

*¿Son muy intensos los campos magnéticos a que estamos sometidos?*

## Campos magnéticos y alta velocidad

Manuel Vázquez, José Miguel García, Enrique Fraga, Celso Prados, Juan Arcas y Antonio Hernando

**ABSTRACT:** The GEC-Alsthom high velocity train (AVE) needs electric energy for running, so it requires high intensity currents. In this work, the alternating magnetic field created by these currents is measured as well as its relation with the different processes needed by the train: traction, braking, changing of direct current/alternating current (DC/AC), and changing of the alternating current phase.

### INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido, existe una estrecha relación entre las corrientes eléctricas (tanto continua como alterna) que circulan por un cable conductor, y los campos magnéticos que generan. La intensidad de estos campos magnéticos depende fundamentalmente de la intensidad de la propia corriente, y de la distancia a la línea de corriente. En los últimos años, el estudio de las radiaciones no ionizantes de baja frecuencia ha cobrado importancia, surgiendo publicaciones acerca del campo electromagnético creado por una línea de alta tensión [1], la posible relación entre campos electromagnéticos y la salud [2], etc. En el caso del tren AVE, se verá en el presente artículo que el campo magnético existente en su interior es muy inferior a los límites fijados por la Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) —para el público en general 100  $\mu T$ , [3]— pero quizá es sufi-

ciente para interactuar con dispositivos cuyo funcionamiento esté basado en fenómenos o materiales magnéticos —por ejemplo, tarjetas magnéticas, equipos de video, etc; el problema de la telefonía fue estudiado aun antes de la puesta en funcionamiento de la línea Madrid-Sevilla [4]—, y en su caso, las perturbaciones producidas podrían alcanzar suficiente intensidad como para deteriorar aquel funcionamiento.

### MEDIDA EXPERIMENTAL

Se realizaron medidas temporales del campo magnético alterno a 50 Hz (es decir: evolución del campo frente al tiempo), en el tren GEC-ALSTHOM de Alta Velocidad (AVE), durante el trayecto Madrid-Sevilla el día 19 de Octubre de 1995. El campo alterno se midió mediante un magnetómetro de inducción, que permite medir campos con resolución de centésimas de  $\mu T$ . Este dispositivo está basado en la ley de Faraday-Lenz: cuando el flujo magnético que atraviesa un circuito varía con el tiempo, se induce en ese circuito una fuerza electromotriz que es directamente proporcional a dicha variación; matemáticamente:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

siendo  $\Phi$  el flujo magnético,  $t$  el tiempo, y  $\varepsilon$  la fuerza electromotriz inducida.

El sensor consta de los siguientes elementos:

- Un bobinado de geometría conocida y que puede orientarse espacialmente para medir el campo magnético en distintas direcciones (recordemos que el campo magnético es una magnitud vectorial).
- Un filtro pasa-banda centrado en 50 Hz, de forma que se eliminan de la medida las componentes no deseadas.
- Un amplificador de ganancia fija, que aumenta el nivel de la señal de salida para obtener valores de voltaje manejables.
- Un amplificador de ganancia variable, que permite realizar la calibración del dispositivo.
- Alimentación mediante dos baterías de 12 V con reguladores de tensión a la salida.

En cuanto a la ubicación del sensor, conviene señalar que durante el viaje, las dos unidades tractoras del tren —la de cabeza y la de cola— están funcionando. Como veremos, la línea de alta velocidad posee tramos en que la alimentación se produce con corriente continua, y tramos en que se hace por corriente alterna. Cuando el tren circula con corriente continua, cada cabeza tractora lleva levantado un pantógrafo, mientras que con alterna la toma de corriente por catenaria se realiza a través de un único pantógrafo en la locomotora de cola; debido a ello, existe una línea eléctrica a lo largo del techo de la composi-

ción, que lleva la corriente desde dicha unidad tractora a la de cabeza.

Así, dado que un cable conductor crea un campo magnético cuyas líneas son circunferencias que rodean al cable en planos perpendiculares al mismo, el sensor se orientó en un plano perpendicular a la catenaria y a la línea de techo, de forma que recogiera el mayor flujo posible. No obstante, debemos destacar que debido a la proximidad de una de las locomotoras, no puede afirmarse que ésa fuera la dirección de flujo máximo de campo magnético durante todo el viaje, ya que la carga o descarga de los condensadores de la locomotora, el funcionamiento de los transformadores, etc, hace imposible determinarla en cada instante.

