

Comité de Estudio C3 - Desempeño Ambiental del Sistema

NIVELES DE CAMPO MAGNÉTICO GENERADOS POR CABLES SUBTERRÁNEOS DE AT, CON MÚLTIPLES TERNAS

C. WALL*
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

P. ARNERA
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

B. BARBIERI
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

***Resumen** – El crecimiento de los centros urbanos y el aumento de la demanda de energía eléctrica hace que cada vez se requieran más tendidos de cables subterráneos de Alta Tensión (AT). Asociados a los mismos se encuentran la generación de campos magnéticos, que desde ya hace varios años han despertado preocupación en la población por la asociación de estos con posibles efectos sobre la salud.*

En el tendido de cables se identifican dos zonas, una correspondiente al tendido regular de los conductores de fase donde estos se encuentran próximos entre sí, y las zonas en donde se llevan a cabo los empalmes, allí las distancias entre las fases son mayores. En esta última, los valores de campo magnético son más elevados, debido al incremento de dicha separación.

Se debe considerar además que en muchas circunstancias es necesario disponer sobre una misma traza más de una terna, lo que puede provocar un incremento en los valores de campo magnético, dependiendo de la configuración de la misma.

En algunas circunstancias, para cumplir con los requerimientos de las normativas, es necesario disminuir los niveles de campo generados en la zona de empalmes, para lograr dicho objetivo existen diferentes estrategias, como ser el incremento de la distancia a los mismos del punto de interés o estudiar las posibles secuencias de energización de las ternas intervinientes en cada caso en particular y determinar la que mejores resultados arroje desde el punto de vista técnico económico.

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante cálculos de campo magnético, considerando el tendido de cables subterráneos de 132 kV, con dos ternas en la misma traza y la aplicación de técnicas de mitigación que consisten en modificar la secuencia de energización de las ternas. Esto se aplica en la zona de ductos y en la zona de empalmes.

Otra alternativa considerada es la utilización de lazos pasivos para mitigar el campo magnético, esta solución es aplicable únicamente a la zona de empalmes.

Los resultados se obtienen empleando herramientas de cálculo, que permiten realizar modelos tridimensionales y representar con un gran nivel de detalles las instalaciones analizadas.

Se comparan los diferentes resultados obtenidos en cada caso, destacando las soluciones más efectivas para los casos analizados.

Palabras clave: Campo Magnético, Mitigación, Cables Subterráneos

1 INTRODUCCIÓN

En las redes de la República Argentina es común encontrar instalaciones que empleen Cables Subterráneos (CS) de Alta Tensión (AT) en 132 y 220 kV, en muchos casos con múltiples ternas, esta situación se da mayormente en el nivel de 132 kV, en donde se pueden encontrar dos o más ternas en la misma traza.

Como se mencionó anteriormente existen en la traza de CS dos zonas, la de ductos con los conductores próximos entre sí y las fosas de empalmes, en donde la separación entre los conductores es mayor. Esta última constituye la zona de mayor interés desde el punto de vista de los valores de campo magnético, debido al incremento en la separación entre los conductores de fase.

Se presentan los resultados de cálculos de Campo Magnético utilizando herramientas de cálculo que permiten elaborar modelos tridimensionales, esto permite reproducir con gran nivel de detalle las instalaciones que se desean analizar.

2 GENERALIDADES

2.1 Campo magnético y Reglamentación

La reglamentación vigente en la República Argentina admite un valor límite máximo para el campo magnético de $25 \mu\text{T}$, a 1 m sobre el nivel del suelo [1], por lo que se analizará si las instalaciones consideradas cumplen con este límite y en caso que se supere se estudian alternativas de mitigación.

Por otro lado para Res. ENRE 1724/1998 [2], indica que las mediciones de campo magnético se deben realizar de acuerdo a los lineamientos establecidos en la norma IEEE 644.1998 [3]; esta última contempla la utilización de medidores de tres ejes.

2.2 Cálculos

Se implementaron modelos tridimensionales en los que se representan todos los conductores involucrados. A partir de estos se realizaron cálculos de campo magnético a 1 m sobre el nivel del suelo. Los resultados que se presentan corresponden al módulo del campo magnético, en primer lugar se determinaron las componentes en cada uno de los tres ejes espaciales y a partir de estas se calculó el módulo.

