

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

Vol. 16 (1)

Ene/Jul 2006

CONTENIDO

Artículos

1. La compensación serie controlada y el relé de impedancia..... 15-26
Araya, Eddie.
2. Estudio de los factores que afectan la hidrólisis enzimática y el proceso fermentativo para la producción de alcohol a partir de papa (*Solanum tuberosum*) 27-37
Molina, Manuel; González, Jorge.
3. Reducción de la radiación electromagnética en las líneas de alta tensión 39-49
Araya, Eddie.
4. Gravity signatures of the Gibraltar Strait 51-58
Bakkali, Saad; Amrani, Mahacine.
5. Influencia de la distancia epicentral sobre los factores de reducción por ductilidad 59-79
Vielma, Juan Carlos; Lobo, William; Rivero, Pedro.
6. Diseño no lineal del AVR de un generador sincrónico 81-93
Araya, Eddie.
7. Despacho óptimo de MVAR en sistemas de potencia 95-104
Acuña, Marco; Araya, Eddie.
8. El concepto de calidad: un marco conceptual 105-119
Herrera, Rodolfo.

Nota técnica

9. Aspectos teóricos y aplicaciones de la operación unitaria de cristalización 121-131
Aguilar, Noé; Román, Carlos.

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 133-138



EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

<http://www.revistaingenieria.inii.ucr.ac.cr>
www.ucr.ac.cr
ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

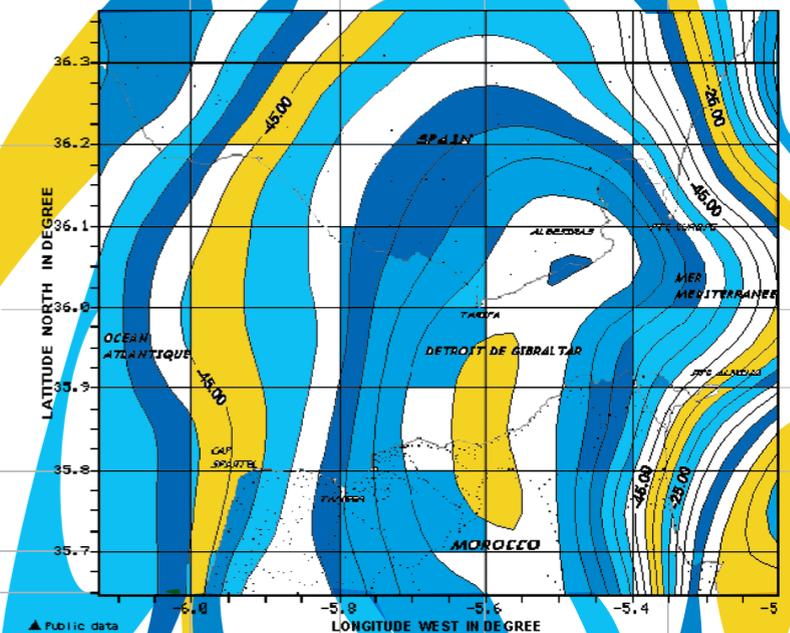
ENERO/JULIO 2006 - VOLUMEN 16 - Número (1)

Número (1)

Enero / Julio 2006

Volumen 16

REVISTA INGENIERÍA



REDUCCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

Eddie A. Araya Padilla

Resumen

Esta publicación presenta cómo el diseño de las líneas de transmisión determina el perfil del campo eléctrico y magnético generado. Este perfil se calcula a través de uso de las ecuaciones de Maxwell, y depende de diversos factores geométricos y operativos de la línea, de modo que una adecuada distribución física de la configuración de la torre, puede disminuir la intensidad de la radiación generada dentro y en el borde de la servidumbre de la línea.

Mediante el análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño, se muestra cómo se distribuyen satisfactoriamente los campos eléctricos y magnéticos generados.

Palabras clave: líneas de transmisión compacta, campos eléctricos, campos magnéticos.

Abstracts

This paper introduces like the design of the transmission lines, determine the profile of the electric and magnetic generated field. This profile is calculated through use of the equations of Maxwell, and depend rely on diverse geometrics and operative factors of the line, so that an adequate physical distribution of the tower configuration, could diminish the intensity of the radiation generated inside of and in the border of right of way of the line.

By means of the analysis of sensibility of the parameters of design, pattern like the electric and magnetic generated fields are distributed satisfactorily.

Key words: compact transmission lines, electric fields, magnetic fields.

Recibido: 25 de mayo del 2005 • **Aceptado:** 03 de marzo del 2006

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los sistemas de potencia tienen sus líneas de alta tensión limitadas por factores de estabilidad en régimen permanente y transitorio; factores económicos en mercados eléctricos de libre competencia, y factores ecológicos definidos por normas ambientales.

Este último aspecto afecta las etapas de planificación, diseño y operación de las líneas de alta tensión, porque imponen fuertes restricciones para garantizar la salud pública. De tal manera que, la construcción de nuevas líneas de transmisión se encuentran limitadas no sólo por el terreno que se debe expropiar, sino también por la producción de los campos electromagnéticos que se generan a baja frecuencia.

