

CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS EN ELECTRODUCTOS, MEDICION Y CALCULO. COMPARACION DE DISEÑOS DE LINEAS

Ing. Patricia L. ARNERA
IITREE-LAT
Argentina

Ing. M. Beatriz BARBIERI
IITREE-LAT
Argentina

Ing. Daniel A. ESTEBAN
IITREE-LAT
Argentina

RESUMEN

Se realizaron mediciones de campo eléctrico y magnético, a nivel del suelo, en un sector rural del sistema de transmisión en 500 kV del Sistema Argentino De Interconexión (SADI).

Las mediciones se comparan con los resultados obtenidos por cálculo a fin de validar el modelo.

A partir del mismo se analizan valores de campo eléctrico y magnético obtenidos para diseños de líneas en 500 kV del tipo "tradicional" y compactas

PALABRAS CLAVES

Campos eléctricos - Campos magnéticos - Medición - Modelos

1. INTRODUCCION.

A fin de evaluar y validar modelos desarrollados para el cálculo de perfiles de campo eléctrico y magnético, asociados a electroductos, se efectuaron mediciones en campo para contrastar los resultados obtenidos.

Se presentan los procedimientos de medición y los instrumentos.

Previo a la medición se relevaron las características de la línea, se trata de una doble terna coplanar horizontal en 500 kV, conductores Dove, conformando haz con 4 subconductores, separados 0,45m.

Posteriormente, con el modelo validado se realizan cálculos, considerando como diseño básico de estructura para la línea, la estructura en V arriostada indicando para la misma un despeje mínimo al suelo de 14,5 m., se comparan los valores de campo para una estructura del tipo "compacta" reconocida como Cross Rope Suspension (CRS), para la que se prevé un despeje mínimo de 11,5 m, para el estado de temperatura máxima (55°C y sin viento).

Validado el modelo se determinan por cálculo los perfiles de: campo eléctrico para mínima altura de los conductores, campo magnético para mínima altura de conductores y máxima corriente en las fases

2. CAMPO ELECTRICO

2.1. Procedimiento de Medición

Las mediciones se realizan disponiendo el sensor sobre un soporte dieléctrico ajustado para que quede posicionado a una altura de 1 metro sobre el nivel del terreno, de acuerdo a lo indicado por las normas, [1] y [2]. Luego se lo desplaza en sentido transversal a la línea partiendo desde el centro de su traza y registrando los niveles de campo a distancias predeterminadas a ambos lados del centro.

Como la distribución de campo eléctrico es sensible a la presencia de objetos tanto metálicos como dieléctricos, se debe verificar que el personal que realiza las distintas tareas durante la medición no afecte con su cercanía al sensor la precisión de las mediciones. El mismo cuidado debe tenerse con la presencia de vehículos y objetos que no son propios del lugar.

2.2. Instrumento de Medición

Características Generales

- Sensor de campo: Dipolo esférico de 0,12 m de radio con conversor análogo-digital de 12 bits y transmisor-receptor de fibra óptica incorporado.
- Receptor de datos: Conversor digital-analógico de 12 bits con salida de $\pm 10V$.
- Enlace sensor-receptor: Fibra óptica, digital con longitud máxima de 1 Km.
- Ancho de banda: 0, 1 Hz a 2,5 kHz a - 3dB.

Factor de trasducción: Correspondiente a campo eléctrico uniforme equivalente perpendicular al ecuador del dipolo esférico.

$$E \left[\frac{V}{m} \right] = K U_0 [V]$$

$$K = 13,5 ; 1,69 ; 0,211 ; 0,0264 \left[\frac{10^3}{m} \right]$$

- Exactitud: $\pm 5 \%$ de fondo de escala.
- Alimentación: Baterías recargables con 8 horas de autonomía.

- Temperatura de funcionamiento: 0 a + 40°C.

Calibración

El procedimiento de calibración utilizado se basa en los lineamientos indicados en las normas, [1] y [2]. El sensor a calibrar se introduce en la zona central entre dos placas paralelas separadas una distancia conocida H y a las que se le aplica una diferencia de potencial U también conocida.

