

INFORME DE ENSAYO

LABE02IE7240

2018-05-23 V1.1

Página 1 de 14

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Facultad de Ingeniería
Sede Bogotá



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Cliente: **CODENSA S.A. E.S.P.**
Paola Baratto Callejas
Calle 93 N° 13 - 45, piso 4°, Bogotá D.C.;
606 92 92 Ext. 1555
8300372480
S/E Terminal

Elemento ensayado: S/E Terminal
Número de elementos ensayados: Uno (1) **Referencia muestras:** N/A
Propósito de los ensayos: N/A
Ensayos realizados: Simulación de Campos Electromagnéticos S/E Terminal
Fecha de finalización de las pruebas: 2018-05-15
Ubicación/Lugar: Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales
Observaciones: Ninguna.

El resultado sólo se aplica para el elemento ensayado. Este informe solo podrá reproducirse en su totalidad y con la correspondiente autorización del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales FABIO CHAPARRO.



Francisco J. Amórtegui G.

Ing. FRANCISCO J. AMÓRTEGUI G.

Jefe Técnico de Ensayos - LABE
Universidad Nacional de Colombia



**ESTE DOCUMENTO SOLO TIENE VALIDEZ EN ORIGINAL Y
COMPLETO**

Elaboró: SGC
Formato: LABE01R20 V1.3
Emisión de formato: 2017-01-11

Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales - LABE
Carrera 30 No. 45 - 03
Edificio 411. Oficina 102C
Bogotá, Colombia
labe_fibog@unal.edu.co

**Patrimonio
de todos
los
colombianos**

EVALUACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DE LOS CAMPOS ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO DE LA SUBESTACIÓN TERMINAL DE PROPIEDAD DE CODENSA S.A. ESP

En este documento se plasma el informe final de actividades respecto a la simulación de campos electromagnéticos en la Subestación Terminal, propiedad de CODENSA S.A. E.S.P. La Subestación Terminal, ubicada en la localidad de Kennedy, hace parte de los proyectos de CODENSA S.A. E.S.P. que buscan contribuir al fortalecimiento de la confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico de Bogotá y Cundinamarca. El objetivo de este proyecto es encontrar los niveles de campo electromagnético al interior de la subestación para verificar el cumplimiento de los límites establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. Esta norma establece que la medida tanto del campo eléctrico como de magnético se hace a un (1) metro de altura del suelo o donde permanezcan personas.

A partir de la documentación, tanto de la geometría como la corriente de carga, entregada por parte de CODENSA S.A. E.S.P., se ha construido el modelo de subestación que se encuentra en las figuras 1 y 2.

La secuencia de fases utilizada para la simulación es positiva (A – C – B para el primer circuito, y B – C – A para el segundo), a una tensión línea – línea de 115 kV_{RMS} y una corriente por fase con una magnitud de 800 A_{RMS} en la entrada de alta tensión, mientras que, en el área de baja tensión, la tensión corresponde a 11,4 kV_{RMS} con una corriente por fase correspondiente a 8,07 kA_{RMS} (en una configuración de fases A – B – C).

El software utilizado es EMF Workstation, que está diseñado para este tipo de estudios. Con él se puede obtener una exactitud aceptable para las zonas donde permanecen personas, es decir a decímetros de los componentes energizados.

En el informe se presentan el campo magnético y el campo eléctrico en el interior de la subestación y sus alrededores inmediatos, además el campo eléctrico en construcciones elevadas que puedan existir en el borde de la servidumbre, debido a la línea que ingresa a la subestación.

