



## CÁLCULO DE VALORES DE CAMPO MAGNÉTICO EN INSTALACIONES DE MT

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

**P. L. ARNERA**  
IITREE-LAT-FI-UNLP  
Argentina

**M. B. BARBIERI**  
IITREE-LAT-FI-UNLP  
Argentina

**Resumen** – *En este trabajo, se presenta la metodología utilizada para la determinación de valores de campo magnético originados por instalaciones eléctricas. Se indican algunos aspectos relacionados con la normativa en lo que respecta a límites de campo magnético (B) en la vía pública y criterios de medición.*

*Se indica en forma concisa la información con que se debe contar para realizar un estudio de simulación de campo B.*

*Por último se presentan los resultados obtenidos en simulaciones correspondientes a puestos de transformación típicos que se pueden encontrar en la República Argentina, con dos diferentes alternativas de diseño que consideran la alimentación de los mismos a través de líneas aéreas o cables subterráneos.*

**Palabras clave:** Campo Magnético – Mitigación - Puestos de Transformación

### 1 INTRODUCCIÓN

El uso de la energía eléctrica se encuentra asociado a la existencia de campos magnéticos, ya sea generado por equipamientos o instalaciones domiciliarias o bien por instalaciones de las empresas eléctricas. Los valores de campo magnético máximo, correspondientes a instalaciones de las empresas eléctricas, se encuentran en las inmediaciones de estaciones transformadoras, centros de transformación, líneas de transmisión y distribución, cables subterráneos, puestos de transición, líneas y cables de distribución, etc.

Con el objeto de cumplir con parámetros ambientales en el área pública, los valores de campo magnético de baja frecuencia (50 o 60 Hz), deben permanecer por debajo de ciertos valores permitidos por la reglamentación vigente.

A su vez, la sociedad ha tomado un interés especial en los campos magnéticos al vincularlos con problemas en la salud de las personas, no obstante el requerimiento de energía eléctrica por parte de la misma sociedad tiende a crecer con el tiempo, debido al incremento de equipamiento eléctrico tanto en las viviendas residenciales como en los lugares de trabajo.

Como consecuencia de esto surge la necesidad de implementar medidas para mantener los niveles de campo magnético por debajo de los límites adoptados por los organismos reguladores, es aquí donde entran en juego las herramientas de cálculo que permiten conocer los valores de campo magnético y evaluar distintas opciones de mitigación, a fin determinar la alternativa que brinde un mejor desempeño técnico económico a la hora escoger e implementar una de ellas.

En este trabajo, se presenta la metodología utilizada para la determinación de valores de campo magnético, los resultados obtenidos en simulaciones de centros de transformación y alternativas de diseño.

### 2 GENERALIDADES

#### 2.1 Objetivo

El objeto es determinar si los posibles niveles máximos de campo magnético y eléctrico, originados por las nuevas instalaciones y las existentes en las zonas externas, cumplen los requisitos de la normativa vigente. En la República Argentina el límite para el campo magnético en la vía pública es de 25  $\mu\text{T}$  (o bien 250 mG), esto considerando la Resolución SE 0077/1998 [1], válida en las zonas en que este organismo tiene competencia, estos límites corresponden a valores de campo magnético en la vía pública a 1 metro del suelo.

Para lograr este objetivo se realiza un modelo en tres dimensiones de las instalaciones que incluye las principales fuentes de campo magnético. A partir de este modelo, mediante un software especializado, se realiza el cálculo. Finalmente, los resultados obtenidos son procesados para generar distintos tipos de gráficas utilizadas para representar los resultados.

## 2.2 Información necesaria para realizar estudios de campo magnético

Antes de comenzar un estudio para el cálculo de campo magnético, es necesario reunir toda la información que permite elaborar el modelo que se utilizará para realizar los cálculos, esta información se detalla a continuación:

- Layout de toda la subestación
- Trazas de cables o líneas aéreas en las inmediaciones
- Característica de cables (monofásicos, trifásicos, sección, etc.) o líneas aéreas
- Disposición de los conductores
- Características de las celdas (planos en donde se detalle la entrada y salida de cables y la disposición de las barras)
- Planos de detalle de:
  - Acometida al Transformador
  - Celdas
  - Banco de capacitores
- Potencia del banco de capacitores
- Cargas
- Datos del transformador:
  - Potencia
  - Grupo de conexiones
  - Características de placa
- Las corrientes que se deben considerar (nominales y máximas e incluso si se consideran algunos casos particulares por ejemplo con desbalances).
- Diferencias entre los niveles del terreno (por ejemplo nivel de la vereda, nivel del piso de la estación, nivel de la calle, otros niveles de diferentes puntos en donde se pretende realizar el cálculo de campo magnético).

