



# Influencia de la disposición de las fases de una línea doble circuito en su impacto ecológico. Campo magnético

Héctor Silvio Llamo

Recibido: octubre del 2005

Aprobado: diciembre del 2005

## Resumen / Abstract

En las líneas de transmisión doble circuito, las fases pueden disponerse de diferentes maneras. En este trabajo se demuestra que dicha disposición influye, en la magnitud del campo magnético generado por la línea con reducciones entre el 6,80 % y el 35,63 %. También se muestra cómo se modifica la variación del campo magnético transversal a la línea, y la necesidad de calcular dichos campos cuando la transferencia real por la línea es mucho mayor que la de la operación actual, para conocer si en el futuro pueden tener efectos nocivos a la salud humana.

Palabras clave: campo magnético, impacto ecológico

*In the double circuits transmission lines, the phases can be disposed of different ways. It demonstrates in these work that these disposition influences in the magnitude of magnetic field generated by the line with reductions between the 6,80 % and the 35,63 %. It shows also how it is modified the magnetic field variation transversal to the line and the necessity of calculating these fields when the transfer in the line is bigger than the transfer of the actual operation to know, if in the future can exist bad effects to the human health.*

*Key words: magnetic field, ecological impact*

## INTRODUCCIÓN

Para interconectar la estación generadora del Sistema Electroenergético Nacional Cubano, Central Termoeléctrica del Este de La Habana, con la barra de 220 kV de la subestación de transmisión Cotorro-220 se proyectó y construyó una línea de transmisión aérea, doble circuito, a 220 kV, con dos conductores de 400 mm<sup>2</sup> por fase y 31 km de longitud.

En el año 2003, la ingeniera Regla Perera Escobar y el doctor Miguel Castro Fernández, junto con el doctor Katsuhiko Naito y el máster Tomonori Ando; ambos del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Meijo y el doctor Yukio Mizuno, del

Instituto Tecnológico de Nagoya, todos del Japón, realizaron la medición de los campos eléctricos y magnéticos de dicha línea para la tensión máxima de operación y la demanda máxima del año. Los resultados de estas mediciones sirvieron para validar los resultados de dos de los algoritmos del paquete de programas PARLINC, que permite calcular los campos eléctricos y magnéticos de las líneas de transmisión aéreas a partir de su representación en cantidades de fase o físicas -matriz de los coeficientes de potencial o de Maxwell (P) y matriz impedancia (Z)-, sobre la base de un análisis **casi estático** posible a las frecuencias de potencia (50 o 60 Hz).<sup>1</sup> El campo magnético máximo medido debajo del eje de la línea (56,6 mGs) está dentro de los valores permisibles,

incluso para el borde de una zona de paso definida, para líneas de hasta 220 kV, a 15 m de dicho eje (tabla 1).

Teniendo en cuenta el desarrollo futuro de la CTE-Habana y la inquietud social existente, que se agudiza especialmente en el caso de las líneas aéreas de alta tensión, se decidió calcular el campo magnético de la línea CTE Habana-Cotorro 220, cuando esté transfiriendo la potencia máxima de diseño que se obtuvo a partir de los resultados de la tabla 2, calculados con el paquete PARLINC,<sup>1</sup> ya mencionado.

**Tabla 1**  
**Campos magnéticos máximos para líneas entre 66 y 220 kV recomendados en el borde de una zona de paso definida con un ancho de 15 m a ambos lados del eje de la torre**

Estado	Campo magnético en el borde de la zona de paso en mGs
Florida	150
Nueva York	200

**Tabla 2**  
**Resultados del análisis de la cargabilidad de la línea doble circuito CTE. Habana-Cotorro a 220 kV con 31 km, una SIL de 381,7 MW con 230 kV en el recibo y una caída de tensión del 10 %.**

Cos $\varphi$	MVA	$\Delta P(\%)$
0,85	1 280	2,35
0,90	1 430	2,48
0,92	1 514	2,56
0,95	1 694	2,77

## DESARROLLO

Este estudio tiene como objetivos determinar qué influencia tiene, en los valores del campo magnético, la disposición de las fases en cada uno de los circuitos de la línea y si en el futuro, debido al aumento de su transferencia, el campo magnético puede hacerse peligroso. Para lograrlo, se utilizó el paquete de programas PARLINC al no ser posible la medición por la imposibilidad de lograr que circule por la línea, en el momento actual, su transferencia de diseño.