Ante esta situación, en Costa Rica se cuenta con el Reglamento General para el Desarrollo y Operación de las Obras de Transmisión de Electricidad, relacionado con campos electromagnéticos y otros aspectos ambientales (Instituto Costarricense de Electricidad, 1998), del cual es importante señalar dos artículos:

Artículo 1. Campo Magnético

“En general, el diseño de las obras se debe efectuar de tal manera que la magnitud del campo magnético para efectos de exposición permanente al público, no exceda 150 miligauss (15 microteslas) en el borde de la servidumbre, a un metro de altura en condiciones normales de operación. Este valor estará sujeto a modificación de acuerdo con el avance de las investigaciones científicas”.

Artículo 2. Campo Eléctrico

“En general, el diseño de las obras se debe efectuar de tal manera que la magnitud del campo eléctrico no exceda los 8000 voltios/metro bajo la línea y 2000 voltios/metro en el borde de las servidumbres, en condiciones normales de operación. Este valor estará sujeto a modificación de acuerdo con el avance de las investigaciones científicas”.

En el ámbito internacional, el Cuadro 1 muestra las normas presentes en algunos países u organismos, sobre la exposición a campos eléctricos y magnéticos.

Cuadro 1. Normas internacionales de exposición a campos eléctricos y magnéticos.

Organismo, lugar o país	Campo eléctrico (kV/m)	Campo magnético (mG)
CENELEC	10	5300
IRPA	5	1000
NRPB-UK	10	13 300
ICNIRP	4,2	840
Alemania	5	1000
Costa Rica	2* 8**	150*
Florida	3,4	150*
Montana	1	-
Nueva Jersey	3	-
Nueva York	1.6	200

* En el borde de la servidumbre

** Bajo la línea

CENELEC: Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

IRPA: International Radiation Protection Association

NRPB-UK: UK National Radiation Protection Board

ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

Florida: Normas Estatales

Alemania: Normas Federales,

Costa Rica: Reglamento Estatal, La Gaceta, N° 248, alcance N° 95-A, 1998.)

Fuente: (ICE, 1998), (NIEHS, 2005) y (WHO, 2005).

En vista de lo anterior, se hace necesario evaluar la magnitud de los campos electromagnéticos que

se generan, tomando en cuenta tanto la geometría de la línea de transmisión, como sus condiciones operativas.

2. CONDICIONES OPERATIVAS Y PARÁMETROS DE LA LÍNEA

Las condiciones de operación normal varían según la hora del día y la época del año, entre otros factores. Bajo estos escenarios, se consideran en este estudio tres condiciones de operación, cuyas potencias a transportar son:

- 160 MVA como condición normal de operación.
- 205 MVA como condición normal de operación (debido al crecimiento del sistema).
- 350 MVA en el caso de que se presente alguna contingencia, como carga máxima de emergencia.

En el caso de los parámetros de la línea se consideraron los siguientes factores (Electric Power Research Institute, 1987):

- La geometría de la línea
- Número de circuitos
- Altura de los conductores
- Diámetro y separación de los conductores activos
- Diámetro y posición del hilo guarda
- Tensión de operación
- Potencia transportada
- Longitud de la cadena de aisladores
- Resistencia de puesta a tierra

Con esta información se procedió a calcular el perfil de los campos eléctricos y magnéticos, para una línea apoyada sobre torres similares

a la mostrada en la Figura 1 (Electric Power Research Institute, 1987), tomando en cuenta las siguientes variaciones de operación y altura de los conductores de fase e hilos guarda.

A. Tres potencias a transportar: 160 MVA, 205 MVA y 350 MVA.

B. Uno o dos circuitos en operación. En el caso de un circuito, se asume una contingencia quedando ese circuito sobrecargado. En el caso de dos circuitos, se asume que las fases de los seis conductores, eléctricamente pueden operar en forma simétrica (RST-RST), o en forma asimétrica (RST-TSR).

C. Se consideró que la distancia H , entre el conductor más cercano al suelo y el terreno, tiene los valores 14,37 m, 12,87 m, 11,37 m, 9,87 m, 8,37 m y 6,87 m.

Con los datos anteriores se obtuvieron dieciocho curvas del perfil de campo eléctrico y cincuenta y cuatro curvas del perfil de campo magnético, los cuales fueron agrupados en doce gráficos. El perfil de los campos electromagnéticos, se determinó en un plano normal a los conductores, cuya magnitud varía hacia los lados de la torre, con respecto al centro de la estructura. Esta distancia se indica con la letra D en los cálculos realizados.