Para la generación del campo eléctrico se disponen dos superficies conductoras horizontales de 2 m x 3 m separadas entre sí una distancia H = 2 m. La superficie inferior (B) se dispone a 0,8 m del nivel del piso de la sala de ensayo. A la superficie superior (A) se le aplica una diferencia de potencial conocida U_{AB} respecto a la inferior (B) que está conectada a potencial cero. El sensor a contrastar se localiza en la zona central entre las dos placas a una distancia variable (X) con referencia al nivel de la superficie inferior que se toma como referencia cero de coordenadas. El desplazamiento del sensor se realiza siguiendo un camino en línea recta perpendicular a los planos definidos por las superficies A y B. En la Figura 1 se indica esquemáticamente la disposición descrita.

Como las placas tienen dimensiones finitas, largo y ancho, la magnitud del campo eléctrico no es constante en los distintos puntos en los que se posiciona el sensor. Para salvar esta dificultad se realiza una integración numérica de la ecuación :

$$U_{AB} = \int_0^H \vec{E}(x) dx \quad (1)$$

Donde : U_{AB} = Diferencia de potencial entre placas [V]

$\vec{E}(x)$ = Campo eléctrico [V/m]

x = Coordenada en la dirección transversal a la superficie de las placas [m]

H = Separación entre placas [m]

La integración numérica de la ecuación (1) puede expresarse como :

$$U_{AB} = \sum_{n=0}^{n=N} E(n) \Delta X_n \quad (2)$$

Donde : U_{AB} = Diferencia de potencial entre placas [V]

$E_{(n)} = E\left(\frac{X_n + X_{n+1}}{2}\right)$ = Campo eléctrico en el punto medio entre X_n y X_{n+1} [V/m]

$\Delta X_n = (X_{n+1} - X_n)$ = Incremento de distancia entre el punto n + 1 y n . [m]

Siendo que el verdadero nivel de campo es desconocido ya que no se conoce la constante de transducción k del sensor se deberá escribir :

$$E_{(n)} = k \cdot (U_{mn}) \quad (3)$$

Donde : k = Constante de transducción $\left[\frac{1}{m}\right]$

U_{mn} = Tensión generada por el transductor (valor medido en el punto n) [V]

Reemplazando la (3) en (2) resulta :

$$U_{AB} = \sum_{n=0}^{n=N} k \cdot U(mn) \Delta X_n = k \cdot \sum_{n=0}^{n=N} U(mn) \Delta X_n$$

Luego :

$$k = \frac{U_{AB}}{\sum_{n=0}^{n=N} U(mn) \Delta X_n} \left[\frac{1}{m}\right] \quad (4)$$

La expresión (4) permite calcular la constante de transducción k del sensor a partir de la diferencia de potencial entre placas U_{AB} y las tensiones producidas por el sensor, U_{mn} , en cada punto n al recorrer un camino entre la placa A y la B.

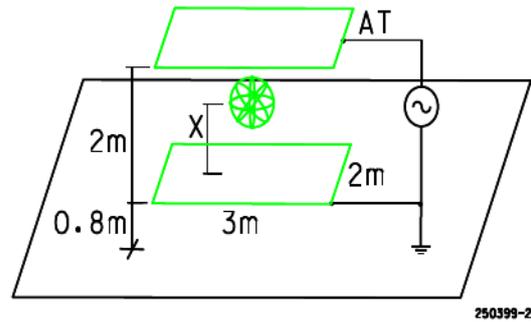


Figura 1

2.3. Modelo de cálculo

Desde el punto de vista de la influencia electrostática sobre objetos y seres vivos en las cercanías de instalaciones eléctricas de muy alta tensión, el parámetro más representativo del fenómeno de inducción es el valor del campo eléctrico no perturbado.

El método de cálculo empleado es el de las imágenes electrostáticas. El campo eléctrico resultante se obtiene de sumar en módulo y fase cada uno de los campos eléctricos cuasiestacionarios individuales asociados a cada uno de los conductores. Dado que la misma se realiza a nivel del terreno, solo existirán las componentes perpendiculares de cada campo individual.

