

Análisis del campo magnético en una línea eléctrica de AT

R. Moreno, J.A. Güemes y I. Pico

Departamento de Ingeniería Eléctrica
E.U.I.T.I., Universidad del País Vasco
Plaza de la Casilla, 3, 48012 Bilbao (España)
Telef.: +34 946014363, fax: +34 946014300
e-mail: iepgualj@lg.ehu.es

Resumen. El incremento en los últimos años de la preocupación por los posibles efectos que pudieran tener los campos magnéticos, producidos por las líneas eléctricas de alta tensión en los seres vivos, ha originado multitud de estudios e informes para esclarecer esta posible fuente "productora" de enfermedades. Creemos que puede resultar de utilidad, para futuros diseños de líneas de transporte de energía eléctrica, emplear una herramienta de cálculo como es el método de elementos finitos, para el cálculo de la distribución y magnitud del campo magnético generado por las líneas eléctricas. De esta forma, se puede conocer con antelación si la línea produce un campo magnético superior al estimado por la Recomendación del Consejo Europeo 1999/519/CE, que establece el límite de tolerabilidad para el campo magnético en $100 \mu\text{T}$ y, en caso necesario tomar las medidas correctoras oportunas. En este trabajo utilizando el método de elementos finitos, se calcula la densidad de flujo magnético generado por una línea de 30 kV de doble circuito y se comparan los resultados con los medidos experimentalmente (en la línea). Igualmente se simula el comportamiento de diferentes configuraciones geométricas de líneas eléctricas con el fin de determinar cuales producen una menor "contaminación magnética".

Palabras llave. Campo magnético, contaminación magnética, método de elementos finitos, líneas eléctricas,

1. Introducción

Algunos experimentos de laboratorio han detectado que, bajo determinadas condiciones, y en algunos modelos en animales, los campos magnéticos pueden tener efectos biológicos. Sin embargo, ni las investigaciones "in vitro", ni las realizadas a animales y personas han demostrado que dichos campos sean nocivos para la salud. Tampoco han permitido establecer el mecanismo mediante el cual, los campos magnéticos podría actuar sobre los seres vivos ni, lo que es más importante, a partir de qué dosis podría hablarse de riesgo para las personas.

El Ministerio de Sanidad y Consumo de España en Julio de 2001 establece: "No puede afirmarse que la exposición a campos electromagnéticos dentro de los límites establecidos en la Recomendación del Consejo Europeo (1999/519/CE) produzca efectos adversos para

la salud humana. Por tanto, el comité concluye que el cumplimiento de la citada recomendación es suficiente para garantizar la protección de la población"

La recomendación de la Unión Europea, de 12 de Julio de 1999, fija el límite de tolerabilidad en $100 \mu\text{T}$, la cual ha tenido en cuenta el principio de precaución. Esta recomendación es ratificada por multitud de organismos, instituciones, informes científicos, médicos, etc. Entre ellos destacamos:

- La Asociación Internacional para la Protección radiológica (IRPA).
- El Instituto Nacional de Normativa de Estados Unidos (ANSI).
- La Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP).
- El Consejo Nacional de Protección Radiológica del Reino Unido (NRPB).
- El Consejo Nacional de Protección Radiológica y Medidas de Estados Unidos (NCRP).
- El Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC).

En los últimos años, se han publicado distintos trabajos en los que se estudia el campo magnético producido por líneas de transporte de energía eléctrica [1] – [5] y la forma de reducirlo [6] – [7].

El primer y principal objetivo del trabajo, es simular el comportamiento magnético de una línea de alta tensión, utilizando el método de elementos finitos mediante modelos en dos dimensiones, y comparar los resultados obtenidos con las medidas experimentales realizadas en la línea.

El segundo objetivo es simular y analizar la distribución de la densidad de flujo magnético en función de la configuración geométrica de los conductores de la línea, la secuencia de fase y el desfase de corrientes entre circuitos, con el fin de determinar que configuraciones producen una menor "contaminación magnética".

2. Línea de alta tensión

El método presentado en este trabajo, se ha aplicado a la determinación y medida de la distribución de la densidad de flujo magnético de una línea eléctrica de alta tensión de 2ª categoría, de 30 kV y doble circuito con un conductor por fase de aluminio acero LA-180. La configuración de la línea es tipo barril, siendo la altura del conductor más bajo en el centro del vano de 12 m.