## LA ELECTRIFICACIÓN DE LA LÍNEA

La electrificación adoptada en la línea de Alta Velocidad Madrid-Sevilla es de corriente alterna monofásica de 50 Hz a 25 kV de tensión, salvo en las cabeceras de línea, donde es de corriente continua a 3 kV. Para que no se produzcan grandes desequilibrios en el sistema trifásico de la Red Eléctrica Española y Sevillana de Electricidad que alimenta a las subestaciones de la línea de alta velocidad, cada 40 km aproximadamente hay un cambio de fase de corriente alterna.

Tanto el cambio de corriente continua a corriente alterna (o viceversa) de las cabeceras de línea, como los cambios de fase de corriente alterna anteriormente mencionados, se realizan en una serie de zonas neutras en las que no existe tensión; el tren desconecta su tracción un poco antes de entrar en la zona neutra, atraviesa ésta por su propia inercia, y vuelve a conectar la tracción una vez que la catenaria está electrificada con la nueva fase.

Como los campos magnéticos de nuestro interés vienen producidos por corrientes eléctricas alternas a 50 Hz, atendiendo a la corriente de la línea de alta velocidad hay entonces tres grupos diferenciados en nuestras medidas:

- Tramos a 3 kV de corriente continua (DC)
- Tramos a 25 kV de corriente alterna (AC) monofásica
- Tramos neutros.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Presentaremos para su discusión cuatro series de medidas: un tramo de corriente alterna, un tramo de corriente alterna con una parada en Córdoba, la salida de Sevilla en corriente continua, y, finalmente, el cambio de corriente continua a alterna (tramo neutro) + el primer tramo de corriente alterna + el primer cambio de fase de corriente alterna (tramo neutro).

### Tramo de AC (Figura 1)

Desde el comienzo de la medida hasta los 40 s, el tren circula con tracción. A los 40 s, el maquinista aprovecha una bajada en el recorrido para cortar la tracción, y por tanto, hasta los 130 s, el tren circula en deriva, momento en el cual inicia una aceleración —que implica unos 600 A de corriente— que dura hasta los 270 s. A los 305 s el maquinista aplica el freno eléctrico, y a los 350 s el tren vuelve a ir sin tracción, aplicándose el freno eléctrico a los 435 s.

Todas estas operaciones se manifiestan en la evolución del campo alterno: cuando el tren circula en deriva, por pura inercia, el campo toma valores bajos (en torno a  $0.3 \mu T$ ) y es bastante estable, mien-

tras que cuando acelera, el campo se hace más intenso y oscilante, llegando a tener picos de  $12 \mu T$ . Cuando frena, aparecen picos en la evolución del campo magnético, en este caso de 3 y  $4 \mu T$ .

### Tramo de AC con parada en Córdoba (Figura 2)

Hasta los 470 s aproximadamente, en que se produce la llegada a la estación de Córdoba, el tren circula por inercia, salvo a los 60 s cuando hay un breve empleo del freno eléctrico, y a los 200 s, a partir de los cuales durante 20 s hay un período de aceleración. El campo magnético alterno es débil y estable mientras el tren circula en deriva, y presenta picos cuando se produce la actuación del freno eléctrico y la corta aceleración a los 200 s. La llegada a Córdoba no se manifiesta en la evolución del campo, probablemente debido a que cuando se actúa con el freno eléctrico, la corriente involucrada sea menor que las existentes en anteriores procesos de frenado o aceleración.

La estancia en Córdoba dura hasta los 730 s, iniciándose entonces la aceleración (tracción con una corriente considerable, entre 600 y 800 A) hasta que el tren vuelve a alcanzar la velocidad requerida durante este tramo, justo antes de