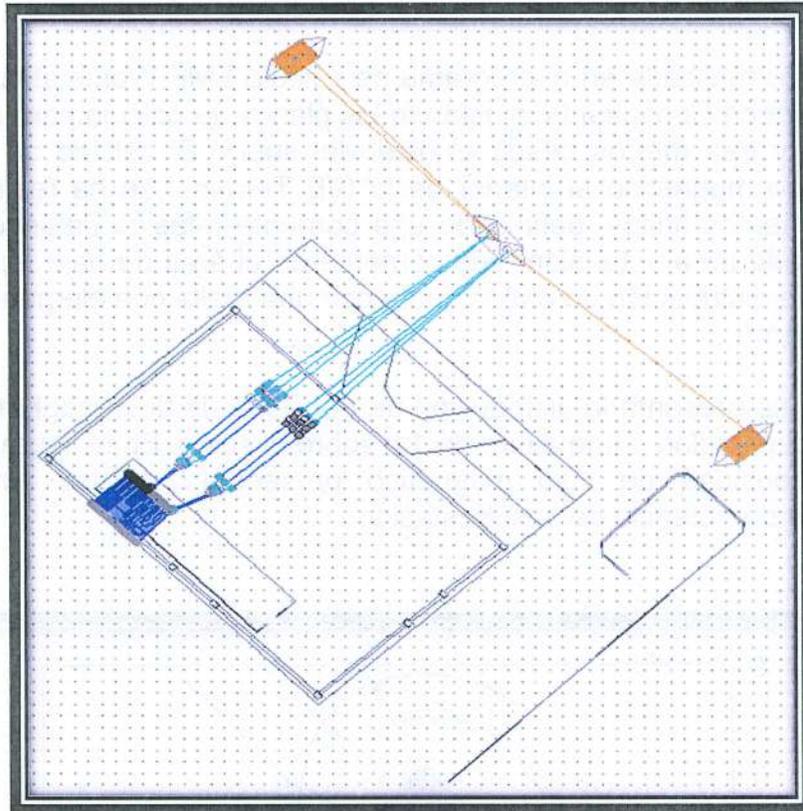


Figura 1. Vista Superior S/E Terminal - EMF Workstation

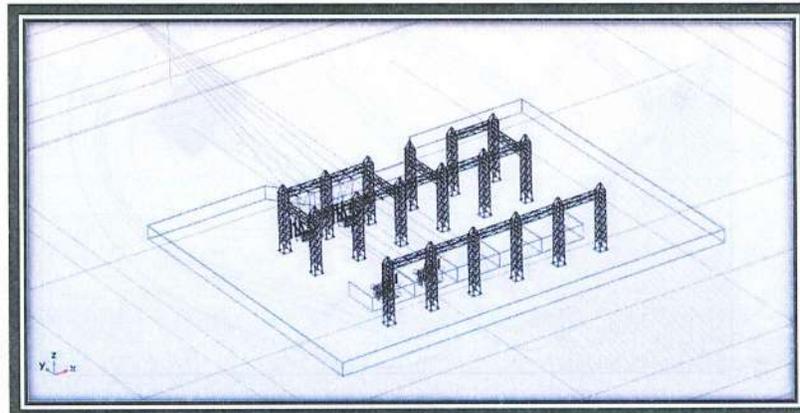


Figura 2. Vista 3D S/E Terminal

CAMPO MAGNÉTICO

La simulación fue realizada en el programa de cálculo EMF Workstation, desarrollado por la empresa Eneritech Consultants, ajustando los planos de cálculo para unas distancias de cero, uno, dos y tres metros desde el nivel del suelo. El cálculo de la distribución de densidad de flujo magnético al interior de la S/E Terminal se ha realizado a través del método de elementos finitos, definiendo una corriente trifásica balanceada de 800A por fase, en la entrada de alta tensión, una corriente en el área de baja tensión de 8,07kA, y unos circuitos de distribución de 4MVA, junto con una malla con elementos cuadrados con una arista de 0,1m.

A continuación, se presenta la distribución de densidad de flujo magnético en tres puntos críticos de la Subestación a una altura de 1m sobre el suelo. En la figura 3 se muestran las isolíneas de densidad de flujo magnético presentado en los alrededores de los transformadores de potencia de la subestación.

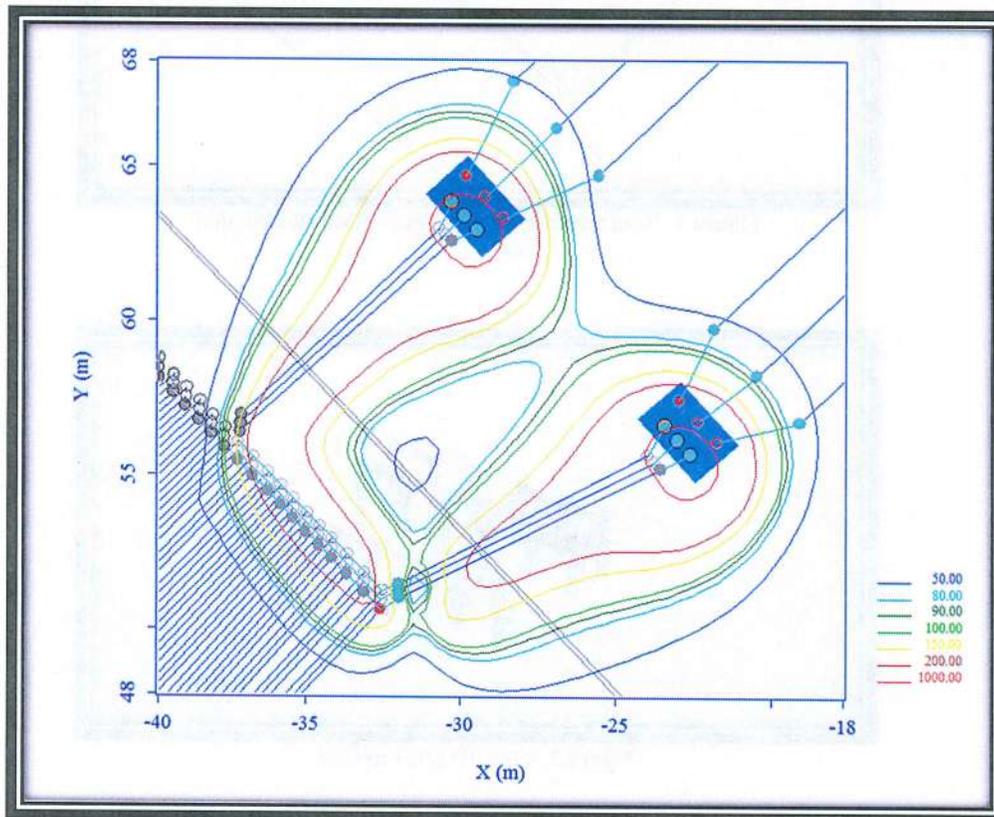


Figura 3. Isolíneas de Densidad de Campo Magnético Transformadores [μT] a un (1) metro desde el nivel del suelo. Se evidencia que existen niveles cercanos a 1mT alrededor de los bornes del devanado secundario del transformador.

De igual forma se analizó la distribución de densidad flujo magnético presentada en las bahías de la subestación, tanto en forma independiente, como en conjunto, mostrando el comportamiento representado en la figura 4. En esta gráfica se presenta la distribución de

densidad de flujo magnético en cada una de las áreas debidas a los elementos al interior de la subestación, exceptuando los transformadores, quienes fueron estudiados previamente. En esta sección analizada, la tensión correspondiente de energización es de 115 kV, la corriente de operación es de 800A por cada una de las fases, y el valor de densidad de flujo magnético máximo encontrado es de $100\mu\text{T}$ a 50 centímetros de los transformadores de la subestación.

