

Atenuación de campos magnéticos en estaciones transformadoras y centro de transformación

Eduardo Spittle, Martín Higes, Marcelo Hodes, Gustavo Tarsia, Roberto Wulf, Diego Díaz y Javier Iorio
Departamento de Ingeniería Eléctrica
UTN Regional Buenos Aires
www.frba.utn.edu.ar

Resumen

Las experiencias de Oersted, Biot, Savart y Ampere permitieron explicar desde principios del Siglo XIX que la corriente eléctrica es la fuente de campos magnéticos, por lo tanto, todas las instalaciones eléctricas ya sean en los niveles de generación, transmisión, distribución y usuarios o consumidores finales son fuentes de campos magnéticos.

Existen distintas normativas internacionales que acotan los valores de emisión de campos electromagnéticos para instalaciones en servicio.

La Resolución ENRE 1724/98 vigente fija el límite superior en 25 mT y obliga a los actores a que adecuen las instalaciones que superen el mismo.

El proyecto consiste en el análisis e interpretación de las mediciones de Laboratorio realizadas sobre campos magnéticos en aire y utilizando distintos metales como pantallas magnéticas, que permiten evaluar su comportamiento. Se realiza un especial enfoque en estas pantallas, describiendo la influencia de sus espesores, y su configuración geométrica. Se describen soluciones técnicas aplicadas en instalaciones en servicio, se evalúan las configuraciones actuales de los equipos electromecánicos y se recomiendan soluciones técnicas

Introducción

El sustento teórico del presente trabajo lo constituyen la Ley de Biot – Savart; la Ley de Ampère y la definición de la Profundidad de Penetración de Ondas Planas.

Las dos leyes enunciadas permiten evaluar en forma teórica los campos magnéticos generados por las corrientes eléctricas, mientras que el concepto de profundidad de penetración explica como las placas conductoras atenúan dichos campos y hacen posible su empleo en las técnicas de control pasivo.

La Ley de Biot-Savart permite calcular los campos magnéticos generados por las cargas en movimiento (figura 1) de acuerdo a su expresión general (ecuación 1).

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot i}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot d\vec{l} \times \vec{r}$$

Ecuación 1

La Ley de Ampere es aplicable a los casos donde existe simetría del campo magnético (ejemplo conductores rectilíneos de longitud infinita, solenoides y tiroides ideales, etc.).

Para el caso de un conductor de longitud infinita se considera válida la ecuación 2:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i$$

Ecuación 2

donde:

$d\vec{B}$: Diferencial de campo magnético.

\vec{B} : Vector campo magnético.

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío.

i : Corriente eléctrica instantánea.

$d\vec{l}$: Diferencial de longitud.

\vec{r} : Versor posición.

La Profundidad de Penetración considera que la atenuación del campo magnético, es la consecuencia del efecto de las corrientes de Foucault sobre láminas conductoras que se interponen

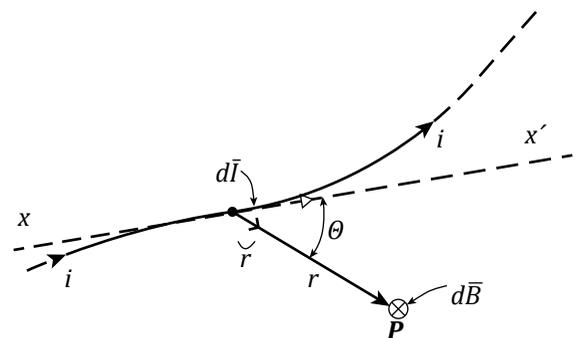


Figura 1. Campo magnético en un punto "P"

con la fuente de campo (figura 2) y se define según (ecuación 3).

$$\delta = \frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}$$

Ecuación 3

Para la profundidad de penetración “ d ”, la amplitud del módulo resultante de $|\vec{B}|$ se atenúa e^{-1} (%), y definiremos entonces la eficiencia del blindaje según la ecuación 4:

$$\eta = 1 - \frac{|\vec{B}_f|}{|\vec{B}_i|}$$

Ecuación 4

donde:

d : Profundidad de penetración.

f : Frecuencia.

