

Estudio de la distribución e intensidad de los campos magnético y eléctrico entorno a líneas eléctricas de alta tensión. Particularización para líneas de 220 y 400 kV

J. J. Ugartemendia¹, J. A. Güemes², P. M. García¹
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad del País Vasco

¹ EUP, Plaza de Europa 1, 20018 Donostia – San Sebastián
Tel.: +34 943 017 232, Fax: +34 943 017 130, e-mail: juanjo.ugartemendia@ehu.es, pedromaria.garcia@ehu.es

² EUITI, Plaza de la Casilla, 3, 48012 Bilbao
Tel. + 34 946 014 363, Fax: 946 014 300, e-mail: joseantonio.guemes@ehu.es

Resumen. El objetivo de este trabajo es determinar la magnitud y distribución del campo magnético y eléctrico entorno a líneas aéreas de transporte de energía eléctrica de 220 y 400 kV. Estas líneas son las que van a producir un mayor nivel de este tipo de emisiones y las que mayor número de kilómetros instalados y previstos tienen para el caso del estado español. Se estudian configuraciones geométricas típicas con: a) diferentes disposiciones de los conductores, b) diferentes dimensiones de la distancia de separación entre vanos y longitud de los mismos y c) cambio de la secuencia de fase en una de las líneas para el caso de líneas con dos circuitos. El análisis se realiza utilizando el método de elementos finitos. Los resultados de las simulaciones dan unos niveles máximos para la densidad de campo magnético y campo eléctrico de unos $55 \mu\text{T}$ y 7.000 V/m , respectivamente, medidos a un metro de la superficie del suelo con una altura de vano de 8 m y configuración geométrica plana.

Palabras llave: Campos magnéticos, líneas aéreas de alta tensión, método de elementos finitos, radiación magnética.

1. Introducción

La creciente preocupación por los posibles efectos que los campos electromagnéticos pueden producir sobre la salud de los seres vivos ha sido avalada por numerosos estudios científicos en los últimos años [1], [2], por tanto, parece adecuado tener en cuenta este fenómeno a la hora de diseñar tendidos eléctricos aéreos de alta tensión. El Consejo de la Unión Europea 1999/5197/CE [3] cuantifica que para 50 Hz estos niveles de referencia, son para la intensidad del campo eléctrico (E) 5000 V/m , y para la densidad del flujo magnético (B) $100 \mu\text{T}$. La recomendación de la Unión Europea ha tenido cuenta el principio de precaución ya que todavía no se conoce el mecanismo por el cual la radiación magnética puede afectar a la salud de las personas y no se ha podido establecer una dosis de radiación magnética de baja frecuencia bajo la cual se pueda concluir que sus efectos son dañinos. Sin embargo, estos niveles de referencia han sido ratificados por multitud de organismos,

instituciones, informes científicos, médicos, etc. Entre ellos se pueden destacar: Asociación Internacional para la Protección Radiológica (IRPA), Instituto Nacional de Normativa de Estados Unidos (ANSI), Comisión Internacional para la Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) y Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC).

Dada la saturación actual de las líneas de transporte de alta tensión existentes, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio aprobó en mayo del 2008, el documento de planificación de los sectores de electricidad y gas 2008-2016 que tiene como finalidad garantizar la seguridad y la calidad del suministro energético. Este plan contempla un significativo programa de construcción de nuevas instalaciones eléctricas que permitirá dar respuesta al incremento de la demanda en los últimos años y se anticipará a las necesidades futuras.

Además de los posibles efectos sobre la salud, las líneas de alta tensión, dada la alta intensidad de los campos magnéticos que generan, pueden producir efectos no deseados al inducir tensiones y corrientes en otros elementos conductores próximos [4], [5] como tuberías de gas o agua, líneas de telefonía o datos, alambradas, etc.

