

**INFORME DE SIMULACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS
PARA LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA OCCIDENTE
Funza, Cundinamarca, Colombia**

**Laboratorio de Innovación en Alta Tensión y Energías Renovables (LIAT-ER)
Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá**

Bogotá D.C. 26 de junio de 2021

Contenido

CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS PARA LA SUBESTACIÓN OCCIDENTE	2
1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVO	2
3. CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS DE FRECUENCIA INDUSTRIAL	3
4. PROCEDIMIENTO	3
4.1. Información base para caso de estudio.	3
4.2. Simulación de campo eléctrico	7
4.3. Simulación de campo magnético	7
4.4. Zona de obtención de resultados.	8
5. MODELAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN EN 3D.	8
6. RESULTADOS OBTENIDOS	10
6.1. Simulación de campo eléctrico	10
6.2. Simulación de campo magnético	15
7. CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
7.1. Simulación de campo eléctrico	22
7.2. Simulación de campo magnético	22
8. REFERENCIAS	23
9. INFORMACIÓN ADICIONAL DEL INFORME	23
10. RESPONSABLES	23

CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS PARA LA SUBESTACIÓN ELECTRICA OCCIDENTE (SEO)

1. INTRODUCCIÓN

Debido al aumento de la demanda energética producto del crecimiento poblacional surge la necesidad de realizar adecuaciones y nuevas instalaciones en el sistema eléctrico de potencia. Por esta razón se prevé la construcción de la nueva Subestación Eléctrica Occidente proyección de ENEL-CODENSA S.A. E.S.P. que se construirá sobre la carrera 9 (antigua carrera 5 este) con calle 9. Según indica ENEL-CODENSA, esta subestación tendrá una capacidad de 120 MVA. El estudio de campos eléctricos y magnéticos cobra importancia a fin de establecer si los valores de campos emitidos en el interior y el exterior de la subestación cumplen con los valores máximos admisibles establecidos en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

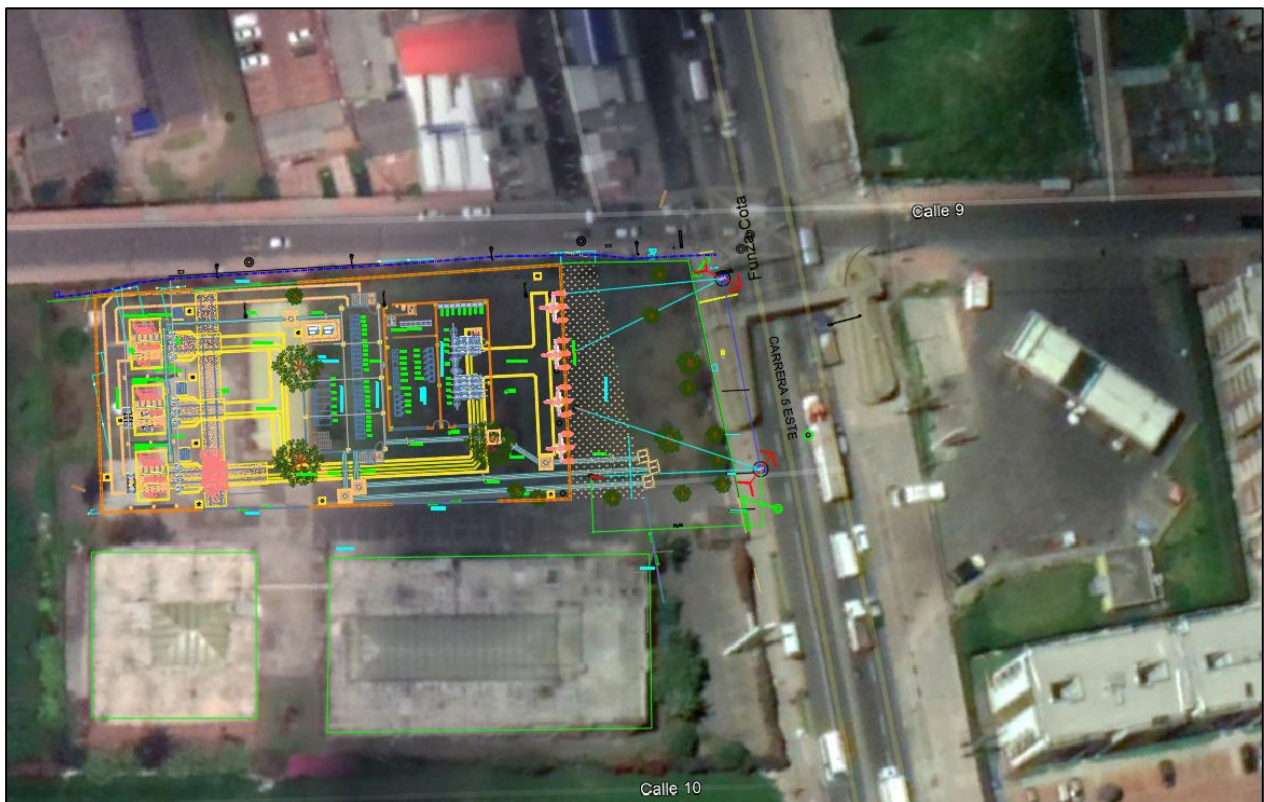


Figura 1. Ubicación de nueva subestación Occidente sobre av. Vía Cota.

2. OBJETIVO

Evaluar, por medio de simulaciones con el método de elementos finitos, las emisiones de campos eléctricos y magnéticos producto la tensión y la corriente eléctrica respectivamente, al interior de la subestación y de las líneas de transmisión conectadas al Sistema de Transmisión Nacional, con la finalidad de verificar el cumplimiento de los valores de exposición para público general y ocupacional definidos en el RETIE.

3. CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS DE FRECUENCIA INDUSTRIAL

Para atender la posibilidad de efectos nocivos, para la salud de las personas, de los campos eléctricos y magnéticos, el RETIE en el artículo 14 “establece los valores de máxima intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético en baja frecuencia (FEB frecuencias extraordinariamente bajas) en zonas donde puedan permanecer personas, independientemente del tiempo de permanencia. Estos valores están basados en los criterios de la OMS y la institución internacional para la protección de la población y el medio ambiente, frente a las radiaciones no-ionizantes” (RETIE, 2013). Atendiendo estos límites en su numeral 14.4 se exige incluir un análisis de campos eléctricos y magnéticos en la etapa de diseño de la subestación.

A continuación, se describen y caracterizan dichos fenómenos:

- El campo eléctrico se origina en conductores energizados de la subestación y líneas de transmisión en la cercanía, la intensidad del campo eléctrico en un punto depende del nivel de tensión de los conductores energizados, la superficie de estos y la distancia del punto a los conductores energizados. El RETIE establece como guía la norma IEEE 644, donde se especifica que la medida debe hacerse sin ningún cuerpo en el lugar de medición, por lo que la evaluación por simulación debe considerar esta condición. Los valores máximos de exposición admisibles al campo eléctrico ambiental, donde haya posibilidad de permanencia de personas, son: 8,3 kV/m para exposición ocupacional y de 4,16 kV/m para público general.
- La densidad de flujo magnético está relacionada con la intensidad de corriente que fluye en los conductores de la subestación y las líneas de transmisión, la densidad en un punto depende principalmente de la magnitud de la corriente por el conductor y la distancia del punto de evaluación al conductor de corriente. La densidad de flujo magnético se mide en Teslas y los límites máximos de exposición aguda (corto plazo) de acuerdo con el RETIE son de 1000 μ T como límite ocupacional y de 200 μ T para público general. Sin embargo, esta restricción no considera los niveles para afectación crónica (largo plazo), pues, aunque no hay certeza científica, estudios epidemiológicos han mostrado que la exposición cotidiana crónica a campos magnéticos por encima de 0,3 μ T y 0,4 μ T, posiblemente, podría aumentar la incidencia de leucemia infantil (Van Deventer, 2007), lo que conlleva a tener presente el principio de precaución donde se deberá disminuirse tanto como se pueda la exposición al público infantil.

4. PROCEDIMIENTO

Las simulaciones contenidas en este informe fueron desarrolladas usando el software COMSOL Multiphysics® teniendo en cuenta la información de ingeniería básica suministrada por la empresa ENEL-CODENSA. A continuación, se presenta el procedimiento en las etapas de modelamiento y obtención de resultados.

4.1. Información base para caso de estudio.

- **Ubicación general:**

La subestación Occidente se sitúa en el municipio de Funza, sobre la avenida principal vía Cota con calle 9. En la **Figura 2** se muestra una vista superior de la subestación y los puntos de conexión en Alta Tensión (AT) y las salidas subterráneas de media tensión (MT).

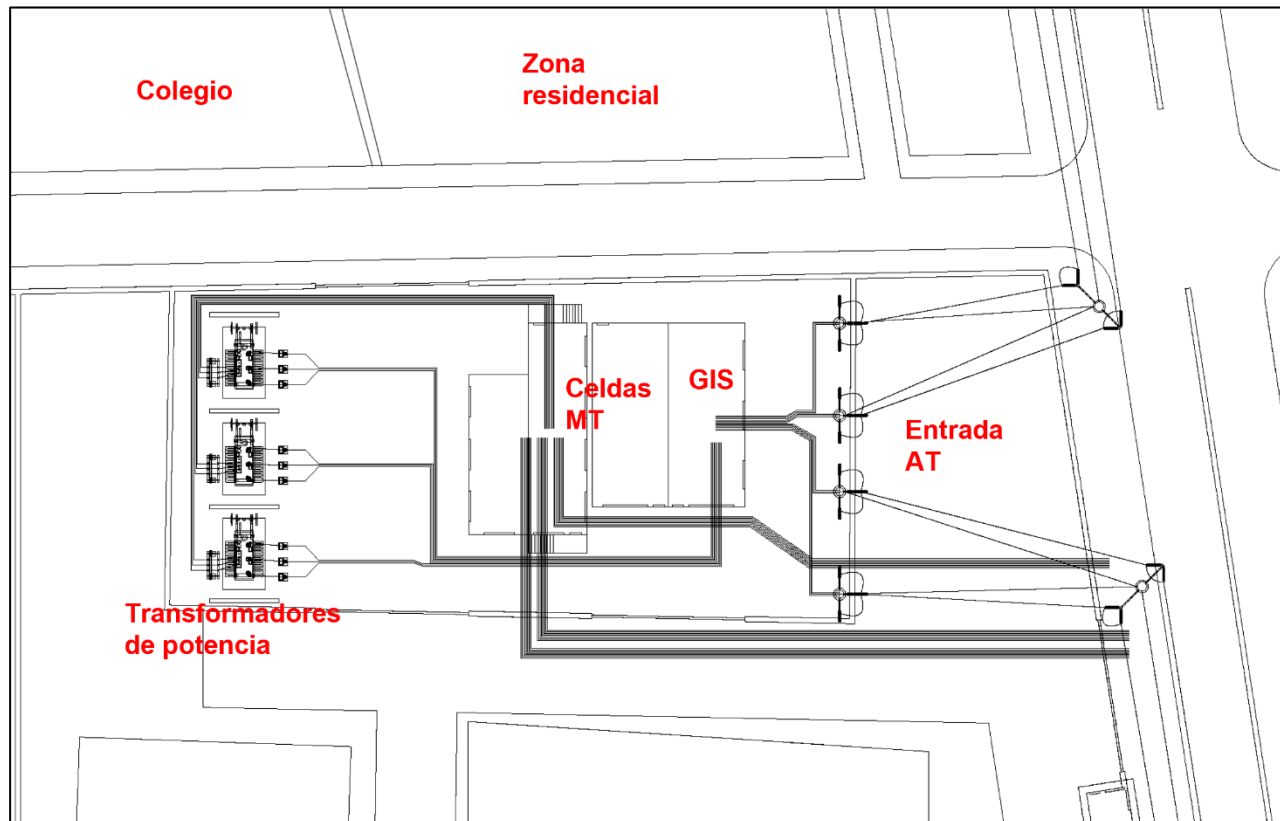


Figura 2. Vista superior de la subestación eléctrica Occidente proyectada.

