

**CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN  
CRÍTICA DE SUS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN TENIENDO COMO  
REFERENCIA LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA**

**ALVARO JULIÁN FUENTES BARRERA  
RITO ALBERTO PERICO ÁRIAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2011**

**CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN  
CRÍTICA DE SUS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN TENIENDO COMO  
REFERENCIA LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA**

**ALVARO JULIÁN FUENTES BARRERA  
RITO ALBERTO PERICO ÁRIAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**DIRECTOR:  
ING. M.P.E. JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2011**

## DEDICATORIA

*A Dios por permitirme alcanzar esta meta. A mi madre Sara, mi padre Álvaro y mi hermano Juan; por todo el amor y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de todas las etapas de mi vida. A todos mis amigos y demás familiares por su compañía y buenos consejos en los momentos difíciles.*

*Alvaro Julián Fuentes Barrera.*

*Me gustaría dedicar esta Tesis a Dios y a toda mi familia. Para mis padres Marcos y Florinda por su comprensión y ayuda en los buenos y malos momentos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.*

*Rito Alberto Perico Arias.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirnos llegar a este punto de nuestras carreras.

A nuestro director de proyecto, el Ing. M.P.E. Julio César Chacón Velasco, por su amistad, dedicación, y valiosas orientaciones brindadas a lo largo de las etapas en las cuales se desarrollo este proyecto.

Al profesor, Ph.D. Gabriel Ordóñez Plata, por su colaboración y valiosos aportes realizados durante la realización de este trabajo.

A nuestras familias por el apoyo incondicional durante nuestra formación universitaria.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	27
1.1 CONCEPTO DE CAMPO ELÉCTRICO	27
1.2 EL CAMPO ELÉCTRICO VARIANTE EN EL TIEMPO	30
1.3 CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN	35
1.3.1 El método de las imágenes aplicado al cálculo del campo eléctrico en líneas de alta tensión.	36
1.3.2 Campo eléctrico de una línea trifásica de circuito sencillo.	41
1.3.3 Campo eléctrico para un sistema trifásico de C.A. de doble circuito.	45
2 RECOPIACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS ACERCA DE LA INFLUENCIA DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS DE FRECUENCIAS EXTREMADAMENTE BAJAS EN EL ORGANISMO HUMANO	48

2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL ACERCA DE LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS DE FRECUENCIAS EXTREMADAMENTE BAJAS	48
2.2	DESCRIPCIÓN GENERAL ACERCA DE LOS POSIBLES EFECTOS EN LA SALUD HUMANA PRODUCIDOS POR LA EXPOSICIÓN A LOS CAMPOS ELÉCTRICOS DE FRECUENCIAS EXTREMADAMENTE BAJAS	54
2.2.1	Resultados de los estudios realizados.	55
2.2.2	Conclusión general sobre los estudios realizados.	61
2.3	ESTUDIOS DE DOSÍMETRIA EN EL CUERPO HUMANO PARA EL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN	62
3	REVISIÓN DE NORMAS Y ESTÁNDARES APLICABLES A LA LÍMITACIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN	73
3.1	RESTRICCIONES BÁSICAS PARA LA EXPOSICIÓN POBLACIONAL Y OCUPACIONAL ESTABLECIDOS POR ALGUNOS ORGANISMOS INTERNACIONALES	73
3.2	NIVELES DE REFERENCIA Y/O MÁXIMOS VALORES PERMISIBLES PARA LA EXPOSICIÓN POBLACIONAL Y OCUPACIONAL ESTABLECIDOS POR ALGUNOS ORGANISMOS INTERNACIONALES	76
3.3	ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN ESTABLECIDOS DENTRO DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA	83

3.3.1	Valores límites de exposición establecidos por la normatividad colombiana.	83
3.3.2	Valores límites de exposición establecidos por los reglamentos técnicos de otros países.	85
3.3.3	Criterios requeridos para realizar la comparación de los valores límites de exposición establecidos por la normatividad colombiana.	87
3.3.3.1	Tipo de población expuesta.	88
3.3.3.2	Frecuencia.	89
3.3.3.3	Nivel de exposición.	90
3.3.3.4	Zonas de servidumbre.	91
3.3.3.5	Distancias de seguridad.	93
3.3.3.6	Duración de la exposición.	95
3.3.3.7	Exposición de cuerpo parcial o total.	96
4	ASPECTOS GENERALES EN LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS PUNTOS CERCANOS A UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN	98
4.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MEDIDORES DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO	98

