



REDUCCIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

L.A. KRAPP
Fac. Ingeniería –
UNR
Argentina

J.C. RONCO
Fac. Ingeniería –
UNR
Argentina

E.A. PASSERINI
Fac. Ingeniería –
UNR
Argentina

S. BELLAGAMBA
Fac. Ingeniería –
UNR
Argentina

G. LÓPEZ
Fac. Ingeniería –
UNR
Argentina

Resumen - El incremento de la demanda eléctrica, en grandes centros poblacionales ha provocado un aumento del número de Sub Estaciones Transformadoras (SET) y Líneas de Alta Tensión (LAT) en zonas urbanas, generando preocupación en los habitantes debido a los posibles efectos biológicos derivados de la polución electromagnética asociada. Esto ha derivado en una creciente preocupación social, cuestionando las instalaciones de los sistemas de transmisión en zonas urbanas, llegándose incluso a detener la ejecución de obras. Este trabajo presenta dos estadios:

a) Análisis de situaciones puntuales y reales mediante:

- la medición de campos electromagnéticos (CEM) en líneas existentes
- el modelado de líneas a estudiar empleando un software (COMSOL) no específico basado en el método de los elementos finitos (MEF) para la determinación de CEM de extra baja frecuencia (EBF).
- el contraste de los dos anteriores.

b) Presentar algunas propuestas para la mitigación de los CEM, justificadas mediante la utilización de la herramienta de cálculo citada arriba, por:

- modificación de la configuración circuital
- alteración de la configuración geométrica
- adición de hilos de guardia extras (apantallamientos)

Las metodologías desarrolladas se limitan a su aplicación exclusivamente en las zonas urbanas atravesadas por LAT, es decir en una longitud reducida, por lo que el incremento de precios es mínimo.

Es el propósito de la presente investigación aportar una herramienta eficaz, innovadora y de bajo costo, al momento de diseñar o analizar instalaciones nuevas o existentes para disminuir los valores de CEM. Los valores referenciales fueron los establecidos por las normativas vigentes.

Palabras clave: Campo Electromagnético, Extra baja frecuencia, Línea de Alta Tensión, Modelización, Simulación, Apantallamiento, Rotación de fases

1 INTRODUCCIÓN

El incremento del nivel de consumo eléctrico obligó al aumento de los niveles de tensión en los sistemas de transmisión por razones estrictamente técnicas y la instalación de estaciones transformadoras en centros urbanos para satisfacer la demanda con calidad. Por otro lado la expansión urbanística provocó

desplazamiento de los ejidos urbanos hacia zonas periféricas, donde existían trazas de Líneas de Alta Tensión (LAT). Todo esto juntamente con el creciente temor a las radiaciones electromagnéticas, provoca reacciones colectivas solicitando el corrimiento o supresión de centros de transformación y/o líneas.

Hoy no se encuentra claramente definida la relación entre exposición a CEM de EBF y enfermedades derivadas de éstos, lo cual representa una situación desafortunada desde el punto de vista de la limitación impuesta a ellos. Por este motivo se debe optar por las condiciones menos riesgosas para los seres vivos. El IARC considera a los EMF de EBF como cancerígenos para los seres humanos[1]. Actualmente la serie de investigaciones existentes tratan de relacionar los CEM con enfermedades físicas y neuronales. En el año 2002 Draper *et al* evaluaron la incidencia de leucemia en niños que viven en un corredor dentro de los 200m de la línea con otros que lo hacen a más de 600m, verificando que el riesgo de contraer la enfermedad se ve incrementado en un 70%[2].