En los últimos años se han publicado distintos trabajos en los que se estudia la intensidad y distribución del campo electromagnético producido por líneas de transporte de energía eléctrica, construyendo para ello modelos basados en la resolución de las ecuaciones de Maxwell mediante diferentes técnicas: a) resolución simplificada de las ecuaciones diferenciales, asumiendo un comportamiento magnetostático y electrostático [6], b) aplicación de un método de diferencias finitas (MDF) [7] y c) resolución mediante el MEF [8].

La modelización y simulación del comportamiento de las líneas mediante el método de elementos finitos (MEF) es

una herramienta muy a tener en cuenta a la hora de prever los niveles de radiación de baja frecuencia que se pueden alcanzar entorno a estas nuevas líneas y son muchos los trabajos de investigación realizados utilizando MEF [9]-[11].

Los modelos desarrollados en este trabajo se basan en la aplicación de las leyes de Maxwell [12] mediante el MEF en 2D. El estudio realizado se ha basado en la teoría cuasi-estática, perfectamente asimilable para la frecuencia de 50 Hz [13].

El objetivo del presente trabajo es calcular la magnitud y distribución del campo magnético y eléctrico en torno a líneas aéreas de transporte de alta tensión, realizando para ello simulaciones basadas en el MEF. El análisis se centra en el estudio de las líneas de alta tensión de 220 y 400 kV.

2. Modelo

Los modelos y la resolución se han realizado mediante el paquete informático FEMM [14]. Esto ha permitido calcular tanto la distribución espacial como la intensidad del campo magnético y eléctrico en torno a diferentes configuraciones espaciales de líneas aéreas de 220 y 400 kV.

A. Contrastación MEF

Para la validación del modelo empleado para el análisis del campo magnético, se han comparado los resultados obtenidos en la medida de campo [15] en una línea de 30 kV (doble circuito, 50 A, configuración tipo *bandera*) con los obtenidos con el modelo EF desarrollado para una línea de idénticas características. Los resultados obtenidos mediante el modelo realizado, para la distribución de la densidad de flujo magnético, medidos a 1 m del nivel del suelo, se muestran en Fig. 1.

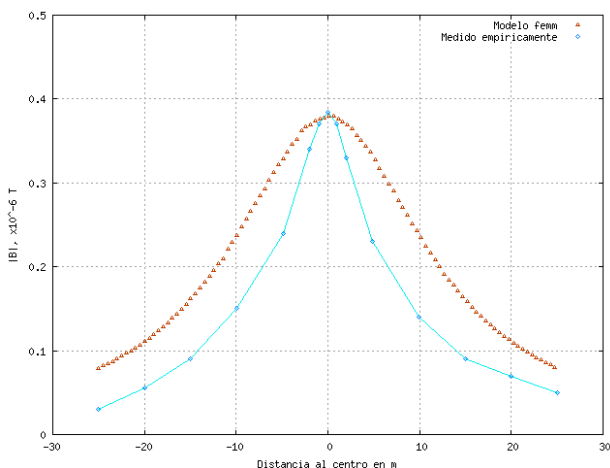


Fig. 1. Distribución de la densidad de flujo magnético, línea de 30 kV

Para la contrastación del modelo electrostático, y dada la ausencia en este caso de medidas experimentales, se han comparado los resultados obtenidos del MEF con lo

obtenido del cálculo teórico a través de la aplicación de la ley de Gauss para un sencillo caso de línea monofásica. En este caso, la diferencia máxima obtenida por ambos métodos no superó el 4 %.

B. Modelos EF

Los modelos utilizados para el análisis del campo magnético y eléctrico producido por las líneas son similares. El modelo para el análisis del campo magnético, basado en el MEF, incluye los conductores que forman las distintas configuraciones de línea analizadas y el aire que los rodea. La zona de estudio se limita en todos los casos a un área de sección circular de 60 m de radio, con centro en el centro geométrico de los circuitos. En Fig. 2 se muestra el caso particular de una línea con dos circuitos en disposición bandera. La condición de contorno considerada es asintótica [16].

En el modelo para el análisis del campo eléctrico además de las condiciones asintóticas para el perímetro de la circunferencia hay que considerar una condición de contorno de potencial cero para la línea de tierra. Las propiedades magnetoeléctricas consideradas se muestran en Tabla I.