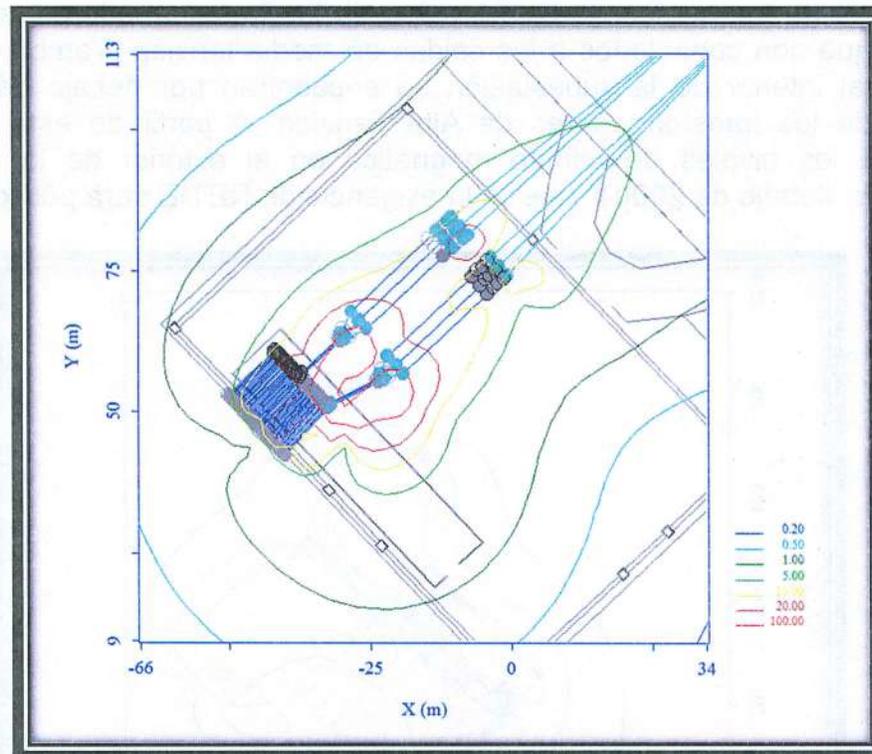


Figura 4. Isolinéas Campo Magnético Bahía 115 kV [μT] a un (1) metro de altura desde el nivel del suelo. Se evidencia que los niveles de densidad de flujo magnético en los alrededores de la subestación, se encuentran por debajo de $5\mu\text{T}$.

Finalmente se muestra por completo la densidad de flujo magnético al interior y en los alrededores de la subestación Terminal, de acuerdo con la información entregada por CODENSA S.A. E.S.P., donde se trazan las isolíneas de campo magnético para diferentes magnitudes, encontrando que los niveles de campo magnético al exterior de la subestación son menores a los máximos estipulados por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, quien fija en el capítulo 14, un valor tope de $200\mu\text{T}$ (medidos a una altura de 1 metro sobre el suelo) para la exposición de público en general.

En la figura 5 se presentan las diferentes isolíneas de campo magnético para un plano ubicado a un (1) metro de altura respecto al suelo. En esta imagen se puede constatar que la densidad de flujo magnético al exterior de la subestación es menor a $1\mu\text{T}$ a una distancia superior a 10 metros. Se presentan también la isolínea de densidad de flujo magnético de $0,2\mu\text{T}$ alrededor de la subestación y el tramo de la línea de transmisión simulada alcanza distancias de hasta cien (100) metros desde los límites de la Subestación.

La densidad de flujo magnético máxima presentada, se encuentra en la salida en bornes del devanado secundario de los transformadores, alcanzando una densidad de flujo magnético de 70mT en el borde de los conductores, donde no debe haber presencia personas cuando el sistema se encuentra energizado.

Es posible evidenciar que las densidades de flujo magnético más altas se encuentran en los alrededores de los bornes de baja tensión de los transformadores, así como de los conductores que son conectados a las celdas de media tensión. También es importante resaltar que al interior de la subestación se encuentran por debajo de 100 μ T en los alrededores de los transformadores de Alta Tensión. A partir de esta información se concluye que los niveles de campo magnético en el exterior de la subestación se encuentran por debajo de 200 μ T, que es la exigencia de RETIE para público general.

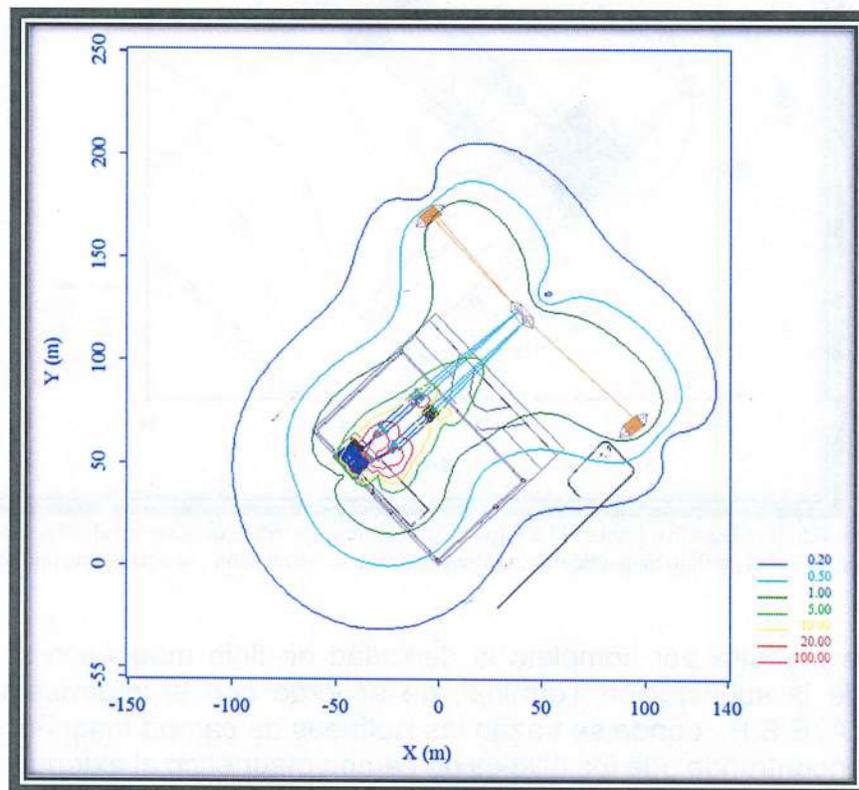


Figura 5. Densidad de flujo magnético a un (1) metro del suelo [μ T] – S/E Terminal. Se evidencia que los niveles de densidad de flujo magnético en los alrededores de la subestación se encuentran por debajo de 5 μ T. La isolínea correspondiente a 0,2 μ T está a máximo 100 metros alrededor de la subestación