μ_0 : Permeabilidad magnética del vacío.

μ_r : Permeabilidad relativa.

σ : Conductividad eléctrica.

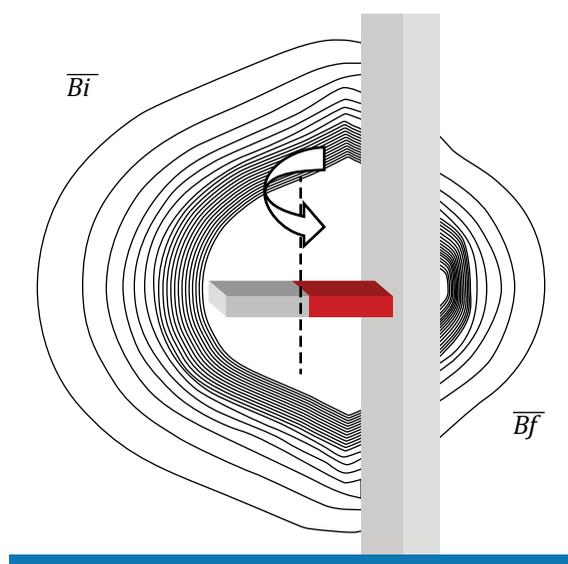
η : Eficiencia del blindaje.

$|\vec{B}_i|$: Campo magnético inicial.

$|\vec{B}_f|$: Campo magnético final.

Mediciones de laboratorio

Las mediciones de laboratorio se realizaron sobre muestras de materiales comerciales, verificándose la respuesta frente a campos magnéticos externos de frecuencia industrial, de modo de:

Figura 2. Efecto de atenuación de \vec{B}

Material	Espesor (mm)	μ_r	s (s/m)	f (Hz)	δ
Cu	0,50	1	$5.8 \cdot 10^7$	50	9,4
Al	0,50	1	$3.78 \cdot 10^8$	50	11,6
Fe galvanizado	0,80	3,9	$7.9 \cdot 10^7$	50	1,3
Fe-Si gr. no orientado	0,50	210	$8.4 \cdot 10^7$	50	0,53
Fe-Si gr. orientado	0,27	275	$8.4 \cdot 10^7$	50	0,47

Figura 3. Propiedades de los materiales utilizados

- ▶ Verificar la atenuación del campo en función de la distancia en aire y en presencia de pantallas magnéticas (ver numeral 2.1).
- ▶ Analizar la influencia del espesor de la pantalla magnética y su relación con la profundidad de penetración teórica (ver numeral 2.2).
- ▶ Estudiar la influencia de la forma de las pantallas magnéticas (ver numeral 2.3).
- ▶ Describir las ventajas de adoptar un apantallamiento múltiple (ver numeral 2.4).
- ▶ Verificar el efecto de borde en la periferia de la pantalla (ver numeral 2.5)
- ▶ Comparar el campo magnético generado en conductores con disposición coplanar y en tresbolillo (ver numeral 2.6).

Se utilizó como generador de campo magnético a un conductor rectilíneo alimentado con una fuente de corriente de 50 Hz. y las lecturas se registraron en un medidor triaxial multirango. La conductividad de las muestras se obtuvieron mediante un puente doble de Thompson y su permeabilidad relativa, por mediciones indirectas a través de toroides construidos para tal fin.

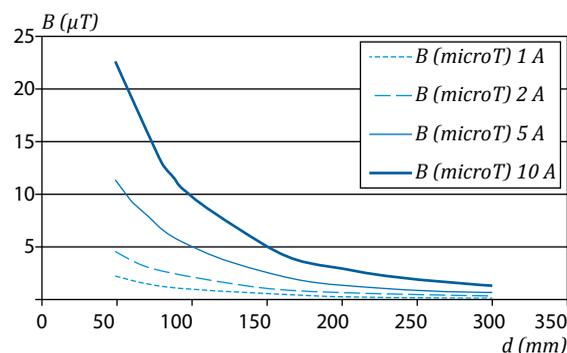


Figura 4. Campo magnético en aire.