Es importante la continuidad de los estudios de factores de riesgos a la salud humana provocados por radiaciones no ionizantes, que permitan la determinación de los valores de riesgo y así poder asegurar el umbral de seguridad. Por este motivo, es imprescindible reducir al máximo los valores de campo producidos por fuentes artificiales de manera de disminuir la posibilidad de afectación. En este trabajo se proponen soluciones económicamente viables frente a la alternativa de colocar un cable subterráneo con un blindaje adecuado, para líneas de 132kV y 500 kV; las propuestas se limitan exclusivamente a la zona por la que las líneas recorren las zonas pobladas, por lo que el incremento de costo es muy bajo.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

El cálculo del Campo Eléctrico (CE) generado por las líneas de transmisión presenta dos etapas: el cálculo de las cargas en los conductores del sistema y el cálculo del campo; mientras que el cálculo del Campo Magnético (CM) se efectúa mediante la determinación de las corrientes por las fases, el modelo de imágenes de Carson y la ley de Ampere.

Son válidas las siguientes consideraciones:

- Se considera un sistema trifásico perfectamente simétrico.
- La carga distribuida en la superficie de los conductores es sustituida por líneas de carga, se supone que no hay carga libre en el espacio, que la permitividad del aire es uniforme y su conductividad es nula.
- A 50 Hz, cualquier terreno se comporta como buen conductor, de manera que la superficie de la tierra puede considerarse perfectamente plana y equipotencial, siendo aplicable entonces el método de las imágenes para el CE.
- La altura variable de los conductores puede ser reemplazada por una altura equivalente constante denominada altura efectiva, de valor: $h_{ef} = H - 2/3 (H - h)$ donde H es la altura máxima (posición del anclaje) y h la altura mínima.
- Si en cada fase se tiene un haz de “n” conductores equiespaciados, éste puede ser reemplazado por un conductor equivalente cuyo radio vale: $r_{eq} = R (nr/R)^{1/n}$ donde “r” es el radio de cada conductor y “R” es el radio del haz.
- A 50 Hz, y resistividades de tierra mayores que 50 Ω m, en el modelo de Carson las corrientes imágenes no aportan al cálculo del CM, de acuerdo a lo manifestado por el reporte de la IEEE Magnetic Fields Task Force [3].

3 METODOLOGÍA

Para la simulación de los CEM de EBF producidos por las líneas de alta tensión y muy alta tensión se empleó el programa COMSOL, efectuando el post-procesado de las distribuciones obtenidas a una altura de 1m respecto del suelo, de acuerdo a las normativas vigentes en la República Argentina.

Se realizaron modelados para distintas distribuciones espaciales y diferentes tensiones en base al proceso de aseguramiento de la calidad de la simulación que se detalla en el trabajo Campos Electromagnéticos en Líneas Aéreas de Baja Frecuencia: MODELADO y SIMULACIÓN, Ronco J *et al*[4].

El método se basó en la comparación de mediciones reales con cálculos efectuados, siguiéndose el esquema detallado en Fig. 1.

Las condiciones de la simulación son: Suelo perfectamente plano, libre de interferencias; encontrándose problemas en la determinación de las imágenes de retorno por la no posibilidad de determinar conducciones accidentales por tierra, como por ejemplo cañerías de agua, gas, blindajes etc., para la simulación de los campos magnéticos.

3.1 Análisis doble terna

En primera instancia se analiza una doble terna, la cual fue objeto de medición y posterior simulación de los CEM. Se trata de una doble terna urbana que vincula las Estaciones transformadoras Ovidio Lagos – Saladillo y Villa