ESTE ESPACIO FUE DEJADO EN BLANCO INTENCIONALMENTE

CAMPO ELÉCTRICO

El cálculo de la distribución de intensidad de campo eléctrico al interior de la S/E Terminal se ha realizado a través del método de elementos finitos, definiendo una corriente trifásica balanceada de $800A_{RMS}$ a una tensión de $115kV_{RMS}$, una corriente en el área de baja tensión de $8,07kA$, y unos circuitos de distribución de $4MVA$, a una tensión de $11,4 kV_{RMS}$.

La simulación fue distribuida en diferentes secciones para analizar al detalle cada parte crítica del sistema, y así poder determinar la influencia del campo eléctrico en los lugares pertenecientes a la subestación, así como sus alrededores.

Para la ejecución de la simulación, se ha definido una malla con elementos tetraédricos con dimensiones ajustables de acuerdo con la geometría. El método de elementos finitos utilizado fue basado en un mallado de alta densidad a una altura de $1,5m$, con un coeficiente de crecimiento de $2,4$. Lo que implica una alta precisión entre $0m$ y $5m$, que decae ligeramente si aleja de este rango de altura, es decir, cuando se acerca a los conductores de la línea. Las manchas blancas en las figuras corresponden con las zonas donde se sobrepasa el nivel de campo eléctrico utilizado como límite.

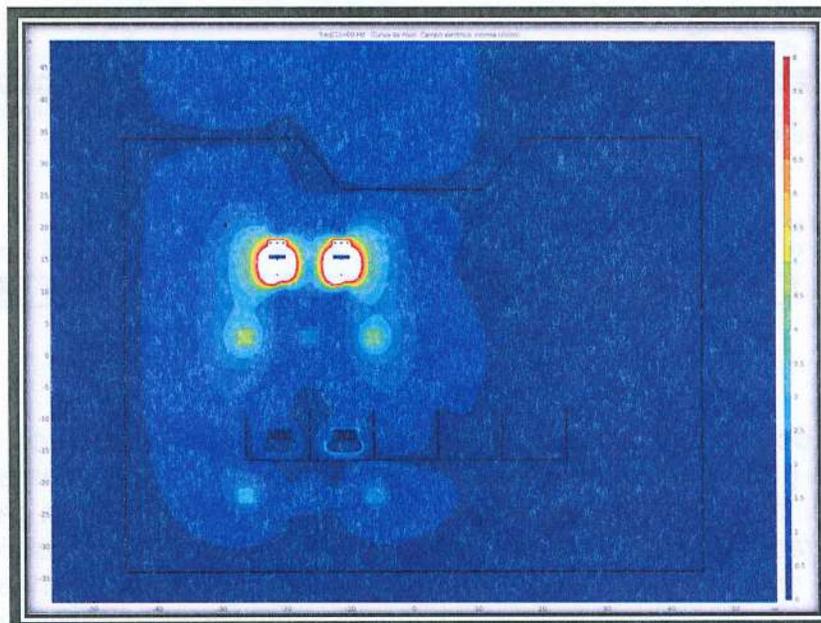


Figura 6. Intensidad de Campo Eléctrico S/E Terminal [kV/m] a un (1) metro de altura desde el nivel del suelo. Los niveles de campo eléctrico alrededor de la subestación se encuentran por debajo de $2 kV/m$.

Se pudo constatar a través del proceso de simulación, que de acuerdo con la información presentada en la figura 6, que los niveles de campo eléctrico en las afueras de la subestación no superan los $2 kV/m$ para la altura de un (1) metro desde el nivel del suelo. Lo cual se encuentra entre los niveles permitidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE.

Analizando al detalle el aporte de campo eléctrico en el patio de la subestación, se determinan los niveles de intensidad de campo eléctrico en los elementos y equipos que componen el patio de la subestación a diferentes alturas de medición. La gráfica de colores fue dibujada de tal manera que se definió como máxima magnitud 8,3 kV/m, valor que corresponde a la intensidad de campo eléctrico máxima permitida por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas como exposición ocupacional. A partir de la información mostrada en la figura 7, a la altura de medición establecida por el RETIE (1 metro), se concluye que es preciso tener en cuenta lo niveles de intensidad de campo eléctrico en los alrededores del equipo de protección (distancia inferior a 20 cm), puesto que se pueden presentar intensidades que superen lo establecido por el RETIE, sin embargo, es preciso mencionar que a estas áreas no tiene acceso el público en general.