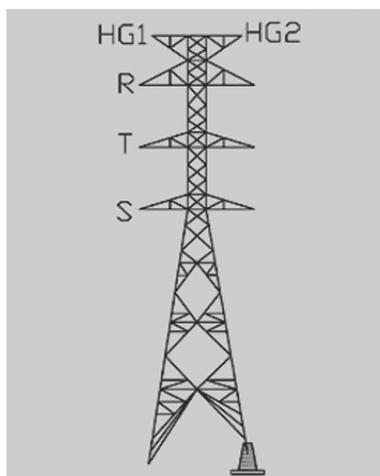


Figura 1. Torre típica de una línea de transmisión
Fuente: (Electric Power Research Institute, 1987)

3. CÁLCULO DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para calcular la magnitud de los campos electromagnéticos, se desarrolló un programa digital, a partir del modelo matemático indicado en la referencia (Electric Power Research Institute, 19871). Con este software se obtuvo los siguientes resultados. En la Figura 2 se muestra el perfil del campo eléctrico, cuando la línea transporta una potencia de 160 MVA, 205 MVA

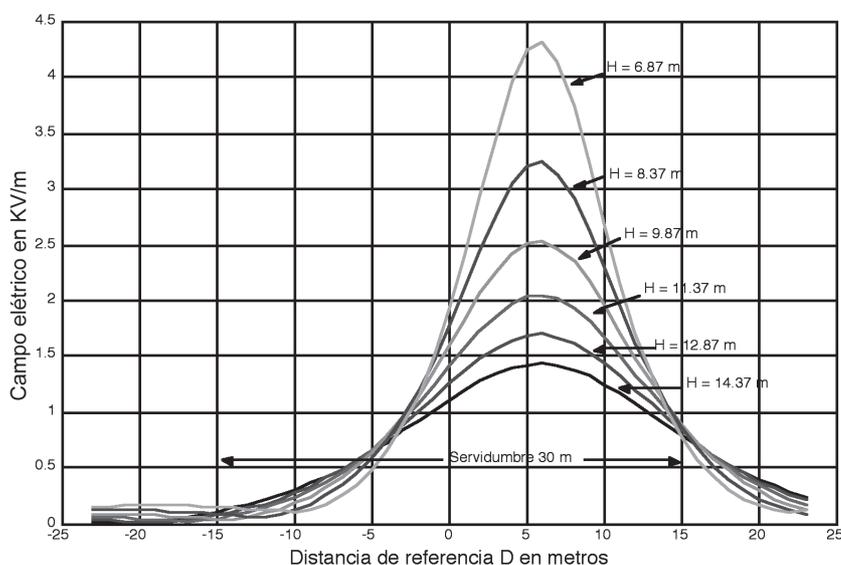


Figura 2. Perfil del campo eléctrico con un circuito energizado.

Fuente: (El autor)

y 350 MVA, respectivamente, con un circuito en operación. Esta figura muestra que en los tres casos de análisis, el campo eléctrico no depende de la condición operativa, si no solamente del nivel de tensión de la línea, el cual es de 230 kV.

Para evaluar el efecto de la ubicación de los conductores activos e hilos guarda con respecto a la altura, se efectuó un análisis de sensibilidad para simular las variaciones de la catenaria en los conductores, los cambios topográficos del terreno a lo largo de la línea y en menor medida, la dilatación de los conductores por cambios térmicos. En este caso, se pudo establecer en qué forma la magnitud del campo eléctrico varía con respecto a la altura de los conductores.

Además, la Figura 2 muestra, cómo el campo eléctrico presenta una distribución asimétrica con respecto al centro de la torre, ubicada en la posición $D = 0,0$ m.

De estos cálculos se demuestra que el campo eléctrico es inferior a 2 kV/m en el borde de la servidumbre y a 8 kV/m dentro de la servidumbre.

En las Figuras 3, 4 y 5 se muestran las distribuciones espaciales del campo magnético, cuando la línea transporta una potencia de 160

MVA, 205 MVA y 350 MVA, respectivamente, con un circuito en operación.

Una vez más, se evalúa el efecto de la ubicación de los conductores activos e hilos guarda con respecto a la altura. En este caso, se pudo establecer en qué forma la magnitud del campo magnético varía con respecto a la altura de los conductores. A medida que la altura aumenta, su distribución se hace más plana.

Al comparar las Figuras 3, 4 y 5, se observa cómo la magnitud del campo magnético se incrementa con la potencia transportada, cuyo valor en el borde de la servidumbre es de $15 \cdot 10^{-7}$ T (150 mG).

En la Figura 6 se muestra el perfil del campo eléctrico, cuando la línea transporta una potencia de 160 MVA, 205 MVA y 350 MVA, respectivamente, con dos circuitos simétricos (RST-RST) en operación.

De nuevo se muestra que en los tres casos, el campo eléctrico no depende de la condición operativa, si no solamente del nivel de tensión de la línea, el cual es de 230 kV.