Para los casos analizados se contemplaron la máxima corriente posible para cada terna, considerando los factores de corrección correspondientes.

2.3 Presentación de resultados

Los resultados de campo magnético obtenidos a 1 metro sobre del nivel del terreno, se presentan mediante distintos tipos de gráficos:

- Mapas de campo magnético 3D.
- Perfiles transversales de campo magnético (perfiles perpendiculares a la traza de los conductores).

Para el caso de Mapas 3D el color de un punto en particular sobre una superficie de cálculo, a 1 metro del nivel del suelo, representa el campo magnético resultante B_R , cuyo valor se indica en la barra referencia color a la derecha del mapa. Los valores mínimos de campo magnético se representan en azul y los máximos en rojo.

Los perfiles transversales se obtienen a partir de los resultados obtenidos en los Mapas 3D, en color azul se representan los resultados en la zona de ductos y en magenta los correspondientes al centro de la fosa de empalmes. Además se indica en color rojo el límite de $25 \mu\text{T}$ (B_{lim}).

2.4 Cable considerado

Para este trabajo se consideró la utilización de Cables Subterráneos de 132 kV, con una sección de 1200 mm^2 , conductor de cobre, aislamiento en XLPE y una corriente máxima de 1485 A. Con el factor de corrección por cantidad de ternas de 0,68, lo que corresponde a una corriente de 1010 A.

3 CAMPO MAGNÉTICO Y CABLES SUBTERRANEOS

A continuación se presentan los valores de campo magnético para cables subterráneos, considerando una doble terna de 132 kV, considerada como caso de referencia.

En la Fig. 1 se presenta una imagen con una secuencia de energización típica para la zona de ductos, en donde se aprecia la disposición de conductores en trébol, utilizando cañeros de $\varnothing 160 \text{ mm}$.

En la Fig. 2 se presenta el esquema correspondiente a la zona de la fosa de empalmes, en la misma se observa que la configuración adoptada es coplanar horizontal.

Para ambos casos se adopta una distancia de 1522 mm desde el nivel del terreno a la parte superior del conductor ubicado a menor profundidad. La separación entre conductores de fase para la fosa de empalmes es de 300 mm y la separación entre ternas es de 400 mm.

La corriente considerada para los conductores de fase fue de 1010 A. Los colores de los conductores representan la posición de las diferentes fases, R: verde, S: azul y T: rojo.

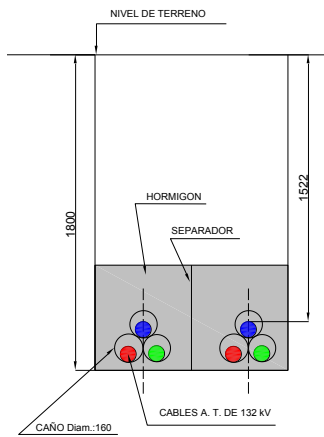


Fig. 1-Caso 1Td, zona de ductos

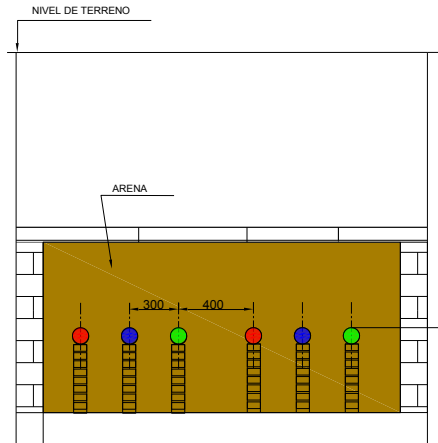


Fig. 2-Caso 1Te, zona de empalmes

3.1 Caso 1

En este caso se considera la secuencia de energización de las ternas propuesta en las Fig. 1 y Fig. 2. Los valores de campo generados se presentan en la Fig. 3, se observa el incremento en los valores de campo magnético en la zona correspondiente a los empalmes. Un detalle de esto se aprecia en la Fig. 4, en donde se trazan los perfiles correspondientes a las zonas de ductos y fosa de empalmes.

Los mayores valores obtenidos son de $11,3 \mu\text{T}$ y $28 \mu\text{T}$, en la zona de ductos y fosa respectivamente.

Se destaca que en la zona de empalmes se supera el valor máximo permitido por la reglamentación vigente en la República Argentina ($25 \mu\text{T}$).