El modelo de cálculo para líneas de transmisión considera conductores cilíndricos, de longitud infinita y ubicados paralelos al suelo a una cierta altura (a determinar como dato).

Así se obtienen los perfiles transversales del módulo y la fase del campo eléctrico al suelo, en sentido transversal a la traza de la línea, y hasta una cierta distancia de la misma.

3. CAMPO MAGNETICO

3.1. Procedimiento de Medición

Las mediciones se realizan a 1 metro de altura del terreno, a ambos lados a partir del centro de la traza de la línea y en sentido transversal a ésta. De acuerdo a lo recomendado por la norma, [1], el sensor se orienta hasta obtener la máxima lectura en cada punto.

La distribución del campo magnético es sensible a la presencia de objetos metálicos por lo que debe evitarse la presencia de vehículos u objetos que no sean propios del lugar.

3.2. Instrumento de Medición

Características generales

- Sensor de campo: Basado en el principio del detector de flujo nulo, aplicado a un núcleo ferromagnético abierto. Permite obtener alta sensibilidad, amplia respuesta en frecuencia, dimensiones reducidas y factor de transducción estable independiente de las características del material magnético y de los dispositivos electrónicos utilizados.
- Ancho de banda: 0, 6 Hz a 30 kHz a - 3dB.
- Factor de transducción: lectura directa en μT correspondiente a campo magnético uniforme equivalente paralelo el eje longitudinal del sensor.
- Rangos: 20 y 200 μT
- Exactitud: $\pm 3\%$ de fondo de escala.
- Alimentación: Baterías recargables con 8 horas de autonomía.
- Temperatura de funcionamiento: 0 a + 40°C.

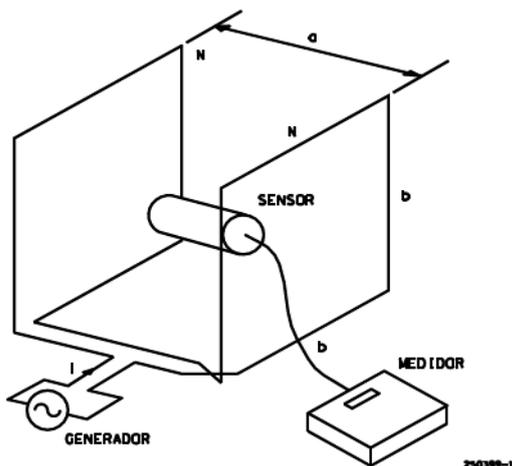


Figura 2

Calibración

En la Figura 2 se muestra la disposición de elementos durante la calibración. Para la geometría indicada el campo de referencia generado se determina por la expresión [3]:

$$B[\mu\text{T}] = 61,3 I [A]$$

Mediante una bobina de Helmholtz, método aceptado por la norma [1], se genera un campo magnético de amplitud y frecuencia conocida. Con el sensor localizado en la zona de campo uniforme se determina la constante de transducción en el rango de 50 Hz a 5 kHz con amplitudes entre 2 μT y 100 μT .

3.3. Modelo de cálculo

En base a la geometría de la línea, se determina el campo magnético a la altura del terreno perpendicular a la traza de la línea.

El campo magnético originado por la línea, tiene, en cada punto, dos componentes de magnitud apreciable: B_x (paralelo al terreno) y B_y (perpendicular al terreno) ambas con variaciones sinusoidales.

En un ciclo el vector campo magnético resultante cambia su dirección recorriendo un diagrama elipsoidal, existe un instante para el cual el módulo del mismo será máximo $B_{\text{máx}}$ (eje mayor de la elipse).

En cada punto el campo tiene una magnitud y dirección del campo máximo ($B_{\text{máx}}$) distinta, por lo tanto es útil establecer las dos componentes del campo en cada punto B_x , B_y y $B_{\text{máx}}$.

4. COMPARACION DE MEDICIONES Y CALCULO

El sistema en el que se realizaron las mediciones corresponde a la doble terna en 500 kV Comahue-Buenos Aires, en un tramo rural entre Henderson y Ezeiza.

Cada terna se compone de 3 conductores equivalentes de fase y dos cables de guardia.