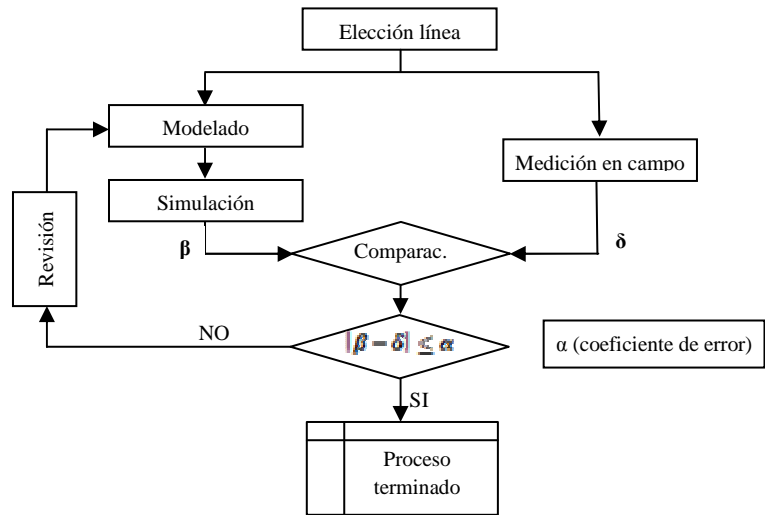


Fig. 1. Sistema de validación

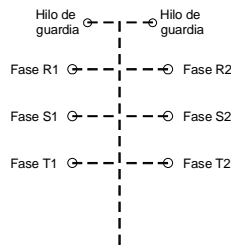


Fig. 2-(a)
Configuración
RST-RST

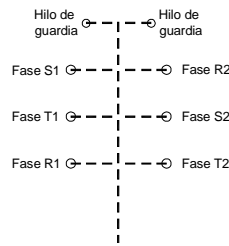


Fig. 2-(b)
Configuración
RST-STR

Gobernador Gálvez, propiedad de la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe, ubicada en la ciudad de Rosario. La distribución de conductores en la misma es de la forma indicada en la Fig. 2-(a). Sin embargo, las líneas doble terna (DT), sean o no de tipo urbana, se realizan con una distribución geométrica de fases no definida, encontrándose la citada recientemente o la correspondiente a la Fig. 2-(b)., no hallándose motivos fidedignos para la elección de una u otra por las empresas prestatarias del servicio eléctrico. Posteriormente a la Fig. 2.(a) se la identifica como DT-RST_RST y a la Fig. 2.(b) como DT-

RST_TRS.

Las coordenadas de los conductores y de los hilos de guardia son: HG1 (1.25,15), HG2 (-1.25,15), R1(2,13), S1(2,11), T1(2,9), S2(-2,13), T2(-2,11), R2(-2,9).

Los resultados obtenidos son para la doble terna en CE y CM son:

3.1.1 Campo Eléctrico

En una doble terna de 132kV con una corriente de 765A se obtiene una distribución de Campo Eléctrico (CE), Fig. 3, que se grafica transversalmente a la línea, entre -50m y 50m (abscisas) a una altura de 1m respecto del suelo. Para una distribución de fases de la forma indicada en la figura 3.1 el valor máximo es de 2674 V/m, en tanto que para la indicada en la figura 3.2 el máximo es de 1574 V/m. Se observa que referido al valor inicial se tiene una reducción del orden del 41%. La cuestión de mayor importancia radica en el hecho que con la primera configuración el valor obtenido es un 11% menor que el admisible por las regulaciones nacionales [5] y para el caso 2 el valor es 48 % inferior al admitido.

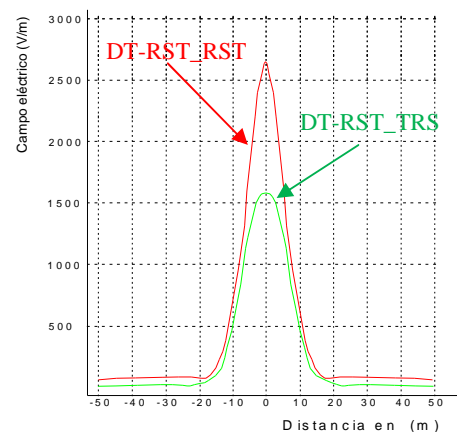


Fig. 3. Comparación CE - DT

3.1.2 Campo Magnético

Bajo las mismas condiciones que en el punto 3.1.1, se verifica que con una rotación de fases se obtiene una importante reducción del valor máximo del CM, como se muestra en la Fig. 4, resultando:

Para la doble terna de la Fig. 2-(a) el valor máximo de campo magnético (CM) referido al regulado de 25 μT , es del 55%, en tanto que para la distribución de fases de Fig. 2-(b) es del 28%.