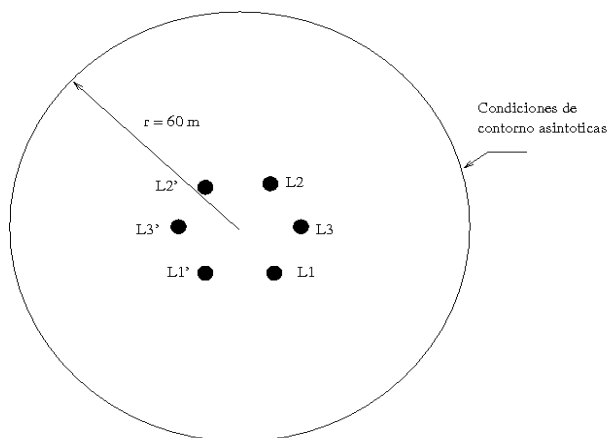


Fig. 2: Área modelizada mediante MEF.

Tabla I: Propiedades electromagnéticas consideradas.

	Permeabilidad magnética (H/m)	Permitividad eléctrica (F/m) *
Aire, tierra, y conductores	$4\pi \times 10^{-4}$	$8,85 \times 10^{-7}$

(*): Solamente para el aire.

C. Aplicación de los modelos a líneas trifásicas de 220 y 400 kV

Se han considerado las geometrías habituales para este tipo de líneas [17] con haces simplex y dúplex (Fig. 3), y los conductores aluminio-acero propuestos por la norma IEC 61 089 [18].

Los conductores elegidos son: a) 400-A/S-45/7, equivalente a una sección de 400 mm² de aluminio homogéneo, $I_{m\acute{a}x} = 790$ A, b) 800-A/S-84/7, equivalente a

una sección de 800 mm² de aluminio homogéneo, $I_{\text{máx}} = 1070$ A.

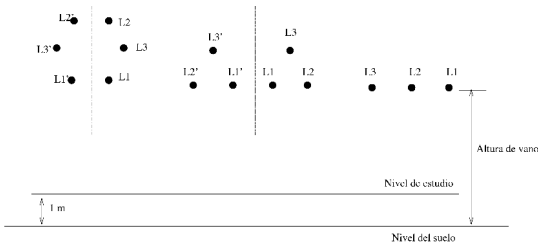


Fig. 3. Configuraciones geométricas estudiadas (doble circuito bandera, doble circuito triángulo, y plana)

Los análisis se realizan para las configuraciones y conductores previamente indicados en líneas con potencias de referencia 600 y 1200 MVA.

3. Resultados obtenidos

Mediante los modelos desarrollados se puede calcular tanto la distribución como la magnitud del campo magnético y electrostático (ver Fig. 4) entorno a las líneas. El estudio se centrará sobre todo en el cálculo de dichas magnitudes en plano horizontal situado 1 m por encima del nivel del terreno.

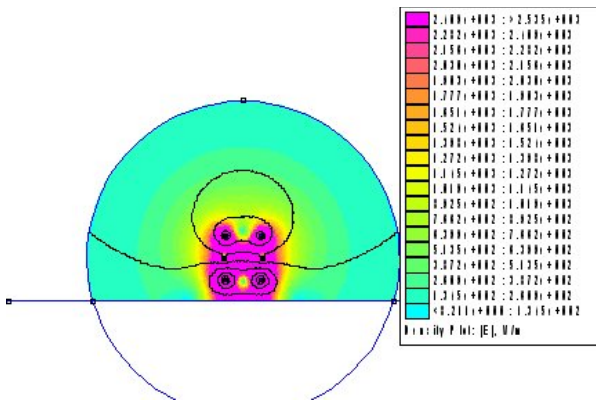


Fig. 4. Distribución de la intensidad del campo eléctrico y líneas equipotenciales en una línea aérea de doble circuito con disposición bandera.