4.2	PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO EN LOS PUNTOS CERCANOS A UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN	101
4.2.1	Perfil lateral o transversal.	104
4.2.2	Perfil longitudinal.	107
4.2.3	Parámetros que afectan la exactitud de las medidas de la intensidad de campo eléctrico.	107
4.2.3.1	Locaciones donde se realiza la medición.	107
4.2.3.2	Fugas en la pértiga de sujeción de la sonda.	107
4.2.3.3	Humedad.	108
4.2.3.4	Temperatura.	108
4.2.3.5	Contenido de armónicos.	109
4.2.3.6	Campos magnéticos ambientales.	109
4.2.3.7	Inclinación del aparato de medida.	109
4.2.3.8	Campo no uniforme.	110
4.2.3.9	Efectos de proximidad.	110
4.3	INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO	111

4.4	PRESENTACIÓN DE INFORMES EN LA MEDICIÓN DE CAMPOS	112
4.5	LA MEDICIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA	112
5	PROGRAMA PARA REALIZAR EL CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS PUNTOS CERCANOS A UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN	114
6	COMPARACIÓN ENTRE LOS PERFILES LATERALES DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO OBTENIDOS A TRAVÉS DE MEDICIÓN Y SIMULACIÓN EN UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN	122
6.1	PERFIL LATERAL OBTENIDO A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO EN LA LÍNEA JUANCHITO-CANDELARIA DE 115 KV	122
6.2	PERFIL LATERAL OBTENIDO A TRAVÉS DEL CÁLCULO (REALIZADO MEDIANTE SIMULACIÓN) DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO EN LA LÍNEA JUANCHITO-CANDELARIA DE 115 KV	127
6.3	COMPARACIÓN DE LOS PERFILES LATERALES MEDIDOS Y SIMULADOS	128
6.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	130
7	MEDIDAS DE PROTECCIÓN Y MÉTODOS DE MITIGACIÓN ANTE LA EXPOSICIÓN AL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN	133

7.1	TÉCNICAS DE INGENIERÍA QUE PUEDEN SER USADAS PARA MINIMIZAR LA EXPOSICIÓN AL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN	136
7.1.1	Efectos por cambios en la geometría de la línea.	136
7.1.1.1	Configuración de la línea.	137
7.1.1.2	Altura de la línea.	138
7.1.1.3	Flecha de la línea.	139
7.1.1.4	Dimensiones del conductor.	139
7.1.1.5	Espaciamiento entre fases.	141
7.1.1.6	Cable(s) de guarda.	141
7.1.2	Métodos de apantallamiento.	142
8	DOCUMENTO DE DIVULGACIÓN	144
9	CONCLUSIONES	152
10	RECOMENDACIONES	155
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Rangos de corriente umbral para efectos indirectos de campos electromagnéticos de 50/60 Hz; incluyendo niños, mujeres y hombres.	57
Tabla 2. Campos eléctricos inducidos de un modelo de cuerpo humano aterrizado en un campo eléctrico vertical de 1 kV/m y 60 Hz.	68
Tabla 3. Campos eléctricos inducidos de un modelo del cuerpo humano de un niño aterrizado en un campo eléctrico vertical y uniforme de 1 kV/m y 60 Hz.	69
Tabla 4. Corriente vertical inducida ( $\mu\text{A}$ ) en un modelo de cuerpo humano en un campo eléctrico vertical uniforme de 1 kV/m y 60 Hz.	71
Tabla 5. Restricciones básicas establecidas por la ICNIRP para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para un rango de frecuencias de 4 Hz a 1 kHz.	74
Tabla 6. Restricciones básicas aplicadas a varias regiones del cuerpo, que fueron establecidas por el IEEE para una frecuencia de 60 Hz.	75
Tabla 7. Niveles de referencia establecidos por la ICNIRP para exposición ocupacional y poblacional a campos eléctricos en un rango de frecuencias de 0,025 kHz a 0,82 kHz (valores eficaces no perturbados).	78
Tabla 8. Máximos valores de exposición permisibles, establecidos por el IEEE para el campo eléctrico en el ambiente con una exposición.	80

Tabla 9. Valores límites de umbral de la ACGIH en EE.UU., para campos eléctricos de 60 Hz.	81
Tabla 10. Comparación entre los niveles de referencia para la exposición al campo eléctrico establecidos por ICNIRP, IEEE y ACGIH.	82
Tabla 11. Valores límites de exposición a campos eléctricos, establecidos por el RETIE.	84
Tabla 12. Comparación entre los diferentes niveles de referencia, establecidos por algunos países, para la exposición al campo eléctrico de las instalaciones eléctricas.	86
Tabla 13. Ancho de la zona de servidumbre establecido por el RETIE para diferentes niveles de tensión de las líneas.	92
Tabla 14. Distancias mínimas de seguridad establecidas por el RETIE para diferentes situaciones.	94
Tabla 15. Información de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.	126
Tabla 16. Valores de intensidad de campo eléctrico obtenidos mediante medición y simulación para distintos puntos a lo largo de la zona de servidumbre de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.	130

