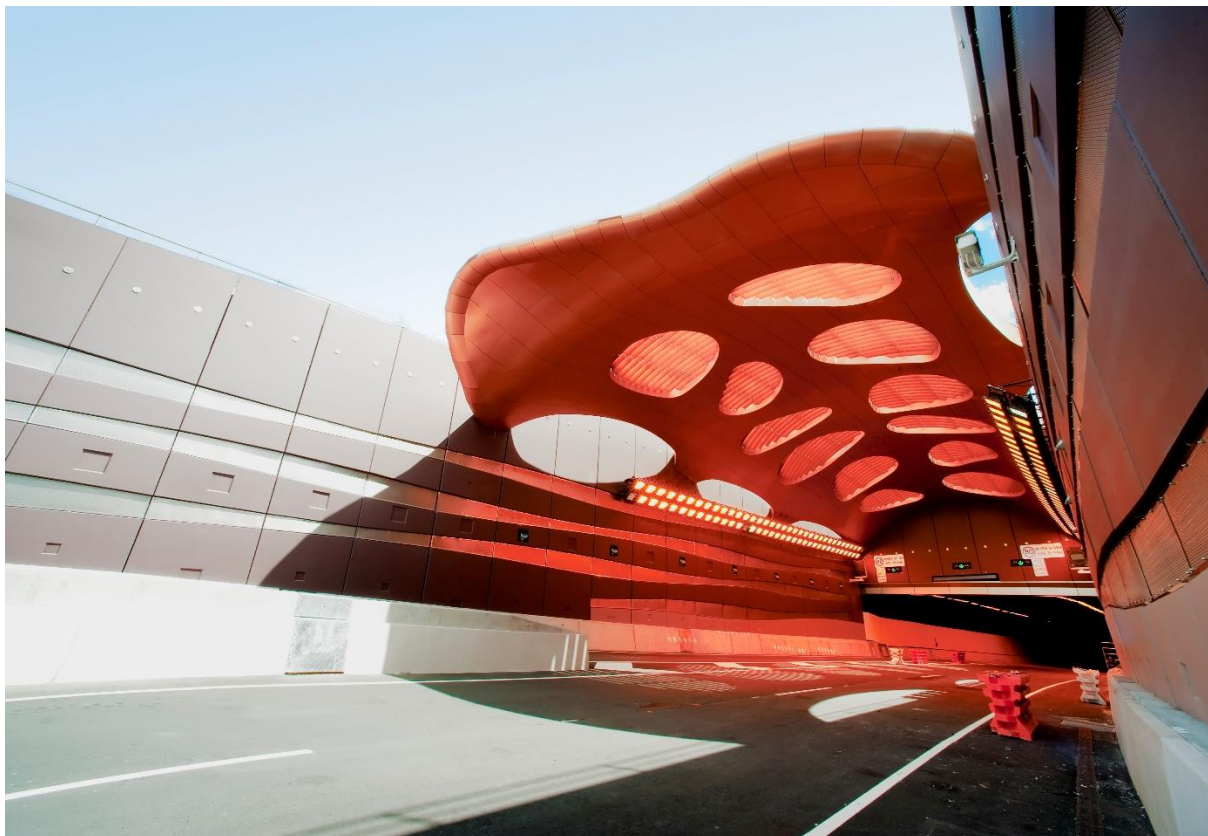


PROPUESTA DE PROYECTO PARA EMPRESA NACIONAL DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EENE, HONDURAS- 2017

# AMPLIACIÓN SUBESTACIÓN TONCONTIN 230/138/13,8 kV, 150MVA ESTUDIO DE CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO

OCTOBER 23, 2017

CONFIDENCIAL





# **AMPLIACIÓN SUBESTACIÓN TONCONTIN 230/138/13,8 KV, 150MVA ESTUDIO DE CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO**

PROPUESTA DE PROYECTO PARA EMPRESA  
NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA EENE,  
HONDURAS- 2017

MEMORIA DE CÁLCULO (VERSION 0.0)  
CONFIDENCIAL

PROYECTO NO.: PROPUESTA DE NEGOCIO.  
FECHA: NOVEMBER 2017

WSP  
CRA 19 # 93 A - 45  
BOGOTÁ, COLOMBIA

TELEFONO: +57 (1) 7562989  
WSP.COM

---

# GESTIÓN DE CALIDAD

REVISIÓN	TEMA	REVISIÓN 1	REVISIÓN 2	REVISIÓN 3
Observaciones				
Fecha	2017/11/01			
Preparado por	Benjamin Alvarez N. Ing. Electricista			
Firma				
Revisado por	Marco Ortiz Ing. Electricista			
Firma				
Autorizado por	Douglas Majetic Ing. Electricista			
Firma				
Número de proyecto	Propuesta de proyecto para EENE			
Número de reporte				
Referencia de documento				

---

# FIRMAS

PREPARADO POR

---

Benjamin Álvarez N.  
Ingeniero de Diseño

REVISADO POR

---

Marco Ortiz  
Coordinador estudios eléctricos

---

---

# EQUIPO DE TRABAJO

## CLIENTE

Función	Nombre
---------	--------

Función	Nombre
---------	--------

Función	Nombre
---------	--------

## WSP

Elaboración	Benjamin Alvarez N.
-------------	---------------------

Revisión	Marco Ortiz
----------	-------------

Aprobación	Douglas Majetic
------------	-----------------

# TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETO.....	2
3	NORMATIVA APLICABLE.....	3
4	METODOLOGÍA.....	4
4.1	Cálculo del campo eléctrico.....	4
4.2	Cálculo del campo magnético.....	6
4.3	Datos de entrada al software.....	7
5	RESULTADOS.....	12
5.1	Cálculo de campo magnético.....	12
5.2	Cálculo de campo eléctrico.....	13
6	CONCLUSIONES.....	16

## TABLAS

TABLA 1. NIVELES MÁXIMOS DE CAMPO ELÉCTRICO RECOMENDADOS POR EL ICNIRP .....	5
TABLA 2. NIVELES MÁXIMOS DE CAMPO MAGNÉTICO RECOMENDADOS POR EL ICNIRP .....	7
TABLA 3 NIVELES MÁXIMOS DE CAMPO ELÉCTRICO VERSUS MÁXIMOS RECOMENDADOS POR EL ICNIRP .....	16
TABLA 4 NIVELES MÁXIMOS DE CAMPO MAGNÉTICO VERSUS MÁXIMOS RECOMENDADOS POR EL ICNIRP .....	16

## FIGURAS

FIGURA 1. DATOS DE ENTRADA, CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTORES.....	7
FIGURA 2. DATOS DE ENTRADA, GEOMETRÍA Y RANGO DE ESTUDIO DE CAMPO ELÉCTRICO .....	8
FIGURA 3. DATOS DE ENTRADA, GEOMETRÍA Y RANGO DE ESTUDIO DE CAMPO MAGNÉTICO .....	9
FIGURA 4. DATOS DE ENTRADA, PUNTOS DE INICIO Y FIN DE LÍNEAS Y CONDUCTORES .....	10
FIGURA 5. DIMENSIONES DE SUBESTACIÓN, LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y RANGO DE ESTUDIO.....	11
FIGURA 6. RESULTADOS, DATOS DE SALIDA DE CAMPO MAGNÉTICO EN ÁREA DE ESTUDIO.....	12
FIGURA 7. RESULTADOS, ISOLINEAS DE CAMPO MAGNÉTICO EN ÁREA DE ESTUDIO.....	13
FIGURA 8. RESULTADOS, DATOS DE SALIDA DE CAMPO ELÉCTRICO EN ÁREA DE ESTUDIO.....	14
FIGURA 9. RESULTADOS, ISOLINEAS DE CAMPO ELÉCTRICO EN ÁREA DE ESTUDIO.....	15
FIGURA 10. DIMENSIONES DE TORRE TIPÓ E ANCLAJE 138 KV ...	17
FIGURA 11. TORRE TIPO DD 230 KV .....	17
FIGURA 12. VISTA EN PLANTA SUBESTACIÓN TONCINTIN 230/138/13,8 KV.....	18
FIGURA 13. CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTOR DE LÍNEAS ACSR, DE CATÁLOGO DE FABRICANTE PROCABLES.....	18
FIGURA 14. CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTOR DE LÍNEAS AAC, DE CATÁLOGO DE FABRICANTE PROCABLES.....	19
FIGURA 15 ÁREA SIMULADA PARA EL CÁLCULO DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS .....	19

# 1 INTRODUCCIÓN

La Empresa Nacional de Energía Eléctrica de Honduras, conocida por sus siglas ENEE, planea la construcción de la ampliación de la subestación Toncontín 230 kV/138 kV /13,8 kV, a las afueras de la ciudad de Tegucigalpa. Para el cual se requiere la comprobación de los niveles de campo eléctrico y magnético, según los límites de la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, en inglés).