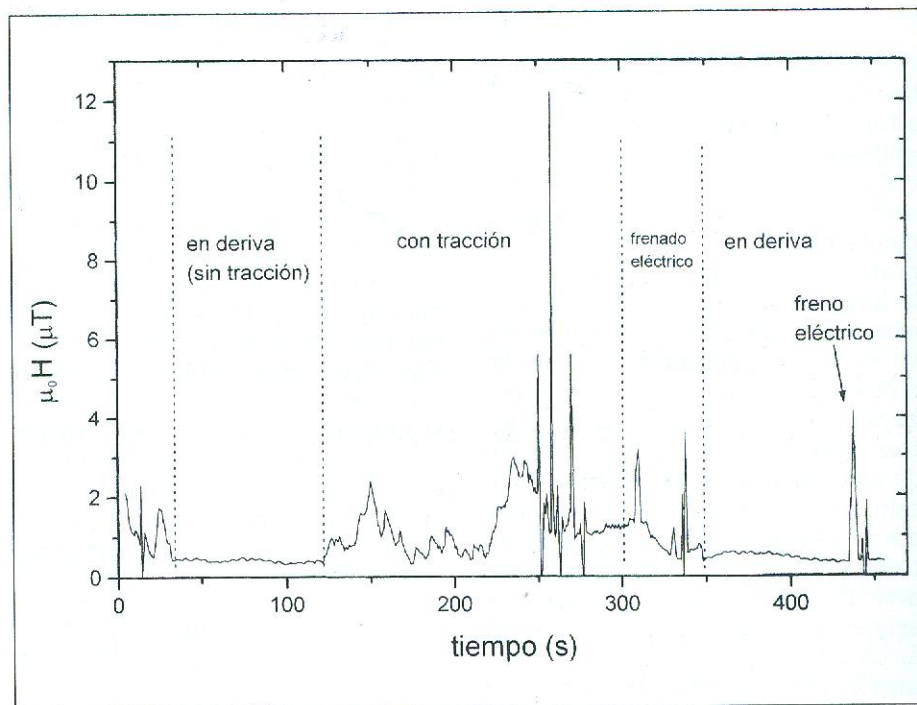


FIGURA 1.  
Evolución del campo magnético en un tramo de corriente alterna (AC).

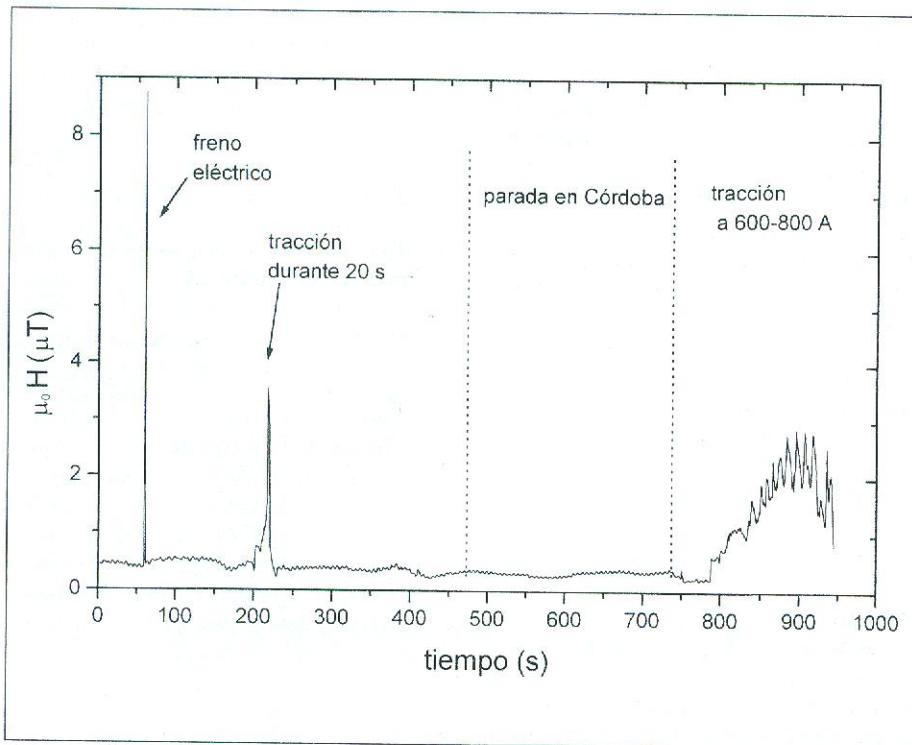


FIGURA 2.  
Evolución del campo magnético en un tramo de corriente alterna (AC)  
con parada en Córdoba.

producirse la entrada en la zona neutra para el cambio de fase. En el campo magnético alterno, se observa un comportamiento muy estable con valores inferiores a  $0.5 \mu T$  mientras dura la parada en Córdoba, y una subida oscilante del campo cuando el tren sufre un fuerte proceso de tracción al acelerar al salir de la estación.