A. Distribución de la densidad de flujo magnético en función de la configuración de la línea

Inicialmente se ha supuesto una altura del vano con respecto al suelo de 8 m, que es aproximadamente la mínima altura que prevé el RLAT [19] para líneas de 400 kV, y la separación entre conductores que se muestra en Fig. 5. Los conductores considerados han sido 400-A/S-45/7, $I_{\text{máx}} = 790$ A, simplex y dúplex.

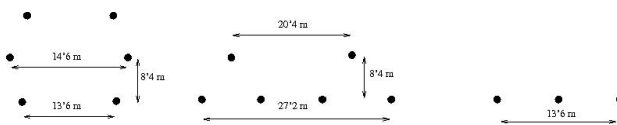


Fig. 5. Distancias entre conductores para las distintas configuraciones (doble circuito bandera, doble circuito triángulo, y plana).

Los niveles de B obtenidos por cada una de las configuraciones para la misma capacidad de transmisión de potencia ($\sqrt{3} \cdot 220 \text{ kV} \cdot (790 \cdot 2) \text{ A} \approx 600 \text{ MVA}$) se muestran en Fig. 6. De las 3 configuraciones mostradas en Fig. 3 se observa que el mayor nivel de inducción magnética (B), corresponde a la configuración plana.

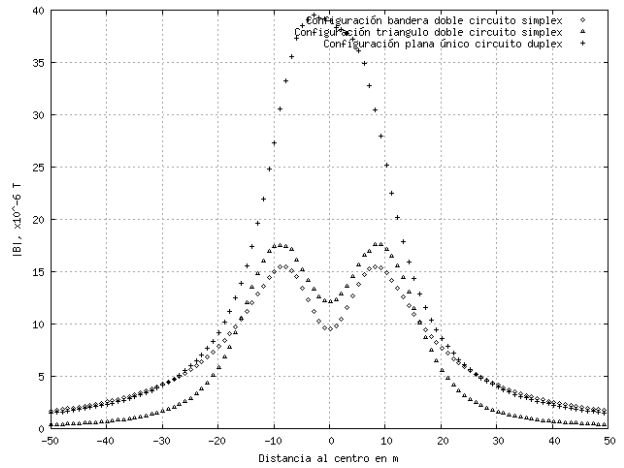


Fig. 6. Densidad de flujo magnético, $I = 790$ A.

B. Distribución de la densidad de flujo magnético en función de la altura del vano

En este apartado se analiza el efecto de aumentar la altura del vano. Las potencias consideradas han sido aproximadamente el doble de las del apartado anterior, doble circuito, 220 kV, configuración bandera, dúplex (1), y configuración plana, 400 kV, único circuito, dúplex (2).

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ kV} \cdot (790 \cdot 4) \text{ A} \approx 1200 \text{ MVA} \quad (1)$$

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV} \cdot (1070 \cdot 2) \text{ A} \approx 1480 \text{ MVA} \quad (2)$$

La reducción del nivel de radiación magnética con un incremento del 100% en la altura es aproximadamente del 50% en la línea de 220 kV y prácticamente del 70% en la línea de 400 kV (ver Fig. 7).

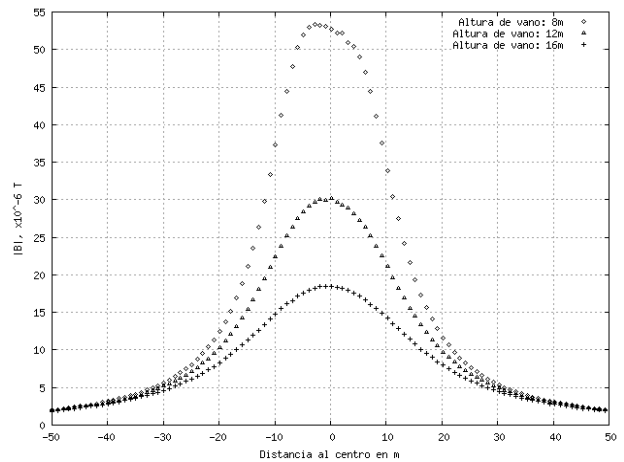


Fig. 7. Densidad de flujo magnético en función de la altura del vano, línea de 400 kV.