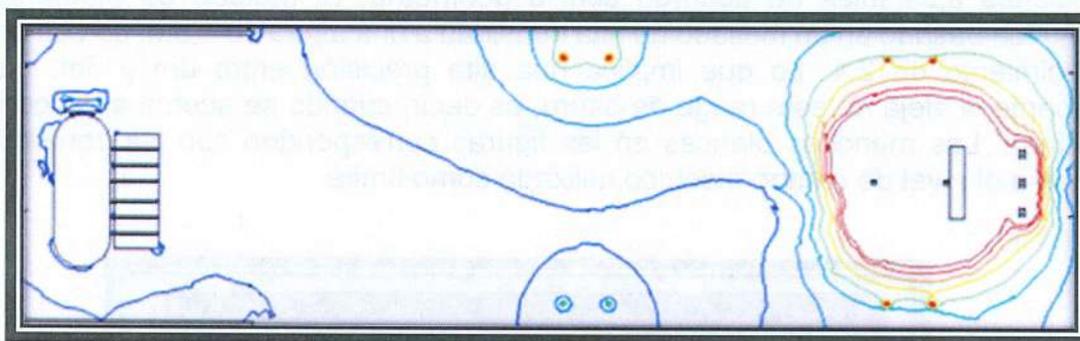


Figura 7. Intensidad de Campo Eléctrico S/E Terminal [kV/m] a un (1) metro del suelo, en bahía del patio de la subestación. Se encuentra que los niveles de intensidad de campo eléctrico más altos se encuentran alrededor del equipo híbrido.

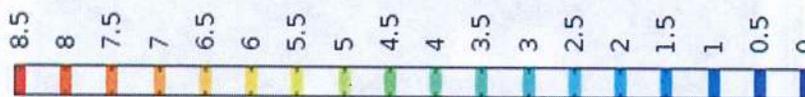


Figura 8. Escala de color [kV/m]

Como método de comprobación de los niveles de campo eléctrico en las afueras de la subestación, se graficaron las isolíneas de campo eléctrico para una intensidad de 4kV/m, para así determinar las zonas límite de acercamiento para el público en general. De la figura 13, se pudo extraer que los niveles de campo eléctrico límites de exposición para el público en general, se encuentran al interior de la subestación, donde la intensidad de campo eléctrico permisible es el doble que en el caso de exposición al público en general.

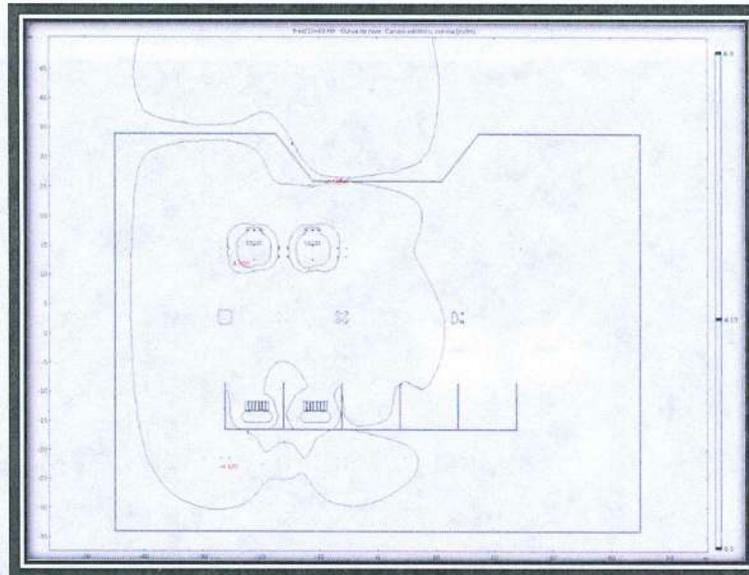


Figura 9. Isolínea de campo eléctrico a 4kV/m S/E Terminal - 1 Metro. Se observa claramente que los niveles de intensidad de campo eléctrico en los límites y áreas exteriores de la subestación se encuentran por debajo de los límites establecidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE.

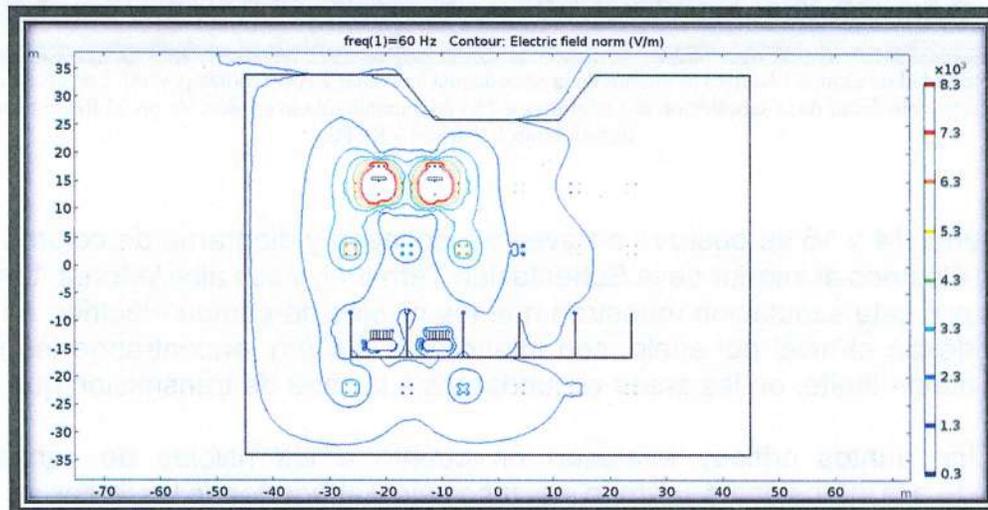


Figura 10. Isolíneas de campo eléctrico en la S/E Terminal [kV/m] a un (1) metro del suelo. Se evidencia que los niveles de intensidad de campo eléctrico en la subestación se encuentran por debajo de los niveles establecidos por el RETIE, con excepción del equipo de protección híbrido, sin embargo, en los puntos calculados, no es posible físicamente tener acceso.



Figura 11. Intensidad de Campo Eléctrico al interior de la Subestación Terminal y Alrededores [kV/m]. Los niveles de intensidad de campo eléctrico alrededor de la subestación son inferiores a 2 kV/m, cumpliendo lo establecido por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE.