Estos datos permiten elaborar un modelo tridimensional en el cual se disponen, en un sistema global de coordenadas, todos los conductores por los que circulan las corrientes que aportan al campo magnético.

Antes de la elaboración de cualquier tipo de estudios, para modelar nuevas instalaciones o realizar ampliaciones de instalaciones existentes, es conveniente realizar mediciones para conocer cuales son los valores de campo magnético antes de introducir una nueva instalación o ampliación de una existente.

## 2.3 Medición de Campo Magnético

Los procedimientos de medición, de campos magnéticos producidos por líneas e instalaciones de potencia, se encuentran normalizados por la norma internacional IEEE Std. 644-1994 [3].

Dado que el campo magnético es una magnitud vectorial variable en el tiempo, cuantificarlo con una magnitud escalar puede llevar a ambigüedades y resulta ser un poco más complejo que otras variables escalares variables en el tiempo como tensión o corriente ([4] y [5]).

Por esto la norma sugiere dos formas distintas de cuantificar el campo magnético, una para los medidores de un solo eje (con una sola bobina) y otra para los medidores de tres ejes, con tres bobinas ortogonales entre si. En ambos casos se supone que la variación de las componentes del campo es del tipo senoidal.

Un medidor de un eje mide el campo sólo en la dirección en que está orientado. Por esto la indicación del medidor depende de la orientación que el operador le da al instrumento. En cambio un medidor de tres ejes es sensible al campo magnético en las tres direcciones del espacio y por esto la indicación del medidor de

tres ejes es independiente de la orientación. Por los mismos motivos la indicación de un medidor de tres bobinas es siempre mayor (hasta un 41 %) a la indicación de un medidor de un solo eje.

Según la norma la indicación de un medidor de tres ejes, llamada campo resultante ( $B_R$ ), queda definida según la ecuación:

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (1)$$

donde  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$  son los valores eficaces de las componentes que definen al campo en cada una de las tres direcciones ortogonales del espacio. Cada componente es medida por una de las tres bobinas y son luego combinadas por el instrumento, ya sea analógica o digitalmente, como indica la ecuación (1).

## 2.4 Simulación de Campo Magnético

Para el cálculo se utiliza un software que permite el modelado en tres dimensiones de todos los conductores como segmentos finitos de corriente.

Los campos calculados siguen las recomendaciones de la norma para medidores de tres bobinas, por ser estos más representativos del mismo. Para determinar  $B_R$ , en una simulación, primero se debe calcular el valor eficaz de cada una de las tres componentes espaciales que definen al campo:  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$ . Esto se logra sumando el aporte de cada uno de los segmentos de corriente respetando la amplitud y fase relativa de su variación en el tiempo. Una vez obtenidos los valores eficaces  $B_x$ ,  $B_y$  y  $B_z$  numéricamente, se los combina como indica la ecuación (1) para calcular  $B_R$ .

Los resultados son presentados en forma de mapas y perfiles transversales o longitudinales de campo magnético, obtenidos a un metro de altura.

## 2.5 Información para simulación y el modelo

Además del layout, es de vital importancia conocer la disposición de los conductores, por ejemplo disposición coplanar o en trébol, y las distintas condiciones de carga en las que deben contemplarse los posibles casos de desbalance entre las fases.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es si se desea calcular los campos producidos por una ET existente o si se desea evaluar el proyecto de una ET que se construirá a futuro. Si se desea evaluar el efecto de una ET existente es posible representar en detalle todos los elementos que tienen influencia en los valores de campo y con esto es posible validar el modelo elaborado por medio de mediciones.

Si en cambio se elabora un proyecto de ampliación o de una instalación nueva, no se pueden realizar mediciones, pero este tipo de estudios permite evaluar distintas características constructivas y poder implementar la opción más conveniente o la que entregue un mejor resultado desde el punto de vista técnico económico.