#### Tramo en DC: salida de Sevilla (Figura 3)

Resulta interesante comparar esta salida de Sevilla con la salida de Córdoba explicada anteriormente. En Sevilla, la catenaria lleva 3 kV de corriente continua (DC), que es una corriente que crea campo magnético continuo y no campo alterno. Por tanto, el proceso de aceleración al salir de Santa Justa no se manifiesta en los valores del campo magnético alterno, que se mantiene estabilizado en torno a  $0.3 \mu T$ . Sin embargo, como ya dijimos, al salir de Córdoba sí se observaba una subida en los valores de campo, es decir, se hacía patente el proceso de aceleración, pues allí la corriente era alterna (nótese además la diferencia de escalas entre las figuras 2 y 3).

#### Cambio DC/AC (tramo neutro) + tramo AC + cambio de fase AC (tramo neutro) (Figura 4)

Inicialmente el tren circula con DC, y como a la salida de Santa Justa, el campo alterno es estable y pequeño, pues no hay corriente alterna por catenaria.

Desde los 40 s hasta los 140 s, el tren circula por inercia en una zona neutra, sucediendo la bajada de los dos pantógrafos de DC (uno por cada cabeza tractora) a los 85 s y la subida del pantógrafo de AC de la unidad de cola a los 95 s, lo que se manifiesta con sendos picos en la gráfica.

A los 140 s ya se alimenta a 25 kV de AC y acelera, observándose una subida en los valores del campo, y un comportamiento inestable (oscilaciones, picos), que como ya se ha visto anteriormente, es característico de los procesos de tracción.

A los 400 s entra en otra zona neutra (el campo baja y se estabiliza en torno a  $0.3 \mu T$ ), produciéndose el cambio de fase a los 420 s (pico en la gráfica), para volver a existir tensión a los 505 s, lo que se nota con una nueva subida en los valores medidos del campo.

## CONCLUSIONES

De los valores medidos cuando el tren circula en deriva —ya sea por razones de ahorro energético, ya porque atraviesa una zona neutra— y cuando circula con corriente continua (recordemos el tramo en DC, figura 3), se deduce que en todo momento hay un fondo de campo de unos  $0.3 \mu T$ , que es debido a las corrientes alternas que existen en el interior del tren para el alumbrado,

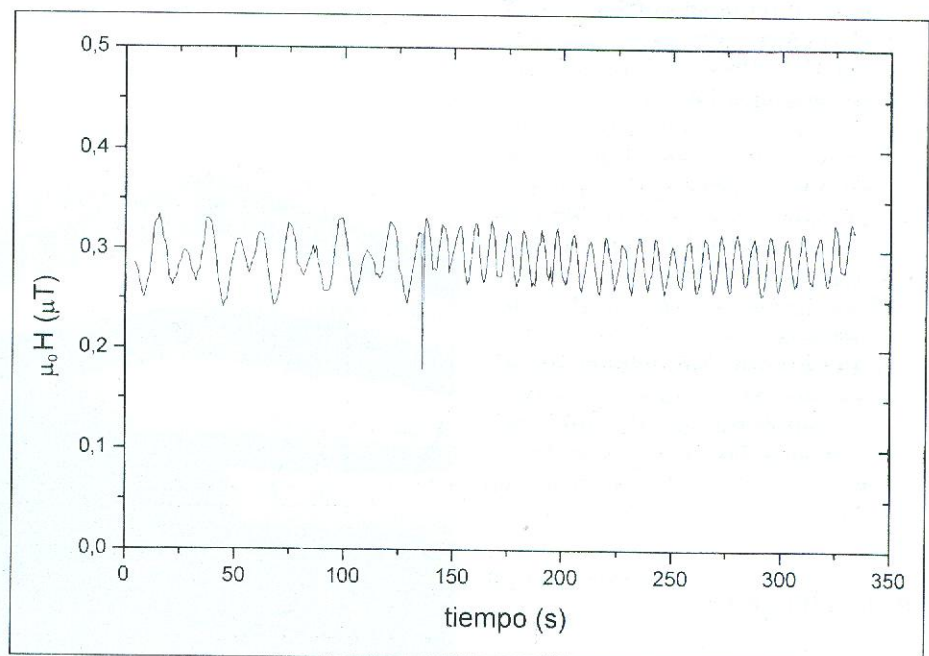


FIGURA 3.  
Evolución del campo magnético en un tramo de corriente continua (DC): salida de Sevilla.