La altura mínima de los conductores de fase en el momento de la medición resultó 15m para la LAT 1 y 16m para la LAT 2.

La separación entre conductores se tomó de 12,5 m. La altura mínima de los conductores de guardia se supuso entre 27 m para LAT 1 y 28 m para la LAT 2 y ubicados a 9 m de la fase central y a ambos lados de la misma. La separación entre las fases centrales de ambas ternas es 62.5 m.

La secuencia de energización de los conductores en dicho tramo es : S R T (LAT 1) T S R (LAT 2), considerando el orden desde distancias más alejadas del tambor hacia la zona del tambor.

En el momento de la medición la corriente de carga era 680 A.

La disposición de los conductores es:

Ubicación conductores de fase:

R1	x= -50 m	y= 15 m
S1	x= -37.46 m	y= 15 m
T1	x= -24.92 m	y= 15 m
T2	x= 12.54 m	y= 16 m
S2	x= 25.08 m	y= 16 m
R2	x= 37.62 m	y= 16 m

Ubicación cables de guardia

CG1	x= -46.56 m	y= 27 m
CG2	x= -28.36 m	y= 27 m
CG3	x= 15.98 m	y= 28 m
CG4	x= 34.18 m	y= 28 m

En la Figura 3 se comparan los valores medidos y calculados del perfil transversal de campo eléctrico. En línea continua se representan los valores calculados y las cruces corresponden a los valores medidos.

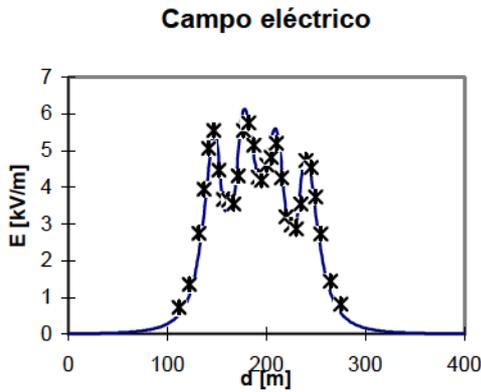


Figura 3- Comparación cálculo y medición de campo eléctrico

Comparación B medido y cálculo

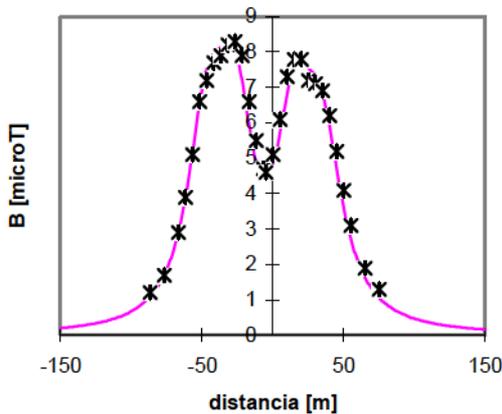


Figura 4- Comparación cálculo y medición de campo magnético máximo.

En la Figura 4 se comparan los valores máximos de campo magnético registrado y el obtenido por cálculo.

Las comparaciones entre valores medidos y calculados, resultan satisfactorias.

A su vez en la Figura 5 se presentan los valores calculados de campo magnético máximo, Bmax, indicando las componentes en la dirección perpendicular al terreno By, y en la dirección paralela al terreno Bx. Bx se indica con trazos continuos, By con cruces y Bmax punteado.

Campo Magnético sobre el terreno

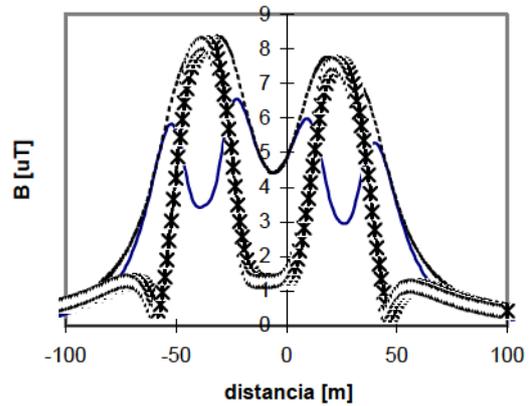


Figura 5- Componentes espaciales del campo magnético calculadas: Bx (continua); By (cruces) y Bmax (punteado).

