



# Impacto ecológico de las líneas de transporte de energía eléctrica aéreas. Parte II: Campo Magnético.

Héctor Silvio Llamo Laborí

## RESUMEN / ABSTRACT

Se presentan las características y algunos resultados de un algoritmo (CMAGNET) que permite calcular el campo magnético de las líneas de transporte de energía eléctrica aéreas. Se muestra además la necesidad de conocer estos resultados desde el punto de vista de la salud de los vecinos cuyas viviendas están próximas a los alimentadores primarios de las redes de distribución urbanas a 13,2 kV.

**Palabras claves:** Líneas de transmisión eléctricas, transporte de energía, impacto ecológico de líneas de transmisión eléctricas.

*In this work are presented the characteristic and some results of CMAGNET algorithm that permit to calculate the magnetic field of aerial transmission lines. It is shown too the necessity of knowing these results from the point of view of the health of the neighbor whose houses is close to the urban distribution feeders at 13,2 kV.*

*Key words: Electric transmission lines, energy transmission, ecological impact of the electric transmission.*

## GENERALIDADES.

Si nuestro hogar está debajo de una línea de alta tensión o próximo a ella se expone tanto al campo magnético como al campo eléctrico. Como las paredes exteriores apantallan al campo eléctrico, pero no al magnético, en el interior de la vivienda, sus moradores estarán afectados sólo por este último. Además, un estudio realizado por Dennis Henshaw, de la Universidad de Bristol, publicado por el *International Journal of Radiation Biologic* afirma que el campo magnético libera el gas radón existente en las paredes de los edificios y que este elemento es asimilado por el organismo con grave riesgo para las personas con cánceres no desencadenados.

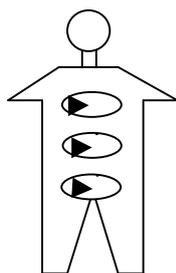


Figura 1- Líneas de fuerza del campo magnético en una persona.

Los resultados mostrados anteriormente y muchos otros más no expuestos han hecho que varios países hayan normado los valores máximos de CEM permisibles en una Zona de Paso (ZP) de las líneas de transmisión y que varias organizaciones hayan definido valores de CEM considerados "seguros". Los nombres de estas organizaciones pueden verse en la primera parte de este trabajo.

La revista "Protection of Workers" da los valores de los CM generados por algunos aparatos electrodomésticos: Lámparas fluorescentes, entre 13 y 200mT a 2,54 cm (1 pulgada). Sierra Circular, entre 210 y 1000 mT a 7,62 cm. Taladro Eléctrico,

entre 0,4 y 800 mT a 7,62 cm. Cocina Eléctrica de 4 hornillas, entre 6 y 200 mT a 2,54 cm. Planchas Eléctricas, entre 8 y 30 mT a 7,62 cm. Lámparas Fluorescentes de mesa, entre 40 y 400 mT a 2,54 cm. Televisores, entre 2,5 y 50 mT a 2,54 cm.

Compare estos valores con los medidos en dos líneas de transmisión aéreas: A 115 kV: 2,97 mT debajo de la línea y 0,65 mT en el borde de la ZP (a 15 m del eje de la torre). A 220 kV: 5,75 mT debajo de la línea y 1,95 mT en el borde de la ZP (a 15 m del eje de la torre). Ambos son valores promedio de 24 h, los máximos son aproximadamente el doble.

Los aspectos anteriores dan una idea clara de la necesidad de conocer el valor de los campos magnéticos de las líneas de transporte de energía eléctrica. En el caso de líneas construidas éstos pueden ser medidos, pero durante su proyección deben ser calculados utilizando algoritmos apropiados.

## CÁLCULO DEL VALOR DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS (CM).

A las frecuencias utilizadas para la transmisión de la energía eléctrica (50 ó 60 Hz), la longitud de onda de las tensiones y las corrientes involucradas es muy grande (5000 ó 6000 km respectivamente). Estas distancias son muy grandes comparadas con las longitudes de las líneas de transmisión y es posible trabajar con el llamado "análisis casi estático", es decir, puede suponerse que los campos actúan de forma independiente (desacoplados) y por ende, pueden utilizarse las fórmulas de los CCMM estáticos. De lo anterior se infiere que este desarrollo no es válido para las altas frecuencias.

El CM se mide en mili Gauss (mG) o en micro Teslas (mT). (1 mG=10 mT).