En las figuras 14 y 15 se observa a través de isolíneas y diagrama de colores, los niveles de campo eléctrico al interior de la Subestación Terminal, y sus alrededores. Los resultados arrojados por esta simulación muestran que los niveles de campo eléctrico a un (1) metro de altura desde el nivel del suelo, son inferiores a 2 kV/m, encontrando los niveles más cercanos a este límite, en las áreas circundantes a la línea de transmisión que ingresa.

Otro de los puntos críticos evaluado en cuanto a los niveles de campo eléctrico, corresponde a la intensidad de campo eléctrico bajo y alrededor de las líneas de transmisión de 115kV, las cuales muestran el comportamiento descrito en las figuras 16 y 17 que corresponden a un plano vertical perpendicular a la línea. La zona con intensidad de campo eléctrico superior al límite de 4,16 kV/m (zona blanca en la figura 17) está sólo en las cercanías de los conductores de la línea y en los bordes del edificio se presentarían intensidades de campo inferiores a 4,0 kV/m, con la línea y sus dos circuitos con secuencia (Configuración A – C – B / B – C - A) y menor a medida que el edificio esté más lejano. Es de resaltar que la intensidad de campo eléctrico puede ser diferente si la secuencia de posición de las fases en los dos circuitos es diferente. Si es la misma, las intensidades de campo son mayores, como es mostrado en las figuras 16 y 17.

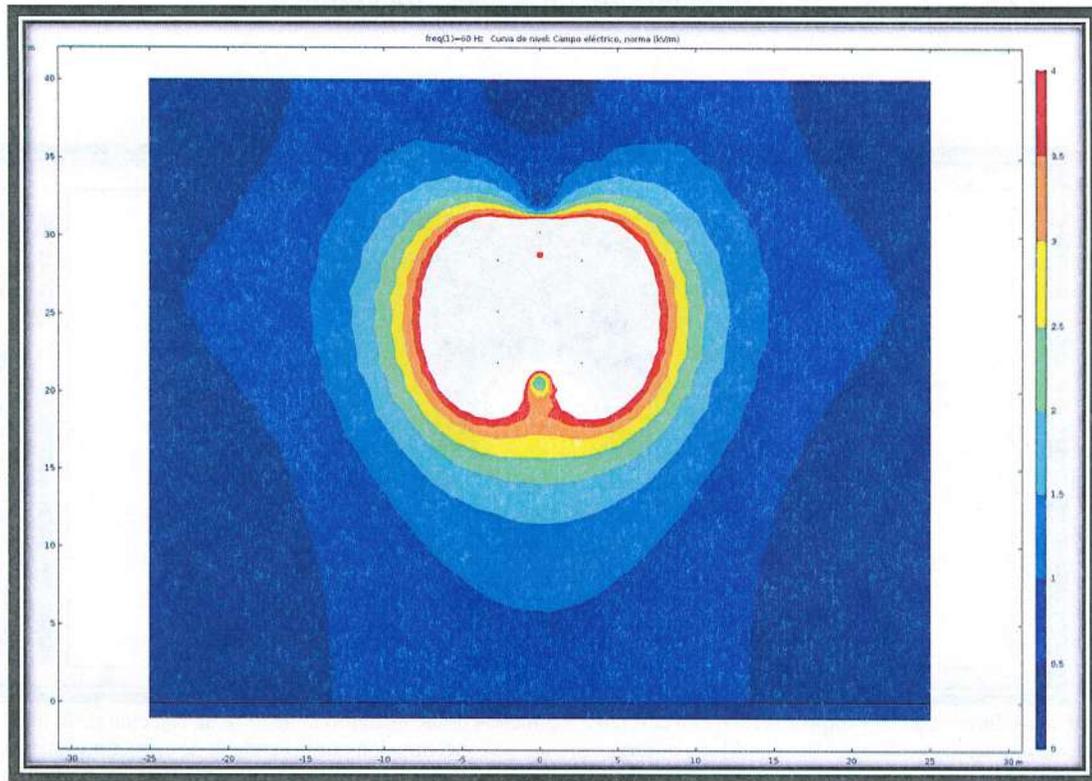


Figura 12. Intensidad de campo eléctrico bajo las líneas de 115 Kv configuración (A – B – C / A – B – C)

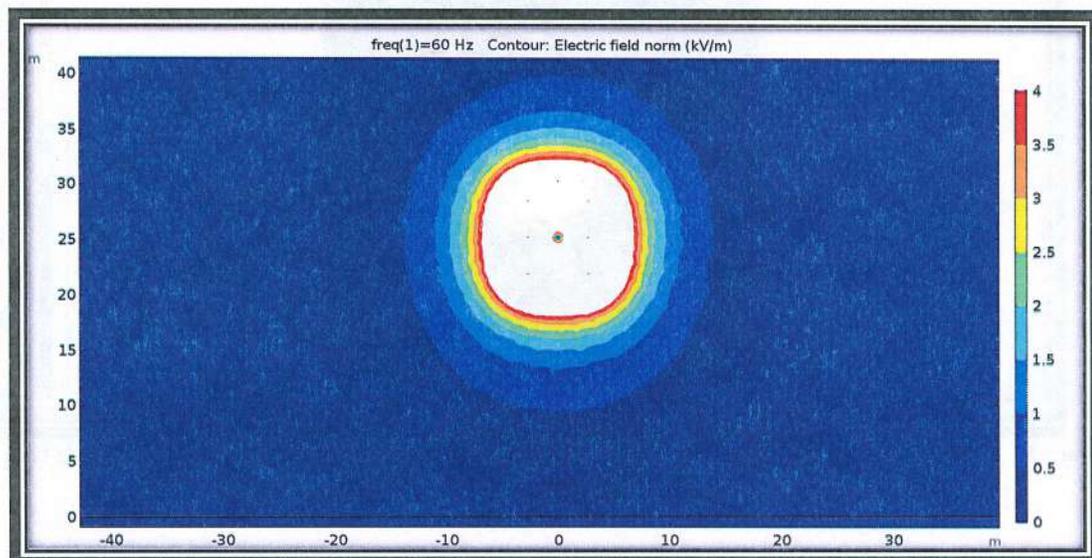


Figura 13. Intensidad de campo eléctrico en circuito 115 kV configuración (A - C - B / B - C - A)

En las figuras 18 a 20 se representa la interacción del circuito de 115 kV en configuración A – C – B / B – C – A, con la cercanía de un edificio residencial.