5. COMPARACION PARA DISEÑOS DE LINEAS

El caso de comparación, corresponde a una simple terna en 500 kV, con diseño convencional y otra del tipo compacta.

La línea “tradicional” posee estructura en V arriostada indicando para la misma un despeje mínimo al suelo de 14,5 m, la separación entre conductores de fase es de 12,7 m y la disposición de los hilos de guardia respecto al centro de la torre es de 10,30 m.

La estructura del tipo “compacta” reconocida como Cross Rope Suspension (CRS), para la que se prevé un despeje mínimo de 11,5 m, la separación entre los conductores de fase es de 7m y la disposición de los hilos de guardia es de 13,75 m respecto al centro de la torre.

Para ambos casos se calculan los perfiles de campo eléctrico y magnético presentados en las figuras 6 y 7, respectivamente.

Para determinar el perfil del campo magnético, se han considerado las alturas mínimas para ambos diseños de torre, para una corriente máxima de 1400 A.

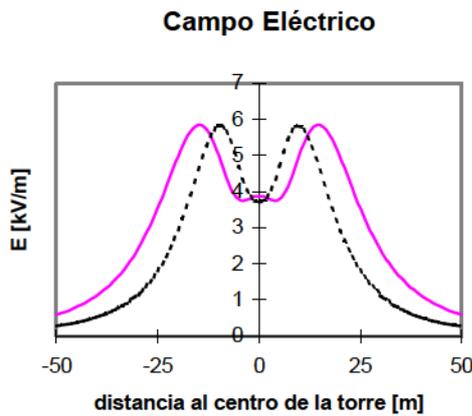


Figura 6- Comparación del perfil de campo eléctrico para una línea compacta (línea de puntos) y tradicional.

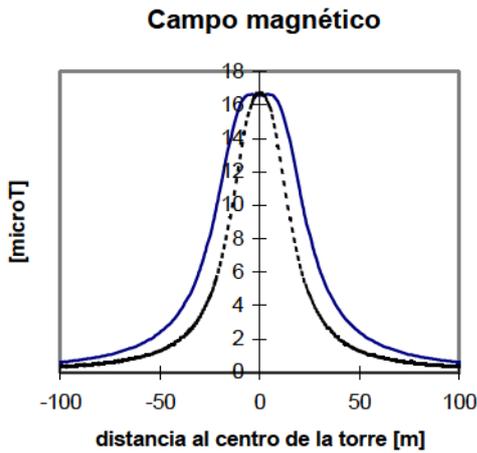


Figura 7- Comparación del perfil de campo magnético para una línea compacta (línea de puntos) y tradicional.

6. CONCLUSIONES

- El método de cálculo de campo eléctrico y magnético resultó más que satisfactorio, dando valores de campo muy próximos a los medidos (apartamientos inferiores a 15%).
- En lo que respecta a los campos eléctricos y magnéticos, considerar el diseño de línea CRS propuesta. no introduce inconvenientes adicionales a los aspectos que corresponden a la seguridad de las personas.
- El valor máximo de *campo eléctrico* para ambos diseños de líneas es inferior a 6 kV/m, por lo tanto considerando la corriente de descarga que circula a través de una persona en contacto con un vehículo, no surgen restricciones de franja de servidumbre para cruce de carretera ($E < 7,6$ kV/m).
- Los valores máximos de *campo magnético* para ambos diseños son inferiores a 170 mG, siendo por ejemplo 200 mG el valor de referencia adoptado para el borde de la franja de servidumbre en Florida (USA), [4] y [5].

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. ANSI/IEEE 644-1987- "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines".
- [2]. IEC 833- 1987- " Measurement of power-frequency electric fields"
- [3]. DIN 45410- "Inmunidad a las perturbaciones de instrumentos electroacústicos, procedimientos de medición y magnitudes de medición"
- [4]. Florida's Perspective on EMF Policy Issues, Hamilton S. Oven, Florida Department of Environmental Regulation.
- [5]. Electric and Magnetic Fields Potential Health Concerns. Hamilton S. Oven, Florida Department of Environmental Regulation