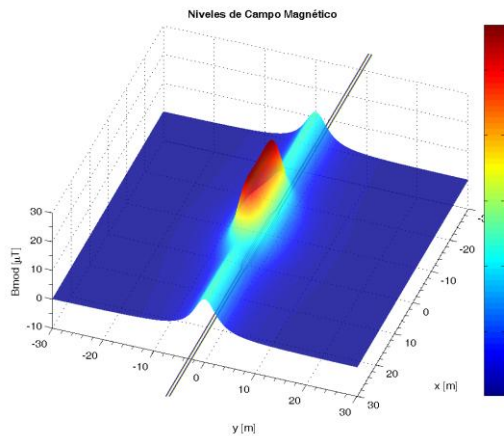


Fig. 3-Mapa de niveles de B, Caso 1

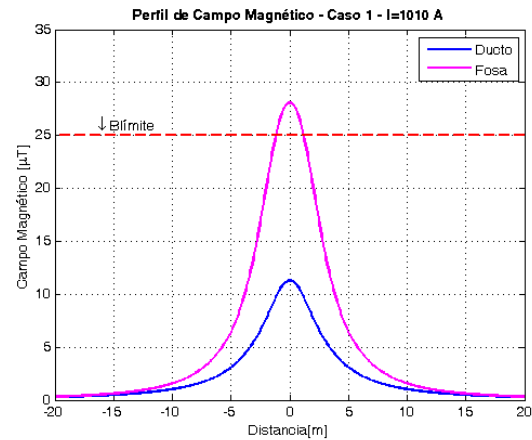


Fig. 4-Perfiles Transversales Caso 1

A partir de estos resultados surge la necesidad de explorar alternativas de mitigación de campo magnético, como ser cambios en la secuencia de energización de fases y la implementación de lazos pasivos.

4 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN

A partir de los resultados obtenidos para el Caso 1, se decidió estudiar alternativas de mitigación de campo magnético. En primera instancia se consideraron diferentes secuencias de energización de fases [4], manteniendo la secuencia de una de las ternas y variando la secuencia de la otra. En segundo lugar se evaluó introducir lazos pasivos como alternativas de mitigación [4] [5] [6]. Los Casos considerados se presentan en la TABLA I.

TABLA I. ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y CASOS CONSIDERADOS

Secuencia de energización		Caso
Cañero	Fosa	
		1
		2
		3
		4
		5
		6
		7

4.1 Caso 2

Los resultados obtenidos para el Caso 2 se presentan en las Fig. 5 y Fig. 6. Los mayores valores obtenidos son de $8,5 \mu\text{T}$ y $14 \mu\text{T}$, en la zona de ductos y fosa respectivamente.

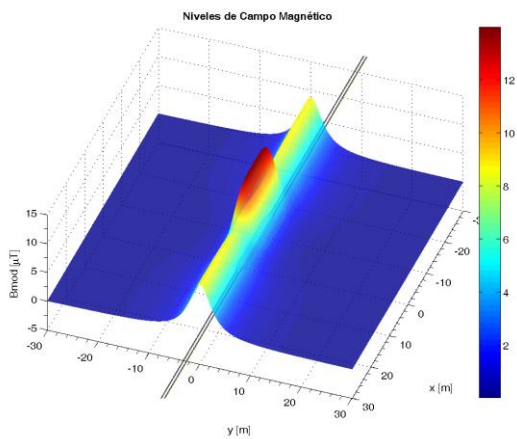


Fig. 5–Mapa de niveles de B, Caso 2

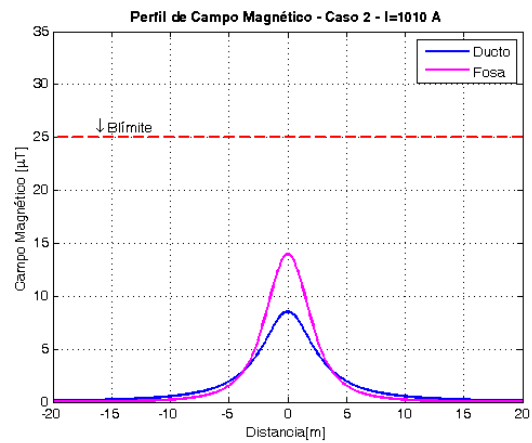


Fig. 6– Perfiles Transversales, Caso 2

4.2 Caso 3

Los resultados obtenidos para el Caso 3 se presentan en las Fig. 7 y Fig. 8. Los mayores valores obtenidos son de $8 \mu\text{T}$ y $20 \mu\text{T}$, en la zona de ductos y fosa respectivamente.