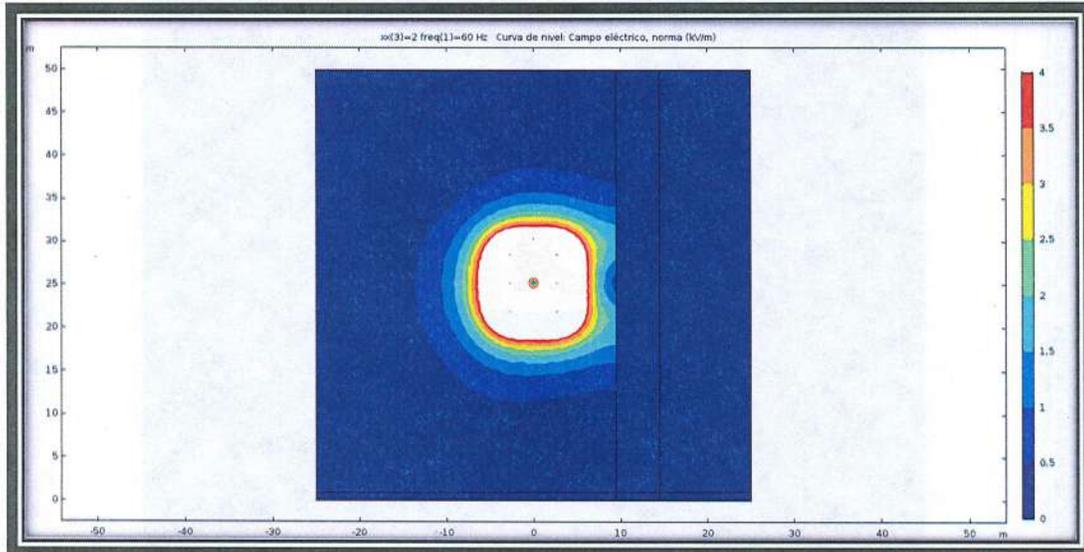


Figura 14. Intensidad de campo eléctrico con edificio a 9,5 metros desde el centro de la torre de sujeción de la línea 115kV (Configuración A – C – B / B – C – A). Se observan puntos de concentración por la cercanía de estructuras aterrizadas.

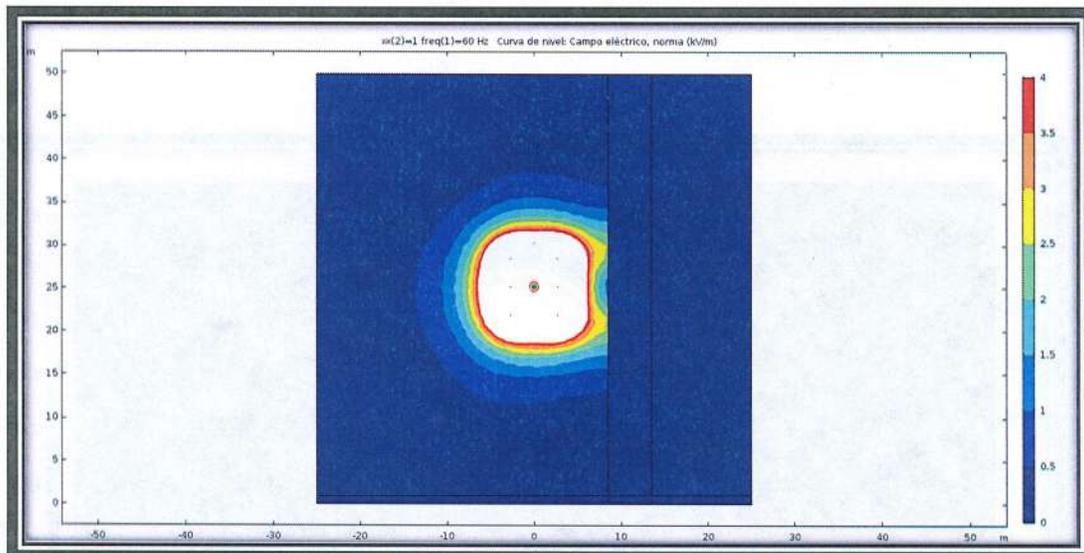


Figura 15. Intensidad de campo eléctrico con edificio a 8,5 metros desde el centro de la torre de sujeción de la línea 115kV (Configuración A – C – B / B – C – A)