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Elipse descrita por un vector de campo eléctrico $E$ , que se encuentra rotando en un plano en el espacio.	32
Figura 2. Línea compuesta por los conductores $i$ y $j$ , con sus correspondientes imágenes.	38
Figura 3. Representación de un conductor configurado en haz.	40
Figura 4. Conductor eléctrico y su imagen.	42
Figura 5. Línea trifásica de doble circuito.	45
Figura 6. Cuerpo humano dentro de un campo eléctrico uniforme de 1 kV/m a 60 Hz - densidad de carga superficial y campo eléctrico externo para el cuerpo: (a) en el espacio libre, (b) parado sobre un conductor perfecto, y (c) la densidad de corriente en una sección transversal vertical del cuerpo.	65
Figura 7. Corriente en las secciones transversales de un modelo del cuerpo humano sometido a un campo eléctrico externo de 1 kV/m y 60 Hz para: (a) un adulto aterrizado, (b) un adulto en el espacio libre, (c) un niño aterrizado, y (d) un niño en el espacio libre.	67
Figura 8. Densidad de corriente máxima en $\mu\text{A}/\text{m}^2$ promediada sobre $1\text{ cm}^2$ en capas verticales del cuerpo para modelos aterrizados expuestos a un campo eléctrico vertical de 1 kV/m y 60 Hz.	70

Figura 9. Densidad de corriente medida en mA/m <sup>2</sup> para un fantoma relleno de una solución salina homogénea, que se encuentra aterrizado a través de ambos pies. La magnitud del campo eléctrico externo es de 10 kV/m, el vector del campo está direccionado a lo largo del eje del cuerpo, y la frecuencia es de 60 Hz.	72
Figura 10. Diagrama de flujo para realizar la verificación del cumplimiento de los niveles de referencia o valores límites de exposición al campo eléctrico en líneas de alta tensión.	77
Figura 11. Niveles de referencia de la ICNIRP para la exposición a campos eléctricos variantes en el tiempo: (a) para público en general, (b) valor pico para público en general, (c) para ocupacionales y (d) valor pico para ocupacionales.	80
Figura 12. Ancho de la zona de servidumbre.	91
Figura 13. Distancias mínimas de seguridad para diferentes lugares y situaciones.	93
Figura 14. Geometrías típicas de las sondas para la medición del campo eléctrico: (a) sonda esférica, y (b) sondas comerciales en EE.UU.	100
Figura 15. Configuración que permite sostener el medidor de intensidad de campo eléctrico en una posición correcta, conservando la altura estipulada en la norma (1 m) y manteniendo una distancia prudente al observador para minimizar el efecto de proximidad.	102
Figura 16. Orientación del medidor de intensidad de campo eléctrico con la pértiga paralela a los conductores de la línea de potencia.	104

Figura 17. Ejemplo de una vista típica de planta obtenida para la medición de la intensidad de campo eléctrico vertical en el punto medio del vano de una línea de alta tensión.	105
Figura 18. Ejemplo de un perfil lateral obtenido de la medición de la intensidad del campo eléctrico vertical en el punto medio del vano de una línea de alta tensión.	106
Figura 19. Vista de planta de la locación donde se realizó la medición.	124
Figura 20. Localización de la zona donde se realizó la medición dentro de la vista de perfil del vano “Torre 13-Torre 14” de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.	124
Figura 21. Configuración geométrica de la estructura de soporte en la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.	125
Figura 22. Perfil lateral obtenido de la medición de la intensidad de campo eléctrico en la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.	126
Figura 23. Datos de entrada para la simulación de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV en el programa <i>E_perfiles.m</i> .	127
Figura 24. Perfil lateral obtenido tras realizar la simulación de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV en el programa <i>E_perfiles.m</i> .	128
Figura 25. Comparación entre los perfiles laterales obtenidos a través de la medición y el cálculo (mediante simulación) de la intensidad del campo eléctrico en la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.	129
Figura 26. Juegos individuales de prendas protectoras para realizar trabajo en línea viva (izquierda) y trabajo en tierra (derecha).	135