## 2 OBJETO

El objeto del presente documento es presentar los resultados como la metodología de cálculo de campos eléctricos y magnéticos presentes en la subestación Toncontin 230/138/13,8 kV - 150 MVA, de manera que cumpla con los valores límites de la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP).

### 3 NORMATIVA APLICABLE

A continuación se citan las normas nacionales, guías de ingeniería y referentes que se consideraron para definir técnicamente los valores de campo y eléctrico magnético:

1. International Comission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz - 100kHz)." 2010.
2. B. Lee, J. Park, S. Myung, S. Min and E. Kim, 'An effective modelling method to analyze the electric field around transmission lines and substations using a generalized finite line charge', IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 3, pp. 1143-1150, 1997.
3. S. A. Word, S. M. Ghania and E. M. Shaalan, 'Three-Dimensional Electric Field Analysis and Measurement Inside High Voltage Substations', International J. of Electrical and Power Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 150-156, 2011.
4. R. Lings, EPRI AC transmission line reference book. Palo Alto, Calif.: Electric Power Research Institute, 2005.
5. T. Modric, S. Vujevic and D. Lovric, '3D COMPUTATION OF THE POWER LINES MAGNETIC FIELD', Progress In Electromagnetics Research M, vol. 41, pp. 1-9, 2015.

- **Manuales de ingeniería:**

1. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and above, 2nd ed., EPRI Publications, Palo Alto (CA), 2005.
2. Southwire Company, Overhead conductor manual, 2nd ed., Carrollton (GA), 2007.

## 4 METODOLOGÍA

A continuación se presenta formulación utilizada para los cálculos de intensidad de campo magnético y eléctrico, valores que deben respetar los criterios de la OMS<sup>1</sup> y el ICNIRP<sup>2</sup> los cuales tienen prioridad por la limitación de los efectos inmediatos y a corto plazo sobre la salud humana.

### 4.1 CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO<sup>3</sup>

Los campos eléctricos, en las proximidades de las líneas de transmisión, barrajes en general conductores eléctricos, se calculan asumiendo que no hay cargas libres en el espacio. Se asume que “la tierra” es un conductor perfecto porque el tiempo requerido por las cargas para redistribuirse sobre la superficie de la tierra, bajo la acción de un cambio en el campo aplicado, es extremadamente pequeño comparado con el período de la frecuencia industrial.

El cálculo del campo eléctrico se realizó para la condición más desfavorable, considerando la tensión máxima de operación del sistema, la geometría descrita en la planimetría de la subestación y las líneas de estudio.

La intensidad del campo eléctrico se calcula mediante el software del Electric Power Research Institute – EPRI, EMF-4 Electric Field of Transmission Lines (3-D); seguidamente se verifica el cumplimiento con lo establecido en el ICNIRP. Toda la formulación y procedimientos de cálculo empleados por dicho software corresponden con lo establecido en el Transmission Line Reference Book de EPRI.<sup>4</sup>

Para el cálculo del campo eléctrico cada conductor se caracteriza por el diámetro y por una tensión real e imaginaria  $V = V_r + jV_i$ .

Las cargas  $Q$  en los conductores se determinan a partir de las tensiones  $V$  y los coeficientes de potencial de Maxwell  $P$ , con la ecuación matriz:

$$[Q] = [P]^{-1} \cdot [V]$$

La ecuación anterior puede ser escrita para cargas tanto reales como imaginarias, así:

$$[Q] = [Q_r] + j[Q_i]$$

$$[Q_r] = [P]^{-1} \cdot [V_r] \quad , \quad [Q_i] = [P]^{-1} \cdot [V_i]$$

Para una línea de transmisión o barraje compuesto de conductores paralelos sobre un terreno perfectamente plano, los elementos de la matriz  $[P]$  están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$P_{aa} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \ln \left( \frac{4 \cdot y_a}{d_a} \right) \quad , \quad P_{ab} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \ln \sqrt{\frac{(x_a - x_b)^2 + (y_a + y_b)^2}{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}}$$

Donde:

- $y_a, y_b$ : Altura de los conductores “a” y “b” sobre el suelo, (m)
- $d_a$ : Diámetro de conductor “a”, (m)
- $x_a, x_b$ : Coordenadas horizontales de los conductores “a” y “b”, (m)
- $\epsilon$ : Permitividad del aire,  $8,854 \cdot 10^{-12}$  (F/m)

<sup>1</sup> Organización Mundial para la Salud.

<sup>2</sup> International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

<sup>3</sup> El procedimiento de cálculo se realizó según lo descrito en el documento EPRI Transmission Line Reference Book. Pág 330-341.

<sup>4</sup> EPRI. Transmission Line Reference Book 2nd Ed. Pág 330-331.

Una vez resuelta la ecuación anterior y conocidas las cargas en cada conductor, el campo eléctrico en el punto N, de coordenadas en el espacio  $(x_n, y_n)$ , puede ser calculado. El campo debido a la carga en el conductor "a" y su imagen dentro de la Tierra es:

$$\vec{E}_a = \tilde{E}_{x,a} \cdot \vec{u}_x + \tilde{E}_{y,a} \cdot \vec{u}_y$$

Donde  $\vec{u}_x$  y  $\vec{u}_y$  son los vectores unitarios sobre los ejes vertical y horizontal y  $\tilde{E}_{x,a}$  y  $\tilde{E}_{y,a}$  están dados por:

$$\tilde{E}_{x,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia}) \cdot (x_n - x_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot [(x_n - x_a)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia}) \cdot (x_n - x_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot [(x_n - x_a)^2 + (y_a + y_N)^2]}$$

$$\tilde{E}_{y,a} = \frac{(q_{ra} + jq_{ia}) \cdot (x_n - x_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot [(x_n - x_a)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(q_{ra} + jq_{ia}) \cdot (y_n + y_a)}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot [(x_n - x_a)^2 + (y_a + y_N)^2]}$$

Las componentes vertical y horizontal,  $\tilde{E}_x$  y  $\tilde{E}_y$  del Campo Eléctrico se calculan mediante la adición de la contribución de todos los conductores,

$$\tilde{E}_x = \tilde{E}_{x,a} + \tilde{E}_{x,b} + \dots$$

$$\tilde{E}_y = \tilde{E}_{y,a} + \tilde{E}_{y,b} + \dots$$

Cada una de estas componentes es un fasor, expresado por partes real e imaginaria:

$$\tilde{E}_x = \tilde{E}_{rx} + j\tilde{E}_{ix}$$

$$\tilde{E}_y = \tilde{E}_{ry} + j\tilde{E}_{iy}$$

Las anteriores ecuaciones describen completamente el campo eléctrico. En lugar de usar las componentes horizontal y vertical, el campo eléctrico puede ser descrito por la parte real del vector y la parte imaginaria del vector:

$$\vec{E}_r = \tilde{E}_{rx} \cdot \vec{u}_x + \tilde{E}_{ry} \cdot \vec{u}_y$$

$$\vec{E}_i = \tilde{E}_{ix} \cdot \vec{u}_x + \tilde{E}_{iy} \cdot \vec{u}_y$$

Finalmente, se calcula la magnitud del campo eléctrico y se verifica el cumplimiento con los niveles establecidos por ICNIRP (ver Tabla 1), así:

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_i^2}$$

Siendo:

- $E$ : es la intensidad del Campo Eléctrico (kV/m);
- $E_r$ : es la componente real del Campo Eléctrico (kV/m);
- $E_i$ : es la componente imaginaria del Campo Eléctrico (kV/m).