Las variaciones de la catenaria en los conductores, los cambios topográficos del

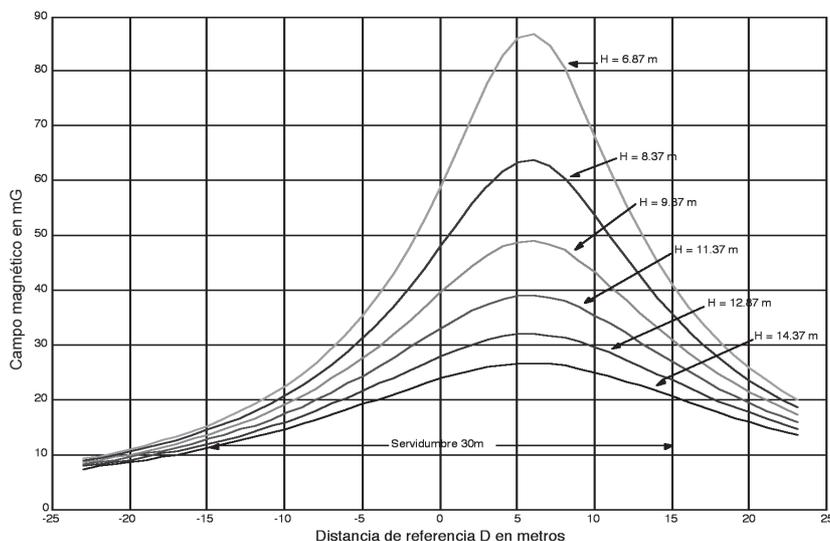


Figura 3. Perfil del campo magnético para un circuito y 160 MVA.

Fuente: (El autor).

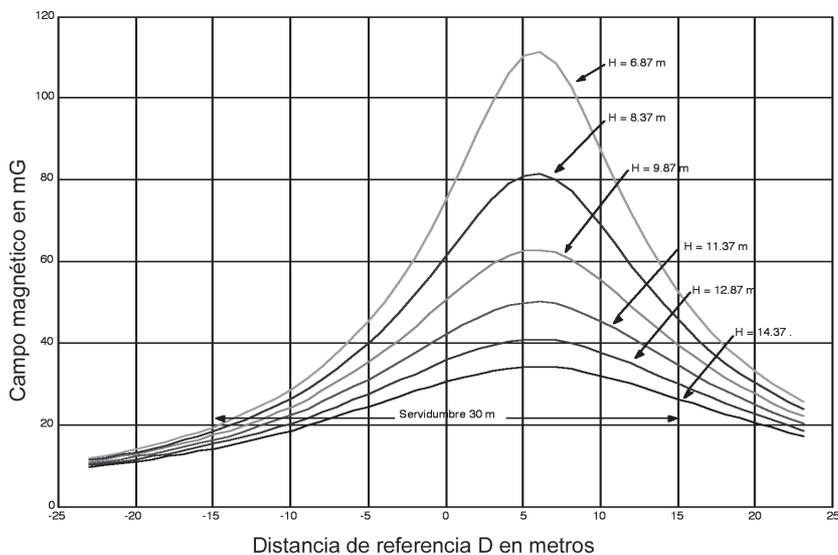


Figura 4. Perfil del campo magnético para un circuito y 205 MVA.

Fuente: (El autor).

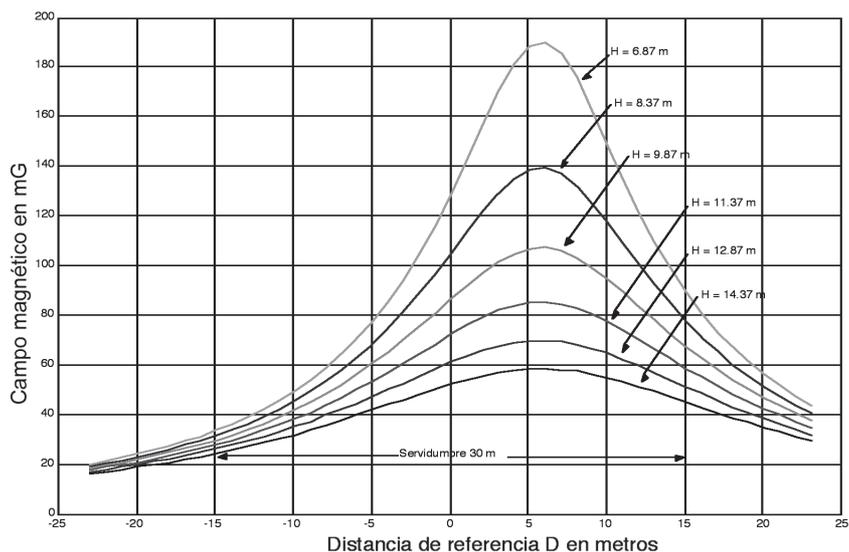


Figura 5. Perfil del campo magnético para un circuito y 350 MVA.

Fuente: (El autor).

terreno a lo largo de la línea y en mucha menor medida, la dilatación de los conductores por cambios térmicos, muestran cómo la magnitud del campo eléctrico varía con respecto a la altura de los conductores.

El campo eléctrico presenta una distribución simétrica con respecto al centro de la torre, ubicada en la posición $D=0,0\text{ m}$. Esta distribución

se debe a las líneas equipotenciales de los conductores activos, se encuentran desplazadas hacia el sitio donde están los conductores.