Para garantizar la obtención del campo magnético máximo se diseñó el experimento con las siguientes condiciones:

- Se supusieron 1 694 MVA de transferencia con un factor de potencia inductivo de 0,95, es decir, el mayor valor obtenido para una caída de tensión del 10 % y una tensión de 209 kV en el recibo de la línea, o sea, la tensión de operación mínima permisible según datos del Despacho Nacional de Carga Eléctrica del SEN. (Ver tabla 2.)

- Se aprovechó la característica del algoritmo de cálculo utilizado que busca la posición angular del vector de las tensiones aplicadas a la línea que genera los mayores valores del campo como se muestra en las tablas 3 y 4.

- Teniendo en cuenta que la altura de los conductores sobre la superficie del terreno influye notablemente en la intensidad de los campos electromagnéticos, se tomó la mayor flecha posible para los conductores de fase, y los campos magnéticos se calcularon en el centro del vano a un metro de altura del suelo.

- Se analizó la influencia de la disposición de las fases de cada circuito en el valor y la variación transversal del campo magnético (figuras de la 1 a la 6), manteniendo constante la disposición de las fases de uno de los circuitos y cambiando la del otro. En ningún caso, el campo sobrepasó los valores permisibles dados en la tabla 5.

**Tabla 3**  
**Valores del campo obtenidos debajo de la línea (campos máximos)**

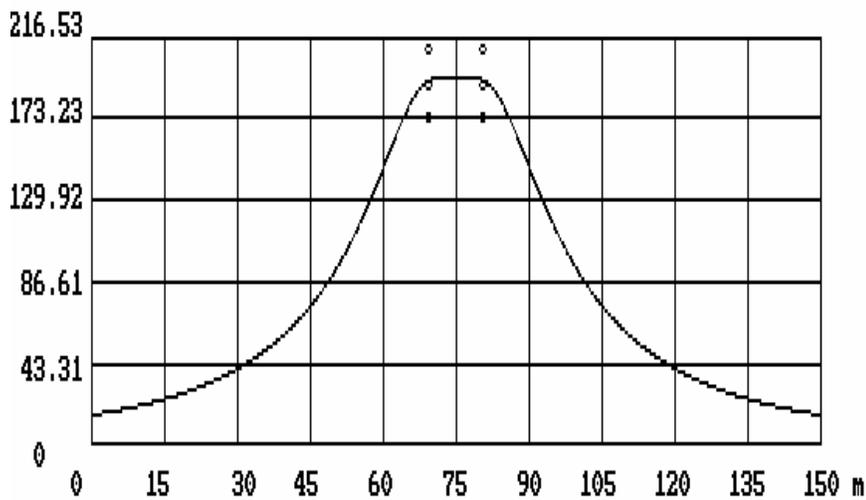
Secuencia de fase de los circuitos	Campo magnético máximo para un desfase del vector de las tensiones aplicadas	Campo máximo debajo de la línea en mGs
ABC - ABC	345°	194,88
ABC - ACB	320°	158,52
ABC - BAC	240°	181,62
ABC - CAB	325°	125,46
ABC - BCA	270°	125,45
ABC - CBA	335°	131,79

**Tabla 4**  
Valores del campo obtenidos en los bordes de la zona de paso

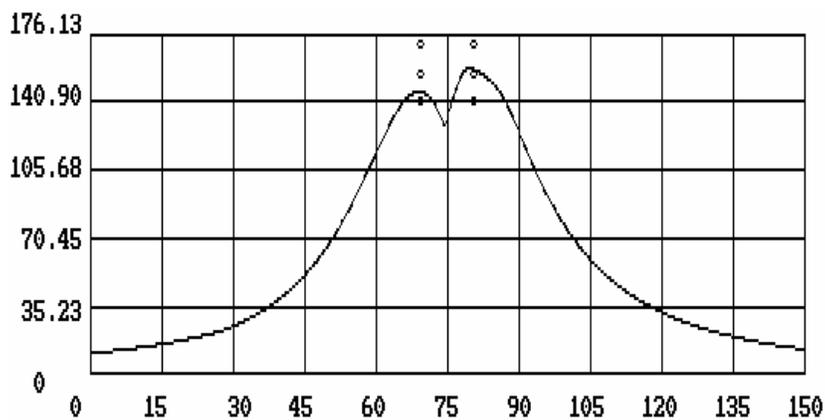
Secuencia de fase de los circuitos	Campo magnético en el borde de la zona de paso (mGs)	
	15 m a la izquierda	15 m a la derecha
ABC - ABC	147,35 (150)	147,345 (150)
ABC - ACB	115,02	125,17
ABC - BAC	128,28	137,72
ABC - CAB	70,48	95,71
ABC - BCA	95,71	70,48
ABC - CBA	69,89	68,23