Con los resultados obtenidos entonces es posible realizar una evaluación sobre el cumplimiento de los límites establecidos por la reglamentación vigente.

Con toda la información disponible se elabora el modelo en donde se contemplan todos los conductores en las correspondientes posiciones y a partir de allí se realizan los correspondientes cálculos ( $B_r(x,y,z)$ ).

Con estos resultados se elaboran distintos tipos de gráficos. Estos permiten realizar diferentes análisis y obtener información de diferentes puntos de la ET. Los gráficos pueden ser vistas en 3D con los valores de campo magnético superpuestos al modelo de la ET, para este mismo tipo de gráfico se puede mostrar la misma superposición desde una vista en planta, o vista cenital.

Otro tipo de gráfico útil es la misma vista pero en lugar de graficar una superficie con los diferentes valores de campo magnético, se vuelcan líneas que unen los puntos con iguales valores de campo magnético (curvas de nivel).

Por otro lado existen perfiles en 2D en los que se vuelcan valores de campo magnético, para cortes. A este tipo de gráficos los podemos clasificar en transversales y longitudinales. Los primeros pueden usarse para representar los valores de campo magnético a lo largo de una línea perpendicular al tendido de los conductores y el perfil longitudinal se puede utilizar para graficar el Campo B en todo el perímetro de de la ET a un metro del suelo y de la pared.

Estos dos perfiles son útiles ya que permiten en determinados puntos de la instalación, que surgen de los gráficos en 3D, determinar los lugares en donde se realizarán las mediciones de verificación u obtener un detalle más preciso de las zonas que requieren una mayor atención.

Para perfiles es de vital importancia indicar en un plano o en una fotografía satelital claramente el sitio al que corresponda cada perfil y sus coordenadas.

### **3 EJEMPLO – CASO PRÁCTICO**

#### **3.1 Características de la instalación**

A raíz de lo hasta aquí expuesto resulta interesante mostrar resultados obtenidos para un caso. Esto permite destacar la importancia de cada uno de los datos que debe aportar el interesado del estudio y aportar mayores detalles para la concreción del proyecto que se ajusten sin diferir de la realidad. Hay que recordar que en este tipo de estudios los resultados obtenidos son proporcionales a la calidad de los datos con que se cuenta.

Para la elaboración del estudio deben considerarse en primer lugar un plano en donde se representa el layout de las instalaciones intervinientes en el modelo, un ejemplo puede apreciarse en la Fig. 1. En la misma se presentan las trazas de los conductores (de entrada y salida), las barras de celdas y las de los transformadores con los vínculos correspondientes.

Otro detalle de vital importancia es contar con una vista en corte de las instalaciones. En la misma se deben indicar en forma clara las alturas del terreno en todos los puntos de interés. Hay que destacar aquí que los cálculos de Campo B deben realizarse a 1 m sobre el nivel del suelo, por tal motivo este detalle resulta de vital importancia, ya que un error en el nivel de referencia puede resultar en una errónea ubicación de alguno de los elementos y con esto un valor de cálculo de campo. Esto se reflejara a la hora de realizar mediciones para la validación del modelo.