C. Distribución de la densidad de flujo magnético en función de la longitud de las crucetas

Partiendo de las condiciones iniciales: altura de vano 8 m y potencia 600 MVA en Tabla II se muestran las longitudes de cruceta consideradas y los valores de B obtenidos bajo la línea.

Así mismo, se ha comprobado que un aumento de la distancia vertical que separa las crucetas (configuración bandera y triángulo) produce un aumento del nivel de B , la disminución de dicha distancia no es recomendable ya que los conductores tienen que respetar unas distancias mínimas entre sí [19].

Tabla II: Resumen de la variación de B bajo diferentes configuraciones de línea de 220 kV que se produce con el aumento de la longitud de las crucetas.

	Bandera			Triángulo			Plana		
Long. crucetas (m)	13,6	15	17	20,4	22,5	25,5	13,6	15	17
	14,6	16	18	27,2	30	34			
B (μT)	15,4	14,9	14,5	17,6	18,2	19	39,5	40	40

D. Distribución de la densidad de flujo magnético en función de la secuencia de fases

Para las configuraciones de doble circuito, bandera y triángulo, se ha procedido a cambiar las posiciones relativas de uno de los circuitos con respecto a la configuración inicial (ver Fig. 8).

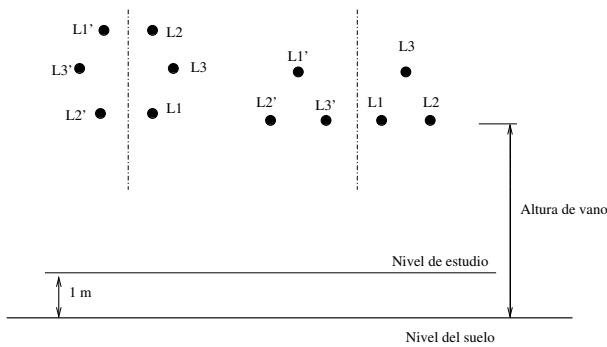


Fig. 8. Configuración de las líneas con la secuencia de fases cambiada.

Los resultados para línea con un vano de 8 m muestran que introducir el cambio de secuencia apenas tiene influencia en el nivel de B . A continuación se repitió el estudio con un vano mayor, 16 m. En Fig. 9 se puede observar la reducción obtenida para la disposición triangular. Para la disposición bandera, la reducción obtenida fue algo inferior.

De lo anterior, se puede concluir que para que un cambio de secuencias tenga un efecto positivo, en lo que a la reducción de B se refiere, la altura del vano debe de ser elevada, de lo contrario no se aprecia mejoría.

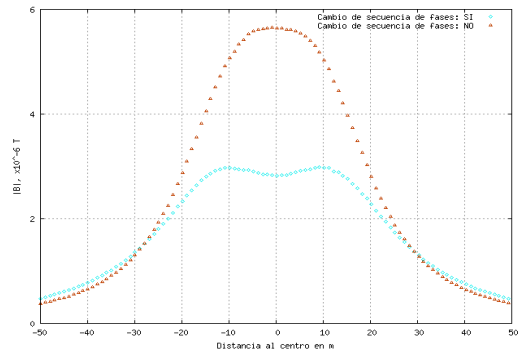


Fig. 9. Densidad de flujo magnético en configuración doble circuito, triángulo, simplex, con y sin cambio de secuencia de fases.

E. Distribución de la intensidad del campo eléctrico en función de la configuración de la línea

Al igual que para el estudio de los campos magnéticos, inicialmente se ha supuesto una altura del vano mínima con respecto al suelo de 8 m, con una disposición inicial como la mostrada en Figs. 3 y 5. Se ha generado un modelo para el estudio de la distribución e intensidad del campo electrostático (E) entorno a las líneas y se han simulado todas las configuraciones con los niveles de tensión de 220 y 400 kV, conductores tipo 400-A/S-45/7, $I_{m\acute{a}x} = 790$ A, simplex y dúplex.