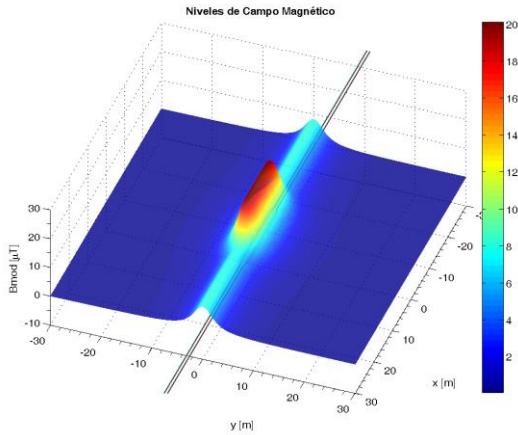


Fig. 7–Mapa de niveles de B, Caso 23

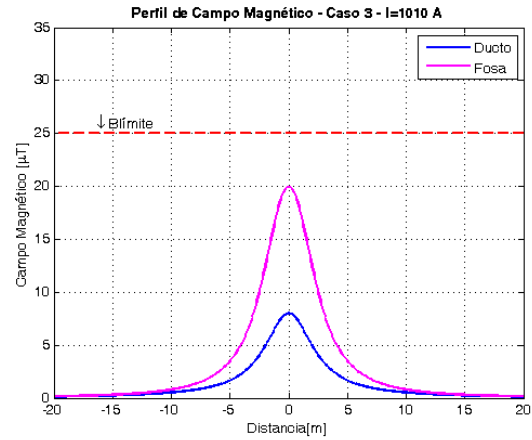


Fig. 8– Perfiles Transversales, Caso 3

4.3 Caso 4

Los resultados obtenidos para el Caso 4 se presentan en las Fig. 9 y Fig. 10. Los mayores valores obtenidos son de $8 \mu\text{T}$ y $25,3 \mu\text{T}$, en la zona de ductos y fosa respectivamente.

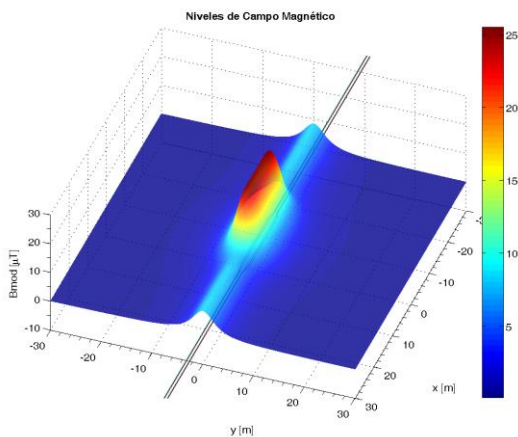


Fig. 9–Mapa de niveles de B, Caso 4

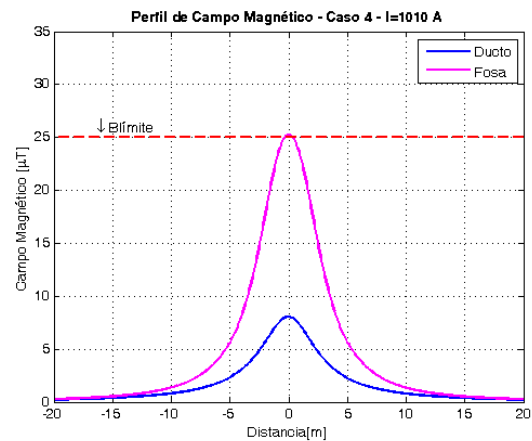


Fig. 10– Perfiles Transversales, Caso 4

4.4 Caso 5

Los resultados obtenidos para el Caso 5 se presentan en las Fig. 11 y Fig. 12. Los mayores valores obtenidos son de $3,3 \mu\text{T}$ y $16,9 \mu\text{T}$, en la zona de ductos y fosa respectivamente.