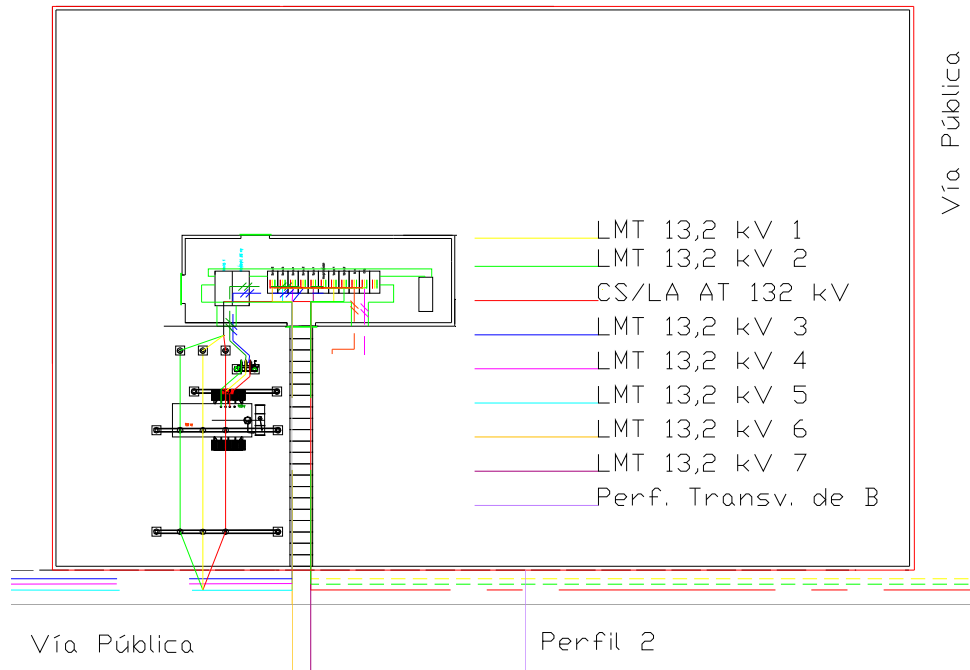
El caso aquí analizado contempla un transformador de 40 MVA, la acometida se realiza en 132 kV y las salidas en 13,2 kV. Se analizan dos posibles implementaciones para la acometida, a través de cable subterráneo (CS) o línea aérea (LA).

Con esto la corriente por los conductores de AT será de 175 A. Las salidas se realizan con siete ternas de cables subterráneos de MT y la corriente asignada es de 250 A cada una. Todas las corrientes se consideran balanceadas.

#### **3.2 Disposición de conductores**

La traza de los conductores en las inmediaciones de la instalación analizada reviste gran importancia, tanto en la propia instalación como en los alrededores. Otro factor es la correcta agrupación de los mismos, por ejemplo en el caso cables subterráneos si los mismos se disponen en trébol o coplanar y la separación entre ternas.

Para el caso que se presenta los conductores de MT son en 13,2 kV con conductores cuya sección es de 185 mm<sup>2</sup> en trébol, la misma agrupación para el caso de los conductores de 132 kV pero su sección es de 400 mm<sup>2</sup>. Para la variante de la LAAT la disposición de la misma es coplanar vertical con 1,6 m de separación entre fases.



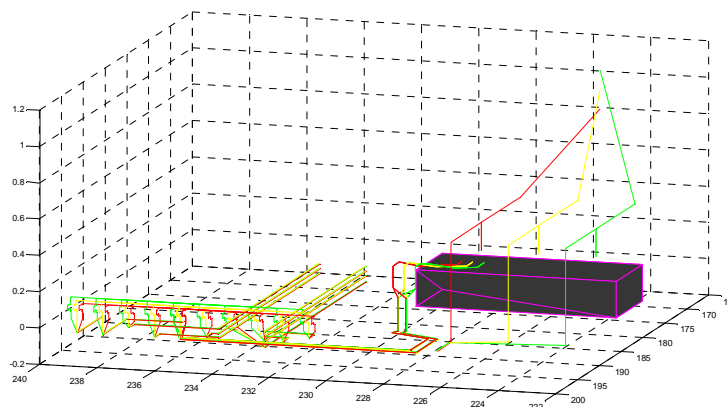
**Fig. 1** – Layout de la instalación

### 3.3 Elaboración del modelo y simulación

Una vez compilada toda la información se procede al armado y como resultado se obtiene un modelo en tres dimensiones con todos los conductores intervinientes representados.

El paso siguiente es asignarle a cada uno de estos la corriente correspondiente a los diferentes escenarios que serán evaluados, lo que incluye los diferentes desbalance si existieran.

En la Fig. 2 se puede apreciar un modelo armado con todos los conductores y las respectivas fases representadas por diferentes colores y la localización del transformador. En la misma se aprecia sólo los conductores ubicados dentro de la subestación. Se incluyeron las dos variantes analizadas.



**Fig. 2** – Modelo de los conductores para la simulación

Una vez definido y armado el modelo, lo que resta es efectuar simulaciones considerando los correspondientes casos, para lo que se consideran las diferentes variantes y escenarios. Es crucial en este punto definir cuáles son las áreas de interés, por lo general se considera un área que acompaña el perímetro de la subestación, tanto en la vía pública como en las propiedades privadas adyacentes. El área se compone por diferentes sub-áreas en donde se realizan los cálculos y que luego se interpolan linealmente para formar

nuevamente el área mencionada, la cantidad de puntos de las sub-áreas varía dependiendo del detalle que se desea, correspondiendo una mayor precisión en las regiones que puedan resultar críticas.