La tabla de la (figura 3) contiene el resumen de los valores medidos y la profundidad de penetración d calculada para cada una de las muestras aplicando la ecuación 3.

Atenuación del campo magnético en función de la distancia:

Se midió las componentes horizontal y vertical del campo magnético en aire para distintos valores de la corriente eléctrica, se determinó el módulo del vector resultante y graficó en función de la distancia horizontal " d " medida desde la fuente, verificándose la ecuación 1 (figura 4).

A continuación se realizaron las mediciones de inducción magnética para una intensidad de corriente de 10 A en aire e interponiendo la lámina de Fe-Si de grano orientado Gr.M4 y 0,27 mm de espesor, poniéndose en evidencia la atenuación del campo magnético por el efecto de la pantalla (corrientes inducidas en la muestra de Fe-Si utilizada). Ver figura 5.

Influencia del espesor de la pantalla:

Para una corriente de 10 A, e intercalando distintos espesores de pantalla de Fe-Si de grano orientado Gr.M4, se realizaron las mediciones de las componentes horizontal y vertical del campo magnético, calculando el vector resultante. Se demuestra así que si el espesor de la pantalla supera la profundidad de penetración d , la atenuación de la inducción magnética no es significativa (figura 6).

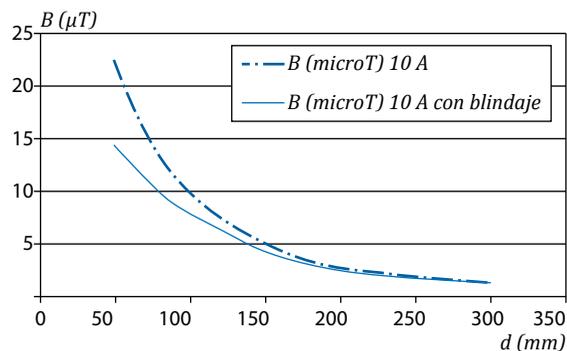


Figura 5. Campo magnético sin/con pantalla

Apantallamiento múltiple:

Para el esquema de la figura 7 y con una corriente de 60 A se realizaron las mediciones de las componentes horizontal y vertical del campo magnético a una distancia " $d_2 = 300$ mm", calculando el vector resultante $B_0 = 9,95$ mT.

Con la misma cantidad de material se realizaron las mediciones del campo magnético, repartiéndolas en dos pantallas iguales. La pantalla 2 modifica su posición en cada medición, respecto de la posición fija del medidor de campo magnético (figura 8), de modo de evaluar el comportamiento del apantallamiento múltiple.

Los resultados obtenidos se reflejan en las figuras 9 y 10, observándose un mejor comportamiento del apantallamiento compuesto respecto de una única pantalla.

d_2 [mm]	B (μT)	B/B_0 [%]
275	8,70	87,44%
260	8,68	87,19%
250	8,60	86,43%
200	8,40	84,42%
150	8,35	83,92%
120	8,25	82,91%
100	8,18	82,16%
70	7,83	78,64%
50	6,80	68,34%
40	5,50	55,28%

Figura 9. Mediciones.

Efecto de borde en el límite de la pantalla:

Las mediciones realizadas en el borde de una lámina en el laboratorio nos da: a) 13,2 μT detrás de la lámina.; b) 28,8 μT en el borde de la lámina;

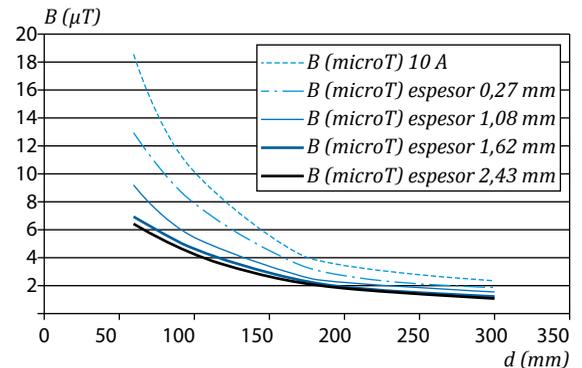


Figura 6. Influencia del espesor de la pantalla.

c) $23,4 \mu\text{T}$ en aire, sin pantalla magnética (figura 11).