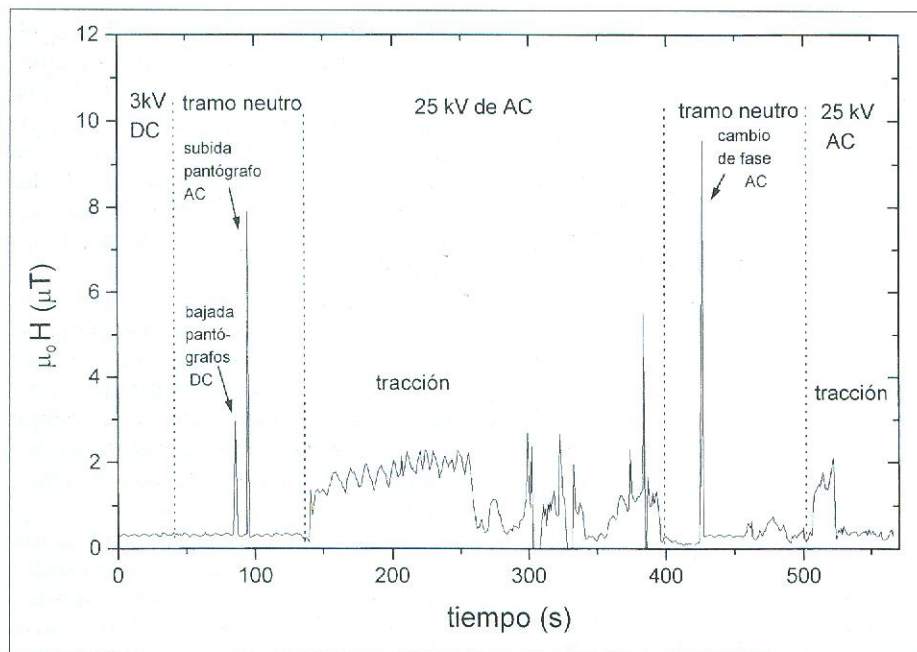


FIGURA 4.

Evolución del campo magnético en un tramo neutro con Cambio DC/AC + tramo en AC + cambio de fase AC (tramo neutro).

sistemas de apertura y cierre de puertas, etc.

Las variaciones del campo magnético alterno (campo AC) son asignables a los procesos de toma de corriente, pues reflejan de un modo bastante fiel el funcionamiento del tren:

- 1) El campo magnético alterno se mantiene estabilizado en valores inferiores a  $0.5 \mu T$  cuando el tren circula en régimen de corriente continua (DC), atraviesa una zona neutra, o circula en deriva.
- 2) El campo magnético alterno sube a valores mayores cuando se aplica la tracción, y presenta picos considerables cuando la intensidad de corriente alterna (AC) es máxima (unos 700 A) o cuando se aplica el freno eléctrico de forma que se involucren corrientes importantes (cientos de amperios).
- 3) Asimismo, aparecen picos cuando se produce el cambio de pantógrafo en el cambio de corriente DC/AC, y cuando se produce el cambio de fase en AC.

### Agradecimientos

Los autores desean reconocer a RENFE su disposición a la hora de

realizar este estudio. José Miguel García y Juan Arcas quieren agradecer, a Volkswagen Audi-CSIC y a Iberdrola respectivamente, la ayuda financiera de que disfrutaron.

### REFERENCIAS

- [1] R. W. P. KING and T. T. WU: «The complete electromagnetic field of a three-phase transmission line over the earth and its interaction with the human body», *J. Appl. Phys.* 78 (2), 668 (1995).

- [2] M. SANCHO y E. LÓPEZ: «Campos electromagnéticos y salud», *Revista Española de Física* 9 (3), 21 (1995)
- [3] J. LEAL y A. UBEDA: «Problemática de las radiaciones no ionizantes», *Radioprotección* N° 9 Vol. III (1995)
- [4] J. E. VILA et al.: «Interferencia Electromagnética generada por el Tren de Alta Velocidad en los Sistemas de Telefonía», *Comunicaciones de Telefónica I + D*, Vol. 1, N° 2 (1990).

**Antonio Hernando (VCM) y Manuel Vázquez (CSIC)** son investigadores en el Instituto de Magnetismo Aplicado UCM-RENFE donde **José Miguel García, Enrique Fraga, Celso Prados y Juan Arcas** están realizando su tesis doctoral.

*El Instituto de Magnetismo Aplicado es un Instituto Universitario adscrito a la Universidad Complutense creado mediante un acuerdo con RENFE. Posteriormente ha pasado a ser también unidad Asociada al Instituto de ciencia de Materiales (CSIC). La finalidad de este Instituto es potenciar la investigación aplicada en Magnetismo y Materiales Magnéticos, así como las relaciones entre organismos de investigación científica con las empresas interesadas en estos temas.*