**Tabla 5**  
Valores límites mínimos para la exposición ocupacional al campo magnético de 60 Hz (American Conference of Governmental Industrial Hygienist)

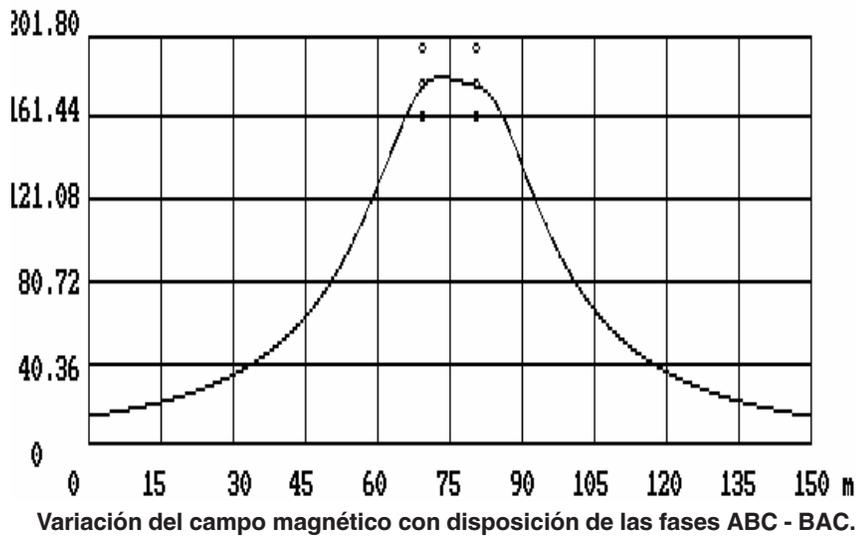
Exposición a 50 o 60 Hz	Campo magnético mGs
Jornada laboral (8 h)	5 000
De pocas horas al día	10 000
Con marcapasos	1 000



