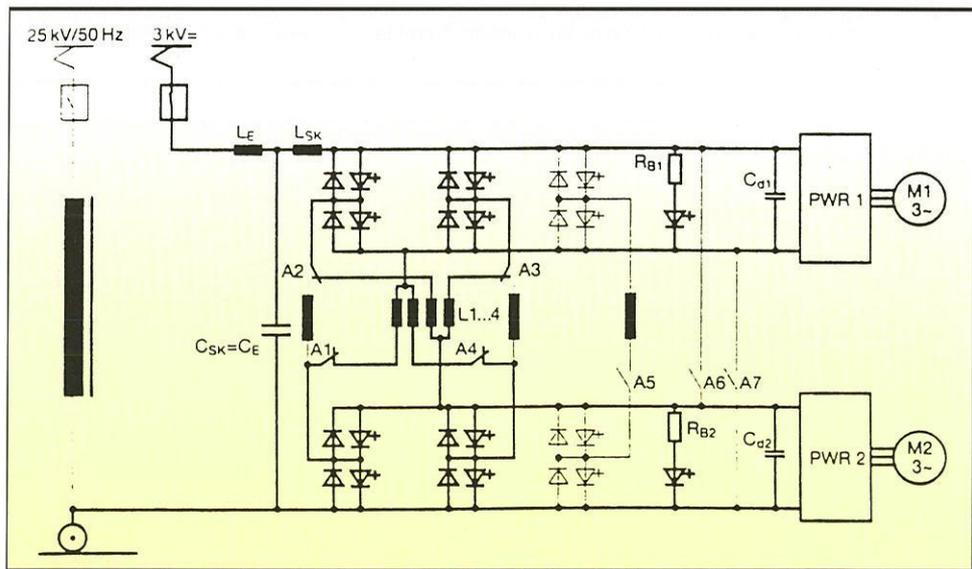


FIGURA 10. Circuito de potencia de las locomotoras de la serie 252 en corriente continua.

#### 4.2. SISTEMA DE TRACCIÓN DE LAS LOCOMOTORAS DE LA SERIE 252

El sistema de tracción de las locomotoras de la serie 252 constituye uno de los sistemas tecnológicamente más avanzados en lo que a tracción ferroviaria se refiere. Estas locomotoras incorporan cuatro motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito de 1.400 kW cada uno. La regulación de velocidad de los mismos se realiza mediante control vectorial o por orientación de campo. Dichos motores se alimentan por inversores de tensión PWM (Pulse Width Modulation) mediante tiristores GTO.

En cada unidad de tracción (bogie) existen dos circuitos intermedios y dos inversores que alimentan a cada uno de los dos motores trifásicos de tracción. El funcionamiento bajo catenaria de alterna 25 kV-50 Hz, se muestra en la figura 9. Los tres secundarios del transformador de entrada T2, T3 y T4, alimentan a cada uno de los rectificadores monofásicos (convertidores de cuatro cuadrantes), conectados

todos ellos en paralelo al circuito intermedio de continua. La tensión de cada secundario del transformador es de 1.500 V c.a., mientras que la tensión continua es de 2.8 kV. Los rectificadores de entrada controlan las aperturas de los GTOs para mantener esa tensión constante. Para elevar la tensión, el sistema de control regula, mediante los GTOs los cortocircuitos de las bobinas correspondientes (T2, T3 o T4), para, a continuación, liberar la energía de estas bobinas a través de los diodos de potencia de los módulos.

Los rectificadores de entrada son bidireccionales, permitiendo la inyección de energía a la red, en el frenado regenerativo. Además pueden funcionar con factor de potencia unitario.

El esquema de funcionamiento bajo catenaria de corriente continua esta recogido en la figura 10. En este caso los tres secundarios del transformador son desconectados, y se conectan las bobinas L1 a L4. Dos de los puentes rectificadores que se usaban en corriente alterna, se utilizan ahora como chopper para la regulación de la tensión en el

bus de continua. En este caso los inversores que alimentan a ambos motores no van en paralelo, sino que cada uno de los chopper regula la tensión de los dos circuitos de continua entre 100% y el 50% de la tensión de catenaria, mediante la conexión alternativa en paralelo y en serie de dichos inversores, solución mas que suficiente para soportar las variaciones de tensión de la catenaria. Una de las mayores ventajas de esta topología consiste en que el sistema bicorriente se consigue con los mismos módulos de potencia.