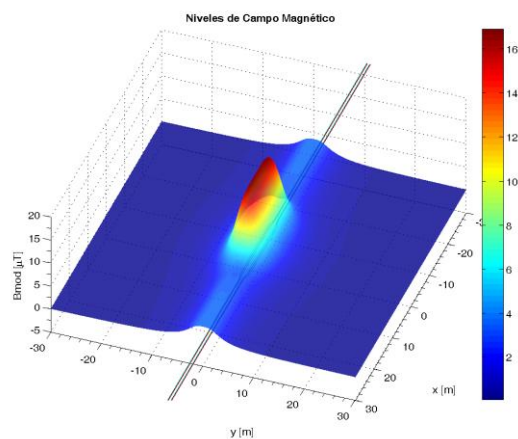


Fig. 11–Mapa de niveles de B, Caso 5

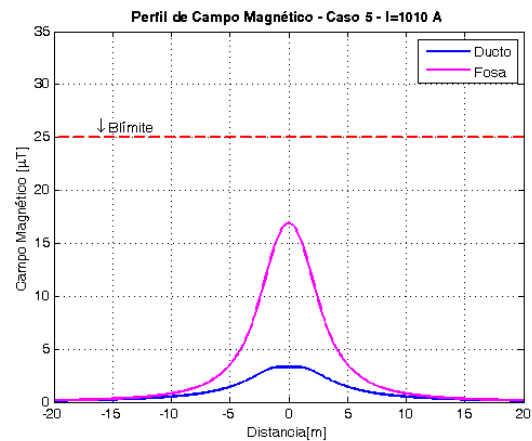


Fig. 12– Perfiles Transversales, Caso 5

4.5 Caso 6

Los resultados obtenidos para el Caso 6 se presentan en las Fig. 13 y Fig. 14. Los mayores valores obtenidos son de $8 \mu\text{T}$ y $25,3 \mu\text{T}$, en la zona de ductos y fosa respectivamente.

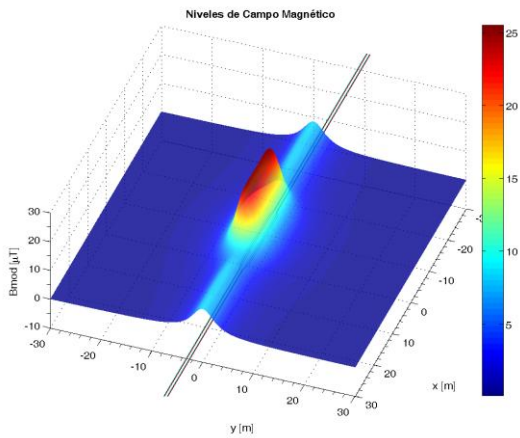


Fig. 13–Mapa de niveles de B, Caso 6

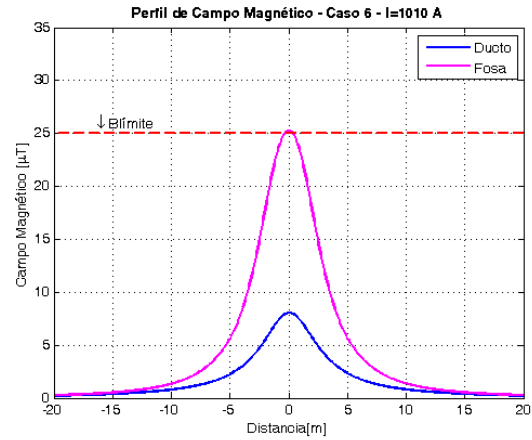


Fig. 14– Perfiles Transversales, Caso 6

4.6 Caso 7

En este caso se propone la incorporación de 3 lazos pasivos, considerando la configuración de la Fig. 15. Los conductores de los lazos son de sección 185 mm^2 y poseen una resistencia de $0,129 \Omega/\text{km}$.

En la Fig. 16 y Fig. 17 se presentan los resultados obtenidos. Los mayores valores obtenidos son de $11,3 \mu\text{T}$ y $10,6 \mu\text{T}$, en la zona de ductos y fosa respectivamente.

No se realizan modificaciones en la zona de ductos, por lo que los resultados son idénticos a los del Caso 1.