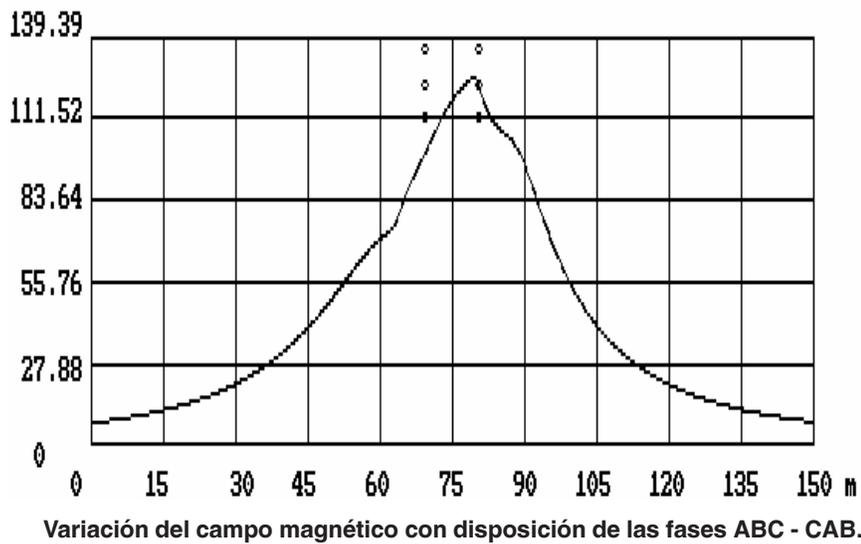
1



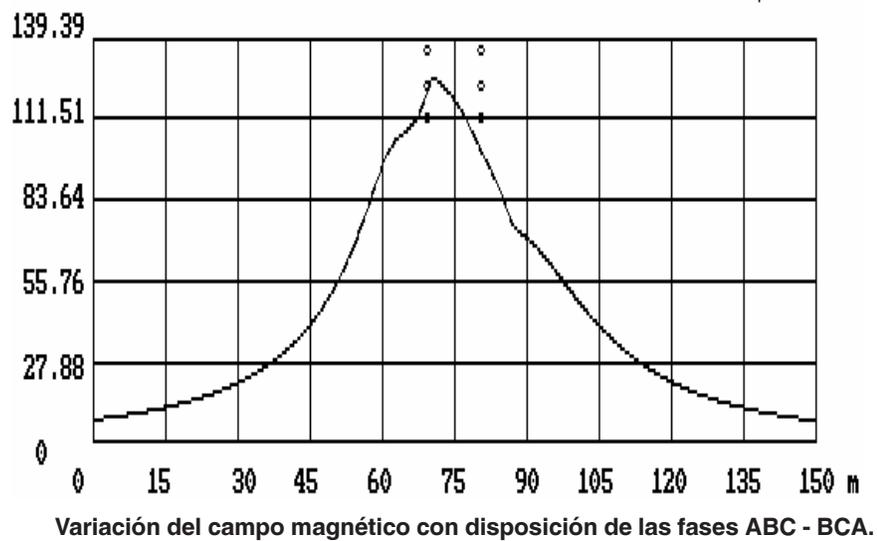
2



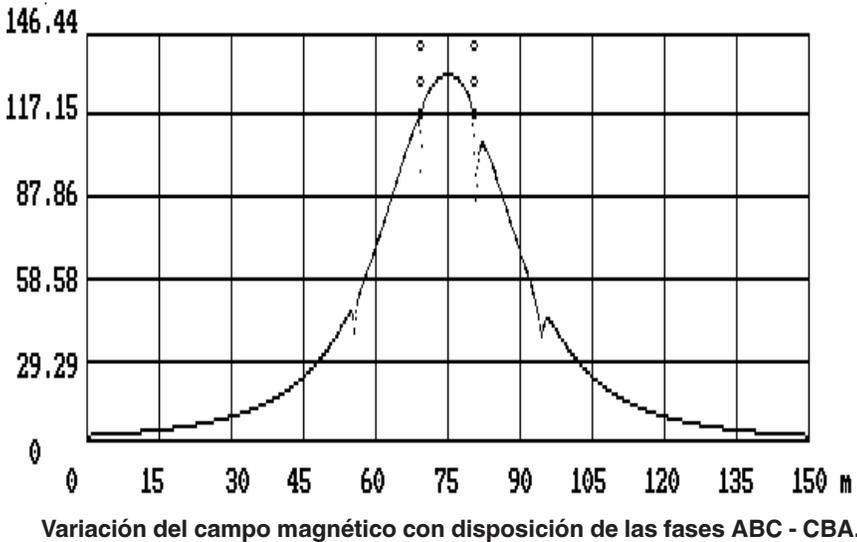
3



4



5



6

## CONCLUSIONES

- La disposición de las fases en cada circuito, modifica los valores de los campos magnéticos calculados. La tabla 6 muestra una diferencia máxima del 35,62 % entre los campos de las disposiciones ABC-ABC (máximo) y ABC-BCA (mínimo).

**Tabla 6**  
Diferencia en porcentaje de las diferentes disposiciones de fase con respecto al campo magnético máximo calculado

Secuencia de las fases de los circuitos	Reducción con respecto al campo máximo (%)
ABC-ABC	00,00
ABC-ACB	18,66
ABC-BAC	6,80
ABC-CAB	35,63
<b>ABC-BCA</b>	<b>35,62</b>
ABC -CBA	32,37

- Aunque el campo máximo calculado no es peligroso, en la etapa del diseño de la línea, debe recomendarse la disposición de las fases ABC-BCA por ser las que dan lugar al menor campo magnético. (tabla 6)
- Las figuras de la 1 a la 6 muestran cómo influye la disposición de las fases en la variación del campo

magnético calculado con un movimiento transversal a los conductores de la línea de una longitud de 150 m. Las disposiciones ABC-ABC, ABC-BAC Y ABC-CBA son las que dan una mayor simetría con respecto al eje de la estructura, siendo la primera (ABC - ABC) la de mayor simetría. (Ver tabla 4.)

- Si se varía la disposición de las fases se obtienen reducciones del valor máximo del campo magnético entre el 6,80 % y el 35,63 % (tabla 6).