Dado que el CM está asociado con las corrientes

que circulan por los conductores de las líneas, que en las redes de media tensión como las redes de distribución urbanas, las corrientes son mayores que en las de alta tensión y además, los alimentadores y ramales están más próximos a la población en general, podría suceder que el efecto del CM fuera más importante en la Distribución que en la Transmisión de la energía eléctrica.

El efecto de la tierra en el CM se tiene en cuenta mediante el método del conductor imagen debido a Carson. Este método, utiliza un conductor ficticio, con Radio Medio Geométrico unitario (reactancia propia nula) ubicado por debajo de la línea a una distancia:

$$D_e \cong 660 \sqrt{\frac{r}{F}} \text{ m} \quad (1)$$

Donde  $r$  es la resistividad del terreno en W-m u W/m<sup>3</sup> y  $F$  es la frecuencia en Hz (50 ó 60 Hz).

Siendo el análisis "cuasi estático", la contribución al CM total por cada uno de los conductores que forman la línea puede calcularse a partir de la ley de Ampere:

$$B_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi R_i} \text{ Weber / m}^2 = G \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

Donde:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ : Permeabilidad absoluta del aire en Wb/A/m.

$R_i$ : Distancia entre el conductor (o su imagen) y el punto donde se calcula el campo.

$I_i = e + jg$ : Fasor de la corriente en cada conductor.

Esta última definición indica que el CM,  $B_i$ , es también un fasor que, al igual que en el campo

eléctrico, describe una elipse en el plano X-Y.

Sustituyendo en la ecuación (2)  $\mu_0$  por su valor numérico y cambiando las unidades a mG se obtiene una nueva expresión para el CM:

$$B_i = 2 \frac{I_i}{R_i} \text{ mGs} \quad (3)$$

Sobre la base de la figura 5 y utilizando un procedimiento similar al utilizado en el campo eléctrico se obtienen las componentes del CM en los ejes "X" y "Y":

$$B_x = 2 \sum_{i=1}^N I_i \left[ \frac{Y_i - Y_p}{(R_i^+)^2} + \frac{Y_p + D_e}{(R_i^-)^2} \right] = e + jf \quad (4)$$

$$B_y = 2 \sum_{i=1}^N I_i \left[ \frac{X_p - X_i}{(R_i^+)^2} + \frac{X_p - X_i}{(R_i^-)^2} \right] = g + jh \quad (5)$$

Donde  $I_i$ , que son las corrientes que circulan por cada conductor o cada fase, según  $N$  sea igual al número de conductores activos o igual a tres por el número de circuitos de la línea, se obtienen de la transferencia de potencia por la línea.

Como el conductor imagen de cada conductor está a una distancia fija, que depende de la frecuencia y de la resistividad del terreno, y la misma,  $D_e$ , es diferente que la altura del conductor,  $Y_i$ , aun en el caso en que se calcule el CM en la superficie del terreno, no habrá simetría y el campo máximo se calculará siempre a partir de los semiejes de la elipse.

## INFLUENCIA DE LA TIERRA EN EL VALOR DEL CAMPO MAGNÉTICO (CM).

El retorno de las corrientes por tierra influye en el valor del campo magnético a través del conductor imagen. Para una frecuencia fija, la resistividad del terreno es el elemento preponderante. Estudios realizados mostraron como influye la resistividad del terreno en el valor del CM si la frecuencia y la carga permanecen constantes:

La distancia del eje de la torre a la cual ocurre el CM máximo no varía con el valor de la resistividad del terreno ( $r$ ).

Para cualquier valor de  $r$  mayor que  $50 \text{ W-m}$ , se obtiene el mismo valor del CM debido a que la distancia a la cual se encuentra el conductor imagen ( $D_c$ ) es tan grande, comparada con la altura de los conductores de la línea, que las componentes del CM debidas a las corrientes que circulan por las imágenes no influyen en el valor del CM total. De este resultado se infiere que, a  $60 \text{ Hz}$ , si la resistividad del terreno es mayor que  $50 \text{ W-m}$ , puede despreciarse el efecto de la tierra en el valor del CM. Sin embargo, para valores pequeños de

la resistividad ( $r$ ), su influencia es notable.