En la figura 1, puede verse la configuración de la línea.



Fig. 1. Línea eléctrica de alta tensión.

3. Metodología

Los pasos seguidos en la comunicación para validar el método propuesto son los siguientes:

- 1) Medir la densidad del flujo magnético en una recta situada perpendicular a la línea de alta tensión, en el centro del vano y a un metro del plano del terreno. Las medidas se realizan a ambos lados del centro de la línea con un mínimo de 10 puntos de medida y hasta una distancia de 25 m del eje de la línea.
- 2) Conocer el histórico de corrientes y potencias en el tiempo de las medidas.
- 3) Utilizando el método de elementos finitos, simular el comportamiento de la línea para la corriente, en el momento de realizar las medidas, facilitada por la compañía suministradora en el histórico de potencias.
- 4) Medir el valor de la densidad de flujo magnético en el modelo de elementos finitos en los mismos puntos indicados en el punto 1.
- 5) Verificar que la magnitud y distribución del campo magnético obtenido de la simulación están acordes con las leyes físicas fundamentales para el cálculo del campo magnético.

- 6) Comparar los valores obtenidos en las mediciones de campo con los medidos en la simulación del comportamiento de la línea utilizando el método de elementos finitos.
- 7) Simular el comportamiento de distintas configuraciones de líneas con el fin de determinar que configuraciones producen una menor "contaminación magnética".

4. Modelo

El modelo de elementos finitos utilizado es plano 2D y esta constituido por una sección recta de los 6 conductores y el espacio de aire que los rodea. El espacio de aire tomado a la izquierda, arriba y derecha de los conductores es de 25 m (debe ser suficientemente amplio para admitir que en el contorno del modelo, la densidad de flujo magnético sea despreciable).

En la figura 2, se muestra el modelo utilizado.

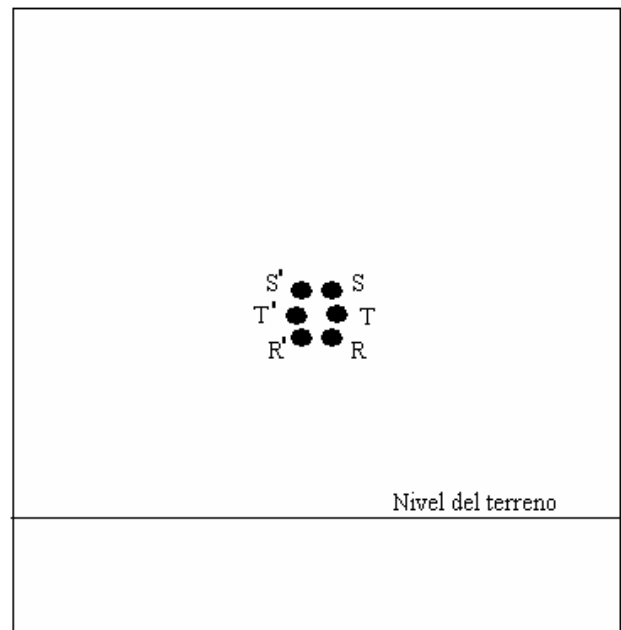


Fig. 2. "Modelo"

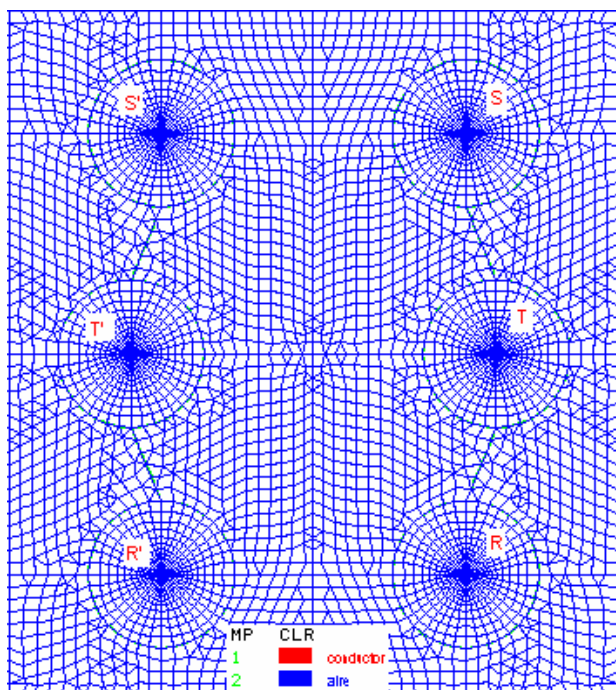
Los elementos utilizados son planos de 4 nodos. En la figura 3, se muestra el mallado utilizado en la zona de los conductores.