**Tabla 1. Niveles máximos de campo eléctrico recomendados por el ICNIRP**

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico (kV/m)
Poblacional	4,16
Ocupacional	8,33

**Nota:** Valores establecidos para 60 Hz

## 4.2 CÁLCULO DEL CAMPO MAGNÉTICO

El campo magnético, se calculó mediante un análisis bi-dimensional, asumiendo líneas paralelas sobre un terreno nivelado.

El cálculo del campo magnético se realizó para la condición más desfavorable, en este caso, considerando la máxima corriente a transportar por los conductores de línea y barrajes. Al igual que con el campo eléctrico se utiliza la geometría descrita en la planimetría de la subestación y las líneas de estudio.

La densidad de campo magnético se calcula mediante el software del Electric Power Research Institute – EPRI, EMF-7 Magnetic Field (3-D). Toda la formulación y procedimientos de cálculo empleados por dicho software corresponden con lo establecido en el Transmission Line Reference Book de EPRI, del cual se desglosa el siguiente procedimiento.<sup>5</sup>

Usando el sistema de coordenadas descrito en la Figura 1, donde el eje Z es paralelo a la línea, la intensidad de campo magnético  $H_{j,i}$ , en el punto  $P(x_i, y_i)$  a la distancia  $r_{i,j}$  de un conductor con una corriente  $I_i$ , tiene una amplitud:

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j}}$$

En notación vectorial:

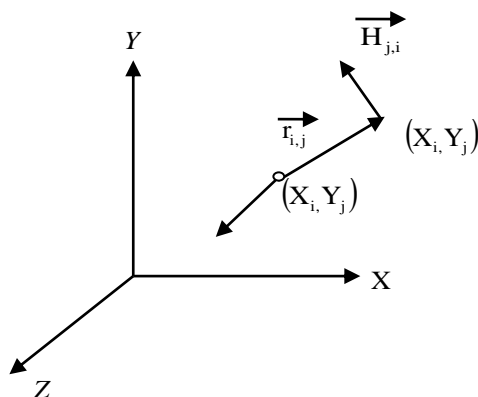
$$H_{j,i} = \frac{I_i \times r_{i,j}}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j}} \cdot \vec{\phi}_{i,j}$$

Donde  $\vec{\phi}_{i,j}$  es el vector unitario en la dirección del producto cruz del vector corriente y el vector segmento  $r_{i,j}$ . El vector unitario es igual a:

$$\vec{\phi}_{i,j} = \frac{y_i - y_j}{r_{i,j}} \cdot \vec{u}_x + \frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} \cdot \vec{u}_y$$

Donde  $\vec{u}_x$  y  $\vec{u}_y$  son los vectores unitarios en la dirección de los ejes horizontal y vertical, respectivamente.

**Figura 1. Sistema de coordenadas para cálculo del Campo Magnético**



El campo magnético total es la suma de todas las contribuciones de las corrientes de línea:

<sup>5</sup> EPRI. Transmission Line Reference Book 2nd Ed. Pág 341-343.

$$\vec{H}_j = \sum_i \frac{I_i}{2 \cdot \pi \cdot r_{i,j}} \cdot \vec{\phi}_{i,j}$$

Finalmente, se calcula la Densidad de Campo Magnético y se verifica el cumplimiento con los niveles recomendados por ICNIRP, así:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

Donde:

$B$ : es densidad de flujo magnético.

$\mu$ :  $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m, tanto para el aire como para la Tierra.

**Tabla 2. Niveles máximos de campo magnético recomendados por el ICNIRP**

Tipo de exposición	Densidad de flujo magnético (μT)
Poblacional	83,3
Ocupacional	416,7

**Nota:** Valores establecidos para 60 Hz

### 4.3 DATOS DE ENTRADA AL SOFTWARE

A continuación se muestran los datos de entrada ingresados a los APPLLET desarrollados por el EPRI: EMF-4 Electric Field of Transmission Lines (3-D) y EMF-7 Magnetic Field (3-D); para cálculo del campo eléctrico y magnético. En los cuales se tiene en cuenta la geometría de las estructuras metálicas de los planos adjuntos, tanto para la subestación como para las líneas de transmisión, vista en planta y cortes de la subestación, características de los conductores, entre otros parámetros.

**Figura 1. Datos de entrada, características de conductores**

Descripción	Calibre del cable (MCM)	Cond. por fase (No.)	Corriente (A)	Tensión fase-fase (kV)	Tensión fase-tierra (kV)	Diam. de conductor (mm)	Diam. de conductor (cm)
Cable de línea	ACSR 477	2	2 x 668 (1336)	230	132,79	21,5	2,15
Cable de línea	ACSR 477	1	668	138	79,67	21,5	2,15
Cable de barraje sup.	AAC 1431	1	1100	230	132,79	35,01	3,501
Cable de barraje inf.	AAC 1431	2	2 x 1100 (2200)	230	132,79	35,01	3,501
Cable de barraje sup.	ACSR 795	1	690	138	79,67	28,1	2,81
Cable de barraje inf.	ACSR 795	1	690	138	79,67	28,1	2,81

**Nota:** La información de capacidad de corriente máxima por conductor utilizada en este estudio es suministrada por el cliente y/o catálogo de fabricante, Figura 13 y Figura 14.

Las alturas y longitudes de las líneas de transmisión, barrajes y derivaciones, son tomada de los planos adjuntos suministrados por el cliente, para el cual se tienen en cuenta las vista y planta y cortes, como se observa en la Figura 10 y Figura 11 del anexo.

A continuación se presentan las entradas en el software:

**Figura 2. Datos de entrada, geometría y rango de estudio de campo eléctrico**

## EMF-4 Transmission Line Electric Field (3-D)

Choose Input Type

Beginning and Ending Points

ID( # )	(cm)	(kV)	(degree)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
79	2.2	132.0	120.0	15.0	115.0	14.0	9.0	100.0	14.0
81	3.5	132.0	0.0	0.0	81.0	10.0	36.0	81.0	10.0
82	3.5	132.0	120.0	0.0	85.0	10.0	36.0	85.0	10.0
83	3.5	132.0	240.0	0.0	89.0	10.0	36.0	89.0	10.0
10	3.5	132.0	0.0	36.0	10.0	10.0	40.0	10.0	10.0
100	2.2	132.0	0.0	38.0	38.0	14.0	17.0	38.0	14.0
101	2.2	132.0	120.0	38.0	34.0	14.0	17.0	34.0	14.0
102	2.2	132.0	240.0	38.0	42.0	14.0	17.0	42.0	14.0
103	2.2	132.0	0.0	21.0	115.0	21.0	21.0	100.0	14.0
104	2.2	132.0	120.0	21.0	115.0	17.5	25.0	100.0	14.0
105	2.2	132.0	240.0	21.0	115.0	14.0	29.0	100.0	14.0

Load Source Data  
Save Source Data  
Delete Source  
View Source

Calculation Line or Rectangular Grid

☐ Calculation Line
☒ Calculation Grid

☒ X-Y Plane
☐ X-Z Plane
☐ Y-Z Plane

	Min	Max	Subdivisions
X (m)	-125	225	20
Y (m)	-100	175	20
Z (m)	1		

Electric Field and Space Potential

☒ Electric Field (V/m)
☐ Space Potential (V)

Contour Values

☒ Automatic
☐ Input by User

Highest
Lowest

Calculate  
Clear  
Demo

**Figura 3. Datos de entrada, geometría y rango de estudio de campo magnético**

## EMF-7 Magnetic Field (3-D)

Choose Source Type ▼

Source (ID#)	Source Type	Current (A)	Current Multiplication Factor	Phase Angle (degrees)
1	S	2200.00	1.00	0.00
2	S	2200.00	1.00	120.00
3	S	2200.00	1.00	240.00
4	S	2200.00	1.00	0.00
5	S	2200.00	1.00	120.00
6	S	2200.00	1.00	240.00
7	S	2200.00	1.00	0.00