Influencia de la disposición de los conductores:

Se dispusieron conductores rectilíneos en forma coplanar separados un diámetro entre ellos y se los alimentó con un sistema trifásico y carga equilibrada. Para una corriente de 10 A se registró un campo B resultante de 8 mT medidos a 0,10 m del plano de instalación de los cables (figura 12).

Dispuestos ahora los conductores en tresbolillo, con las mismas condiciones de alimentación y carga se registró un campo B resultante de 5 mT medido a la misma distancia (figura 13). Representa una reducción del 35 % respecto del campo magnético medido en la disposición coplanar.

Experiencias de campo

Estación transformadora de 220/132/13,2 kV - 2x300 MVA

Valor del campo magnético proyectado antes de la remediación 45 mT medidos en la montante que se desarrolla sobre la pared medianera (figura 14). La adecuación consistió en instalar chapas de Fe-Si adheridas a la pared de hormigón con el empleo de cemento de contacto y curvándolas (donde fuera posible) para evitar la concentración del campo en los extremos (efecto de borde). Se

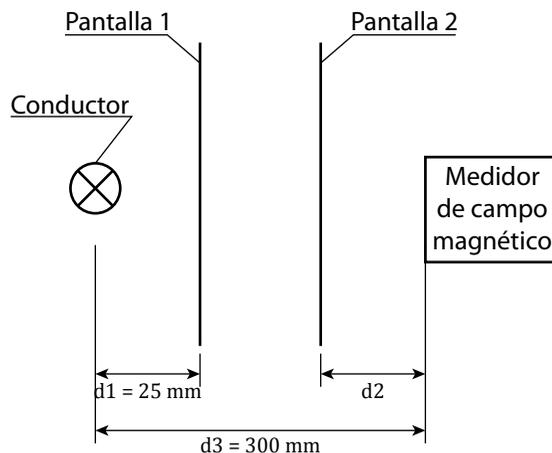


Figura 8. Influencia de la pantalla 1 y 2.

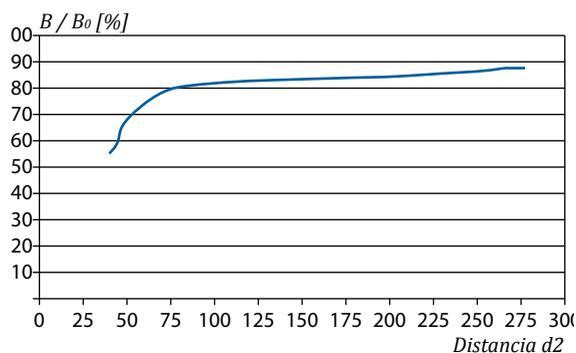


Figura 10. Apantallamiento compuesto.

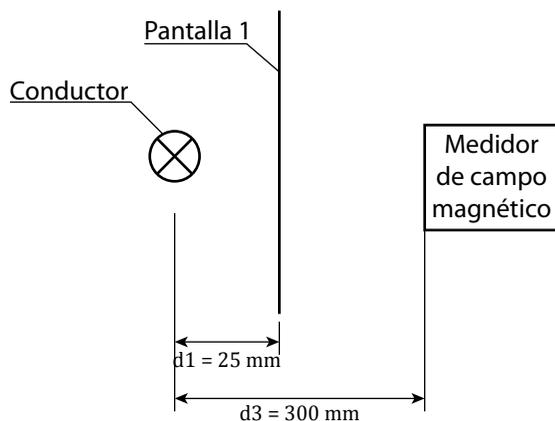


Figura 7. Influencia de la pantalla 1.