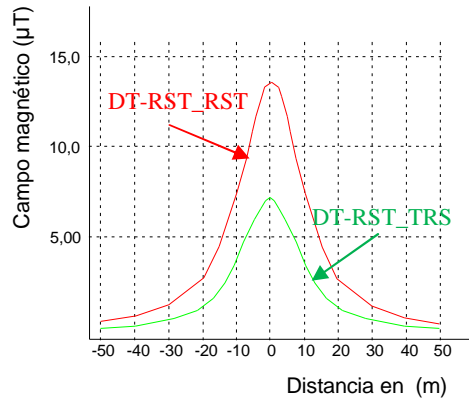


Fig. 4. Comparación CM - DT

En este análisis se consideró que ambas líneas DT están en paralelo, sin embargo la cantidad de situaciones a considerar son innumerables. En este trabajo se analiza únicamente las corrientes en oposición

Análisis que corresponde a una DT bajo estudio y que vincula las EETT Ovidio Lagos – Saladillo - Villa Gobernador Gálvez, propiedad de la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe.

En la Fig. 5 se toma la DT en la que se simula el CM para dos situaciones:

- DT fases rotadas (Fig. 2-(a))
- DT fases simétricas (Fig. 2-(b))

Los resultados obtenidos corresponden a lo previsto, es decir se tiene un menor CM con una distribución simétrica de fases, de acuerdo al CM producido por conductores circulados por corriente de sentidos opuestos para distancias mucho mayores respecto de la separación entre ellos.

En este caso se tiene una importante disminución del CM para una distribución de fases simétrica.

El CE no se considera en este caso porque no existe una diferencia de tensión apreciable entre las fases de una misma designación con respecto a la situación considerada en el punto 3.1.1.

3.2 Simple terna vertical

Se considera una línea de 132 kV del tipo vertical, utilizada para sistemas urbanos, del tipo indicado en la Fig. 6. En este caso se analizó la línea que vincula las EETT San Nicolás y San Nicolás Urbana propiedad de TRANSBA.

Para la reducción del CE y del CM se optaron por dos soluciones posibles:

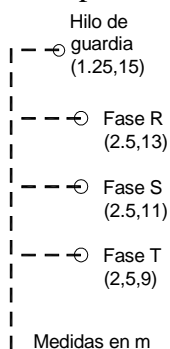


Fig.6. Línea urbana 132 kV

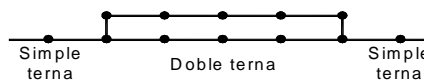


Fig.7. Configuración de la línea

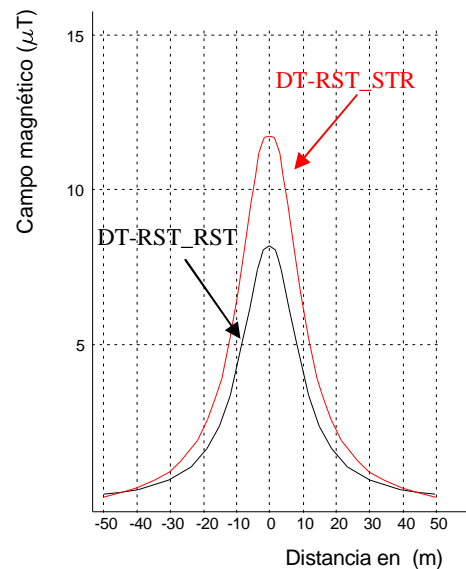


Fig. 5. CM – DT – Corrientes opuestas

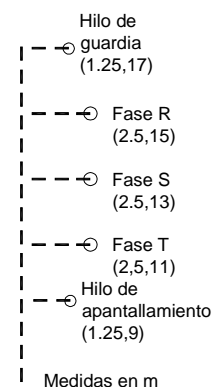


Fig.8. Línea urbana 132 kV con apantallamiento

1. Convertir el tramo que atraviesa la zona urbana en doble terna basado en las consideraciones del punto 3. Tal procedimiento se ilustra en la Fig. 7.
2. Levantar la línea e introducir un hilo de apantallamiento. Se desplazan los conductores de fase 2 m hacia arriba y se introduce un hilo a potencial de tierra, como muestra la Fig. 8.