- **Conductividad de Materiales empleados en la simulación:**

Material	Conductividad [S/m]
Aire	0
Cemento	0,01
Acero	1e6
Aisladores	1e-18

Tabla 1. Conductividad eléctrica de los materiales usados en las simulaciones.

- **Alta Tensión (AT):**

De acuerdo con la información suministrada por el personal de ENEL-CODENSA, la subestación Eléctrica Occidente tendrá una potencia de operación de 120 MVA con tres (3) transformadores de 40 MVA cada uno y tensiones de operación para un transformador de 115/34.5 kV y dos transformadores de 115/11.4 kV (**Figura 3**). (Información suministrada por ENEL-CODENSA).

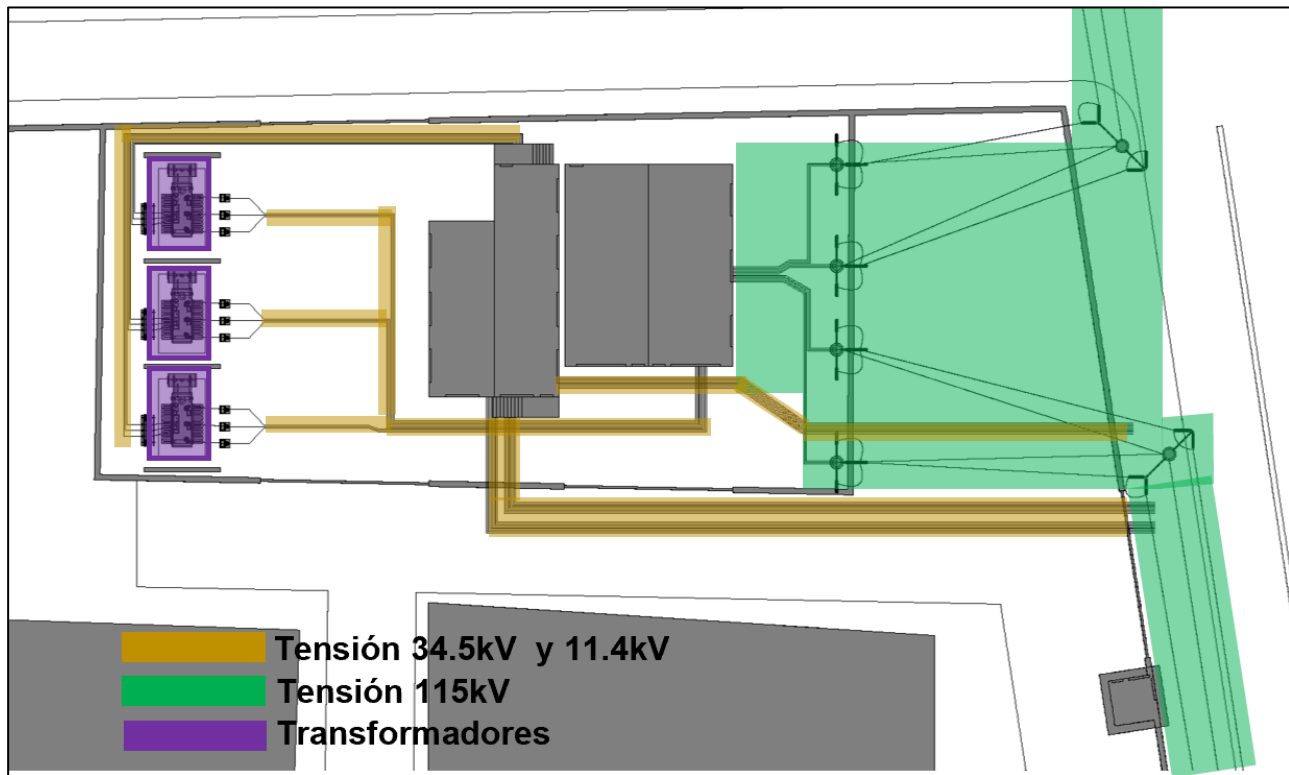


Figura 3. Disposición de transformadores de potencia en la subestación Occidente y zonas de alta tensión (AT) y media tensión (MT).

Para la evaluación de los campos eléctricos y magnéticos, se usaron dos estructuras de soporte para los cuatro circuitos (Mosquera, Noreste, Terminal, Noreste 2) **Figura 4 y**

Figura 5, sus dimensiones se muestran en la **Tabla 2 y Tabla 3**. Dimensiones de las estructuras de dos (2) circuitos poste 2783N.

Medidas	Longitud [m]
A	27
B	16
C	5
D	5
E	3.5
F	2

Tabla 2. Dimensiones de las estructuras de dos (2) circuitos poste 2783AN.

Medidas	Longitud [m]
A	27
B	17.6
C	3,3
D	3,3
E	2.8
F	2.5

Tabla 3. Dimensiones de las estructuras de dos (2) circuitos poste 2783N.

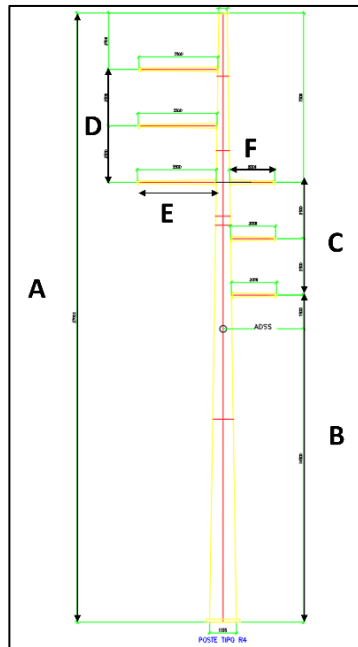


Figura 4.(a) Tipo y disposición de estructura poste 2783AN.

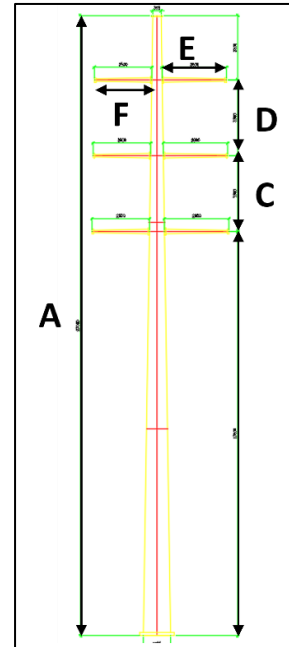


Figura 5. Tipo y disposición de estructura poste 2783N.

- **Media Tensión [MT]:**

Los valores de las corrientes en MT definidas en la simulación se relacionan en la **Tabla 4**, (información suministrada por CODENSA). Los conductores salen del secundario del transformador y llegan hasta las celdas de MT ubicadas en el cuarto técnico.

Transformador	Nivel de tensión [kV]	Corriente en el secundario [A]
T1	34.5	670
T2	11.4	2025
T3	11.4	2025

Tabla 4. Corrientes en los secundarios de los transformadores.

El cuarto técnico contiene dos tipos de celdas correspondientes a los dos niveles de MT (11.4 kV y 34.5 kV). Las salidas de cada celda se presentan en la **Tabla 5**, en esta tabla también se indica la corriente transportada por cada tipo de circuito; cada circuito sale de las celdas de MT por bancos de ductos (información de CODENSA) y se representan en la **Figura 3** por medio del área amarilla para 11.4kV y 34.5 kV.

Nivel de tensión [kV]	Número de circuitos de salida	Corriente por circuito de acuerdo con los niveles de MT [A]
34.5	5	134
11.4	18	225

Tabla 5. Cantidad de salidas en las celdas de MT.

4.2. Simulación de campo eléctrico

Las simulaciones de campo eléctrico se realizaron con la tensión nominal (115 kV) en una secuencia de fases ABC para todos los circuitos. En la **Figura 3** se puede apreciar la distribución de tensiones para simulación de campo eléctrico, donde el área de color verde tiene un nivel de tensión de 115 kV, el área amarilla tiene una tensión de 34,5 kV y 11,4 kV, Sin embargo, estas zonas (34.5-11.4kV) no se incluyeron en la simulación ya que su emisión de campo eléctrico es insignificante debido al apantallamiento de los conductores. Los conductores de cada circuito en AT aéreos (Mosquera, Noreste, Terminal, Noreste 2) son de tipo AAAC315 (conductor desnudo).

4.3. Simulación de campo magnético

Las simulaciones de densidad de flujo magnético se desarrollaron con la distribución de fases teniendo en cuenta la misma secuencia para todos los circuitos. De acuerdo con la información suministrada por CODENSA la secuencia de fases es A-B-C para todos los circuitos. La **Tabla 6** y la **Figura 6** muestran las corrientes que se tuvieron en cuenta para el análisis de campos magnéticos, para mantener el equilibrio de corriente fue necesario invertir el flujo de potencia de las líneas Terminal y Mosquera.

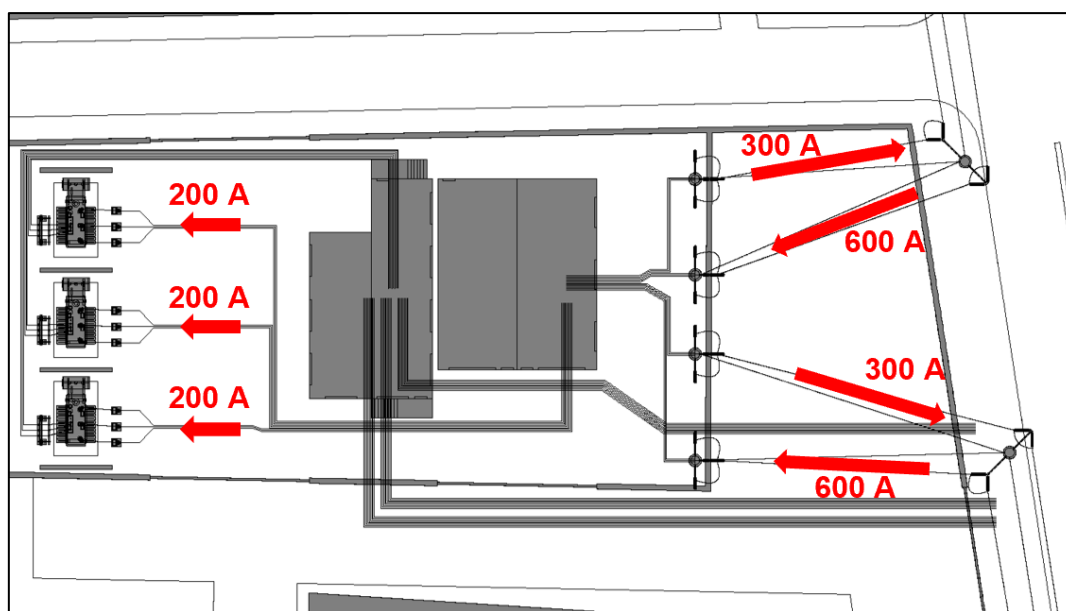


Figura 6. Dirección de los flujos de corriente utilizados en la evaluación de campos magnéticos en la subestación Occidente.

Líneas	Corriente [A]	Estado del circuito
Mosquera	300	Salida
Noreste	600	Entrada
Terminal	300	Salida
Noreste 2	600	Entrada

Tabla 6. Características eléctricas de los circuitos de AT que llegan y salen de la SE subestación Occidente de acuerdo con información suministrada por ENEL- CODENSA.

Para el análisis de campos eléctricos y magnéticos de las líneas, todos los circuitos se tomaron en secuencia ABC como muestra la **Figura 7**.

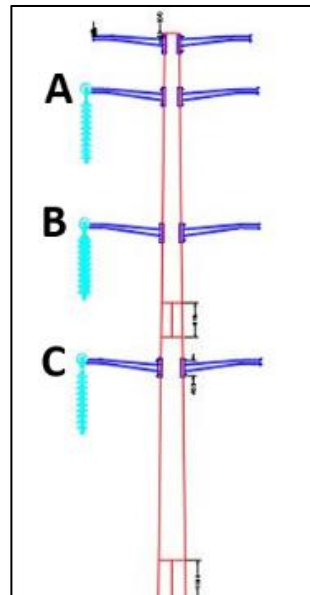


Figura 7. Disposición de circuitos de los postes de la subestación OCCIDENTE.