Las excitaciones se definen por medio de la densidad de corriente en cada uno de los conductores. La densidad de corriente se calcula a partir del histórico de potencias, en el periodo en el que se realizaron las medidas de campo.

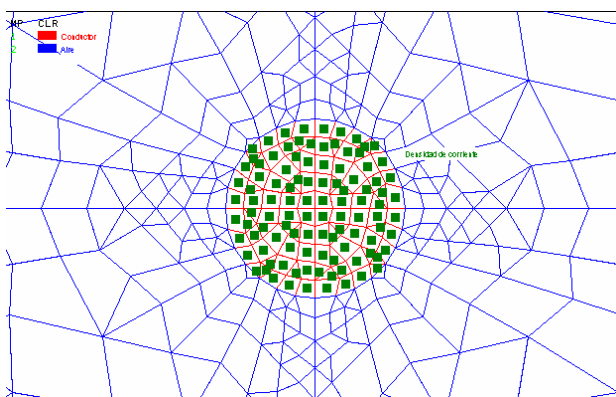
Las propiedades se definen por medio de la permeabilidad magnética del aire, conductores eléctricos y la tierra.

La condición de contorno es vector potencial magnético nulo en la periferia del modelo.

El tipo de análisis realizado es magnetostático.



a) zona próxima a los conductores



b) zoom de un conductor

Fig. 3. Mallado

La simulación del comportamiento de la línea, se ha realizado para instantes de tiempo de 0; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5 y 20 ms (cada 45° durante un periodo) de la forma de onda correspondiente a la corriente por la fase R.

En la figura 4, se muestra la forma de onda de la densidad de flujo magnético en el centro de la línea y centro del vano, a un metro de altura de la superficie del terreno, obtenida de la simulación del comportamiento de la línea utilizando el método de elementos finitos (50 A por circuito).

Podemos observar que, para la corriente de ensayo, la forma de onda de la densidad de flujo magnético está desfasada 24,5° respecto de la forma de onda de la corriente por la fase R.

En las figuras 5 y 6 se muestra respectivamente, la distribución del vector potencial magnético y densidad de flujo magnético, en la zona de los conductores, para el instante en el que la corriente es máxima en la fase R.