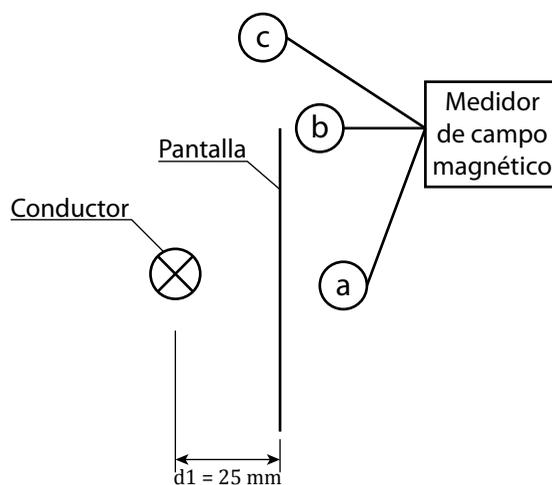


Figura 11. Efecto de borde.

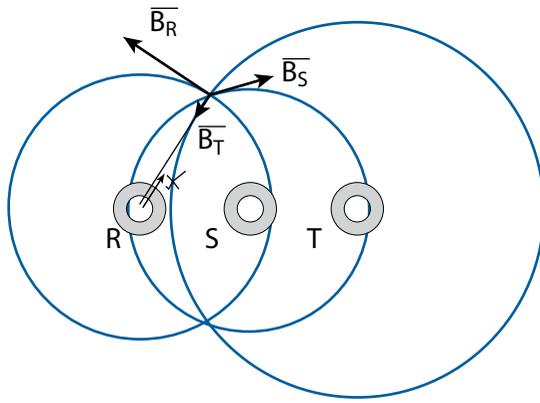


Figura 12. Campos magnéticos en una disposición coplanar.

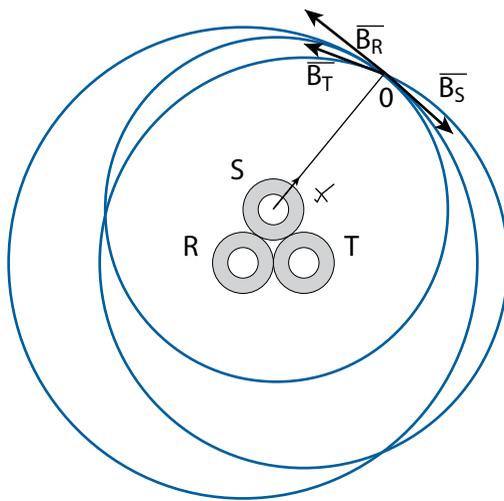


Figura 13. Campos magnéticos en una disposición en tresbolillo.



Figura 15. Instalación de pantalla magnética detrás del tablero de BT.

obtuvieron valores de B proyectados de 15 mT. Eficiencia de la medida técnica $h = 0,67$.

Cámara transformadora 13,2/0,4-0,231 kV - 1250 KVA

Valor del campo magnético proyectado antes de la remediación 35 mT- Se retiraron las barras de BT que vinculaban el transformador y el tablero colocándose bandeja portacables con conductores unipolares y placas de Fe-Si en el cielorraso y por encima de la bandeja y se obtuvieron valores proyectados de $B=6$ mT (figura 16). Eficiencia lograda $h=0,83$.

Recomendaciones constructivas

Disposición típica de una cámara transformadora

Para la cámara transformadora de la (figura 17) formulamos las siguientes recomendaciones que se ilustran en la (figura 18): a) Reemplazar las barras de BT entre el transformador y el tablero, por conductores unipolares dispuestos en tresbolillo sobre bandeja. b) Rotar el transformador para alejar los aisladores de BT respecto de la pared. Instalando una pantalla de material ferromagnético. c) Instalar una pantalla de material ferromagnético en la parte posterior del tablero de BT. c) La conexión del neutro del transformador y el electrodo de la puesta a tierra deben ser coincidentes o en su defecto estar separadas por la mínima distancia.