4.4. Zona de obtención de resultados.

Con el fin de observar la emisión de los campos eléctricos y magnéticos sobre ciertas zonas de interés, en la **Figura 8** se plantean una serie de cortes verticales a un (1) metro de altura de suelo.

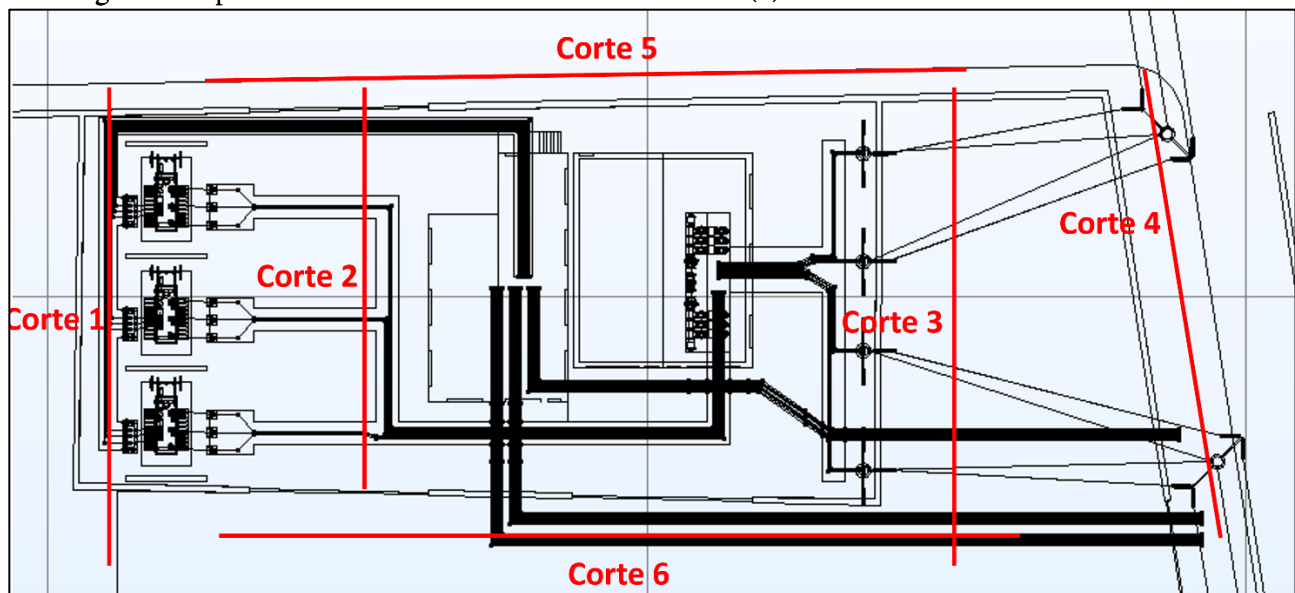


Figura 8. Cortes verticales donde se evaluaron detalles de los campos eléctricos y magnéticos

5. MODELAMIENTO DE LA SUBESTACIÓN EN 3D.

A continuación, se muestran imágenes con el modelamiento en 3D de la subestación OCCIDENTE para las simulaciones de campos eléctricos y magnéticos.

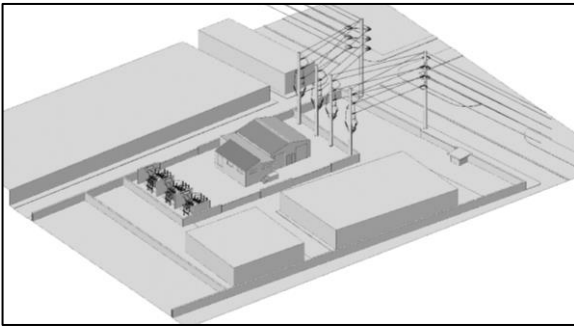


Figura 9. Imagen con modelamiento de la subestación Occidente.

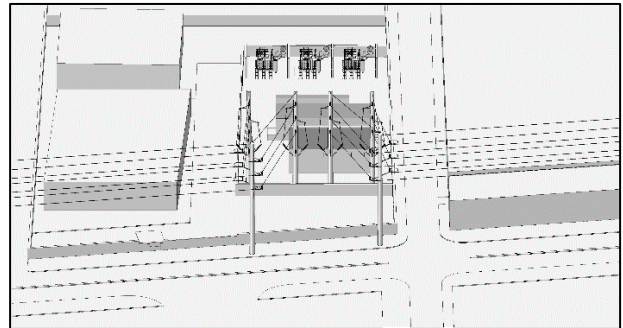


Figura 10. Imagen de detalle del modelamiento de la subestación Occidente

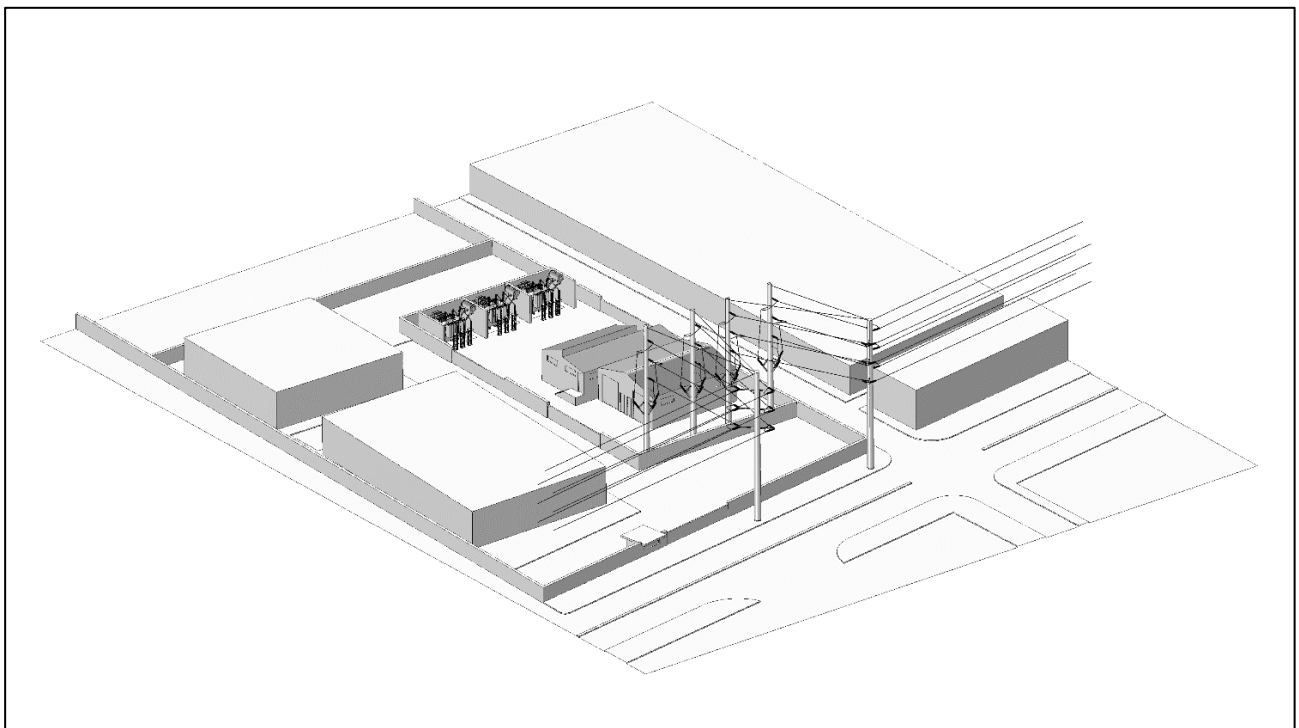


Figura 11. Modelamiento de la subestación eléctrica Occidente.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1. Simulación de campo eléctrico

En la **Figura 12**, **Figura 13**, **Figura 14** y **Figura 15** se observan los resultados obtenidos de la simulación de campos eléctricos en la subestación Occidente, estos resultados se presentan en cuatro escalas de colores diferentes de 0,5 kV/m, 1 kV/m y 5 kV/m de forma comparativa. De acuerdo con las **Figura 13** y **Figura 14**, la mayor emisión de intensidad de campo eléctrico se presenta en los afloramientos de los conductores de AT que entran al primario del transformador. A mayor altura la intensidad de campo eléctrico superior, tal como lo muestra la **Figura 15** para una altura de 2m.

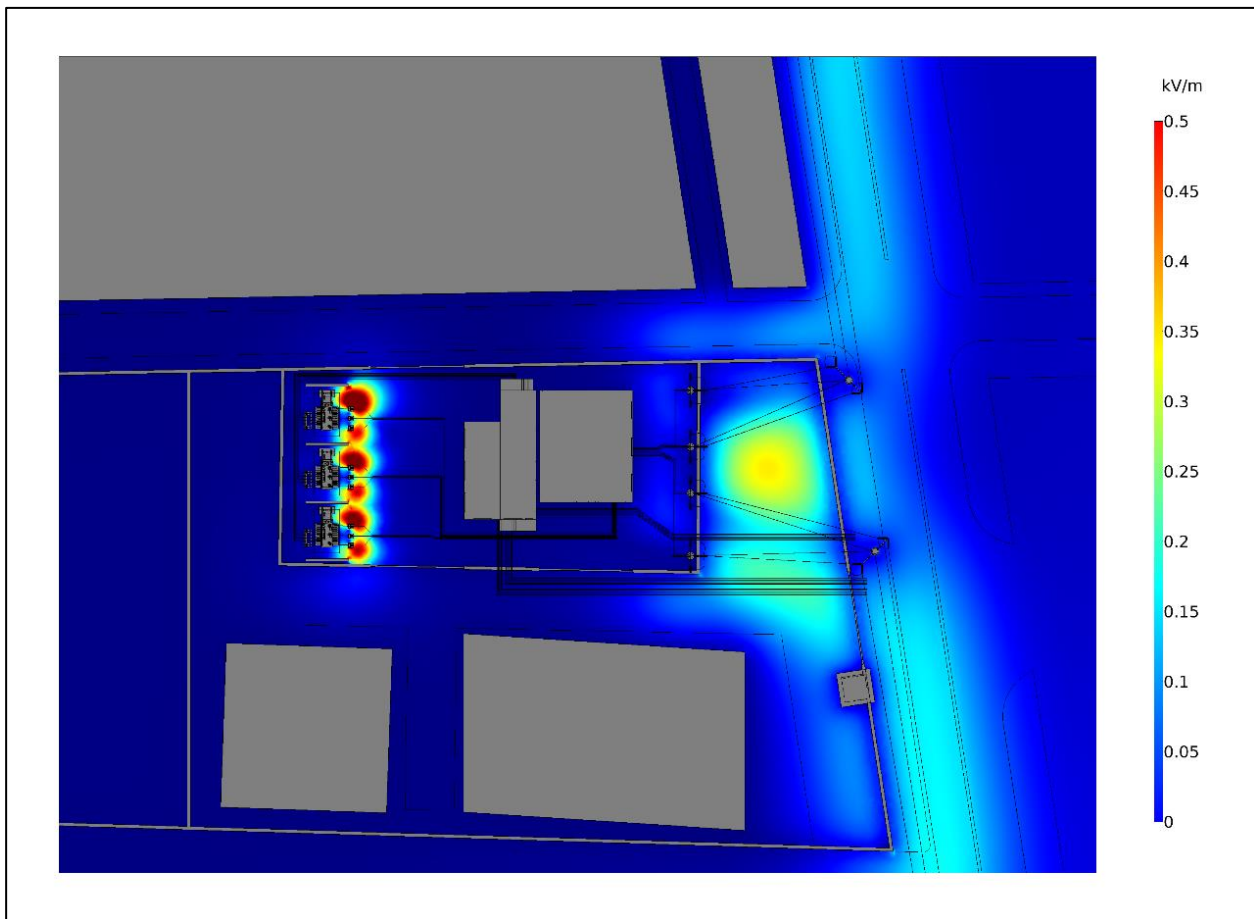


Figura 12. Intensidad de campo eléctrico emitido por la subestación OCCIDENTE a un metro de altura (límite de color: 0,5 kV/m).