Load Source Data

Save Source Data

Delete Source

View Source

-- Calculation Line or Rectangular Grid --

☐ Calculation Line  
☒ Calculation Grid

☒ X-Y Plane  
☐ X-Z Plane  
☐ Y-Z Plane

	Min	Max	Subdivisions
X(m)	-125	225	20
Y(m)	-100	175	20
Z(m)	1		

----- Contour Line Values (mG) -----

☐ Automatic  
☒ Input by User

Highest

Lowest

2500

2000

1500

1000

500

Calculate

Clear

Demo



**Figura 4. Datos de entrada, puntos de inicio y fin de líneas y conductores**

Electric Field and Space Potential

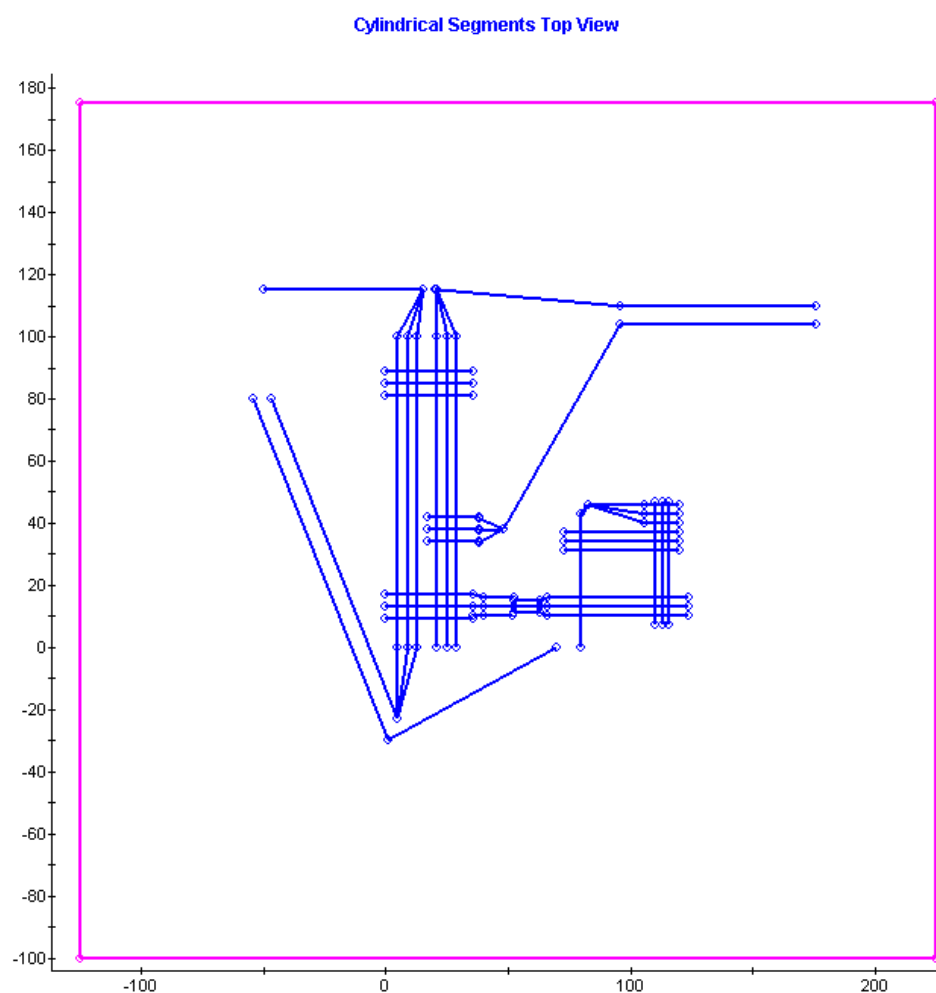
INPUT DATA

----- List of Sources -----

ID#	D (cm)	V (kV)	Phase Angle (degree)	Beginning Points			Ending Points		
				X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	3.5	132.0	0.0	5.0	0.0	14.0	5.0	100.0	14.0
3	3.5	132.0	240.0	13.0	0.0	14.0	13.0	100.0	14.0
4	3.5	132.0	0.0	21.0	0.0	14.0	21.0	100.0	14.0
5	3.5	132.0	120.0	25.0	0.0	14.0	25.0	100.0	14.0
2	3.5	132.0	120.0	9.0	0.0	14.0	9.0	100.0	14.0
6	3.5	132.0	240.0	29.0	0.0	14.0	29.0	100.0	14.0
7	3.5	132.0	0.0	0.0	9.0	10.0	36.0	9.0	10.0
8	3.5	132.0	120.0	0.0	13.0	10.0	36.0	13.0	10.0
9	3.5	132.0	240.0	0.0	17.0	10.0	36.0	17.0	10.0
11	3.5	132.0	120.0	36.0	13.0	10.0	40.0	13.0	10.0
12	3.5	132.0	240.0	36.0	17.0	10.0	40.0	16.0	10.0
13	3.5	132.0	0.0	40.0	10.0	10.0	52.0	10.0	10.0
14	3.5	132.0	120.0	40.0	13.0	10.0	52.5	13.0	10.0
15	3.5	132.0	240.0	40.0	16.0	10.0	52.5	16.0	10.0
16	2.8	80.0	0.0	52.5	11.0	10.0	63.0	11.0	10.0
17	2.8	80.0	120.0	52.5	13.0	10.0	63.0	13.0	10.0
18	2.8	80.0	240.0	52.5	15.0	10.0	63.0	15.0	10.0
19	2.8	80.0	0.0	63.0	11.0	10.0	66.0	10.0	10.0
20	2.8	80.0	120.0	63.0	13.0	10.0	66.0	13.0	10.0

Select All      Graph      Close

**Figura 5. Dimensiones de subestación, líneas de transmisión y rango de estudio**



## 5 RESULTADOS

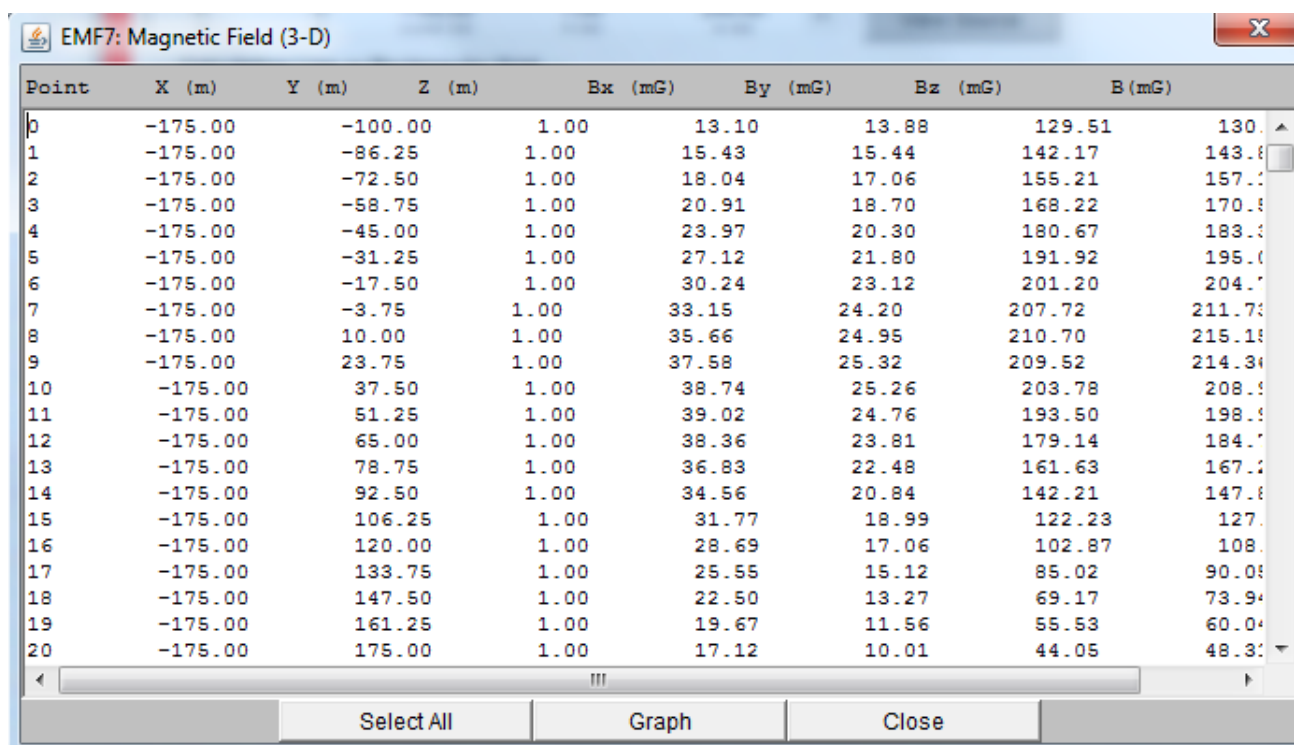
El campo magnético se calculó en 20 puntos uniformemente distribuidos a lo largo del área de estudio, donde se presenta la subestación y partes de las líneas de llegada y salida, con un rango de entre 250 m para el eje x, y 175 m para el eje y, siendo agregado 50 m al último punto de cada eje para mayor rango de medida, de manera que se pueda estudiar los alrededores, todo a una altura (H)= 1,0 m (en la Figura 15 se presenta el área simulada). El resultado se muestra a continuación:

### 5.1 CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO

Los niveles máximos de campo magnético para personas expuestas a ellos, indicados en el ICNIRP, son de 83.3  $\mu$ T para exposición al público general hasta 8 horas, para una exposición tipo ocupacional de hasta 8 horas este valor es de 416.7  $\mu$ T.

Teniendo en cuenta lo anterior se llevó a cabo los cálculos mediante el programa HERBS 2.0 APPLET EMF - 7 desarrollado por EPRI a una altura de 1 m del suelo, el resultado del programa está dado en la unidad G (Gauss) y los límites en T (Tesla), por tanto se debe considerar que 10,000G=1T.

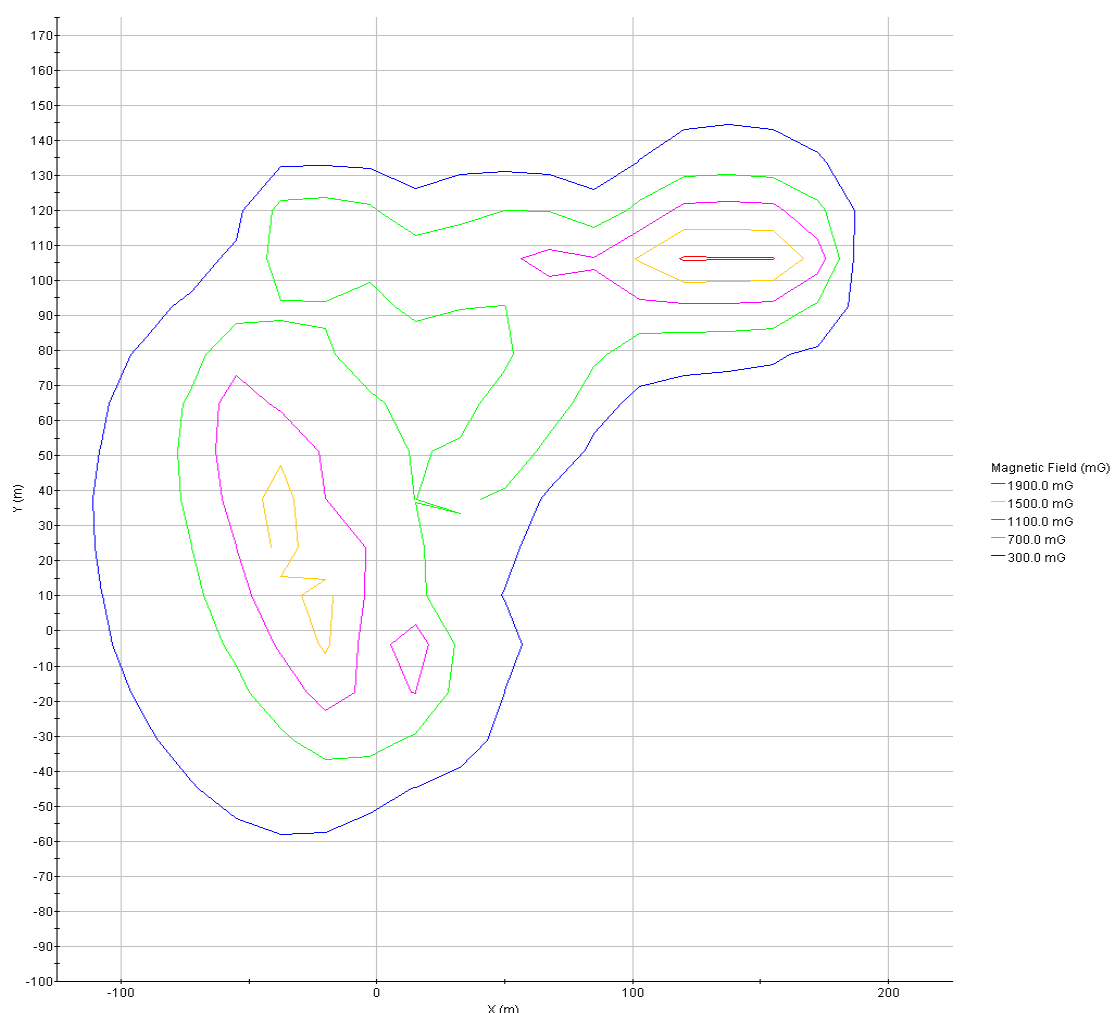
**Figura 6. Resultados, datos de salida de campo magnético en área de estudio**



Point	X (m)	Y (m)	Z (m)	Bx (mG)	By (mG)	Bz (mG)	B (mG)
0	-175.00	-100.00	1.00	13.10	13.88	129.51	130.8
1	-175.00	-86.25	1.00	15.43	15.44	142.17	143.6
2	-175.00	-72.50	1.00	18.04	17.06	155.21	157.1
3	-175.00	-58.75	1.00	20.91	18.70	168.22	170.8
4	-175.00	-45.00	1.00	23.97	20.30	180.67	183.3
5	-175.00	-31.25	1.00	27.12	21.80	191.92	195.0
6	-175.00	-17.50	1.00	30.24	23.12	201.20	204.7
7	-175.00	-3.75	1.00	33.15	24.20	207.72	211.73
8	-175.00	10.00	1.00	35.66	24.95	210.70	215.18
9	-175.00	23.75	1.00	37.58	25.32	209.52	214.34
10	-175.00	37.50	1.00	38.74	25.26	203.78	208.9
11	-175.00	51.25	1.00	39.02	24.76	193.50	198.9
12	-175.00	65.00	1.00	38.36	23.81	179.14	184.7
13	-175.00	78.75	1.00	36.83	22.48	161.63	167.1
14	-175.00	92.50	1.00	34.56	20.84	142.21	147.8
15	-175.00	106.25	1.00	31.77	18.99	122.23	127.1
16	-175.00	120.00	1.00	28.69	17.06	102.87	108.1
17	-175.00	133.75	1.00	25.55	15.12	85.02	90.08
18	-175.00	147.50	1.00	22.50	13.27	69.17	73.94
19	-175.00	161.25	1.00	19.67	11.56	55.53	60.04
20	-175.00	175.00	1.00	17.12	10.01	44.05	48.32

Para un mejor análisis de los resultados se realiza una gráfica de valores en el área de estudio como se observa en Figura 7:

**Figura 7. Resultados, Isolneas de campo magnético en área de estudio**



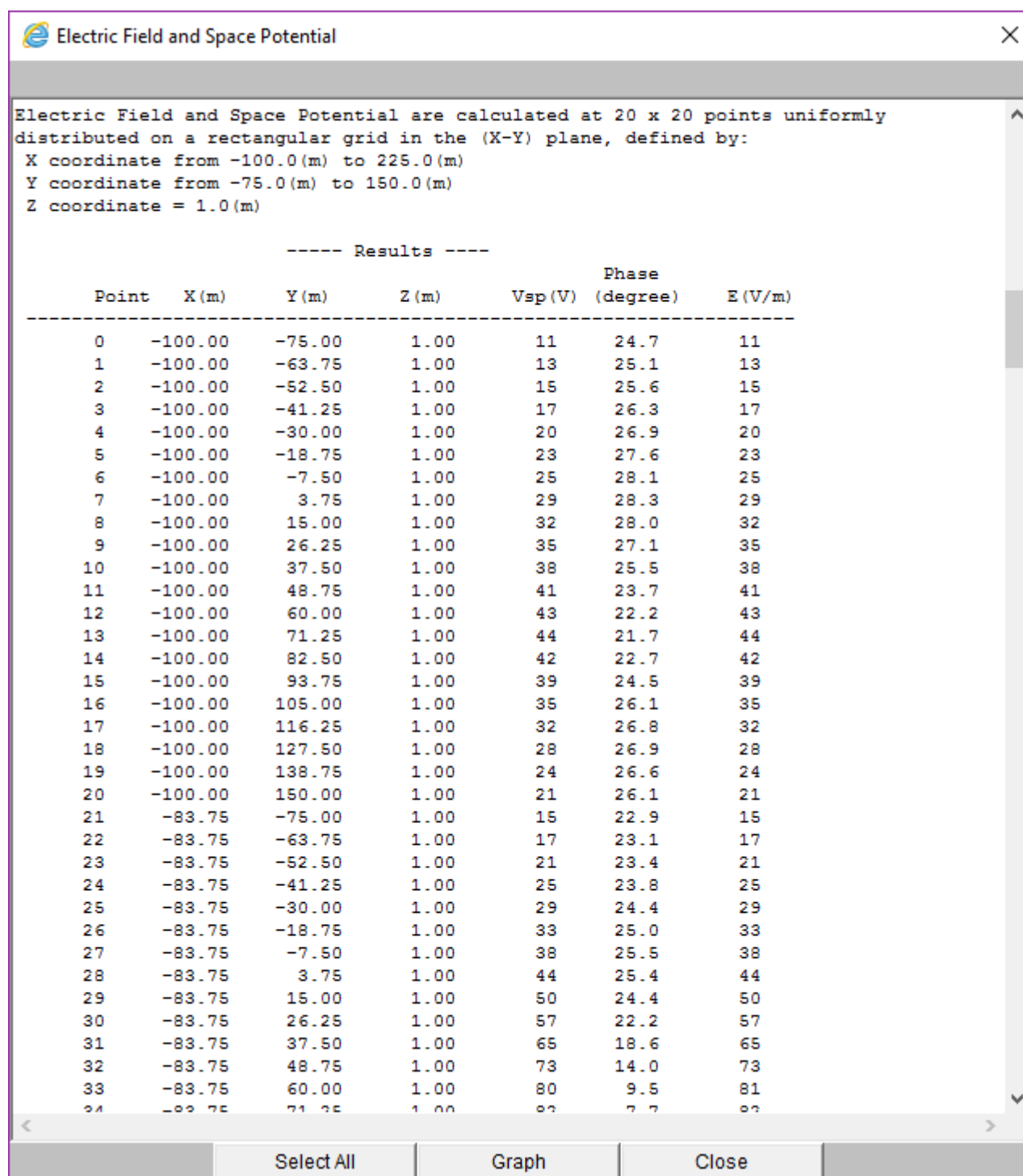
De la simulación se puede observar que el valor máximo a través del área de estudio es 1935 miligauss [mG] o 193,5 microtesla [ $\mu$ T], presente en la zona de salida de líneas a 230 kV de Amarateca, como valor mínimo 21 miligauss [mG] o 2,1 microtesla [ $\mu$ T] presente en los alrededores de la subestación, cuyos valores no sobrepasan el límite de campo magnético ocupacional de 416.7  $\mu$ T, exigido por ICNIRP. De igual manera, el campo magnético máximo en el borde de la servidumbre de las líneas no supera los 71,9 mG (7,19  $\mu$ T), para la línea de dos circuitos en el peor de los casos, no excede el límite de 83.3  $\mu$ T para el público general.

## 5.2 CÁLCULO DE CAMPO ELÉCTRICO

Respecto a los resultados de campo eléctrico, también se tienen en cuenta los valores límites indicados por el ICNIRP, donde para exposición al público general hasta 8 horas el valor máximo es de 4.16 kV/m, para una exposición tipo ocupacional de hasta 8 horas este valor es de 8.33 kV/m.

Partiendo del programa HERBS 2.0 APPLETT EMF - 4 desarrollado por EPRI a una altura de 1 m del suelo se presentan los resultados de la Figura 8 y Figura 9.

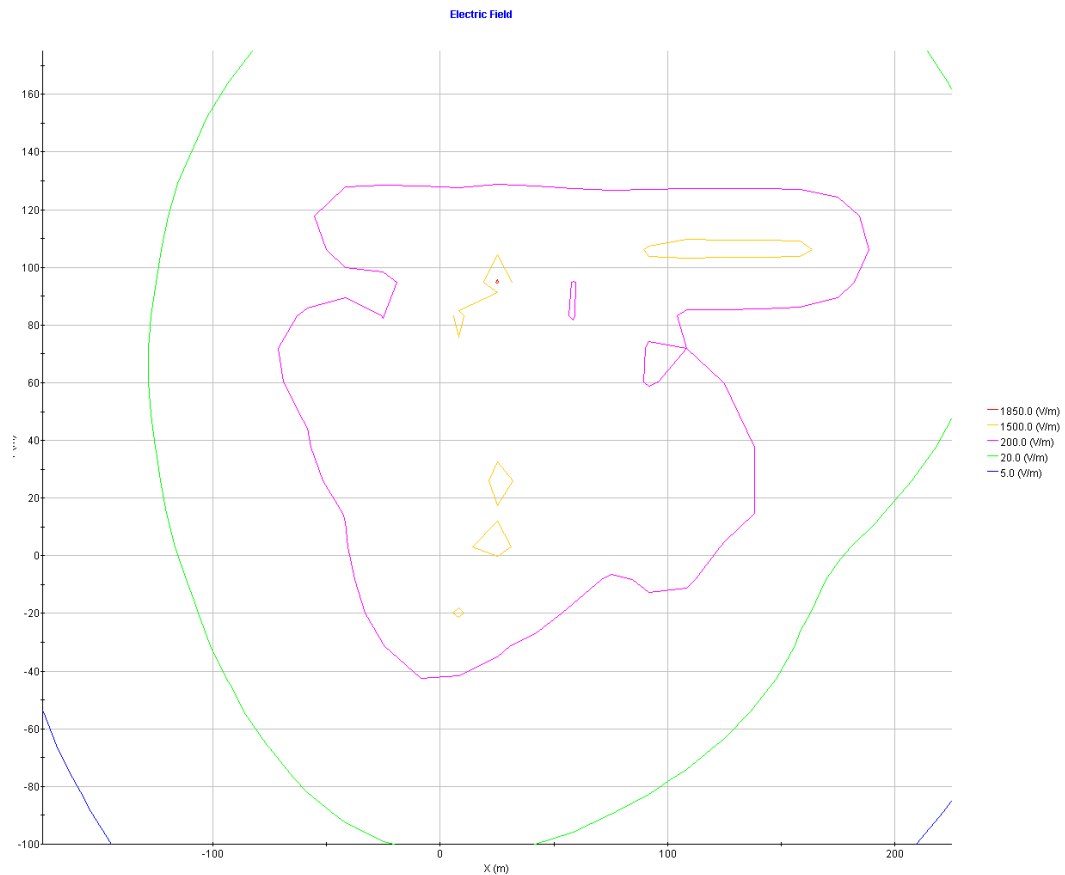
**Figura 8. Resultados, datos de salida de campo eléctrico en área de estudio**



Los resultado suministrados en V/m, son divididos entre 1000, para obtener la unidad de comparación del ICNIRP, sienta está unida kV/m.