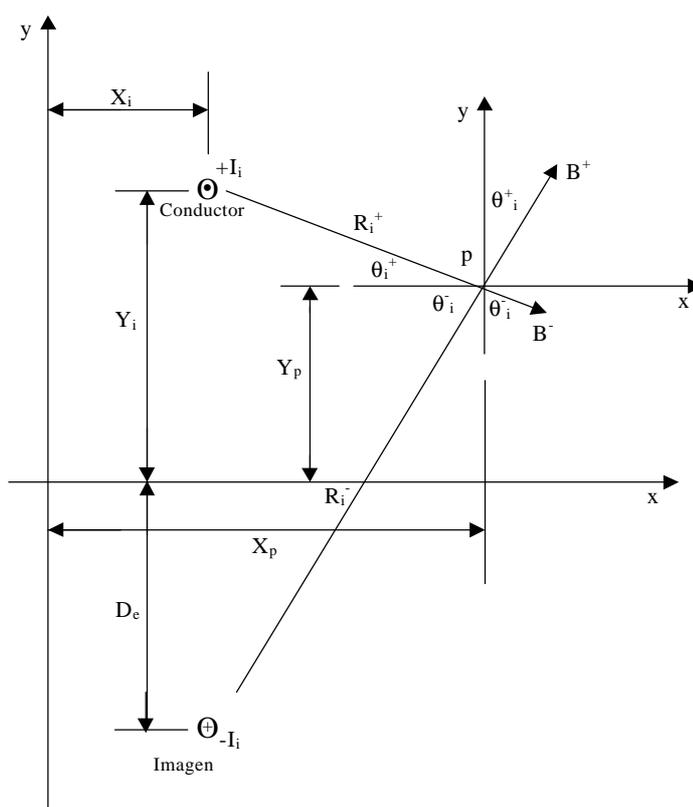
Se comprobó que la forma de la curva CM vs X no cambia con el valor de la resistividad.

**Resultados prácticos: Efecto de la distribución urbana a 13,2 kV en la salud humana.**

Para calcular el valor de los campos magnéticos asociados con las redes de distribución urbanas a  $13,2 \text{ kV}$  se utilizará el programa CMAGNET perteneciente al paquete PARLINC<sup>1</sup>. En dicho algoritmo, debido a las bajas frecuencias involucradas ( $60 \text{ Hz}$ ), se realiza un análisis "cuasi estático". Las líneas aéreas son tratadas como sistemas acoplados que incluyen el efecto del retorno de las corrientes por tierra (mediante las correcciones de Carson) y del conductor neutro, es decir, el modelo matemático está muy próximo a la línea real.

Los resultados de este algoritmo han sido validados mediante la comparación de sus resultados con las mediciones hechas en líneas de transmisión cubanas a  $110$  y  $220 \text{ kV}$  por ingenieros japoneses y colombianos.

**Figura 2- Sección transversal al conductor y al conductor ficticio debido a Carson en una línea de transmisión.**



Dado que el valor del campo magnético (CM) depende del sistema de impedancias propias y mutuas de la línea, matriz impedancia (Z), es independiente de la longitud de la línea y de que la misma sea o no paralela al edificio considerado, sólo es necesario conocer la transferencia de potencia por el tramo con un trazado próximo a la vivienda considerada.

En las redes de distribución urbanas (RDU) del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) hay circuitos con estructuras tipo "A" céntricas y excéntricas. De la referencia 2 se tomaron dos tipos de estructuras tipo "A", una céntrica y otra excéntrica. Esta última se convirtió en dos variando la altura del neutro para determinar su efecto en el valor del CM.

De la referencia 3 se tomaron las distancias mínimas permisibles a fachadas y balcones. Se supuso un edificio de tres plantas, con balcón a la calle de 1,5 m de ancho, una sala de 4,5 m por 4,5 m y un puntal de 3m. Los pisos se supusieron de un espesor de 0,20 m. Esto da una altura al edificio de 9,6 m si se descuenta la altura de la placa del techo. Con estas suposiciones, y las distancias mínimas dadas en la referencia 3 se obtuvo que el eje de los postes (referencia para el programa CMAGNET) debe estar a 3,56 m del balcón y a 5,06 m de la fachada. Esta la condición "normada". Como es sabido, en Ciudad de la Habana hay calles donde los postes; con arboladura excéntrica, están mucho más cerca de la fachada de los edificios por lo que se decidió analizar otro caso más crítico como es el de un edificio de tres pisos, similar al anterior, pero sin balcones en el que los postes de la línea de distribución están a sólo 20 cm de las paredes que dan al trazado del tramo considerado.