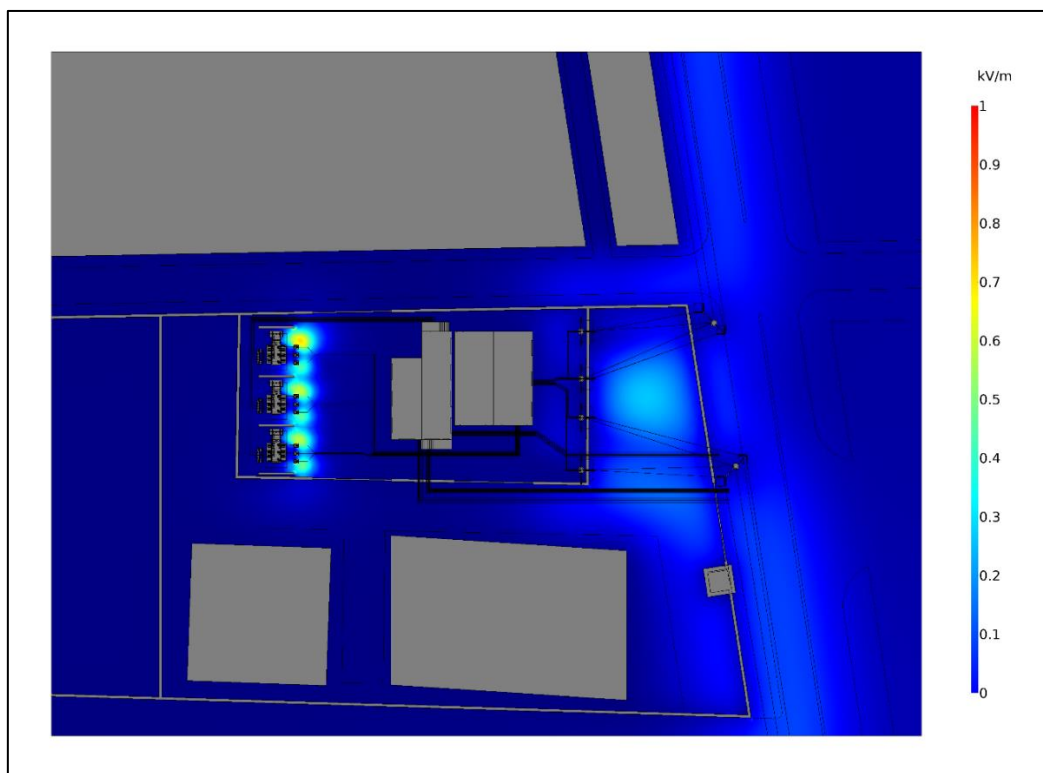


Figura 13. Intensidad de campo eléctrico emitido por la SE OCCIDENTE a 1m de altura (límite de color: 1 kV/m).

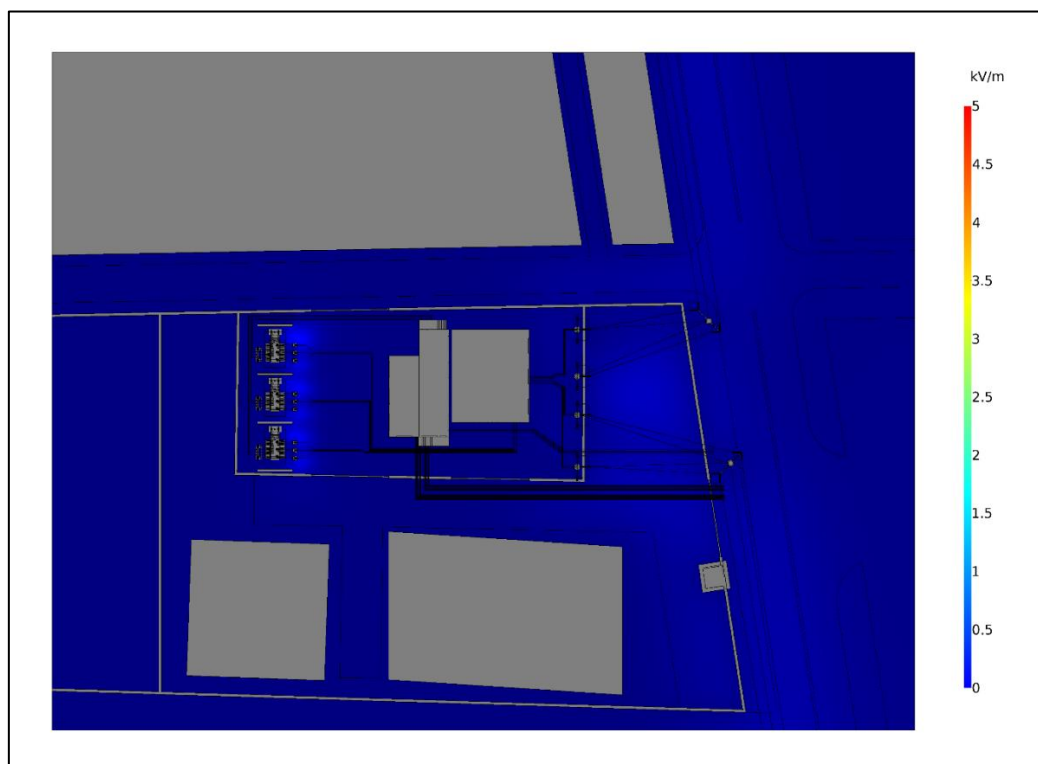


Figura 14. Intensidad de campo eléctrico emitido por la subestación OCCIDENTE a 1 m de altura (límite de color: 5 kV/m).

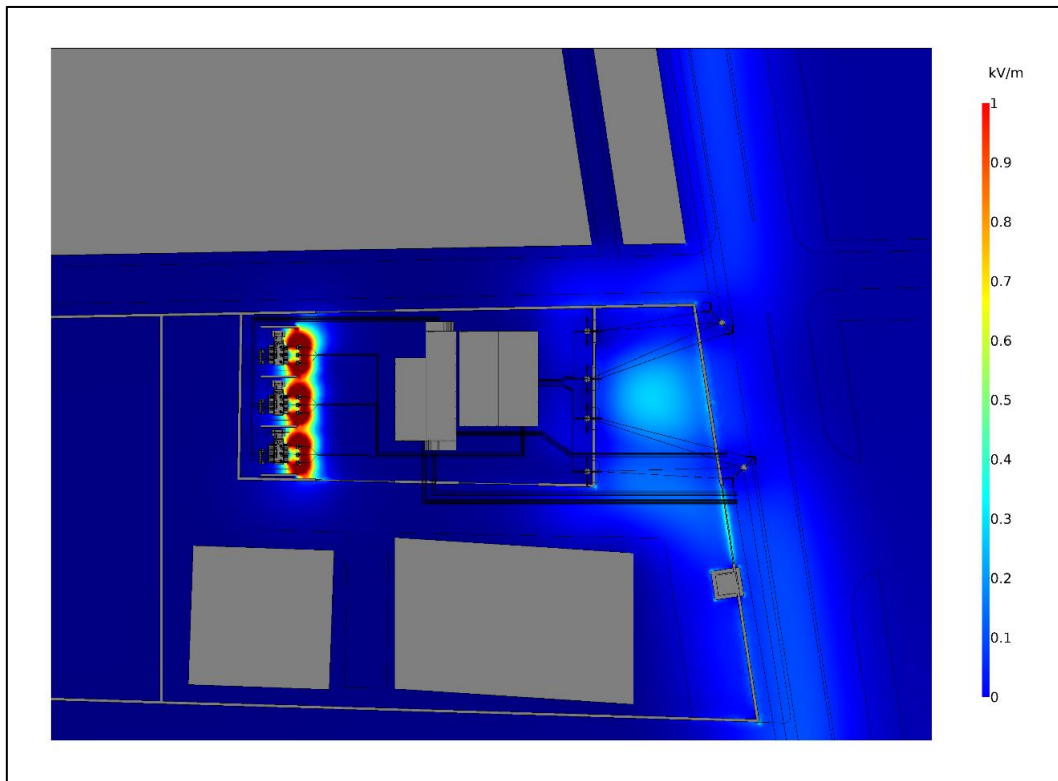


Figura 15. Intensidad de campo eléctrico emitido por la SE Occidente a 2 m de altura (límite de color: 1 kV/m).

A continuación, se presenta la distribución de intensidad de campo eléctrico de forma longitudinal a un (1) metro de altura en cada uno de los cortes establecidos previamente en la **Figura 8**.

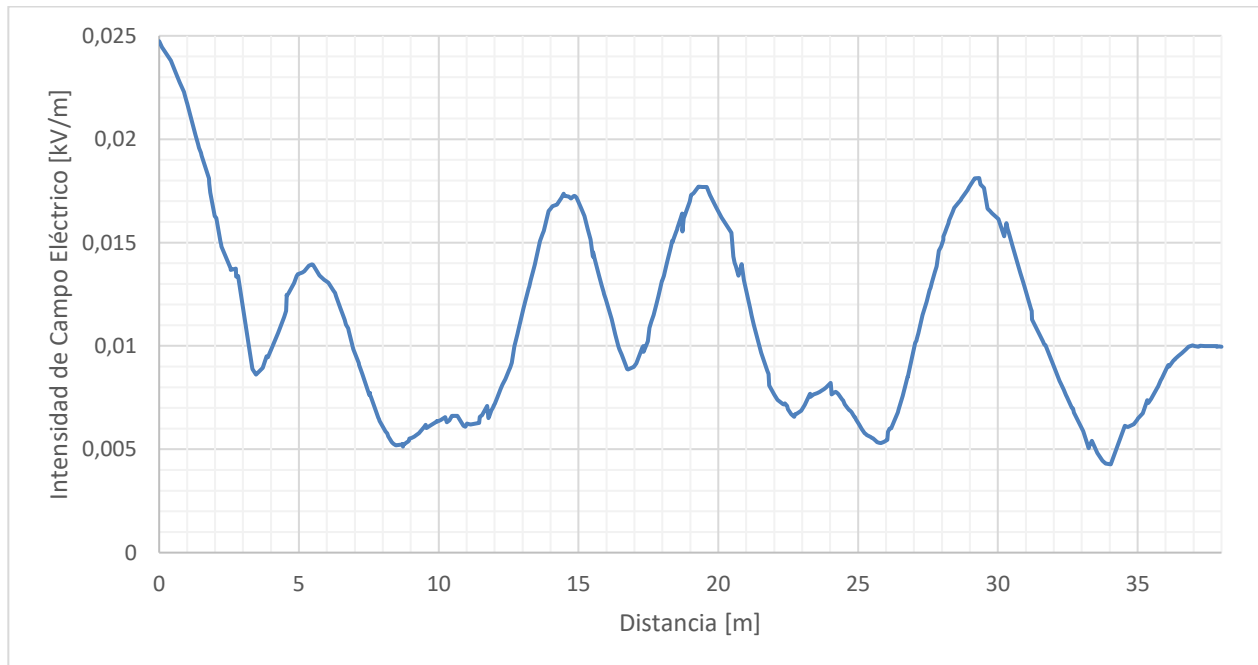


Figura 16. Intensidad de campo eléctrico sobre el corte 1 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