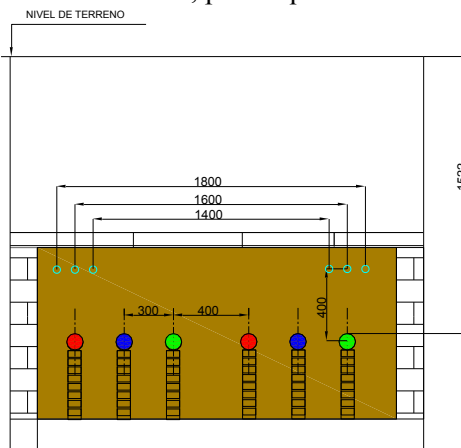


Fig. 15–Mapa de niveles de B, Caso 2

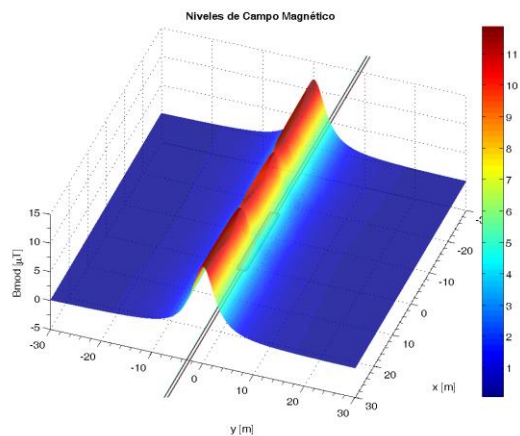


Fig. 16– Mapa 3D, Caso 7

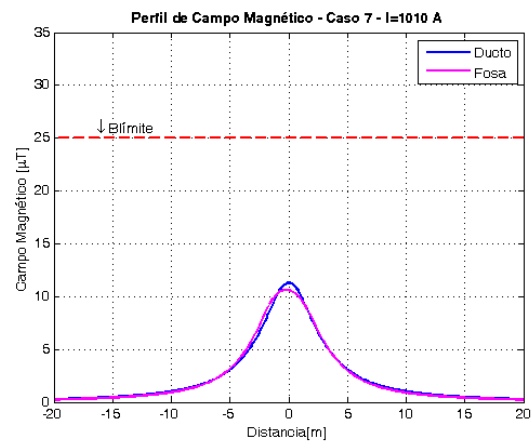


Fig. 17– Perfiles Transversales, Caso 7

5 ANALISIS DE RESULTADOS

La efectividad de las alternativas de mitigación puede ser evaluada por el grado de reducción de campo magnético en un punto o área de interés. Esto se logra con la relación entre el campo magnético sin mitigación y con mitigación.

Para cuantificar el grado de reducción de B y comparar entre las diferentes alternativas, se utiliza el Factor de Apantallamiento (FA), que se define en (1).

$$FA = \frac{B_0(P)}{B_S(P)} \quad (1)$$

FA es la relación entre la densidad de flujo magnético en un punto dado (P) en ausencia (B_0) y en presencia (B_S) de mitigación [4].

En las Fig. 18 y Fig. 19 se presentan los perfiles de FA obtenidos para la zona de ductos y para la zona en donde se realizan los empalmes. Para todos los cálculos se considera como flujo magnético en ausencia de mitigación al Caso 1.

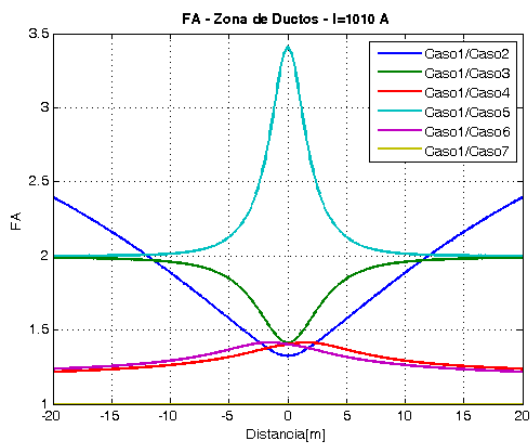


Fig. 18–FA para zona de ductos

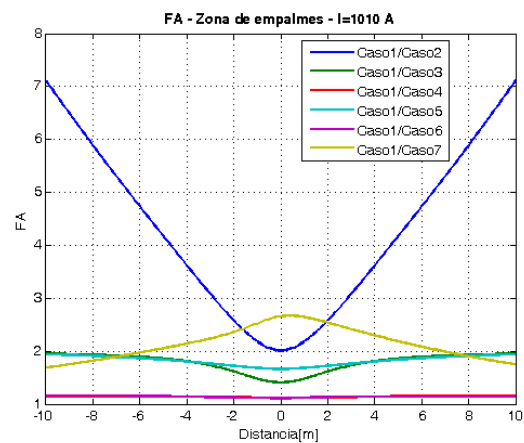


Fig. 19– FA para zona de empalmes

Se centrará el análisis en la zona de mayor valor de campo magnético ($x=0$).