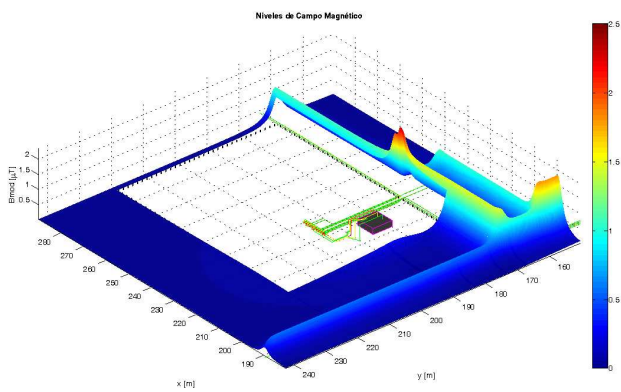
Otro factor de interés es considerar las corrientes y las respectivas fases de los conductores, y los sentidos de las mismas, se debe tener en cuenta las diferencias de ángulos de fases existentes entre el primario y secundario del transformador, para el caso analizado el mismo es de  $30^\circ$ .

#### 4 RESULTADOS

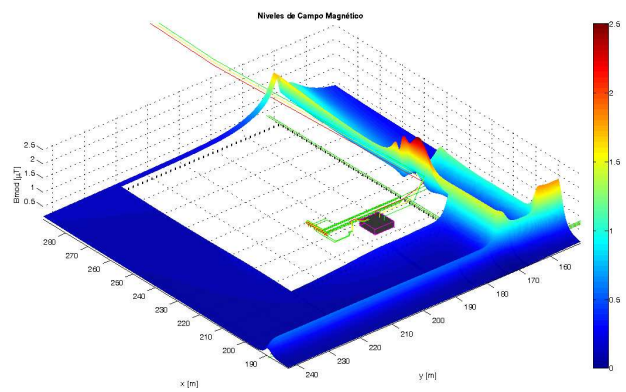
Los resultados que se obtienen son valores que se pueden graficar de distintas formas, tal como los descritos anteriormente. De cada uno de ellos es posible obtener diferente información.

A continuación se presentan los resultados para los casos contemplados de alimentación en 132 kV con cable subterráneo (CS) y línea aérea (LA).

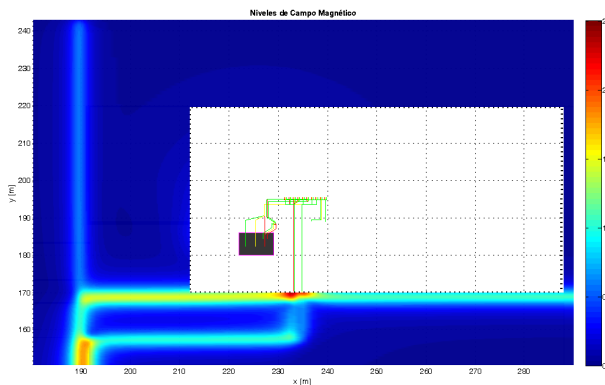
En la Fig. 3 y 4 se aprecian imágenes en 3D de los valores de Campo B en toda la periferia de la instalación y los elementos que intervienen en los modelos considerados, en la Fig. 5 y 6 se observa la misma información desde una vista en planta.



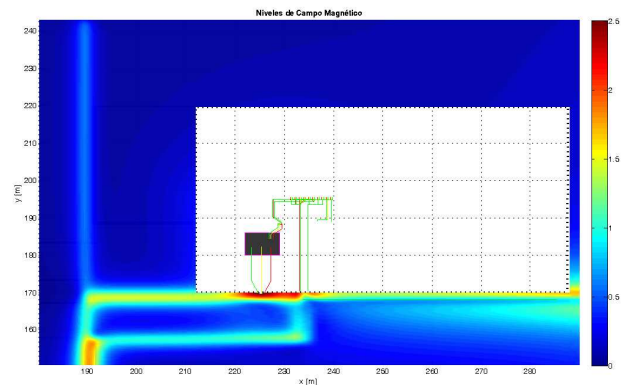
**Fig. 3** – Vista 3D de la instalación y B - CS