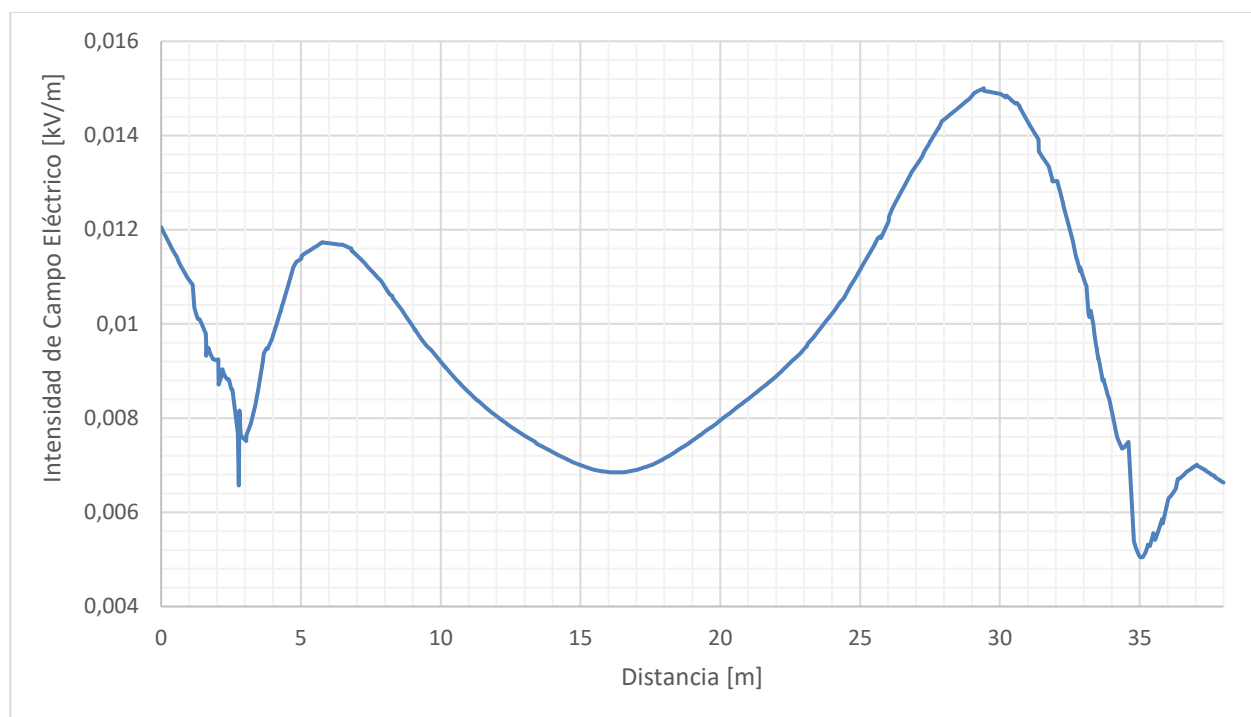


Figura 17. Intensidad de campo eléctrico sobre el corte 2 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

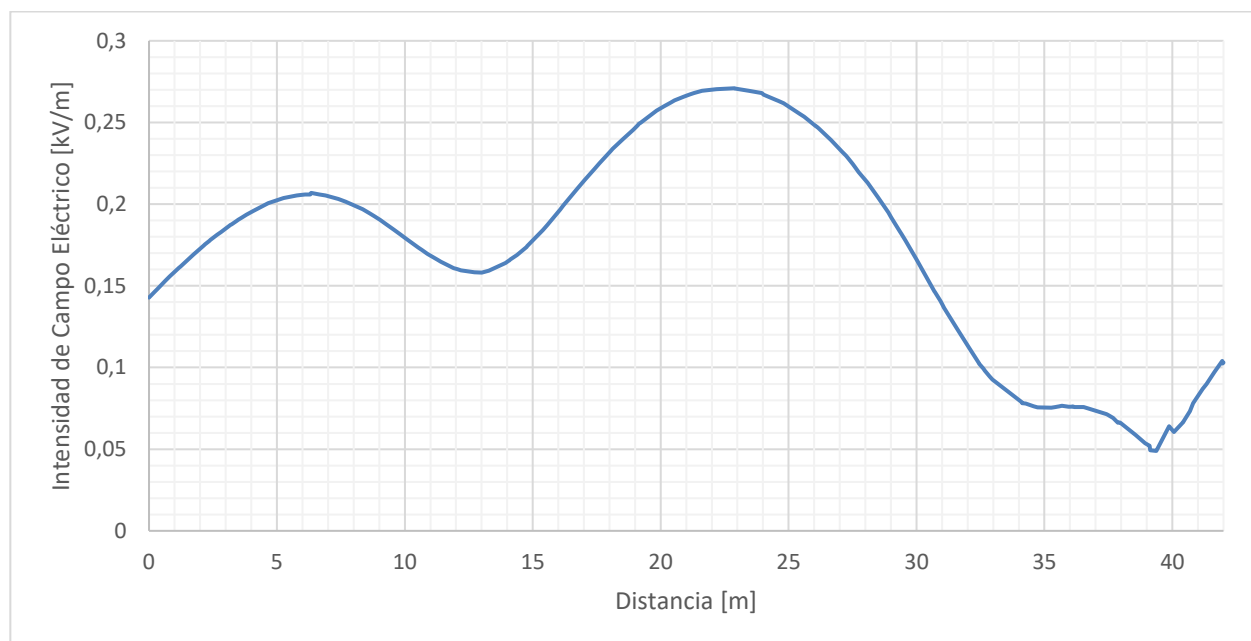


Figura 18. Intensidad de campo eléctrico sobre el corte 3 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

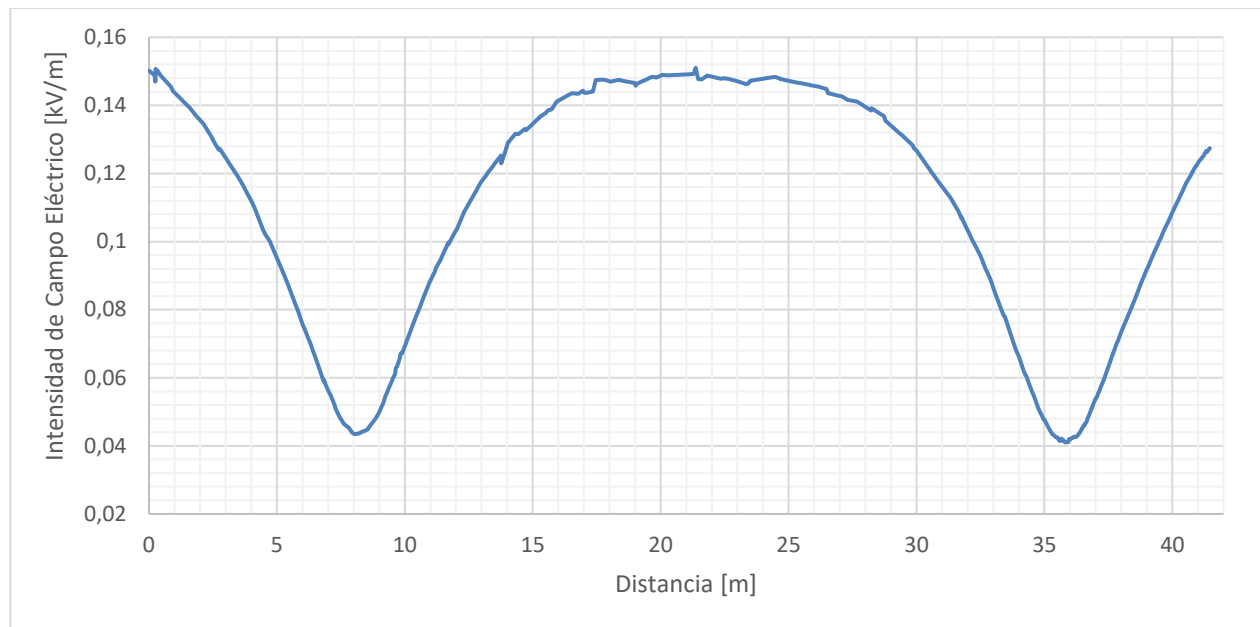


Figura 19. Intensidad de campo eléctrico sobre el corte 4 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

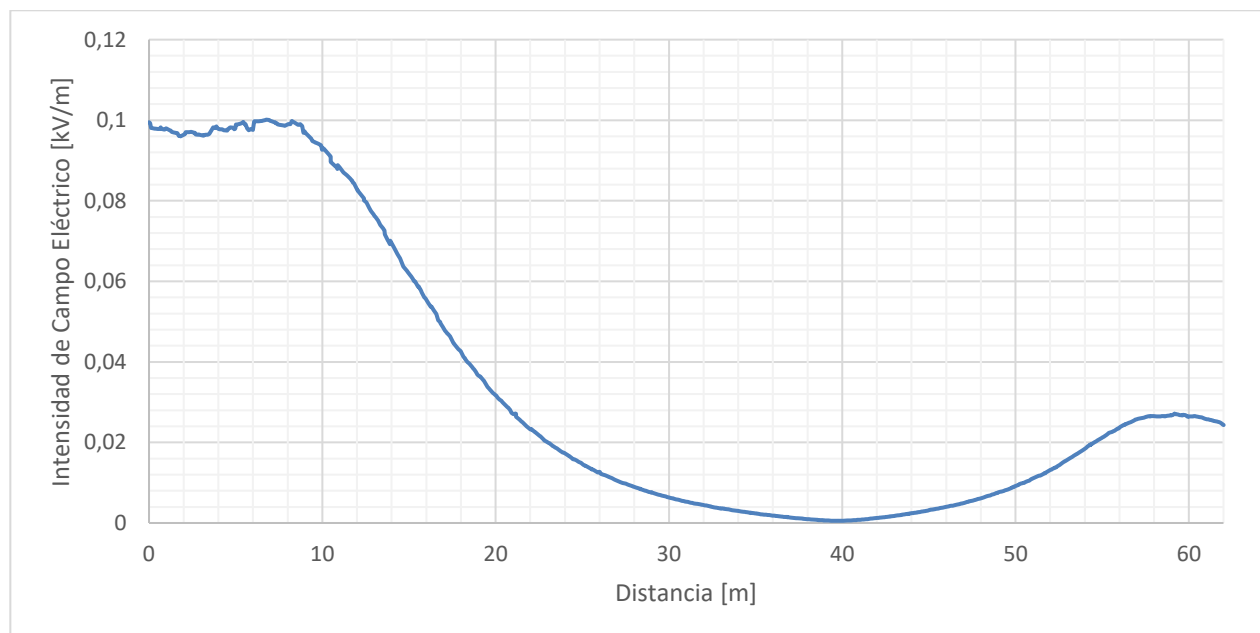


Figura 20. Intensidad de campo eléctrico sobre el corte 5 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

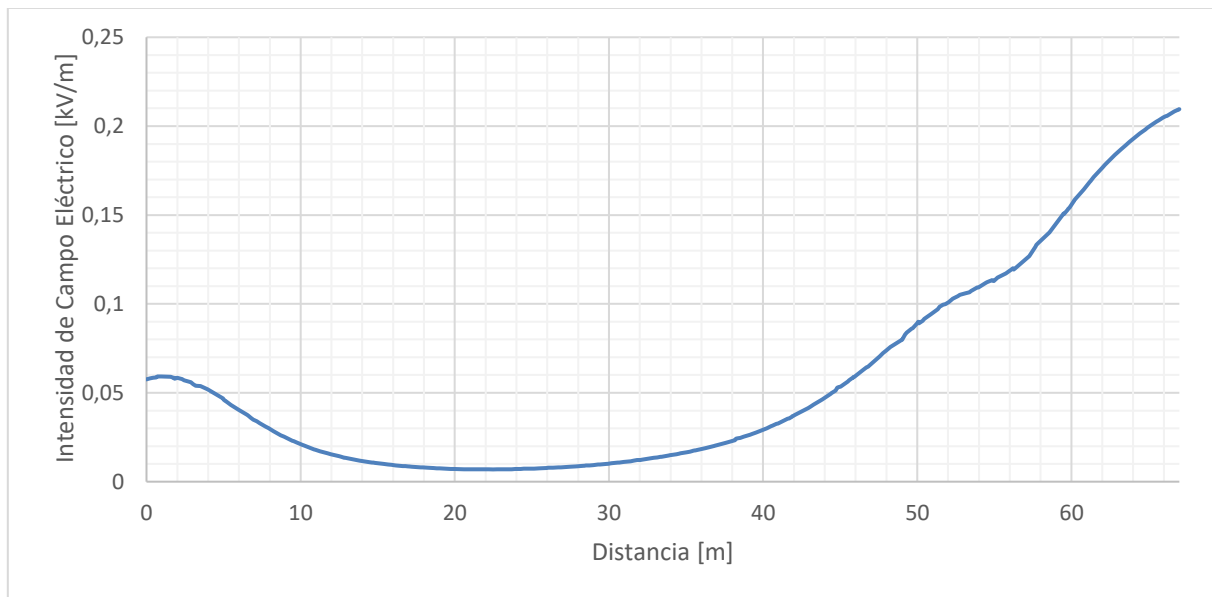


Figura 21. Intensidad de campo eléctrico sobre el corte 6 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