Las potencias respectivas transportadas por las líneas de 220 y 400 kV modelizadas son:

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ kV} \cdot (790 \cdot 2) \text{ A} \approx 600 \text{ MVA} \quad (3)$$

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV} \cdot (790 \cdot 2) \text{ A} \approx 1100 \text{ MVA} \quad (4)$$

Los niveles de E obtenidos por cada una de las configuraciones para el nivel de tensión de 220 kV son los mostrados en Fig. 10. Para el caso de las líneas de 400 kV el incremento de la intensidad del campo es prácticamente proporcional al de tensión.

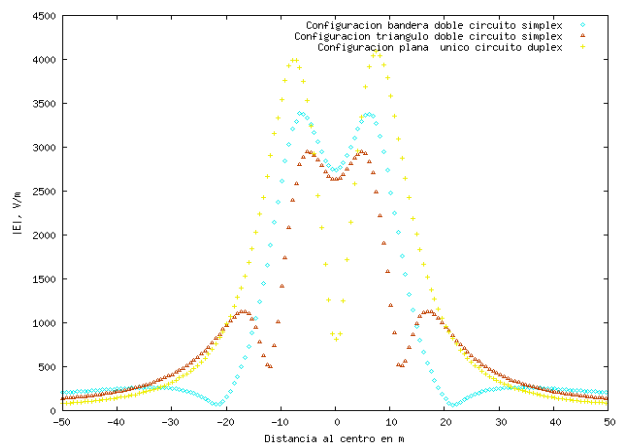


Fig. 10. Intensidad del campo eléctrico en función de la distancia para una línea de 220 kV.

Al igual que ocurría en el estudio de la intensidad del campo magnético, la configuración menos favorable

desde el punto de vista de la “contaminación” electrostática, es la configuración plana.

Se analiza a continuación una segunda forma de incrementar la potencia a transportar -manteniendo la tensión constante- que es incrementar el número de conductores por fase. En Fig. 11 se muestra la distribución del campo obtenida. El nivel de E aumenta en un 40 % aproximadamente. Un resultado semejante se tiene en el caso de las otras configuraciones geométricas. Una tercera forma de incrementar la potencia transportada es aumentar la sección de los conductores, manteniendo constante tanto tensión como el número de conductores por haz. Este cambio de sección apenas supone modificación alguna de la magnitud del campo eléctrico, por tanto, desde este punto de vista sería la solución óptima.

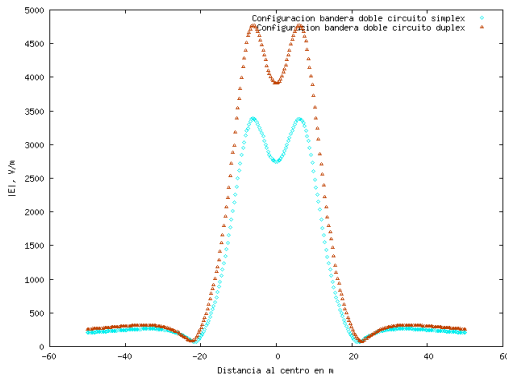


Fig. 11. Niveles de E para una línea de 220 kV de doble circuito, configuración bandera, conductores simplex y dúplex.

F. Distribución de la intensidad del campo eléctrico en función de la altura del vano

Se considerarán la configuración bandera -220 kV- y la configuración plana -400 kV-, ambas con un haz dúplex y potencias nominales dadas por las expresiones (5) y (6) respectivamente.