**Fig. 4** – Vista 3D de la instalación y B - LA

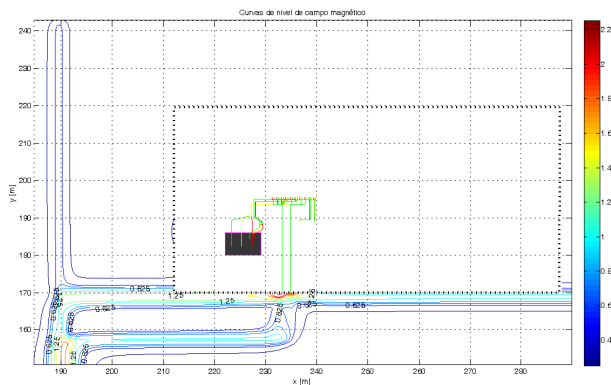


**Fig. 5** – Vista cenital de la instalación y B - CS

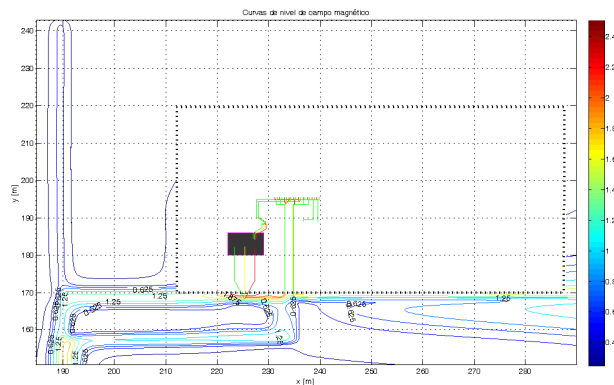


**Fig. 6** – Vista cenital de la instalación y B - LA

Otras formas de presentar los valores obtenidos son las curvas de igual nivel de campo B. En las Fig. 7 y 8, pueden apreciarse líneas de diferentes colores, cada una de estas representan líneas de campo B de igual valor. En tres graficas hasta aquí descritas se aprecia además el perímetro de la subestación.

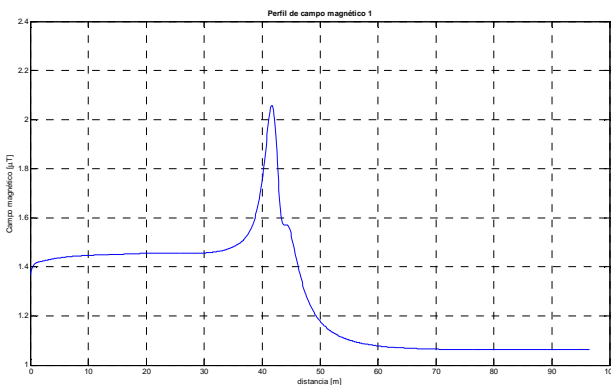


**Fig. 7** – Curvas de nivel de campo B - CS

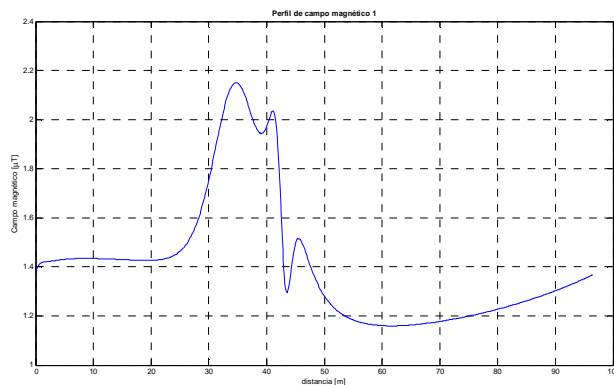


**Fig. 8** – Curvas de nivel de campo B - LA

De gran importancia además son los perfiles de campo B. En las Fig. 9 y 10 se aprecian los perfiles calculados a 1 m de la pared del frente de la estación y a 1 m del suelo, este tipo de perfiles se define como perfiles longitudinales y son aquellos paralelos al perímetro de la subestación y se eligen zonas definidas a partir de las anteriores vistas obtenidas.