6.2. Simulación de campo magnético

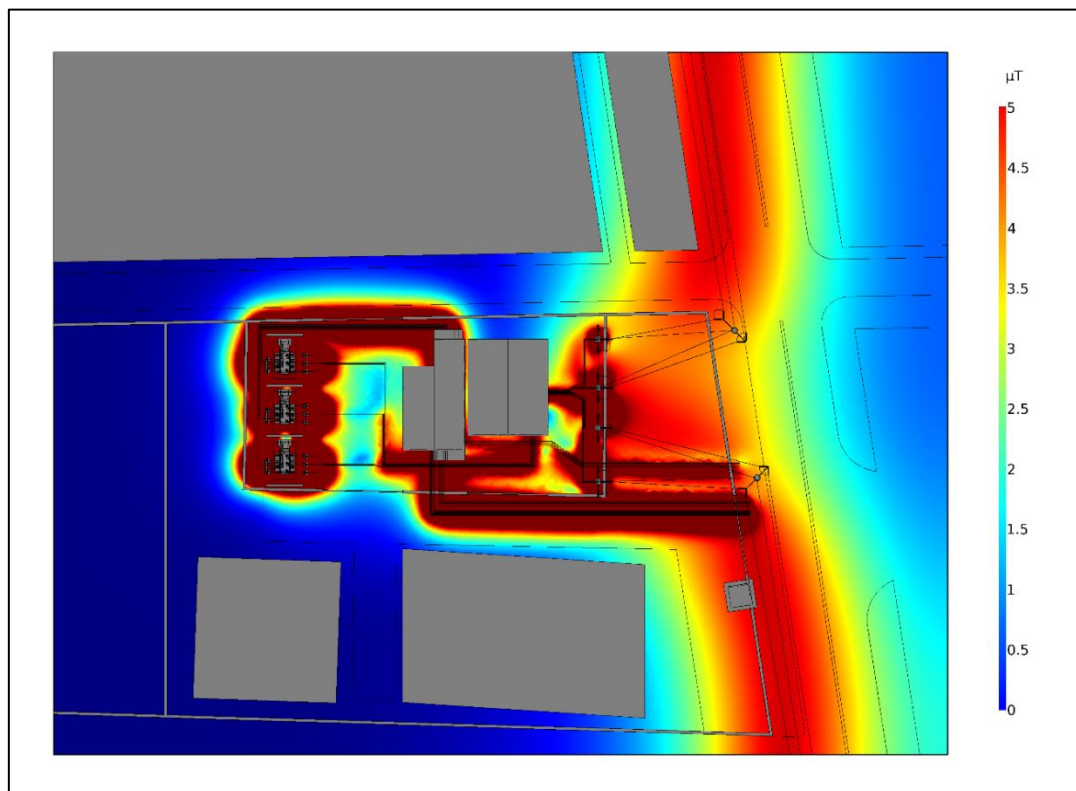


Figura 22. Densidad de flujo magnético emitido por la SE OCCIDENTE a 1 m de altura (límite de color: 5 μT).

En las **Figura 22**, **Figura 23**, **Figura 24** y **Figura 25** se encuentra el resultado de las simulaciones de campo magnético calculados a un metro de altura y con una escala de colores de 5 μT , 50 μT , 200 μT y 1000 μT . Adicionalmente se puede observar que los elementos de mayor densidad de flujo magnético

se presentan en los conductores de media tensión que salen de los transformadores tanto en los transformadores de 115/34.5 kV como los de 115/11.4 kV.

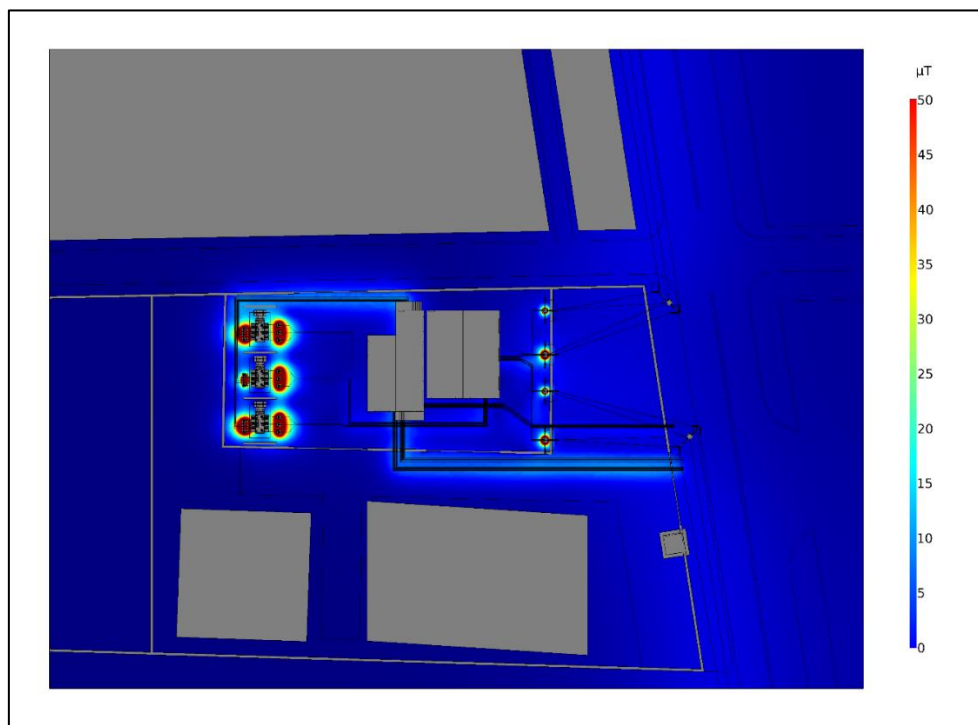


Figura 23. Densidad de flujo magnético emitido por la SE OCCIDENTE a 1 m de altura (límite de color: 50 μT).

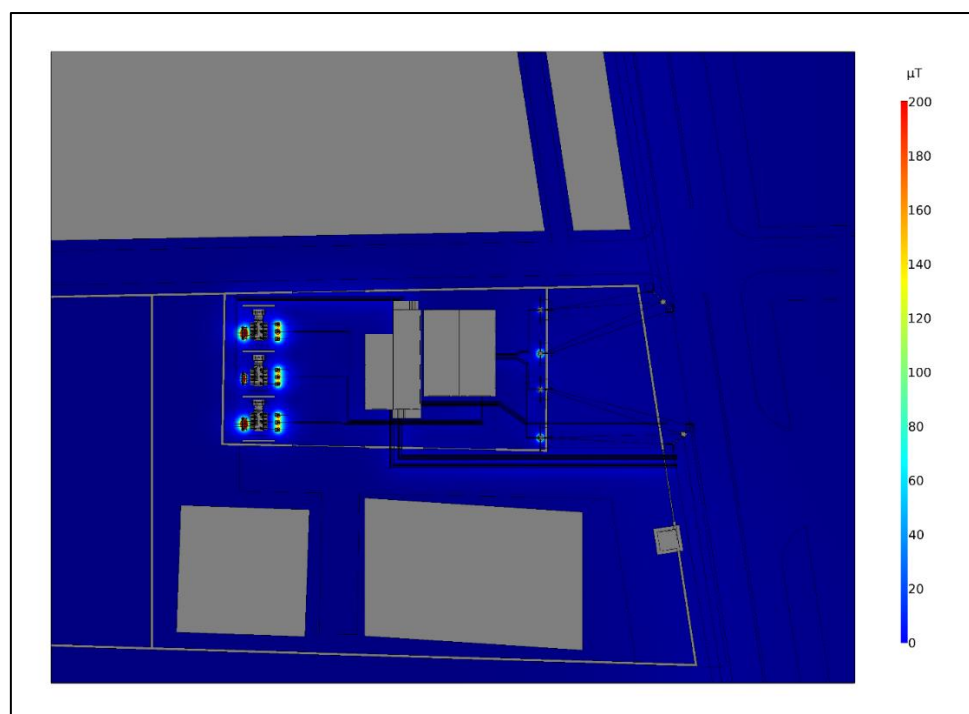


Figura 24. Densidad de flujo magnético emitido por la subestación OCCIDENTE a un metro de altura (límite de color: 200 μT).

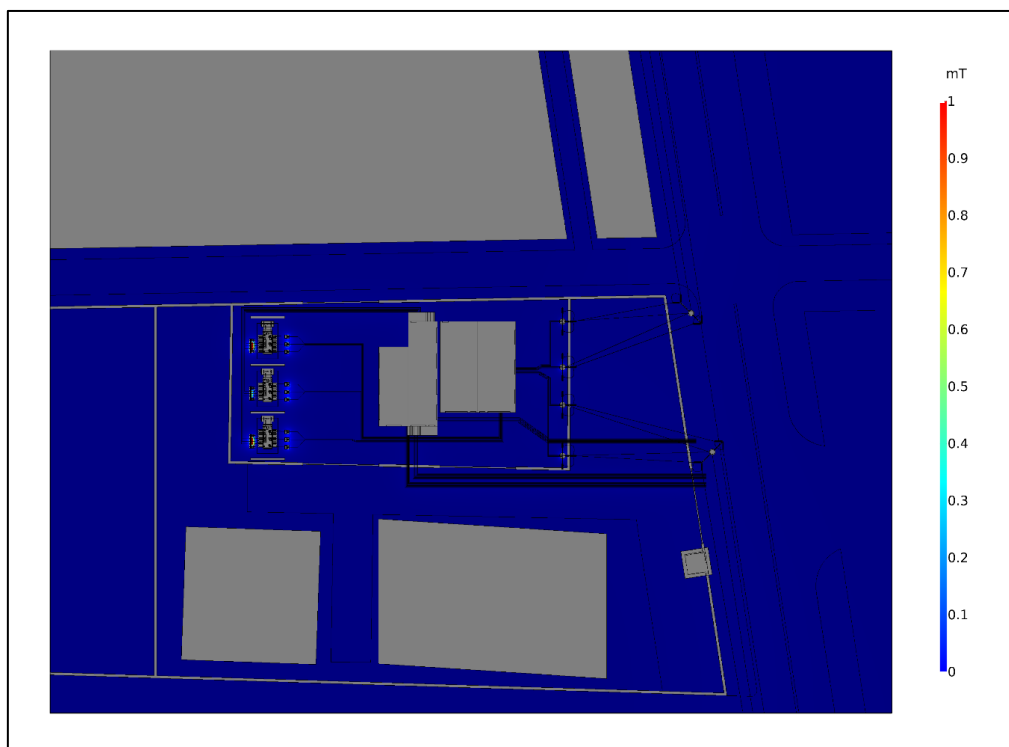


Figura 25. Densidad de flujo magnético emitido por la SE OCCIDENTE a 1m de altura (límite de color: 1000 μ T).