De igual manera que en los resultados de campo magnético, en los resultados de campo eléctrico se realiza una gráfica de valores en el área de estudio como se observa en la Figura 9:

**Figura 9. Resultados, Isolneas de campo eléctrico en área de estudio**



Se tiene un valor máximo de campo eléctrico dentro de la servidumbre de la línea es de 82 V/m o 0,08 kV/m, para el caso de dos circuitos de línea. En nivel de campo eléctrico en el borde de la servidumbre (público general) no supera los 4.16 kV/m. Para el estudio en general, se presenta como valor máximo 2527 V/m o 2,52 kV, y como valor mínimo 5 V/m o 0,005 kV/m, para cualquiera de los casos no se supera los 8.33 kV/m exigidos por ICNIRP para el límite de campo eléctrico ocupacional.

## 6 CONCLUSIONES

A continuación se presentan los resultados obtenidos de campos eléctricos y magnéticos en la superficie evaluada:

**Tabla 3 Niveles máximos de campo eléctrico versus máximos recomendados por el ICNIRP**

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico (kV/m)	
	Niveles Máximos norma ICNIRP	Niveles Máximos S/E Toncontín 230/138/13.8 kV
Poblacional	4,16	0,08 (servidumbre de línea)
Ocupacional	8,33	2,52

**Tabla 4 Niveles máximos de campo magnético versus máximos recomendados por el ICNIRP**

Tipo de exposición	Intensidad de campo magnético (μT)	
	Niveles Máximos norma ICNIRP	Niveles Máximos S/E Toncontín 230/138/13.8 kV
Poblacional	83.3	7,19 (servidumbre de línea)
Ocupacional	416.7	193,5

De acuerdo con los valores obtenidos para la superficie de evaluación seleccionada se concluye lo siguiente:

- Se comprueba que para las rutas de circulación de personal, se presentan niveles de intensidad de campo eléctrico y densidad de campo magnético por debajo de los niveles requeridos.
- Se comprueba que para las superficies analizadas, en las zonas aledañas al cerco perimétrico y servidumbre de línea se presentan niveles de intensidad de campo eléctrico y densidad de campo magnético por debajo de los niveles requeridos.

En general, los niveles de campo eléctrico y magnético cumplen con los niveles máximos permitidos y exigidos por la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, en inglés)

# ANEXO

Figura 10. Dimensiones de TORRE TIPÓ E anclaje 138 kV

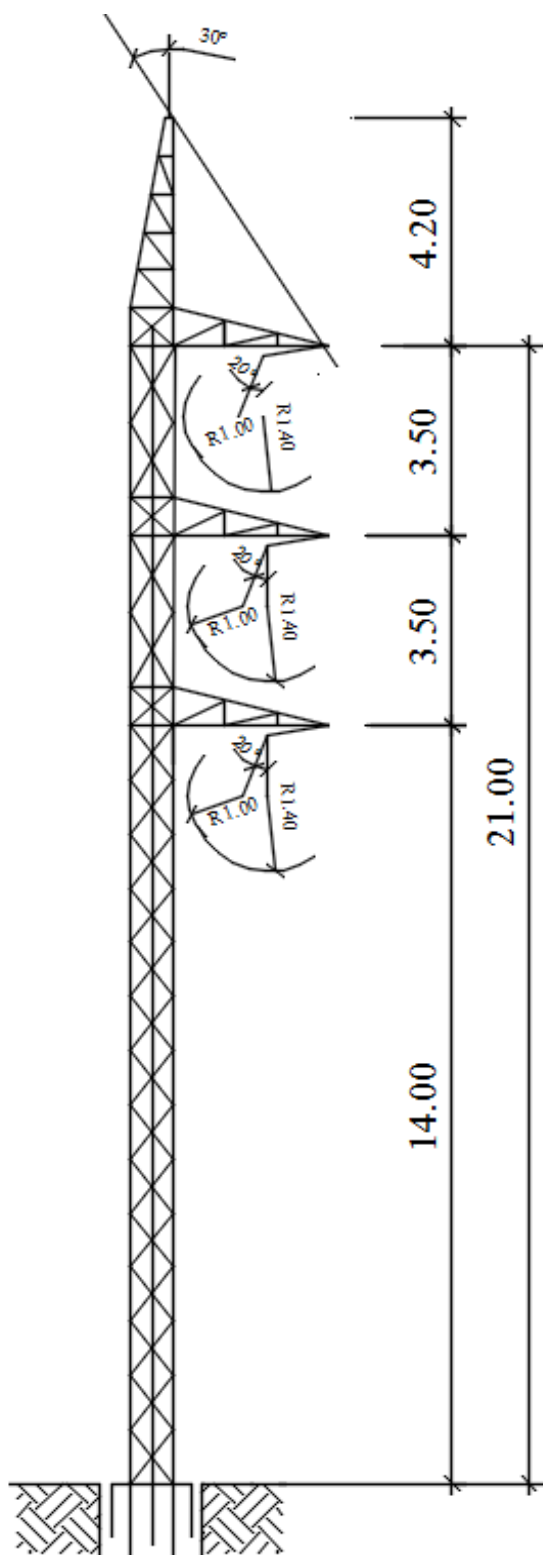
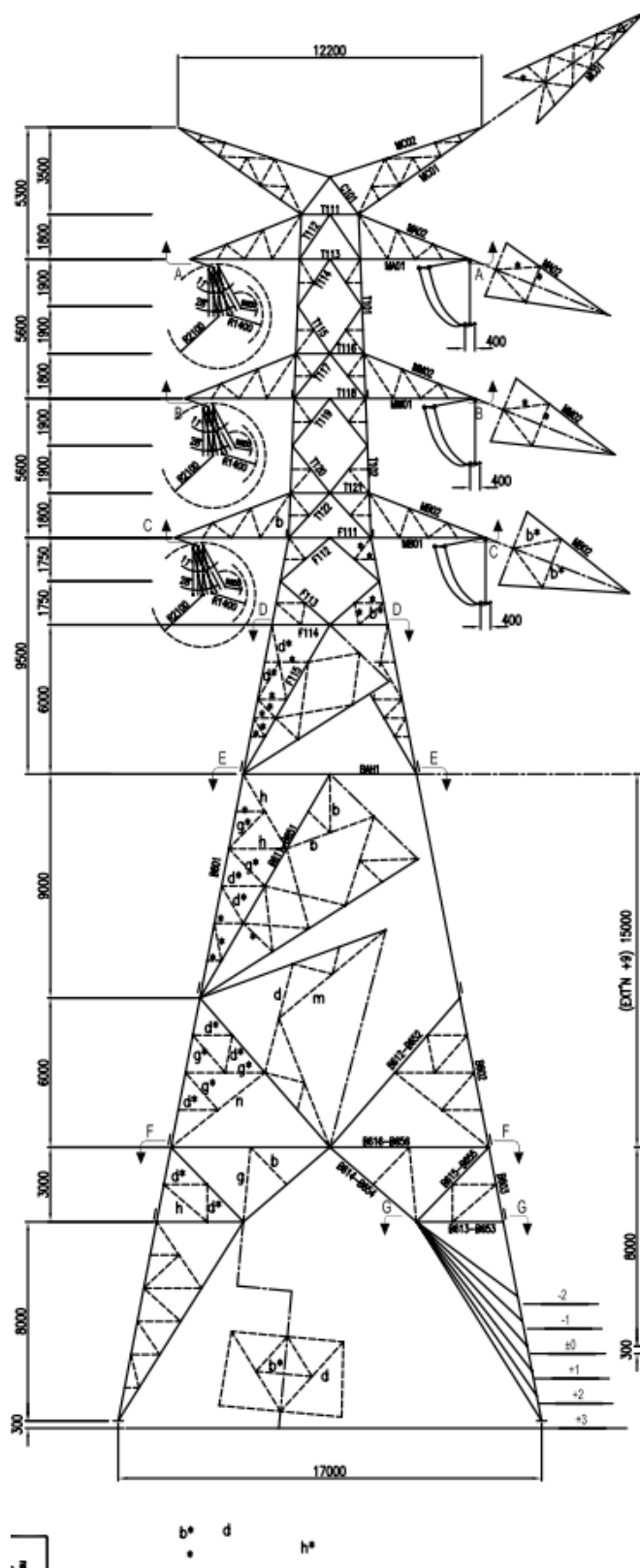
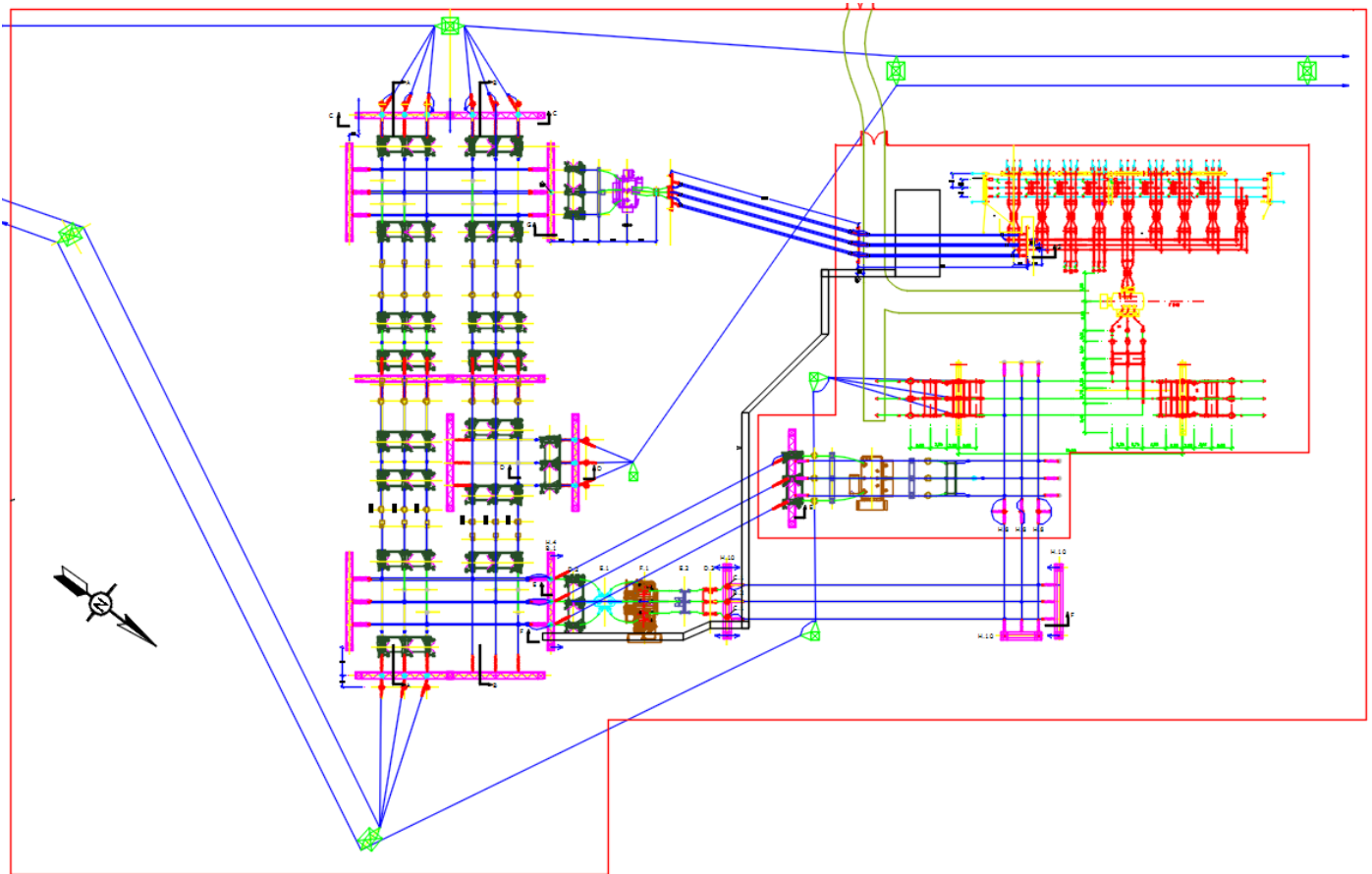