Se observa que el perfil del campo eléctrico dentro de la servidumbre es relativamente uniforme, y para una altura $H = 6,87\text{ m}$ se presenta una magnitud más pronunciada exactamente debajo de los conductores activos. De estos cálculos se

demuestra que el campo eléctrico es inferior a 2 kV/m en el borde de la servidumbre y a 8 kV/m dentro de la servidumbre.

En las Figuras 7, 8 y 9 se muestran las distribuciones espaciales del campo magnético, cuando la línea transporta una potencia de 160 MVA, 205 MVA y 350 MVA, respectivamente, con dos circuitos simétricos en operación.

El campo magnético presenta una distribución simétrica con respecto al centro de la torre. Dentro de la servidumbre, el mínimo valor se da en el borde. A partir de esta posición, la magnitud se incrementa, hasta su valor máximo en el sitio donde se ubican los conductores activos, es decir, en $D = \pm 5,75$ m. Después de esa posición, la magnitud del campo magnético disminuye exponencialmente. De estos cálculos

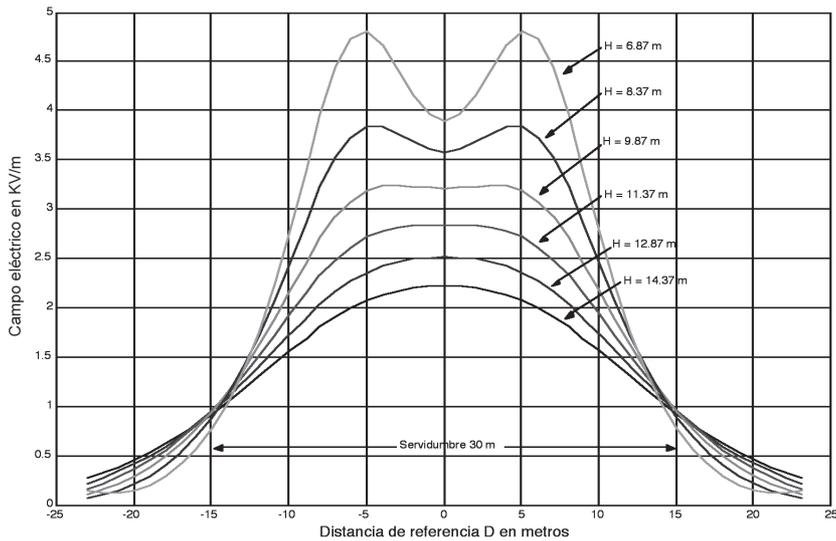


Figura 6. Perfil del campo eléctrico con dos circuitos energizados.
Fuente: (El autor).

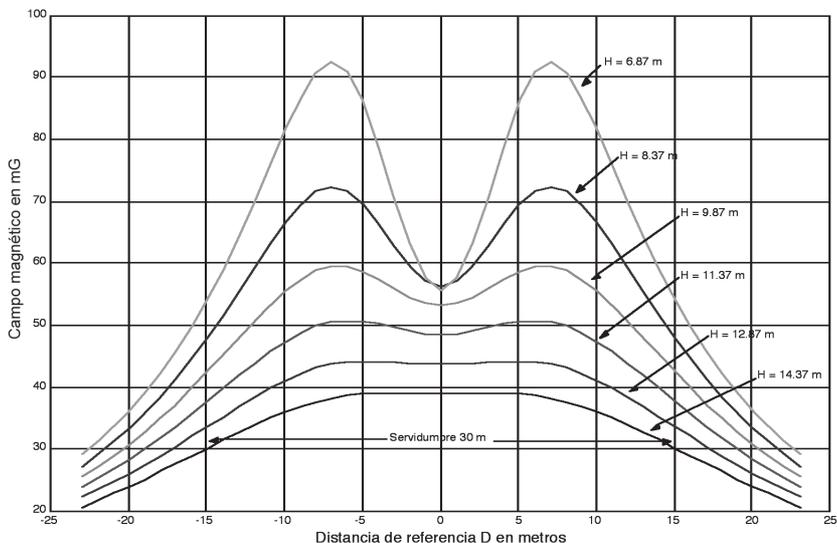


Figura 7. Perfil del campo magnético para dos circuitos y 160 MVA.
Fuente: (El autor).

se demuestra que el campo magnético es inferior a $15 \cdot 10^{-7}$ T (150 mG) en el borde de la servidumbre.

En la Figura 10 se muestra el perfil del campo eléctrico, cuando la línea transporta una potencia de 160 MVA, 205 MVA y 350 MVA, respectivamente, con dos circuitos asimétricos (RST-TSR) en operación.

En la Figura 10 se muestra cómo la asimetría de las fases hace que la magnitud del perfil del campo eléctrico sea más pronunciada en el sitio donde se encuentran los conductores activos. Por otro lado, se contrarresta el efecto del campo eléctrico exactamente en el centro de la estructura de la torre. De estos cálculos se demuestra que el campo eléctrico es inferior a 2 kV/m en el borde de la servidumbre y a 8 kV/m dentro de la servidumbre.