Con respecto a la demanda utilizada en los cálculos, se tomaron tres valores: 13600, 10000 y 8000 kVA, todas con un factor de potencia de 0,8 y un voltaje de 13200 V.

Los CM se calcularon para personas que estuvieran paradas, sentadas y acostadas en el balcón y en el centro de la sala de la vivienda del

primer tipo (ver la tabla 1). Se hizo lo mismo para el segundo tipo de vivienda y estructuras, pero con personas en la puerta de la planta baja, en las ventanas que se corresponden con la puerta en los pisos superiores y en el centro de la sala (ver la tabla 2).

## RESULTADOS.

Las tablas 1 y 2 muestran los resultados obtenidos para las dos condiciones impuestas. Un análisis de la influencia de la posición del conductor neutro, (se tomó a 6,18 m y 5,80 m del piso según aparece en la referencia 74), demostró que en este caso particular la pequeña diferencia en la altura del neutro no influye en los valores del CEM.

	Campo en micro Tesla ( $\mu$ T) para una persona:		
1er. Piso.	Parada.	Sentada	Acostada.
Balcón.	3,326	2,693.	2,280
Sala.	1,662	1,550	1,403
2do. Piso.	Parada.	Sentada.	Acostada.
Balcón.	9,242	6,556	5,467
Sala.	2,432	2,338	2,186
3er. Piso.	Parada.	Sentada.	Acostada.
Balcón.	10,180	8,642	9,189
Sala.	2,489	2,549	2,591

Tabla 1- Alimentador con estructuras tipo "A" céntricas a 13,2 kV.

Para las personas paradas se supuso una altura de 1,80 m. Para las sentadas, de 1,3 m y para las acostadas de 0,60 m del piso.

	Campo en micro Tesla ( $\mu$ T) para una persona:		
1er. Piso.	Parada.	Sentada.	Acostada.
Puerta.	2,183	-----	-----
Sala.	1,642	1,427	1,187
2do. Piso.	Parada.	Sentada.	Acostada.
Ventana.	11,392	-----	-----
Sala.	4,360	3,881	3,194
3er. Piso.	Parada.	Sentada.	Acostada.
Ventana.	15,633	-----	-----
Sala.	4,733	5,038	5,241

**Tabla 2- Alimentador con estructuras tipo "A" excéntricas a 13,2 kV.**

Como era de esperarse, en todos los casos analizados, el campo máximo está fuera de la vivienda, debajo de los conductores del alimentador y el mínimo en el fondo de la sala, es decir, en la zona más alejada de los conductores de la línea.

El hecho de que en el tercer piso, una persona parada esté sometida a un campo menor que otra sentada o acostada no es una contradicción. Esto se debe a que en ese piso el punto donde se calcula el campo está por encima de los conductores de la línea por lo que si la altura del punto disminuye, se acerca más a la influencia del CEM.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Los habitantes de los pisos superiores están expuestos a los campos magnéticos de un mayor valor debido a que están más próximos a los conductores de la línea.
- Dado que en la actualidad no hay unanimidad en cuanto a los valores de CEM considerados "seguros", los habitantes de los pisos superiores deben considerar que están en una zona de protección sanitaria y en estudio de los posibles efectos nocivos del CEM: Valores  $> 15 \mu\text{T}$ .
- Se recomienda que el Ministerio de Salud Pública, junto con el Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM) realice un estudio sobre los posibles efectos de los CEM en la salud humana.

## Referencias bibliográficas.

1.- Llamo, H.S.: "Cálculo Automatizado para el Diseño de las Líneas de Transporte de Energía Eléctrica". Tesis para el grado de Dr. en Ciencias Técnicas. ISPJAE. 1995.

2.- E.C.: "Normas para líneas aéreas de distribución y subtransmisión eléctrica". Sección

*de Proyectos. 1964.*

3.- E.C.E. : "Datos Técnicos". Red Provincial Habana. 1963.

## DATOS DEL AUTOR

Héctor Silvio Llamó Laborí

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Ciudad de la Habana

En la actualidad, es jefe de la disciplina Sistemas Electroenergéticos e imparte cursos de Pregrado y Postgrado en las asignaturas relacionadas con los Sistemas Eléctricos de Potencia.