Figura 11. Torre tipo DD 230 kV





**Figura 12. Vista en planta subestación Toncontín 230/138/13,8 kV**



**Figura 13. Características de conductor de líneas ACSR, de catálogo de fabricante Procables.**

ACSR  
ACSR

Nombre clave	Calibre	N° hilos		Diámetro de cada hilo				Diámetro núcleo de acero		Diámetro exterior		Área sección de Aluminio	
		Aluminio	Acero	Aluminio		Acero							
Code word	Size	N° of wire		Nominal wire diameter				Steel core diameter		Overall cable diameter		Aluminum cross section	
				Aluminum		Steel							
	AWG or kcmil	Aluminum	Steel	mm	mils	mm	mils	mm	in	mm	in	mm²	kcmil
Ibis	397,5	26	7	3,14	123,6	2,44	96,1	7,32	0,288	19,9	0,783	201,2	397,5
Lark	397,5	30	7	2,92	115,1	2,92	115,1	8,77	0,345	20,5	0,806	201,4	397,5
Pelican	477	18	1	4,14	162,8	4,14	162,8	4,14	0,163	20,7	0,814	241,7	477
Flicker	477	24	7	3,58	141,0	2,39	94,0	7,16	0,282	21,5	0,846	241,7	477
Hawk	477	26	7	3,44	135,4	2,68	105,3	8,03	0,316	21,8	0,858	241,5	477
Hen	477	30	7	3,20	126,1	3,20	126,1	9,61	0,378	22,4	0,883	241,7	477
Heron	500	30	7	3,28	129,1	3,28	129,1	9,84	0,387	23,0	0,904	253,5	500
Cuckoo	795	24	7	4,62	182	3,08	121,3	9,2	0,364	27,7	1,092	402,9	795
Drake	795	26	7	4,44	174,9	3,45	136,0	10,4	0,408	28,1	1,107	402,9	795,2
Coot	795	36	1	3,77	148,6	3,77	148,6	3,8	0,149	26,4	1,04	402,7	794,8
Turn	795	45	7	3,38	132,9	2,25	88,6	6,8	0,266	27,0	1,063	402,8	795
Condor	795	54	7	3,08	121,3	3,08	121,3	9,2	0,364	27,7	1,092	402,6	794,5
Mallard	795	30	19	4,14	162,8	2,48	97,7	12,4	0,489	29,0	1,14	402,9	795,1

Fuente: <http://www.procables.com.co/>

# ANEXO

**Figura 14. Características de conductor de líneas AAC, de catálogo de fabricante Procables.**

AAC  
AAC

Nombre clave	Calibre	Construcción			Diámetro exterior		Área		Resistencia nominal c.c. a 20 °C		Carga mínima a la rotura		Masa nominal		Capacidad de corriente	
		Clase	N° de hilos	Diámetro de cada hilo												
Code word	Size	Stranding			Overall Diameter		Area		Nominal d.c. resistance at 20 °C		Minimum tensile strength		Total mass		Ampacity	
		Class	N° of wires	Diameter of wires												
	AWG kcmil					mm	mils	mm	in	mm²	in²	Ω/km	Ω/kft	kgf	lbf	kg/km
Narcisus	1272	AA, A	61	3,67	144	33,01	1,3	644,5	0,999	0,045	0,0136	9992	22027	1778	1195	1171
Carnation	1431	AA, A	61	3,89	153,2	35,01	1,378	725,1	1,124	0,040	0,0121	11012	24300	2001	1344	1255
Gladiolus	1510,6	AA, A	61	4	157	35,98	1,417	765,4	1,186	0,038	0,0114	11624	25626	2112	1419	1297

Fuente: <http://www.procables.com.co/>

**Figura 15 Área simulada para el cálculo de campos eléctricos y magnéticos**