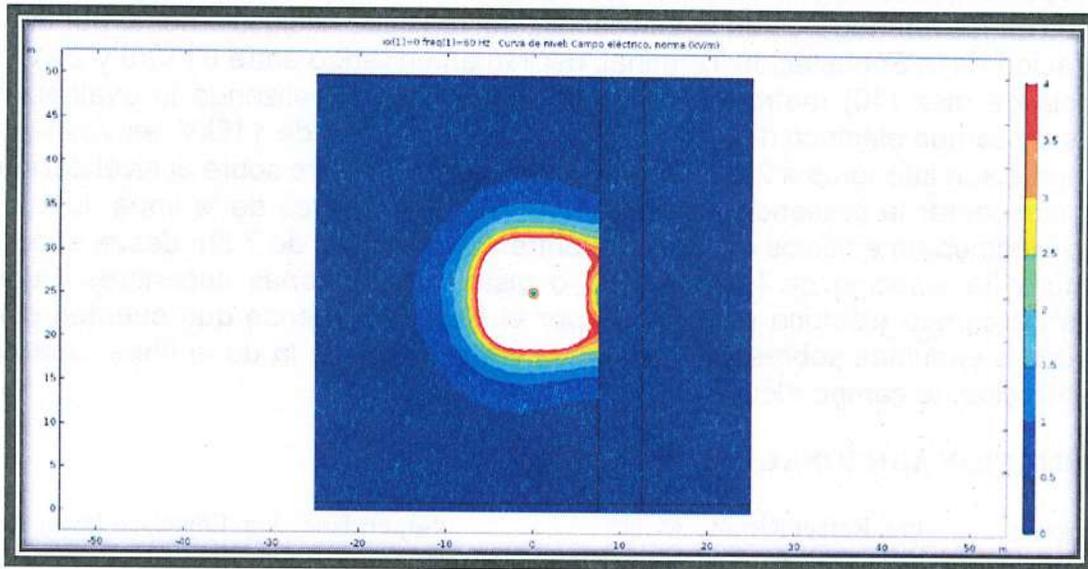


Figura 16. Intensidad de campo eléctrico con edificio a 7,5 metros desde el centro de la torre de sujeción de la línea 115kV (Configuración A - C - B / B - C - A)

CONCLUSIÓN

Con el modelamiento y la simulación realizada para determinar el efecto electromagnético en la subestación Terminal, propiedad de CODENSA S.A. E.S.P., se encontró que el comportamiento de la densidad de flujo magnético en la subestación se encuentra dentro de los niveles establecidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE, con una excepción alrededor de los conductores conectados a los bornes de MT, donde se presentan niveles de flujo magnético que superan los $1000\mu\text{T}$ establecidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. Es preciso aclarar que en estos lugares no puede existir la presencia de personal, puesto que las restricciones físicas lo impiden. En los demás lugares, los niveles de campo magnético se encuentran por debajo de los $200\mu\text{T}$, que es el nivel máximo permitido por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, en lugares donde existe la presencia de público en general. En la figura 10 se muestra que los niveles de campo magnético al exterior de la subestación hasta una distancia superior a diez (10) metros, oscila entre $0,1\mu\text{T}$ y $5\mu\text{T}$, influenciados exclusivamente por la subestación.

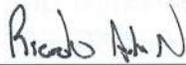
También es evidenciable a través del proceso de simulación, que el campo eléctrico en la subestación es más alto en los elementos de protección, puesto que estos se encuentran energizados a una tensión de 115kV. Sin embargo, dibujando la isolínea de campo de 4kV/m con los datos obtenidos, se puede observar que se encuentran al interior de la subestación, a partir de lo cual es posible concluir que los niveles de campo eléctrico al exterior de la subestación son inferiores a $4,16\text{ kV/m}$, respetando lo establecido por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE para lugares en los cuales se pronostica presencia de público general. Sólo sería necesario atender si se hacen o existen

construcciones de gran altura. Realizando un análisis detallado de los niveles de campo eléctrico en la subestación y sus alrededores, es posible encontrar que los niveles de campo eléctrico en los alrededores de la edificación, influenciado exclusivamente por la presencia y operación de la Subestación Terminal, oscilan en un rango entre 0 kV/m y 2 kV/m en una distancia de diez (10) metros fuera de la subestación. Realizando la evaluación de los niveles de campo eléctrico debido a la presencia de la línea de 115kV, es visible que estos igualmente son inferiores a 2kV/m a una altura de un (1) metro sobre el nivel del suelo, pero es de considerar la presencia de edificios en los alrededores de la línea. Los niveles de campo eléctrico en edificios que se encuentren a distancias de 7,5m desde el centro de la estructura de sujeción de los circuitos, o distancias cercanas superiores, cumplen los niveles de campo eléctrico estipulados por el RETIE, a menos que cuenten con puntas metálicas o esquinas sobresalientes -a una altura similar a la de la línea- que causen la concentración de campo eléctrico.

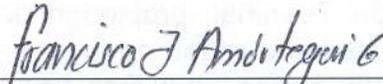
INFORMACIÓN ADICIONAL DEL INFORME

Encargado Ing. Rafael Ricardo Ávila **Supervisor** Ing. Francisco Javier Amórtegui
Presentes Cristian David Rodríguez, Ricardo Poveda, Andrés Felipe Escobar
Cotización: LABE01C13202

RESPONSABLES



Ing. RAFAEL RICARDO ÁVILA NARANJO
Ingeniero(a) de Pruebas – LABE
Universidad Nacional de Colombia



Ing. FRANCISCO J. AMÓRTEGUI G.
Jefe Técnico de Ensayos - LABE
Universidad Nacional de Colombia

El Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales (LABE) de la Universidad Nacional de Colombia, preparó este informe bajo contrato para **CODENSA S.A. E.S.P.** LABE NO DA NINGUNA GARANTÍA, EXPRESA O IMPLÍCITA, EN CUANTO A LOS RESULTADOS QUE SE OBTENDRÁN POR ALGUNA PERSONA O ENTIDAD A PARTIR DEL USO DEL CONTENIDO DE ESTE INFORME. LABE no da ninguna garantía expresa o implícita de la comerciabilidad o de la aptitud para un propósito determinado de ninguno de los productos mencionados en este informe. LABE no conserva muestras testigo, por lo tanto, solo garantiza los resultados sobre la muestra o elemento ensayado y en las condiciones ambientales y de montaje señaladas en este informe. Este informe solo podrá reproducirse en su totalidad y con la correspondiente autorización de LABE.

-----**FIN DEL INFORME**-----