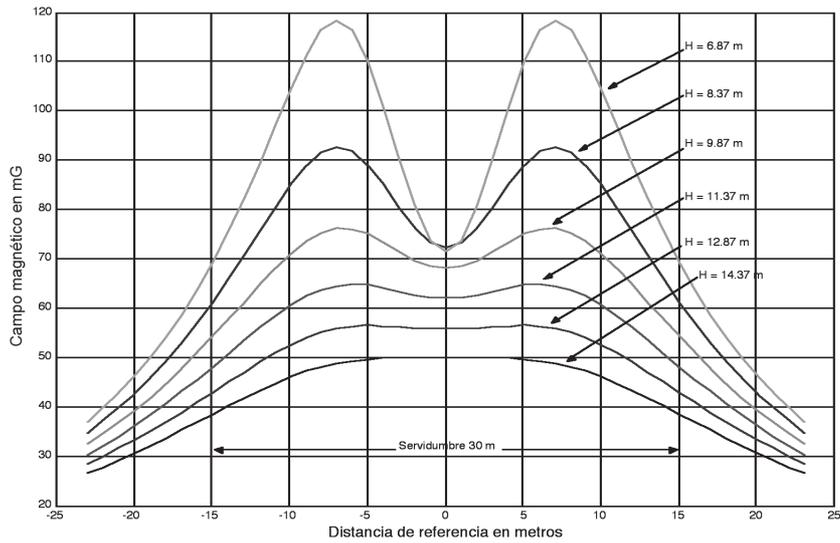


Figura 8. Perfil del campo magnético para dos circuitos y 205 MVA.

Fuente: (El autor).

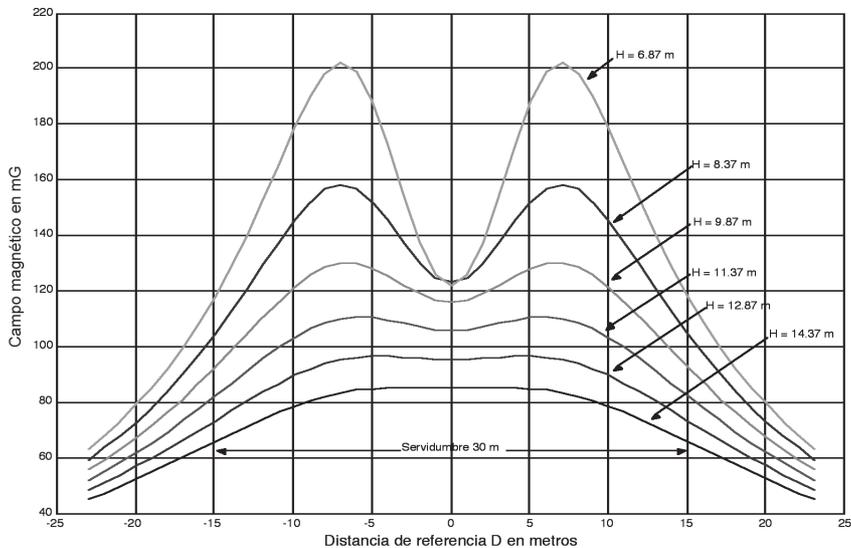


Figura 9. Perfil del campo magnético para dos circuitos y 350 MVA.

Fuente: (El autor).

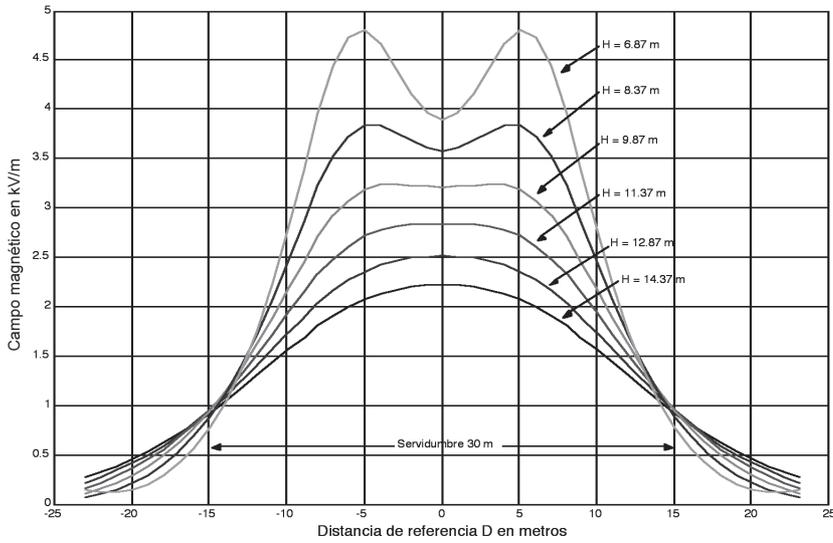


Figura 10. Perfil del campo eléctrico con dos circuitos energizados.

Fuente: (El autor).