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ kV} \cdot (790 \cdot 4) \text{ A} \approx 1200 \text{ MVA} \quad (5)$$

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ kV} \cdot (1070 \cdot 2) \text{ A} \approx 1480 \text{ MVA} \quad (6)$$

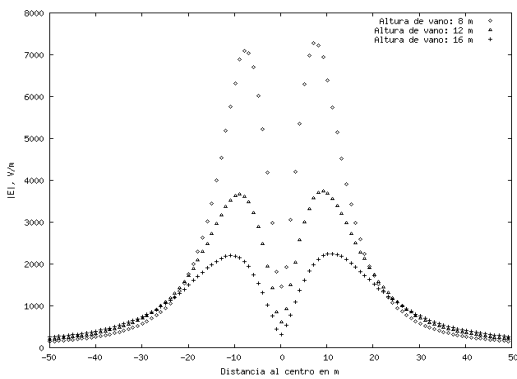


Fig. 12. Nivel de E bajo una línea de 400 kV de único circuito para diferentes alturas de vano, configuración plana, conductor 800-A/S-84/7, haces dúplex.

En ambos casos se observa una disminución muy considerable de E con la altura, un incremento del 100% de la altura supone en el primer caso una reducción del 50% y en el 2º caso se llega a alcanzar una reducción del 70% (Fig. 12).

G. Distribución de la intensidad del campo eléctrico en función de la longitud de las crucetas

Se va a estudiar ahora el efecto que tiene aumentar la longitud de las crucetas sobre el nivel de E entorno a la línea. La altura de vano considerada es de 8 m, la capacidad de transporte 600 MVA (3). En Tabla III se muestran los resultados obtenidos.

Tabla III: Resumen de la variación de E bajo diferentes configuraciones de línea de 220 kV que se produce con el aumento de la longitud de las crucetas.

	Bandera			Triángulo			Plana		
Long. crucetas (m)	13,6 14,6	15 16	17 18	20,4 27,2	22,5 30	25,5 34	13,6	15	17
(E) (kV/m)	3,4	3,3	3,15	2,95	3	3	4	4,1	4,2

Así mismo, se ha comprobado que un aumento de la distancia que separa las crucetas (configuración bandera y triángulo) produce un aumento del nivel de intensidad del campo, mayor en el caso de la disposición bandera.

H. Distribución de la intensidad del campo eléctrico en función de las secuencias de fase

Se ha procedido a cambiar la posición de los conductores en uno de los circuitos para las configuraciones bandera y triángulo (Fig. 8). El estudio se ha hecho para una altura de vano de 8 m, capacidad de transporte 600 MVA. En ambos casos se consigue una reducción de la “contaminación” electrostática. En Fig. 13 puede verse la reducción obtenida para la configuración triángulo.

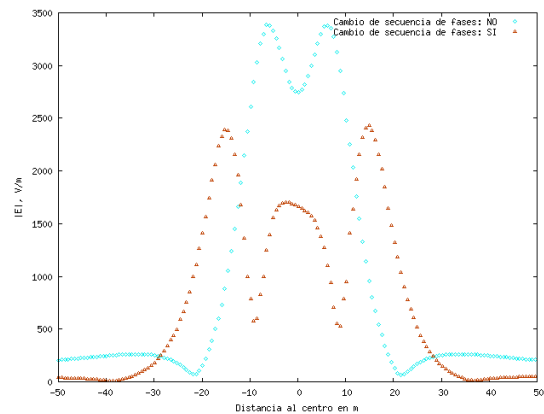


Fig. 13. Comparación del nivel de E obtenido con 2 configuraciones triángulo, con y sin cambio de secuencia de fases, 2 circuitos en paralelo simplex, 220 kV.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la influencia que tienen distintos factores sobre la distribución e intensidad de los campos eléctrico y magnético para líneas de 220 y 400 kV.

La configuración plana de los circuitos es la que da lugar a una mayor intensidad de ambos campos. En la densidad de flujo magnético es donde se aprecia una mayor diferencia comparativamente con las otras dos geometrías analizadas -un 100% superior.

El incrementar la altura de los vanos, es una medida útil para reducir los niveles de radiación a nivel del suelo. La mayor reducción con el incremento de la altura se consigue con la configuración plana, siendo de un 70%, para ambos tipos de campos, cuando la altura del vano es incrementada en un 100%.

La longitud de las crucetas y la distancia vertical de separación entre las mismas, tiene poca influencia en la distribución de B y E .