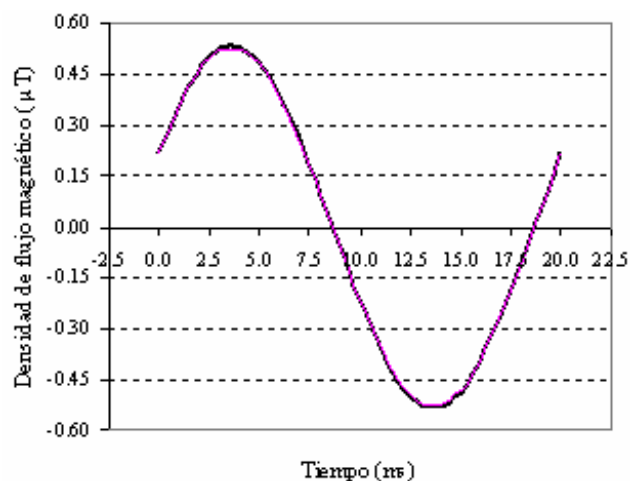


Fig. 4. Densidad de flujo magnético

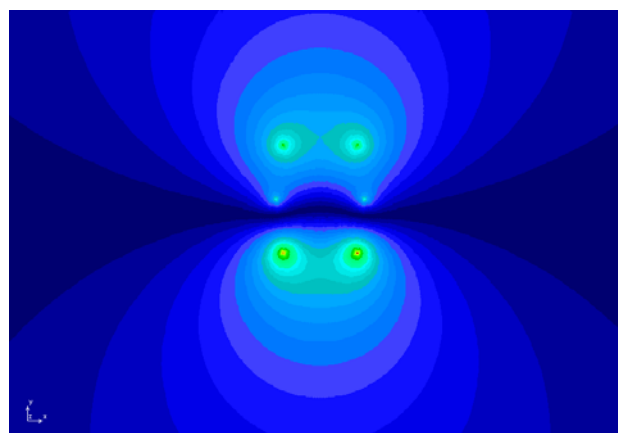


Figura 5. Vector potencial magnético

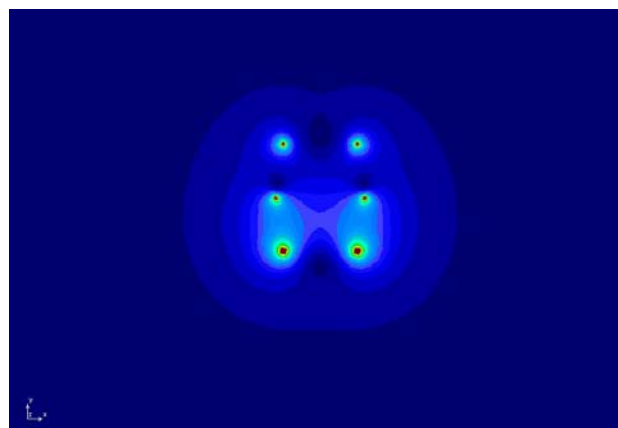


Fig. 6. Densidad de flujo magnético

5. Comparación de resultados

Una vez realizada la medida de campo y la simulación del comportamiento de la línea para las corrientes calculadas (50 A por circuito), se tienen los valores de densidad de flujo magnético mostrados en la figura 7.

Podemos observar como los resultados obtenidos por simulación se asemejan a los medidos experimentalmente. Únicamente en los puntos situados bajo la eléctrica línea, se obtiene por medición un valor

de la densidad de flujo magnético ligeramente superior al obtenido por simulación.

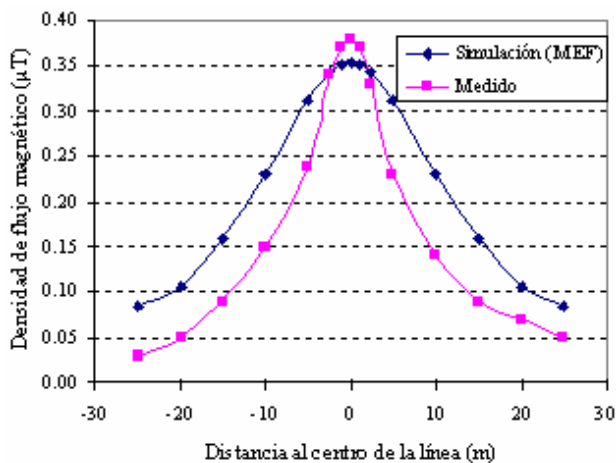


Fig. 7. Densidad de flujo magnético

La diferencia existente entre los valores medidos en las prácticas de campo con los obtenidos por simulación, pueden ser debido principalmente a que la corriente real, en el periodo de medición, fuera ligeramente inferior a la calculada por el histograma de potencias facilitado por la compañía suministradora y también a la precisión del instrumento de medida.

En la curva de medidas de las prácticas de campo (Fig 7), se observa que los valores de densidad de flujo magnético en el lado derecho son algo superiores a la misma distancia en el lado izquierdo, lo que demuestra que la corriente real por el circuito 1, en el momento de realizar las medidas, era superior a la corriente por el circuito 2.

El campo magnético en cada uno de los ejes se ha medido con un gausímetro con un rango de medida de 0,01 μT a 2000 μT (2 mT), con una precisión de ±10 % y un ancho de banda de 30 a 300 Hz.

Las medidas de densidad de flujo magnético, se realizaron en puntos separados dos metros entre si y situados en una recta localizada perpendicular a la línea de alta tensión, en el centro del vano y a un metro del plano del terreno. En cada uno de los puntos se realizan tres medidas (B_x , B_y , B_z), calculando el valor resultante de la densidad de flujo magnético en ese punto, por medio de la ecuación:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (1)$$

Realizado nuevamente la simulación del comportamiento magnético de la línea, para el valor máximo de corriente, (400 A por circuito), se tiene un valor máximo de la densidad de flujo magnético de 3 μT (medio en el centro del vano y a un metro de altura sobre el plano del terreno). El valor obtenido es muy inferior a los 100 μT establecidos por la recomendación de la Unión Europea 1999/519/CE.