Efecto de borde en el límite de la pantalla:

Se recomienda instalar las pantallas con sus extremos curvados conforme a las líneas de



Figura 16. Conductores unipolares dispuestos en tresbolillo sobre bandeja.

campo magnético generadas por la fuente en estudio. En la (figura 19) se observa además, el apantallamiento múltiple analizado en 2.3 y el curvado de las pantallas precisado.

Disposición de conductores en tresbolillo

Los cables de salida en BT desde el transformador al tablero, se dispondrán en tresbolillo de acuerdo al detalle de la (figura 20), de modo de optimizar la distribución de corrientes entre sí e igualar la inducción magnética.

Conclusiones

El control pasivo de campos magnéticos da una respuesta satisfactoria y de bajo costo para la adecuación de Estaciones Transformadoras AT/BT y Centros de transformación MT/BT en los que los niveles de campos magnéticos esperados superen los 25 mT.

El empleo de las chapas de Fe-Si laminadas en caliente, son la respuesta técnica – económica óptima para aplicaciones en baja frecuencia. No es recomendable adoptar espesores de pantalla magnética superiores a la profundidad de penetración d , pudiéndose adoptar - de ser necesario - el apantallamiento múltiple y curvando los extremos en todos los casos para evitar los efectos de borde.

Para las instalaciones en servicio y durante la etapa de proyecto de las nuevas, se sugiere adoptar las disposiciones constructivas recomendadas, evaluando su desempeño mediante la simulación con softwares específicos. ■



Figura 19. Curvado de las pantallas.

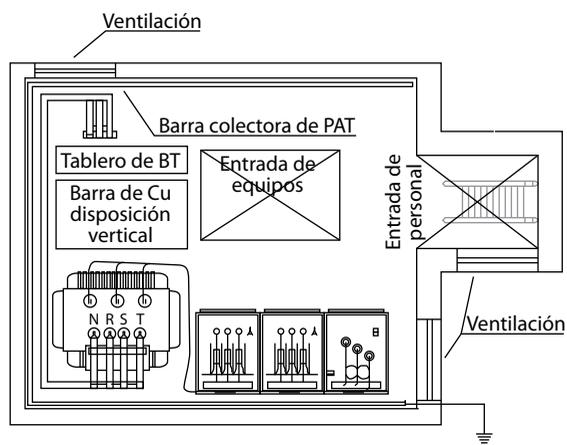


Figura 17. Cámara transformadora típica.

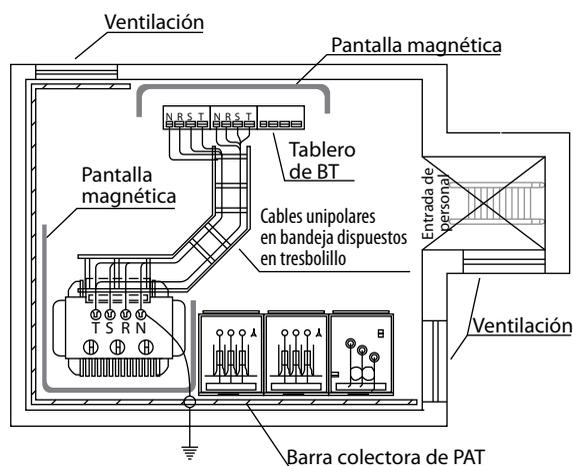


Figura 18. Cámara transformadora adecuada

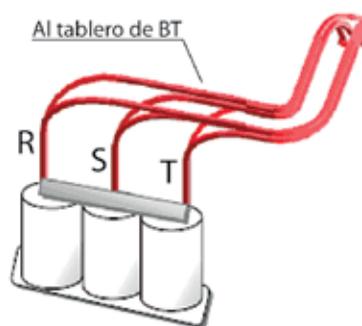


Figura 20. Disposición de cables de BT en bandeja.