El cambio de la secuencia de fases en las configuraciones bandera y triángulo con doble circuito, tiene muy poca influencia en la reducción del campo magnético por el contrario en el campo eléctrico se observa una reducción del 30%.

Los niveles máximos obtenidos para B y E han sido de unos $55 \mu\text{T}$ y 7.000 V/m respectivamente -a 1 m del nivel del suelo- para la configuración geométrica plana. Las otras 2 disposiciones geométricas estudiadas casi siempre han dado niveles inferiores de "contaminación". Estos niveles son dignos de tener en cuenta de acuerdo con los criterios de convergencia europeos. Sin embargo, estos valores se reducen aproximadamente a un 5% de los máximos obtenidos, cuando se produce un alejamiento de 30 m. A pesar de ello, para el caso de líneas de nueva construcción, y por un principio de precaución, deberían tomarse en consideración los aspectos de diseño y constructivos analizados en este trabajo y las distancias mínimas de este tipo de líneas respecto de zonas habitadas, si se desea que los niveles de B y E sean despreciables.

Referencias

- [1] M. A. Stuchly, and S. Zhao, "Magnetic Field-Induced Currents in the Human Body in Proximity of Power Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996.
- [2] T. Tynes, and T. Haldorsen, "Residential and occupational exposure to 50 Hz magnetic fields and hematological cancers in Norway", Cancer Causes and Control, Vol. 14, pp. 715–720, 2003.
- [3] Recomendación del consejo Europeo sobre los límites de exposición del público a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz), 1999/519/CE.
- [4] M. Frazier, H. Robertson and J. Dunlap, "Transmission line, railroad and pipeline common corridor study", IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-1, No. 3, pp. 294–300, 1986.
- [5] I.G. Damousis, K.J. Satsios, D.P. Labridis, and P.S. Dokopoulos, "A fuzzy logic system for calculation of the interference of overhead transmission lines on buried pipelines", Electric Power Systems Research, Vol. 57, pp. 105–113, 2001.
- [6] 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. 1313-1319, 2003.
- [7] M. A. Elhribawy, L. S. Jennings, and W. W. L. Keerthipala, "Variable step length finite difference method for calculation of the 3-phase electromagnetic field in the long conductor approach", International Journal of Electronics, Vol. 92, No. 6, pp. 357–373, 2005.
- [8] K. J. Satsios, D. P. Labridis, and P. S. Dokopoulos, "Finite element computation of field and eddy currents of a system consisting of a power transmission line above conductors buried in nonhomogeneous earth", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, pp. 876–882, 1998.
- [9] I. Hanafy, "Effect of tower displacement of parallel transmission lines on the magnetic field distribution", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 23, No. 4, pp. 1705-1712, 2008.
- [10] W. Zhang, "Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, pp. 2127–2136, 1988.
- [11] T. Vinh, T. L. Jones, and C. H. Shih, "Magnetic fields near overhead distribution lines—measurements and estimating technique," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 6, pp. 912–921, 1991.
- [12] J. Jin, "The Finite Element Method in Electromagnetics", Wiley-IEEE Press, 2nd edition, 1993.
- [13] R. G. Olsen, and P. S. Wong, "Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp. 2046-2055, 1992.
- [14] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics Version 4.0. User's Manual", 2006.
- [15] R. Moreno, J.A. Güemes, and I. Pico, "Análisis del Campo Magnético en una línea de AT", in CD-ROM 9CHLIE, 2007.
- [16] Q. Chen and A. Konrad, "A review of finite element open boundary techniques for static and quasistatic electromagnetic field problems", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 33, No. 1, pp. 663-676, 1997.
- [17] L. M. Checa, "Líneas de Transporte de Energía Eléctrica", Ed. Marcombo Boixerau, 1988.
- [18] Norma Iberdrola 54.63.01, "Conductores desnudos de aluminio-acero para líneas eléctricas aéreas de alta tensión", 1999.
- [19] Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09, RD223/2008 de 15 de febrero.