6. Simulación del campo magnético con distintas configuraciones y/o secuencias de fase.

En vista de los resultados obtenidos anteriormente, en este apartado simulamos el comportamiento magnético de: a) distintas configuraciones de líneas y, b) distintas secuencia o desfases de las corrientes entre circuitos. En ambos casos el estudio se realiza para el valor máximo de la corriente por la línea (400 A por circuito).

A. Distintas configuraciones

En la figura 8, se muestran las distintas configuraciones de líneas estudiadas.

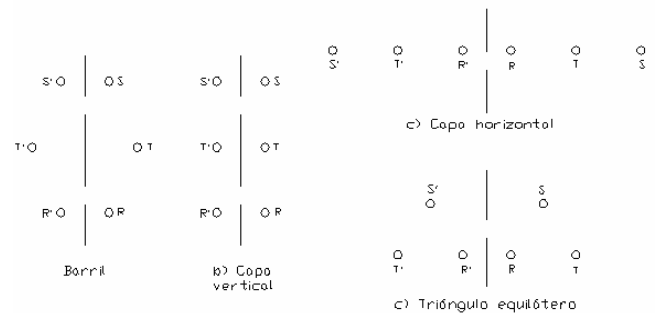


Fig. 8. Distintas configuraciones

Una vez realizada la simulación del comportamiento de las distintas configuraciones, se tiene el resultado mostrado en la figura 9.

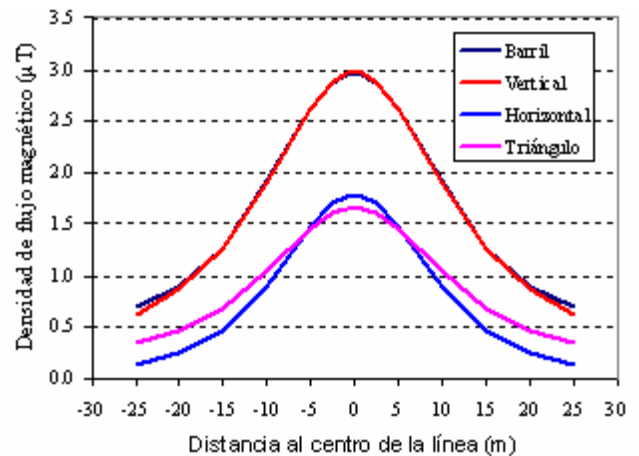


Fig. 9 Densidad de flujo magnético en distintas configuraciones de los conductores de la línea

Se puede observar que el valor de la densidad de flujo magnético disminuye aproximadamente a la mitad, utilizando las configuraciones en triángulo y horizontal, mientras que, como era esperado, la configuración en doble capa vertical da resultados muy similares a la configuración barril.

En la figura 10, se muestra como varía la distribución de la densidad de flujo magnético en función de la configuración geométrica de los conductores de la línea, para el instante en el que la corriente es máxima en la fase R.

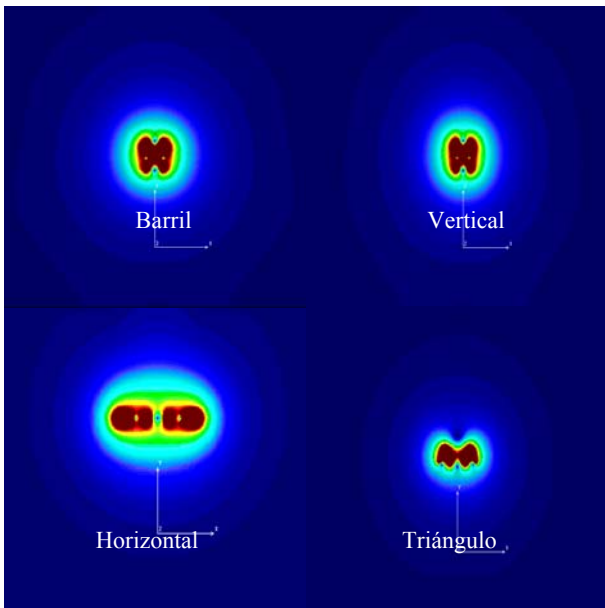


Fig. 10. Distribución de la densidad de flujo magnético

B. Modificación de la secuencia de fases o desfase de corrientes entre circuitos.

Finalmente se han estudiado como afecta en la distribución de la densidad de flujo magnético, los siguientes factores:

- Cambio del orden de secuencia de fases del circuito 2 (configuración 1 – véase figura 11a).
- Cambio del orden de secuencia de fases y adelanto de 30° de las corrientes del circuito 2 con respecto a las corrientes del circuito 1 (configuración 2 - véase figura 11b)
- Adelanto de 30° de las corrientes del circuito 2 respecto del circuito 1 (configuración 3 - véase figura 11c).

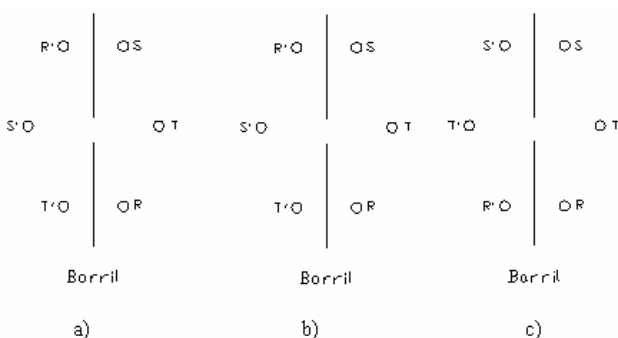


Fig. 11. Distintas secuencias y/o desfases de corrientes entre circuitos

Una vez realizado el análisis se tienen los resultados mostrados en la figura 11.

Se puede apreciar como al cambiar el orden de secuencia de fases en uno de los circuitos (configuración 1), se reduce el campo magnético de una forma importante (66 %). Si además de esto, las corrientes entre a ambos circuitos están desfasadas (configuración 2), la reducción

del campo es más acusada (74 %). En cambio si únicamente las corrientes de un circuito van desfasadas 30° respecto de las del otro (configuración 3), no se obtiene una reducción del campo magnético apreciable.

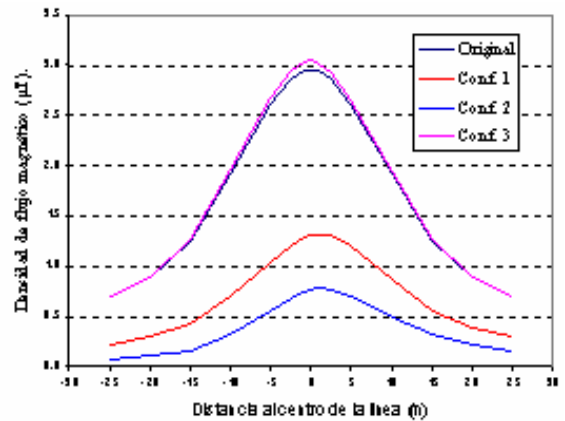


Fig. 12. Densidad de flujo magnético para distintas secuencias del orden de sucesión de fases y/o desfases de corrientes

La figura 13, muestra la distribución de la densidad de flujo magnético para cada una de las configuraciones anteriormente indicadas para el instante en que la corriente es máxima en la fase R.