Los resultados fueron los indicados en las figuras 8 y 9 para CE y CM respectivamente y en la tabla I, donde se presenta los valores máximos resultantes.

TABLA I. VALORES MÁXIMOS DE CE Y DE CM PARA DISTINTAS CONFIGURACIONES DE UNA LÍNEA URBANA

REFERENCIA	Símbolo	Campo Eléctrico (kV/m)		Campo Magnético (μT)	
		Calculado	Máximo	Calculado	Máximo
Simple Terna vertical	ST	1,61	3 Res. 77/1998 Sec. Energía	7,76	25 Res. 77/1998 Sec. Energía
Doble Terna rotada	DT	1,34		3,48	
Simple Terna + 2m	ST+2m	1,15		5,27	
Simple terna + apantallamiento	ST+HA	0,67		-----	

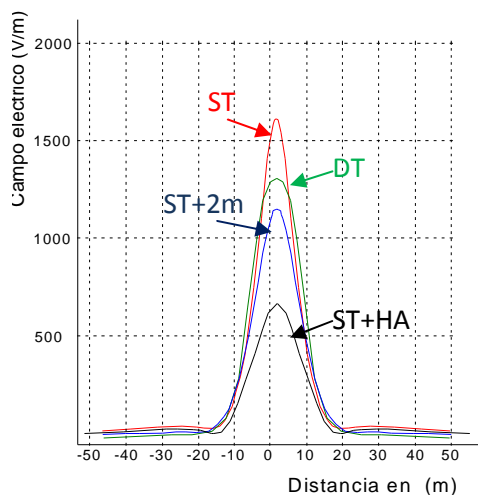


Fig. 8 - Campo Eléctrico

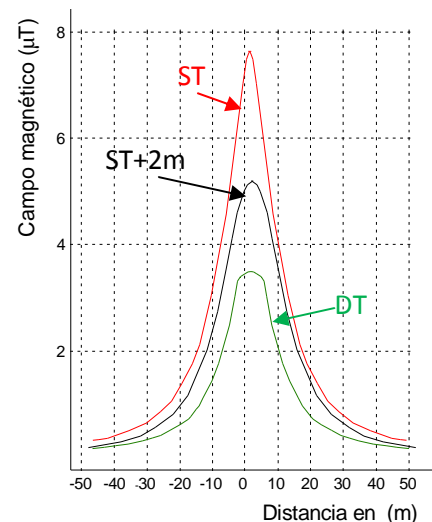


Fig. 9 - Campo Magnético

En el tramo de la doble terna la corriente de cada fase se tomó la mitad del valor inicial.

La ubicación de cada conductor de la Fig. 6 es:

Hilo de guardia (1.25, 15): Fase R (2.5, 13), Fase S (2.5, 11), Fase T (2,5,9).

Cuando se le agrega un hilo de guardia las dimensiones pasan a ser:

Hilo de guardia (1.25, 17): Fase R (2.5, 15), Fase S (2.5, 13), Fase T (2,5, 11), Apantallamiento (1.25, 9).

En la doble terna considerada, debió utilizarse la rotación de fases estudiada en el punto 3.1, ya que las corrientes en ambas líneas están en fase.

3.3 Línea de 500 kV

Este es un caso que nos ocupa muy especialmente, ya que existen zonas de esparcimiento cercanas a centros urbanos muy próximas al electroducto de la línea

La línea que se utilizó para validar la simulación fue la que vincula las EETT Rosario Oeste y Ramallo operada por Transener.

La configuración geométrica empleada es la que se detalla en Fig. 10-(a) y Fig.-10-(b), considerándose en esta última dos conductores de apantallamiento.