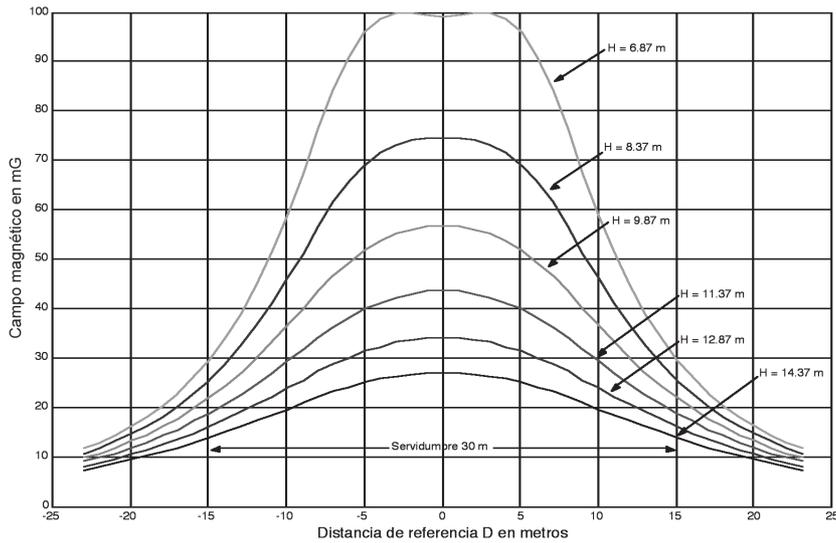


Figura 11. Perfil del campo magnético para dos circuitos y 160 MVA.

Fuente: (El autor).

En las Figuras 11, 12 y 13 se muestran las distribuciones espaciales del campo magnético, cuando la línea transporta una potencia de 160 MVA, 205 MVA y 350 MVA, respectivamente, con dos circuitos asimétricos en operación.

En las Figuras 11, 12 y 13 se muestran cómo los campos magnéticos presentan una distribución simétrica con respecto al centro de la torre.

Dentro de la servidumbre, el mínimo valor se da en el borde, y a partir de esta posición, la magnitud se incrementa, hasta su valor máximo en el centro de la torre. Después de esa posición, la magnitud del campo magnético disminuye exponencialmente. De estos cálculos se demuestra que el campo magnético es inferior a $15 \cdot 10^{-7}$ T (150 mG) en el borde de la servidumbre.

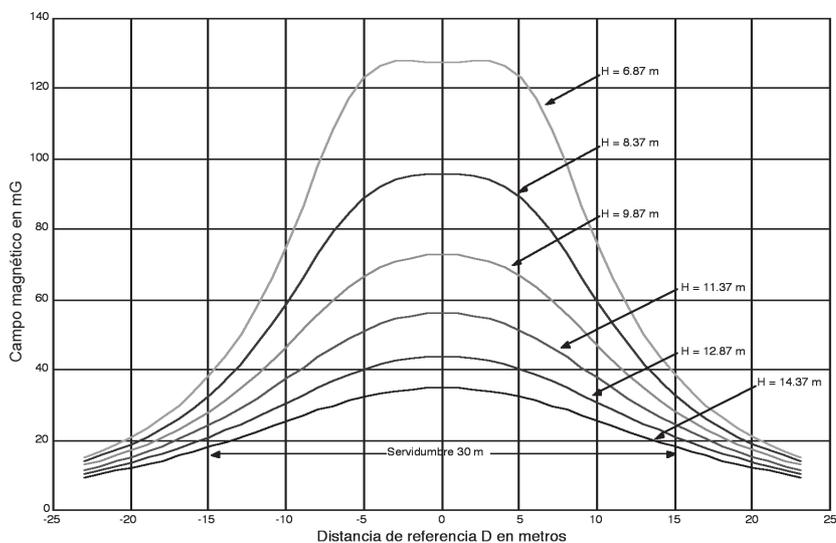


Figura 12. Perfil del campo magnético para dos circuitos y 205 MVA.

Fuente: (El autor).

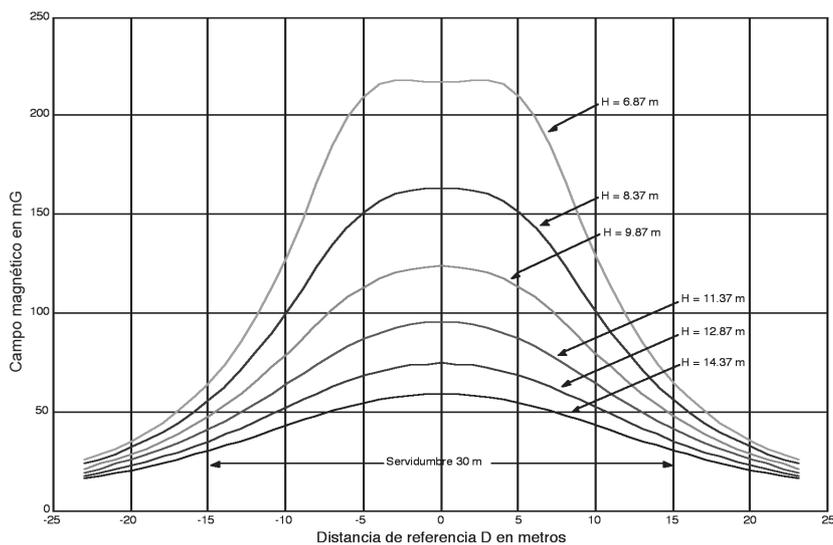


Figura 13. Perfil del campo magnético para dos circuitos y 350 MVA.