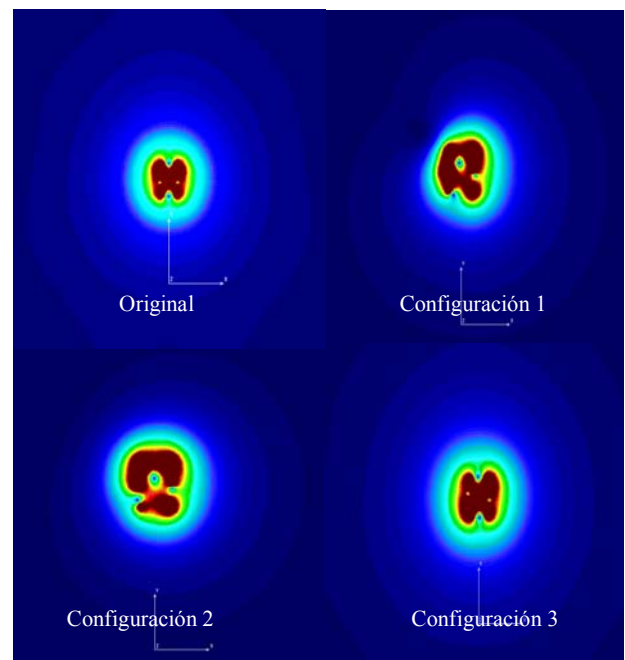


Fig. 13. Distribución de la densidad de flujo magnético

De los resultados anteriores, podemos indicar que con un adecuado replanteo del orden de secuencia de fases y del “desfase de corrientes entre los dos circuitos” se puede reducir los niveles de densidad de flujo magnético de forma importante.

En este trabajo se han estudiado distintas configuraciones de líneas y se ha indicado cual es la más aconsejable respecto de la mínima “contaminación magnética”. No obstante en el diseño de una línea, influyen otros factores como la capacidad entre conductores o entre estos y tierra, el tamaño de las torres, etc.

El método presentado en este trabajo es de gran ayuda para los ingenieros eléctricos que se dedican al cálculo de líneas eléctricas, pues permite incluir en sus proyectos además de los datos habituales, la curva de densidad de flujo magnético esperada.

Otra aplicación importante que puede tener el método es el cálculo de la capacidad entre conductores y a tierra de la línea propuesta.

7. Conclusiones

Según los resultados de las medidas realizadas “in situ”, se constata que el campo magnético producido por esta línea de 30 kV de doble circuito, está por debajo del límite de tolerabilidad establecido por la recomendación de la Unión Europea, 1999/519/CE.

La simulación a través de método de elementos finitos, da resultados aceptables y resulta una herramienta muy útil para la realización de estudios de campo magnético.

El método presentado en este trabajo permite realizar comparaciones entre los “mapas” de densidad de flujo magnético, generados por distintos tipos de configuraciones geométricas de los conductores de la línea, con o sin cambio de la secuencias de fase y/o desfase de las corrientes entre circuitos.

Se ha constatado que la configuración triángulo y horizontal ofrecen un mejor resultado que la configuración barril y vertical.

Con una correcta redistribución de las fases se consigue reducir de una forma importante el valor del campo. No obstante en el diseño de una línea han de considerarse otros factores tales como las capacidades entre conductores, las pérdidas por efecto corona, el costo de la línea, etc.

El método expuesto pueda utilizarse para determinar formulas de aplicación industrial, para calcular el valor del campo magnético “producido” para distintas configuraciones de líneas en función de la corriente y la secuencia de fases.

Referencias

- [1] W.T. Kaune and L.E. Zaffanella, “Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 7, no. 4, pp. 2082-2091, 1992.
- [2] R.G. Olsen, “Electromagnetic fields from power lines”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 138-143, 1993.
- [3] A.V. Manishev and B.D. Russell, “Measurement of Magnetic fields in the direct proximity of power line conductors”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1211-1216, 1995
- [4] C. Garrido, A.F. Otero and J. Cidrás, “Low-frequency magnetic fields from electrical appliances and power lines”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1310-1319, 2003.
- [5] P. Sarma Maruvada, A. Turgeon, D.L. Goulet and C. Cardinal, “An experimental of residential magnetic fields in the vicinity of transmission lines”, vol. 13, no. 4, pp. 1328-1334, 1998
- [6] A.R. Memari and W. Janischewskyj, “Mitigation of magnetic field near power lines”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1577-1586, 1996
- [7] V.S. Rashkes and R. Jordan, “Magnetic field reduction methods: efficiency and cost”, vol. 13, no. 2, pp. 552-559, 1998
- [8] “IEEE Standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC Power line”, IEEE Std 644-1994.
- [9] Varios, “Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements”, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 2127-2136, 1988.
- [10] P.P. Silvestre, R.L. Ferrari, “Elementos Finitos para Ingeniería Eléctrica”.
- [11] Recomendación del consejo Europeo sobre los límites de exposición del público a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz). 1999/519/CE
- [12] Campos eléctricos y magnéticos de 50hz. Análisis del estado actual de conocimientos” REE y UNESA, 2001.