Si se considera la zona de empalmes y modificando la secuencia de energización, los mejores resultados se obtienen con el Caso 2, con un FA igual a 2, con lo que se logra una reducción de los valores de campo magnético del 50%, de 28 a 14 μT .

Utilizando lazos pasivos se logra una reducción mayor, $FA=2,65$, de 28 a 10,6 μT .

Los Casos 4 y 6, permiten reducir los valores máximos de campo magnético, no obstante el valor máximo obtenido es mayor que 25 μT , con lo que estas alternativas no serían una solución al problema planteado.

En la zona de ductos no se superan los 25 μT para el Caso 1, no obstante si se analizan los resultados obtenidos, se observa que la configuración correspondiente al Caso 3 resulta ser la más eficiente, donde el FA máximo es de 3,4, ver Fig. 18.

En la TABLA II, se presenta un resumen de los resultados obtenidos, se indican los valores máximos de campo magnético y el FA, para zona de ductos y fosa de empalmes, comparados con la configuración del Caso 1.

TABLA II. VALORES MÁXIMOS DE CAMPO MAGNÉTICO OBTENIDOS

Caso	B máx [μ T]		FA	
	Ducto	Fosa	Ducto	Fosa
1	11,3	28	-	-
2	8,5	14	1,3	2
3	8	20	1,4	1,4
4	8	25,3	1,4	1,1
5	3,3	16,9	3,4	1,7
6	8	25,3	1,4	1,1
7	11,3	10,6	1	2,65

6 CONCLUSIONES

A partir del objetivo propuesto, reducir los valores de campo magnético en la zona de empalmes (Caso 1), ya que allí se superaba el límite de 25 μ T, se analizaron diferentes alternativas de mitigación.

Se consideraron variaciones en la secuencia de energización de las fases, se analizaron 5 alternativas, Casos 2 a 6, de las cuales dos de ellas no son una solución al problema, Caso 4 y 6. De las otras alternativas la más efectiva resulta corresponde al Caso 2, que permite reducir al 50% los valores máximos de campo magnético.

Adicionalmente para la zona de ductos la alternativa más eficiente resultó la correspondiente al Caso 5, en donde la reducción del valor máximo de campo para esta zona fue de 3,4 veces.

Otra opción introducida, Caso 7, contempla la introducción de lazos pasivos en la zona de empalmes, se consideraron 3 lazos, ubicados en un plano a 400 mm sobre el plano de ubicación de los conductores de fase, y en la zona de mayor valor de campo la reducción obtenida fue de 2,65 veces.

Considerando los resultados presentados y la cantidad de casos analizados, se destaca la importancia de contar con herramientas de simulación que permitan analizar diferentes alternativas, y a partir de los resultados obtenidos elegir la más adecuada.

La implementación de modelos en 3D, permiten obtener una idea general de los valores de campo y a partir de estos analizar cada zona en forma particular, esto se logra trazando perfiles transversales.

7 REFERENCIAS

- [1] Resolución SE 77/98, Secretaría de Energía de la Nación (Argentina). Boletín Oficial N° 28.859 1ª Sección.
- [2] Resolución ENRE 1724/1998. Boletín Oficial n° 29.038, lunes 7 de diciembre de 1998, pp. 25-26.
- [3] IEEE Std. 644TM-1994 (R2008), "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines".
- [4] Cigré Technical Brochure 373 "Mitigation Techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems". WG C4.204, February 2009.
- [5] "Implementation of a tool for magnetic field mitigation using passive loops". C. A. Wall, P. L. Arnera, M. B. Barbieri. IEEE T&D LA Sixth IEEE/PES, 3-5 September 2012, Montevideo, Uruguay.
- [6] "Development of software for magnetic field calculation and mitigation using passive loops". 3rd Cigré International Colloquium on Electric and Magnetic Fields at Extremely Low Frequencies (EMF-ELF 2013), 15-16 October 2013, Nara, Japan. C. A. Wall, P. L. Arnera, M. B. Barbieri.