3.3.1 Campo eléctrico

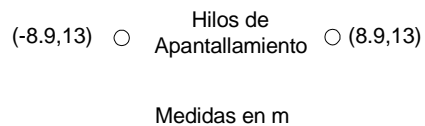
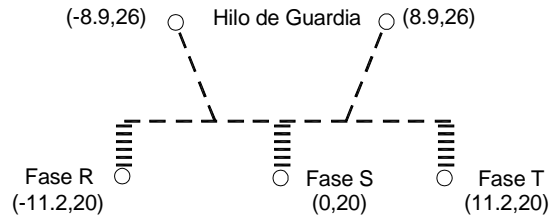
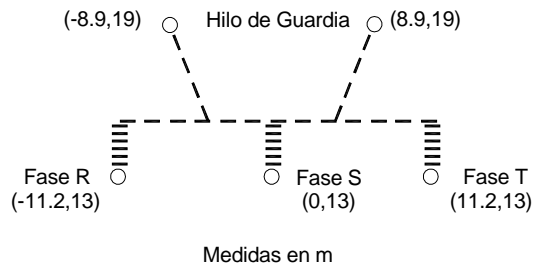


Fig. 10-(a) – Línea de 500 kV

Fig. 10-(b) – Línea de 500 kV con apantallamiento

En la Fig. 11 se grafican los CE obtenidos por simulación para tres condiciones:

- a- Línea original (indicada con la letra A)
- b- Línea elevada 7m (indicada con la letra B)
- c- Línea con dos hilos de apantallamiento (indicada con la letra C)

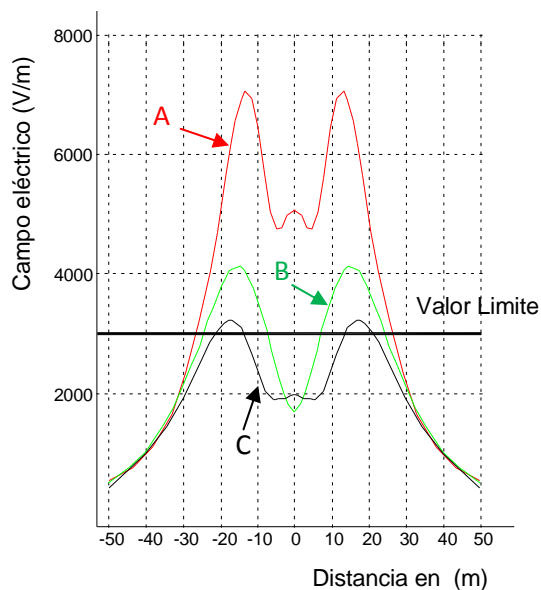


Fig. 11. Distribución CE línea 500 Kv

Todos los cálculos se realizan entre -50m y +50m efectuando el barrido a 1m de altura, como lo establecen las normativas vigentes.

Del análisis de la Fig. 10, se observa, para el caso a), que a distancias de 27 m hacia ambos lados del centro de la línea se sobrepasa los 3 kV/m indicados por la Secretaría de Energía en su resolución 77/98 como valor de referencia.

En la curva B (corresponde a la línea elevada en 7m) existe una reducción de los valores máximos del orden del 50%, reduciéndose la zona en la que se sobrepasa los 3 kV/m a 26 m.

Por último, para el caso en que se utiliza apantallamiento con dos conductores inferiores (curva C), prácticamente el valor máximo es del orden del admisible.

En todos los casos las curvas son asintóticas entre sí a distancias mayores a los 30 m contados desde el eje

de la traza de la línea.

3.3.2 Campo Magnético

Para la simulación del CM sólo se consideraron los casos indicados como A y B, por considerar que el efecto desmagnetizante de la espira conformada por los hilos de guardia y/o hilos de apantallamiento es de escasa importancia en los resultados de la simulación. Para la justificación de esta afirmación se puede calcular la fuerza electromotriz inducida (FEMi) en la espira conformada por los hilos de guardia de la terna original (Fig. 10-(a)). La expresión que se obtiene para la FEMi es:

$$e = \frac{1}{4} \frac{\mu_0 l}{\pi} \sqrt{2} I \ln \delta \omega \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad [\text{Ec. 1}]$$

La simbología empleada responde a:

e : FEM instantánea;

μ_0 : Permeabilidad del aire;

l : distancia entre dos torres;

I : corriente por la línea;

δ : función de las distancias.