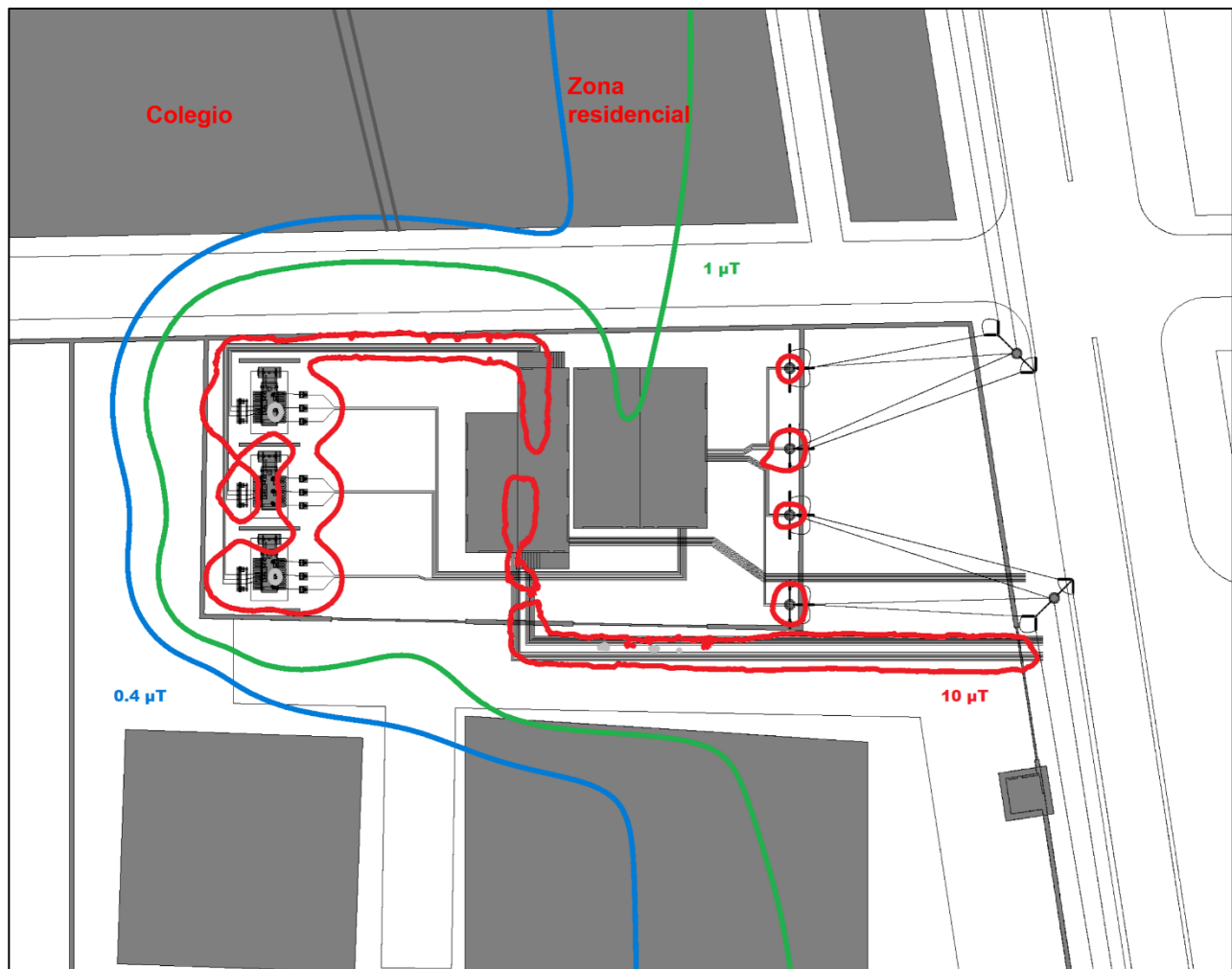


Figura 26. Isolíneas de densidad de flujo magnético producidas por la SE Occidente y los circuitos que la conforman a una altura de un (1) metro sobre el suelo.

A continuación, se presenta la densidad de flujo magnético obtenida a un metro de altura en cada uno de los cortes establecidos previamente en la **Figura 8**.

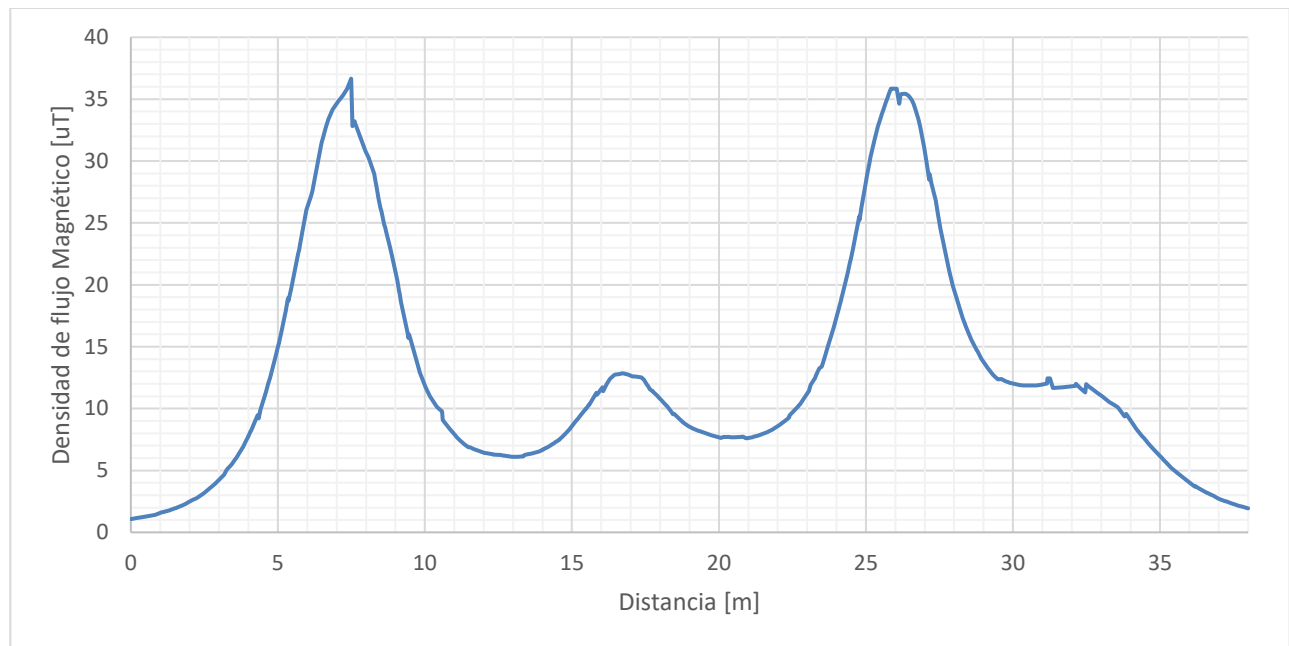


Figura 27. Densidad de flujo magnético sobre el corte 1 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

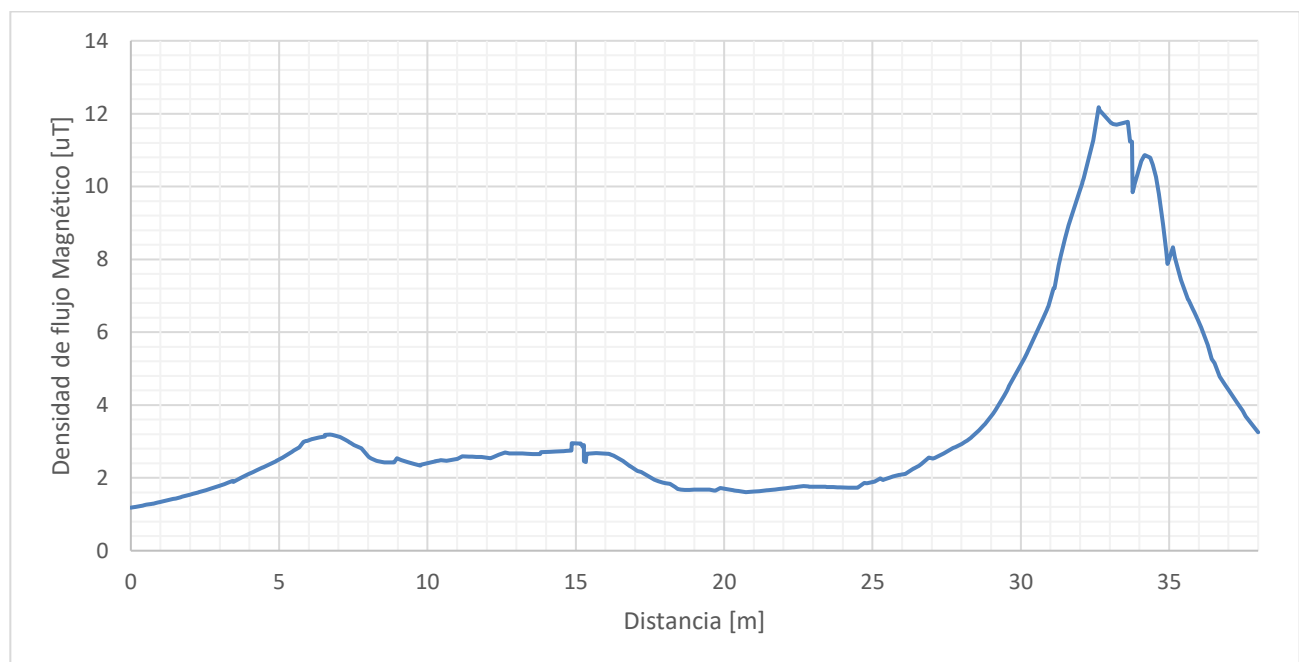


Figura 28. Densidad de flujo magnético sobre el corte 2 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

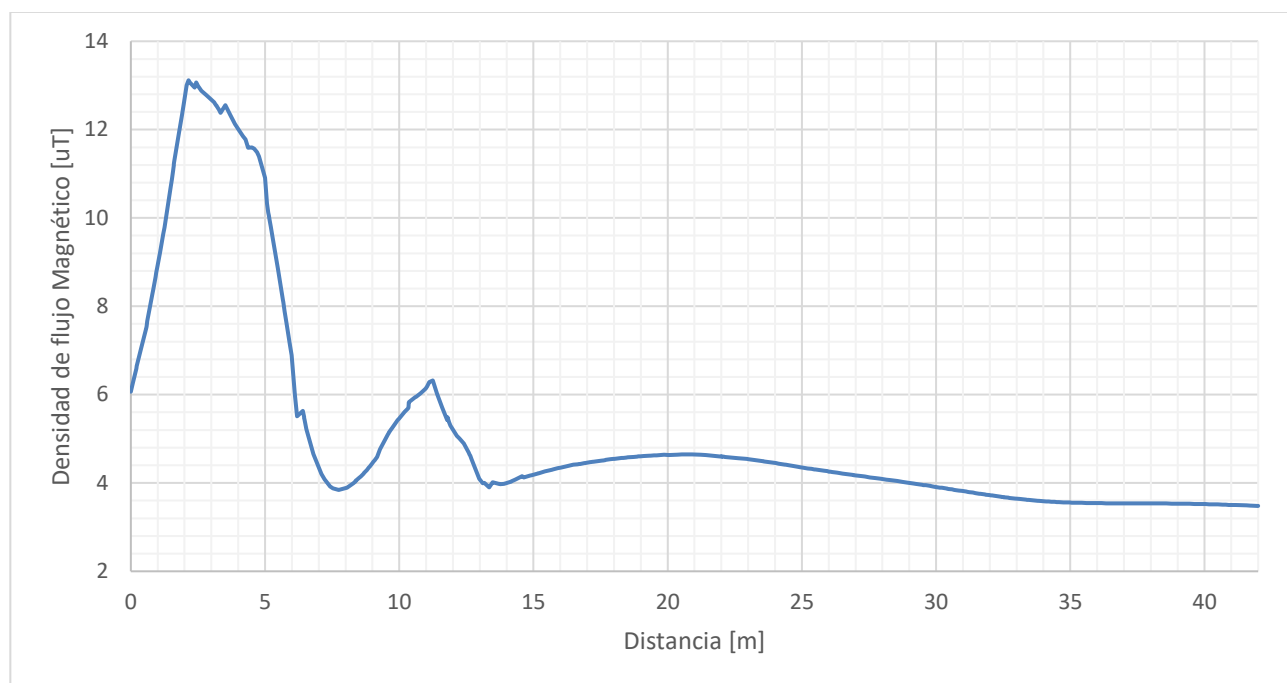


Figura 29. Densidad de flujo magnético sobre el corte 3 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