## 5. LÍNEAS FUTURAS DE LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN FERROVIARIA

Las líneas futuras de los sistemas de tracción ferroviaria se enmarcan dentro de la tendencia seguida por las locomotoras de la serie 252, esto es, tracción asíncrona con convertidores PWM, control vectorial de la máquina y factor de potencia unidad. Las mejoras posibles a este sistema únicamente se podrían enmarcar en tres líneas:

En primer lugar la utilización de los IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor), capaces de funcionar a frecuencias mucho mas altas que los GTOs, dando lugar a un menor contenido de armónicos en las corrientes tanto de la máquina asíncrona como de la red. Hasta el momento, su utilización no ha sido posible por el rango de potencia por ellos alcanzado, inferior a los rangos típicos en tracción ferrovia-

ria. Pero tanto el aumento constante de su potencia, como los desarrollos en convertidores multimodulares, puedan permitir su utilización en un plazo relativamente corto. Las ventajas también se centrarán en una disminución de peso y volumen muy considerable debido a la enorme simplificación de los circuitos de disparo.

En segundo lugar, la refrigeración de los semiconductores por agua, en un primer paso desionizada y posteriormente normal, dará lugar a un avance de gran importancia en el campo de la tracción ferroviaria.

Por último la utilización de convertidores de corriente con eliminación dinámica de armónicos, podría generar considerables ventajas en la disminución de la polución electromagnética generada por los sistemas de tracción.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. JIMÉNEZ REDONDO, J. A. "Modelos de diodo y tiristor para PSPICE. Simulación de circuitos de potencia". Mundo Electrónico. Septiembre 1994. pág. 23-31.
2. IGLESIAS, I.; GARCÍA-TABARÉS, L.; TAMARIT, J. "A D-Q Model for the Self-Commutated Synchronous Machine Considering the Effects of Magnetic Saturation". IEEE Trans. on Energy Conversion. Dec 1992, Vol 7 No 4, pág 768-777.
3. SIEMENS. Locomotora de Alta Potencia S252. Internal Report. 1993
4. State Oriented Control of Optimized Pulse Patterns Applied to a PWM Current Source Inverter. R. Vogel. SIEMENS AG. Proceedings of the 6th European Conference on Power Electronics. pág 1071-1076.



**A E P O**  
S. A. INGENIEROS CONSULTORES

### ÁREAS DE LA EMPRESA:

- ☛ ÁREA DE COMERCIAL
- ☛ ÁREA DE ESTUDIOS Y PROYECTOS
  - Departamento de Carreteras
  - Departamento de Transportes
  - Departamento de Hidráulica
  - Departamento de Estructuras
  - Departamento de Arquitectura y Urbanismo
  - Departamento de Medio Ambiente
  - Departamento de Energía e Instalaciones
- ☛ ÁREA DE CONTROL Y VIGILANCIA
  - Departamento de Asistencia Técnica en obra
  - Departamento de Obra
- ☛ ÁREA DE GEOTECNIA Y LABORATORIO
  - Departamento de Geotecnia
  - Laboratorio
- ☛ ÁREA DE GESTIÓN Y AUSCULTACIÓN DE FIRMES
  - Departamento de Auscultación
  - Departamento de Estudios Especiales
- ☛ ÁREA DE CALIDAD Y GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL



Control y Vigilancia de las obras del AVE Madrid-Barcelona-Frontera Francesa. Tramo: Zaragoza-Lleida. Subtramos VI y VII.

Redacción del Proyecto y Control de las obras del AVE Madrid-Barcelona-Frontera Francesa. Tramo: Madrid-Zaragoza. Subtramo I.

Redacción del Proyecto y Control de las Obras de Plataforma de los Accesos a Lleida del AVE Madrid-Barcelona-Frontera Francesa.

Redacción del Proyecto y Control de las Obras de Plataforma del AVE Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa. Tramo: Lleida-Martorell. Subtramo V.



### OFICINA CENTRAL:

c/ Bascones, 22 28029 Madrid  
Phone: 913 78 96 60 Fax: 913 23 26 44  
E-mail: info@aepo.es http://www.aepo.es