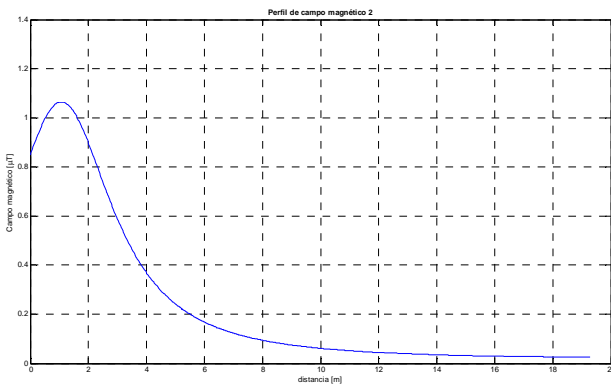


**Fig. 9** – Perfil longitudinal de campo B - CS

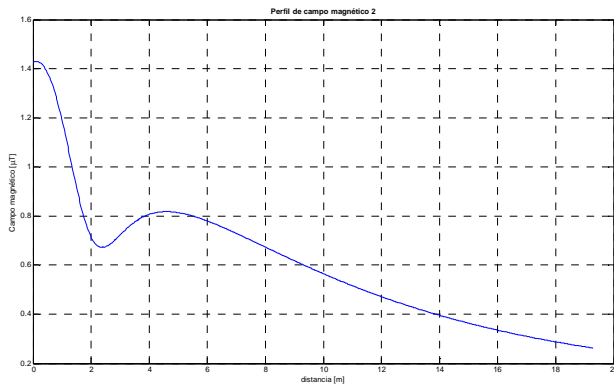


**Fig. 10** – Perfil longitudinal de campo B - LA

Otro tipo de perfiles son los transversales a las trazas de los conductores, los que se definen en la vía pública por encima del recorrido de los conductores. Este tipo de gráficos pueden apreciarse en las Fig. 11 y 12 y los mismos corresponden al Perfil 2 indicado en la Fig. 1.



**Fig. 11** – Perfil transversal de campo B - CS



**Fig. 12** – Perfil transversal de campo B - LA

## 5 CONCLUSIONES

Estos estudios permiten obtener valores de campo B (x, y, z) en su zona de interés, a partir de ellos se elaboran distintos tipos de gráficos: los 3D arrojan una idea global de cómo es la distribución del campo magnético en el área de interés, a partir de estos a través de gráficos en 2D es posible obtener información más detallada en determinados puntos de dichas zonas.

Estos estudios nos permiten conocer cual será el impacto de la instalación de nuevos Centros de Transformación o ampliación de Centros ya existentes, subestaciones líneas de diferentes tipos constructivos, sobre los niveles de campo magnético existentes.

Otro aspecto destacable de la metodología presentada es que todo el estudio se realiza considerando los procedimientos de medición empleados por los medidores de campo B disponibles comercialmente, desde el punto de vista de las normas que dictan los procedimientos de medición.

Con esto es posible realizar comparación entre diferentes alternativas y con ello adoptar la que arroje un mejor desempeño técnico económico y de esta forma cumplir con las reglamentaciones.

En el ejemplo presentado se destaca que la mayor diferencia en el acceso a la estación, entre las dos alternativas, es que en el caso en que se dispone la acometida a través de Cable subterráneo, como los conductores se ubican muy próximos entre sí, se obtiene como resultado menores valores de Campo B en comparación con el caso de la línea aérea.

Los valores de campo en cualquiera de las alternativas son menores que  $2,5 \mu\text{T}$ .

## 6 REFERENCIAS

- [1] Resolución SE 77/1998. Boletín Oficial n° 28.859, miércoles 18 de marzo de 1998.
- [2] Resolución SE 297/1998. Boletín Oficial n° 28.950, lunes 3 de agosto de 1998.
- [3] IEEE Std 644™-1994 (R2008) "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields Form AC Power Lines", Reaffirmed 27 March 2008, Approved December 13 1994, IEEE standards board.
- [4] CIGRÉ TB 320 "Characterisation of ELF Magnetic Fields". Cigré April 2007.
- [5] CIGRÉ TB 373 "Mitigation Techniques of Power-Frequency Magnetic Fields Originated from Electric Power Systems". Cigré February 2009.