- Si se comparan los resultados de las tablas 3 y 4 con los valores mínimos considerados seguros y obtenidos de la literatura (150 mG en el borde de la zona de paso para el estado de la Florida y 1000 mG para la American Conference of Governmental Industrial Hygienist (tablas 1 y 5), se observa que los campos magnéticos calculados están por debajo de los mismos. El valor más próximo es el del borde de la zona de paso (1,77 % menor) por lo que puede concluirse que los campos magnéticos de la línea CTE Habana - Cotorro son inferiores a los establecidos en las normas y recomendaciones internacionales, vigentes,<sup>2</sup> y no afectarán a la población ni al medio ambiente en los próximos años de explotación.<sup>3</sup>

- En la actualidad, la línea CTE Habana-Cotorro transmite unos 200 MVA por lo que los campos magnéticos son inferiores a los calculados.

## REFERENCIAS

1. Llamo, H. S.: "Algoritmos para realizar el análisis integral de las líneas de transporte de energía eléctrica", Tesis para optar por el grado de Doctor en

- Ciencias Técnicas, Ciudad de La Habana, Cuba, 1995.
2. **Kaune, W. T.:** "Assesing Human Exposure to Power Frequency Electric and Magnetic Field", *Environmental Research* 101 (suppl. 4), pp. 121-133, 1993.
  3. **Durkin, C. J. et al.:** "Five Years of Magnetic Field Management", *IEEE, Trans. On Power Delivery*. January, 1995.
  4. **Izquierdo, C y M. Burgos:** *Medidas de campos electromagnéticos en líneas aéreas de alta tensión*, ALTAE 97, Ciudad de La Habana, Cuba, 1997.
  5. **Carson, J. R. et al.:** "Propagation of Periodic

Current Over a System of Parallel Wires", *Bell Systems Technology*. Vol. 6, pp. 495-545, July, 1926.

#### AUTOR

**Héctor Silvio Llamo Laborí**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba  
e-mail: hllamo@electrica.cujae.edu.cu

## ANEXO I

### CARACTERÍSTICAS DEL ALGORITMO UTILIZADO PARA CALCULAR LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

A las frecuencias utilizadas para la transmisión de la energía eléctrica la longitud de onda de las tensiones y las corrientes involucradas es del orden de los 5000 km. Estas distancias son muy grandes comparadas con las longitudes de las líneas de transmisión, es posible suponer que los campos actúan de forma independiente y pueden utilizarse las fórmulas de los campos estáticos.<sup>4</sup> El efecto del retorno de las corrientes por la tierra en el CM se tiene en cuenta mediante el método del conductor imagen debido a Carson.<sup>5</sup> La contribución al CM total por cada uno de los conductores que forman la línea puede calcularse a partir de la ley de Ampere. Con esta definición, el CM, es un fasor que describe una elipse en el plano X-Y. La expresión para el CM es:

$$B_i = 2 \frac{I_i}{R_i} \text{ MiliGauss (mGs)} \quad \dots(1)$$

Sobre la base de la descomposición en los ejes de un sistema cartesiano de las componentes real e imaginaria del CM se obtienen sus componentes en los ejes X y Y

$$B_x = 2 \sum_{i=1}^N I_i \left[ \frac{Y_i - Y_p}{(R^+_i)^2} + \frac{Y_p + D_e}{(R^-_i)^2} \right] = e + jf \quad \dots(2)$$

$$B_y = 2 \sum_{i=1}^N I_i \left[ \frac{X_p - X_i}{(R^+_i)^2} + \frac{X_p - X_i}{(R^-_i)^2} \right] = g + jh \quad \dots(3)$$

donde:

$I_i$ : Corriente que circula por cada conductor, obtenida de la transferencia de potencia por la línea.

$N$ : Número de conductores activos de la línea.

$X_i$  y  $Y_i$ : Coordenadas de los conductores.

$R^+_i$  y  $R^-_i$ : Distancias entre los conductores de fase y sus imágenes respectivamente.

$D_e$ : Ubicación del conductor ficticio debido a Carson.

Datos de la línea: Tensión nominal, 220 kV. Tensión de operación, 209 kV. Longitud, 31 km. Resistividad del terreno 100  $\Omega$  - m. Flecha de los conductores 8 m, 2 conductores de 400 mm<sup>2</sup> por haz, 2 cables protectores de acero de 70 mm<sup>2</sup> y 14 conductores en total.