Realizados los cálculos, la FEMi es 2,4 V, por lo que la corriente que circula es despreciable frente a la corriente de línea.

Las simulaciones de los CM se grafican en la Fig. 12. Por lo expresado no se simula el CM para el caso correspondiente a la configuración con apantallamiento.

Los cálculos fueron realizados para una corriente de 1000 A, por ser ésta la máxima admisible para la línea considerada.

La reducción del CM elevando la línea 7m es del orden del 47%.

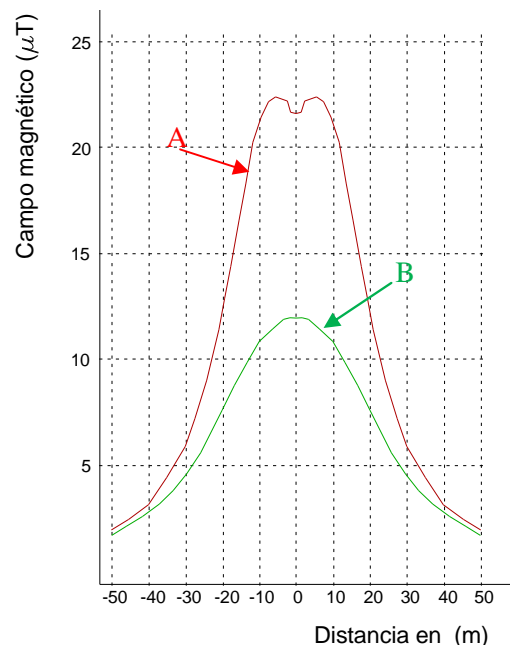


Fig. 12. Distribución CM línea 500 Kv

4 CONCLUSIONES

En el trabajo se plantean distintas formas de disminuir los CE y los CM, obteniéndose resultados muy satisfactorios para las líneas de 132 kV y 500 kV, lográndose valores de CEM compatibles con los de las normativas nacionales vigentes, reduciendo el riesgo de exposición. poniendo a los seres vivos en un potencial riesgo menor, en especial hasta que se logre un acuerdo internacional sobre valores máximos admisibles sin que se afecte la salud.

Una consideración importante es el nivel de reducción logrado sin realizar una inversión importante ya que al tratarse de modificaciones a ejecutar sólo en cercanías de zonas que atraviesan centros urbanos, no altera prácticamente la inversión demandada.

No se consideran métodos de apantallamiento de CM por ser estos muy onerosos ya que exigen la disposición debajo de la línea de espiras en cortocircuito circuladas por una corriente que debe ser controlada por un sistema que provea una corriente proporcional a la que tiene la red. El valor de corriente usada para la simulación de los CM es el máximo que puede ser transportada por la línea, ya que el propósito de este trabajo es analizar la situación más desfavorable.

5 REFERENCIAS

- [1] IARC, Working Group of the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Non Ionizing Radiation, Part 1: Static and extremely low frequency (ELF) electric and magnetic fields. The International Agency for Research on Cancer, 2002.
- [2] G. Draper, T. Vincent, M. Kroll and J. Swanson, “Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case control-study” BMJ, Jun 2005.
- [3] R.G. Olsen, D. Deno and R.S. Baishiki, “Magnetic fields from electric power lines. Theory and Comparison to measurements”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, N° 4, October 1988.
- [4] J. Ronco, L. Krapf, M. Ferrari, E. Passerini, R. Seggiaro, G. López, L. Rumín and A. Vazquez, “Campos Electromagnéticos en Líneas Aéreas de Baja Frecuencia: MODELADO y SIMULACIÓN – Cidel Argentina – Buenos Aires 2010.
- [5] Secretaria de Energía. Energía Eléctrica, Res 77/98.