Fuente: (El autor).

4. ASPECTOS RELEVANTES DE LOS CÁLCULOS

A partir de los gráficos obtenidos, se pueden recopilar las siguientes observaciones cuando la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos varía con respecto a la potencia:

a. En los casos donde los conductores están ubicados simétricamente con respecto al centro geométrico de la estructura, el perfil de los campos eléctricos y magnéticos son simétricos, lo que a su vez se manifiesta con magnitudes iguales en el borde de la servidumbre.

b. En los casos donde los conductores están desplazados a un lado con respecto al centro geométrico de la estructura, el perfil de los campos eléctricos y magnéticos, es desplazado en la misma dirección, lo que produce magnitudes diferentes en el centro y borde de la servidumbre.

c. La intensidad del campo eléctrico no depende de la potencia transportada sino de la tensión de operación, 230 kV.

d. El campo magnético se incrementa en forma proporcional con respecto a la potencia transportada.

Por otro lado, a partir de los gráficos obtenidos, se pueden recopilar las siguientes observaciones cuando la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos varía con respecto a la altura de los conductores activos y del hilo guarda:

a. En los casos donde los conductores están ubicados simétricamente con respecto al centro geométrico de la estructura. Esta configuración hace que el perfil de los campos eléctricos y magnéticos, sea simétrico, obteniéndose magnitudes iguales en el borde de la servidumbre.

b. En los casos donde los conductores forman una configuración vertical a un lado de la estructura. Esto hace que el perfil de los campos eléctricos y magnéticos, sea desplazado en la misma dirección, obteniéndose magnitudes diferentes en el centro y borde de la servidumbre.

c. La magnitud de los campos eléctricos y magnéticos se incrementan en forma no lineal, al disminuir la separación de los conductores con respecto al terreno.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pueden rescatar las siguientes conclusiones:

1. La intensidad del campo eléctrico y magnético generado bajo condiciones normales (160 MVA y 205 MVA) y anormal (350 MVA)

de operación, cumple con normas nacionales e internacionales.

2. Cuando la línea opera bajo condiciones normales, la intensidad del campo eléctrico y magnético presenta una distribución simétrica.

3. Cuando la línea opera bajo condiciones anormales, la intensidad del campo eléctrico y magnético presenta una distribución asimétrica, desplazando la intensidad del campo eléctrico y magnético a un extremo de la servidumbre.

4. La intensidad del campo magnético en el borde de la servidumbre disminuye en una distribución asimétrica de las fases (RST-RST), con respecto a una distribución simétrica de las fases (RST-TSR). Esto se verifica al comparar las Figuras 7, 8 y 9 con las Figuras 11, 12 y 13, respectivamente.

5. En el caso de que la línea de transmisión esté constituida de un doble circuito, una alternativa adecuada para disminuir la intensidad del campo eléctrico y magnético, es un cambio en la distribución de las fases eléctricas. Es decir, se cambia la distribución simétrica de las fases (RST-RST), por una distribución asimétrica (RST-TSR).

6. En el caso de que se supere la magnitud de los campos eléctricos y magnéticos establecidos en la normativa (Electric Power Research Institute, 1987), una alternativa adecuada para disminuir la intensidad del campo electromagnético, es: ubicar los conductores de fase más cerca a la estructura que los soporta (diseño compacto), aumentar la altura de los conductores de fase con respecto al perfil del terreno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Electric Power Research Institute. (1987). *Transmission Line Reference Book* (2^a ed.). Palo Alto, California.

Instituto Costarricense de Electricidad. (1998). Reglamento general para el

desarrollo y operación de las obras de transmisión de electricidad, relacionado con campos electromagnéticos y otros aspectos ambientales. *La Gaceta* 248, 3-5.

NIEHS (2005). National Institute of Environmental Health Sciences/National Institutes of Health. EMF RAPID Program (cap.5). Extraído el 9 de enero, 2005 del sitio Web: <http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/booklet/>.

WHO (2005). World Health Organization. International EMF Project. EMF World Wide Standards. Extraído el 12 de enero, 2005 del sitio Web: <http://www.who.int/docstore/peh-emf/EMFStandards/who-0102/Worldmap5.htm>.

SIMBOLOGÍA

HG1	conductor de hilo guarda # 1
HG2	conductor de hilo guarda # 2
R	conductor de la fase R
S	conductor de la fase S
T	conductor de la fase T

SOBRE EL AUTOR

Eddie A. Araya Padilla

Profesor Asociado, Departamento de Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica
Teléfono: 207-38 68
Correo electrónico: earaya@eie.ucr.ac.cr