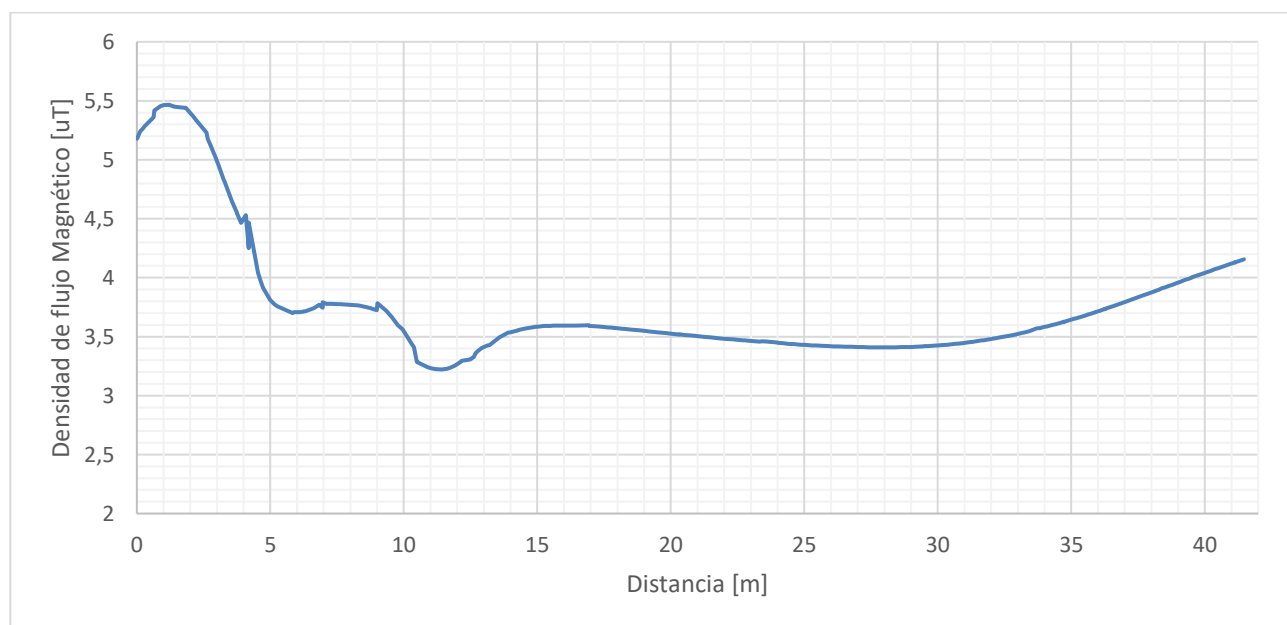


Figura 30. Densidad de flujo magnético sobre el corte 4 presentado en la **Figura 8**, a un metro de altura.

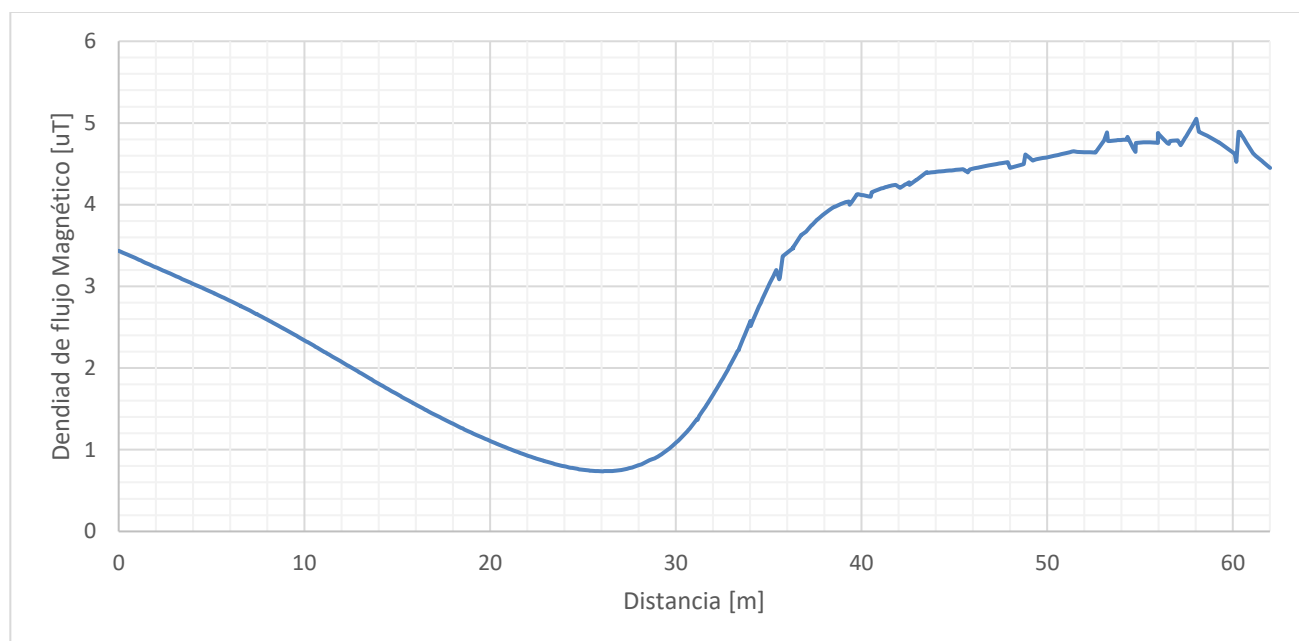


Figura 31. Densidad de flujo magnético sobre el corte 5 presentado en la **Figura 8**, a 1m de altura.

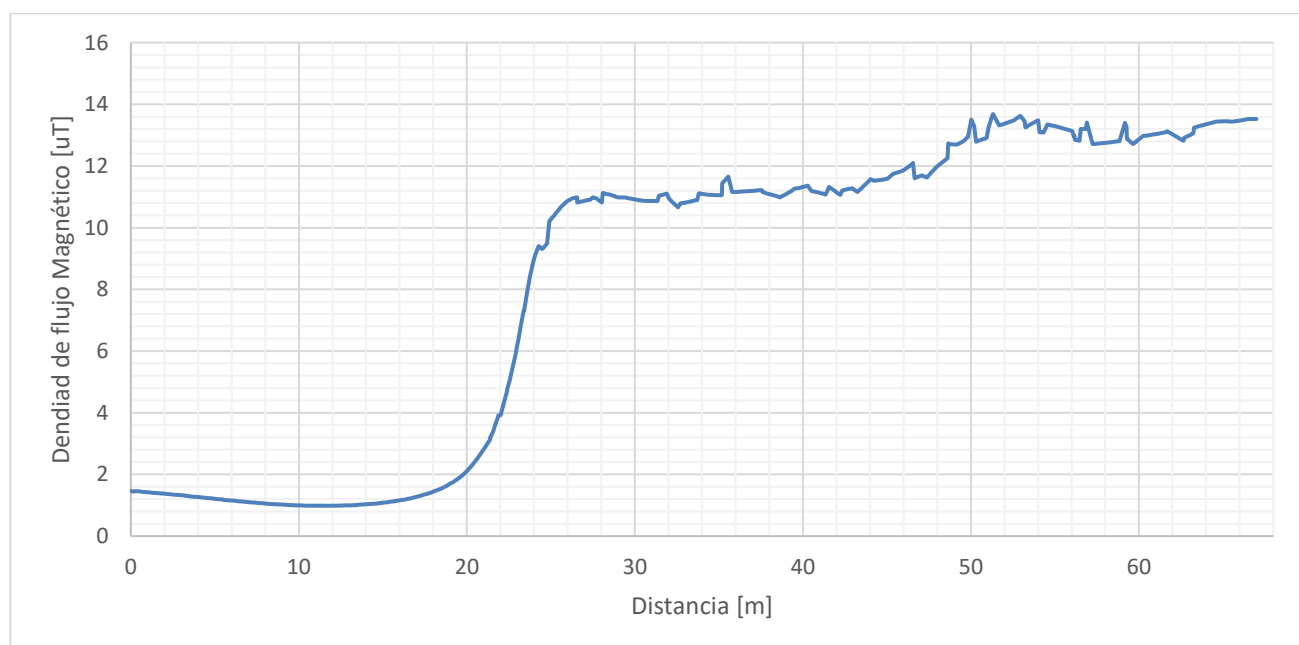


Figura 32. Densidad de flujo magnético sobre el corte 6 presentado en la **Figura 8**, a 1 m de altura

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Simulación de campo eléctrico

Las simulaciones indican que, a un metro de altura, ninguna zona al exterior de la subestación sobrepasa el límite de exposición para público general establecida en el RETIE (4,16 kV/m). Adicionalmente, se puede observar que al interior de la subestación no se presentan intensidades de campo eléctrico superiores al límite de exposición ocupacional de (8,3 kV/m).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las **Figura 19 y Figura 20** por medio de los cortes 4 y 5 (**Figura 8**), se puede corroborar que la intensidad de campo eléctrico medido en la zona perimetral y debajo de las líneas, no supera los límites establecidos por el RETIE ya que los valores máximos alcanzados en estas gráficas no exceden los 0,2 kV/m. De igual manera en la **Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 20** correspondiente a los cortes 1, 2, 3 y 6 (**Figura 8**), no se exceden los límites establecidos por el RETIE para exposición ocupacional.

7.2. Simulación de campo magnético

Los resultados de la simulación muestran que los niveles de corriente con los que opera la subestación en los casos más críticos (de acuerdo con los diseños aportados por ENEL-CODENSA) que serían los de máxima carga de la subestación, situación que por confiabilidad no es normal ya que los equipos (líneas y transformadores) se cargan hasta un 70% dando espacio a que, ante una falla de un equipo, pueda entrar el otro a respaldar por un tiempo. Con estos datos críticos se encontró que los valores de campo magnético fuera de la subestación están muy por debajo de los límites de densidad de flujo magnético máximos exigidos en el numeral 14.3 del RETIE para exposición a público general (200 μ T) en la zona perimetral (exterior) de la subestación a un metro de altura, como se muestra en la **Figura 26**

Aunque la legislación colombiana no lo exige explícitamente, por la posible afectación a la salud de menores y en aplicación del principio de precaución, el campo magnético se debe disminuir tanto como sea posible, en el caso del colegio que quedaría al lado de la subestación la incidencia de campo magnético debido a la subestación está por debajo de 0,4 uT y será menor en la operación ya que normalmente no se lleva la subestación al 100% de su capacidad.

En la **Figura 24 y Figura 25** se aprecia que, salvo la salida en MT de los transformadores de potencia, el patio no se excede los límites establecidos por el RETIE para exposición ocupacional (1000 μ T) teniendo una densidad de flujo magnético máxima de 50 μ T.

8. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos por medio de simulación muestran que los valores de emisión de campos eléctricos y magnéticos no superan los valores máximos permitidos por el RETIE en el parágrafo 14,3 con valores muy inferiores a 4160 V/m y 200 uT respectivamente.

Aún en la máxima condición de carga de operación (100%) de la subestación eléctrica Occidente, el valor de campo magnético, debido a la subestación, en la zona del colegio, está por debajo de 0,4 uT como se muestra en la **Figura 26**.

9. REFERENCIAS

IEEE, Norma 466. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines.

Ministerio De Minas y Energía de Colombia. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE (2013).

Van Deventer, E. (2007). Environmental health criteria 238: Extremely low frequency fields. World Health Organization. Geneva: WHO Offset Publication.

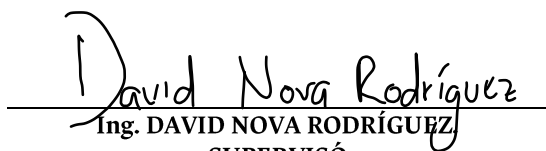
10. INFORMACIÓN ADICIONAL DEL INFORME

Encargado	Ing. Andrés Felipe Escobar	Supervisor	Ing. David Nova R
Supervisores auxiliares	Carlos Camilo Caro		
Cotización:	LIAT-ER 01C205V3		

11. RESPONSABLES



Ing. ANDRÉS FELIPE ESCOBAR PARRA
ENCARGADO
Ingeniero de Proyectos
Universidad Nacional de Colombia



Ing. DAVID NOVA RODRÍGUEZ
SUPERVISÓ

Ingeniero de Proyectos
Universidad Nacional de Colombia



Ing. FRANCISCO JAVIER AMÓRTEGUI GIL
AUTORIZÓ

Jefe Técnico de Ensayos
Universidad Nacional de Colombia

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