Figura 27. Tipos de configuración de línea: (a) delta equilátera, (b) horizontal, y (c) vertical.	137
Figura 28. Perfiles laterales de campo eléctrico al nivel del suelo para líneas de configuración: (a) delta equilátera, (b) horizontal y (c) vertical.	138
Figura 29. Efecto del cambio en la altura de la línea ( $H_1 < H_2$ ) sobre el campo eléctrico al nivel del suelo.	140
Figura 30. Efecto del cambio en el espaciamiento entre fases de la línea ( $S_1 < S_2 < S_3$ ) sobre el campo eléctrico al nivel del suelo.	142

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Espectro electromagnético.	165
Anexo B. Generalidades acerca de la estimación de la incertidumbre en la medición.	166
Anexo C. Hoja de datos típica para registrar la información de fondo requerida para las mediciones en terreno de campos eléctricos y magnéticos en líneas de potencia de C.A.	175
Anexo D. Manual de uso del programa <i>E_perfiles. m.</i>	177
Anexo E. Estructura del programa <i>E_perfiles. m.</i>	185

## RESUMEN

**TÍTULO: CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN CRÍTICA DE SUS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN TENIENDO COMO REFERENCIA LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA\*.**

**AUTORES:** ALVARO JULIÁN FUENTES BARRERA.  
RITO ALBERTO PERICO ARIAS\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** CAMPO ELÉCTRICO, EXPOSICIÓN, LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN, MEDICIÓN, SIMULACIÓN, DIVULGACIÓN.

**DESCRIPCIÓN:** En este trabajo de grado se hace una revisión de las disposiciones reglamentarias contenidas dentro de la normatividad colombiana, en lo que se refiere a la limitación de la exposición ocupacional y del público en general al campo eléctrico producido por las líneas de alta tensión. Igualmente, se realiza una comparación de los valores de intensidad de campo eléctrico que constituyen los niveles de referencia para la exposición a los seres humanos contemplados en la norma técnica colombiana, con los valores recomendados por algunos organismos internacionales, así como con los límites establecidos por otros países. Por otra parte, se hace referencia a la medición y la simulación del campo eléctrico, como los métodos que permiten estimar los niveles de exposición; describiendo los principales aspectos que se deben tener en cuenta para realizar su medición en los puntos cercanos a dichas estructuras y desarrollando la actualización del programa computacional utilizado para realizar su cálculo, el cual es empleado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander. Los resultados obtenidos de la simulación en este programa se comparan con los registrados para una medición realizada en el caso particular de una línea de 115 kV. Finalmente, se elabora un folleto que permite realizar una correcta divulgación dentro de la población en general, de la información que se refiere a la problemática que comprende la exposición a los niveles de campos eléctricos y magnéticos que se generan en las líneas de alta tensión.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.  
Director: Ing. M.P.E. Julio César Chacón Velasco.

## SUMMARY

**TITLE: ELECTRIC FIELD IN HIGH VOLTAGE LINES. CRITICAL COMPARISON OF THEIR EXPOSURE LIMIT VALUES WITH REFERENCE TO THE COLOMBIAN NORMATIVITY\*.**

**AUTHORS:** ALVARO JULIÁN FUENTES BARRERA.  
RITO ALBERTO PERICO ARIAS\*\*.

**KEY WORDS:** ELECTRIC FIELD, EXPOSURE, HIGH VOLTAGE LINES, MEASUREMENT, SIMULATION, DISCLOSURE.

**DESCRIPTION:** In this degree project is done a review of the reglamentary provisions contained in the Colombian normativity, in regard to the occupational and general public exposure limitation to the electric field produced by the high voltage lines. Likewise, it realizes a comparison of the electric field strength values that constitutes the reference levels to the human beings exposure contemplated in the Colombian technical standard, with the recommended values by some international organisms, as well as with the limits established by other countries.

On the other hand, it refers to the electric field measurement and simulation, as methods to estimate the exposure levels; describing the main aspects to be taken into account in order to measure it in the closely points to these structures and developing the computer program upgrade used to compute it, which is employed in the Laboratorio de Alta Tensión of the Universidad Industrial de Santander. The obtained results of the simulation in this program are compared with those recorded for a measurement on the particular case of a 115 kV line.

Finally, it elaborates a brochure that allows to realize a properly disclosure into the general population, about the information which refers to the problem that include the exposure to the electric and magnetic field levels generated in the high voltage lines.

---

\* Degree Project.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.  
Director: Ing. M.P.E. Julio César Chacón Velasco.

## INTRODUCCIÓN

Un elemento importante dentro de la comprensión de la problemática actual de la contaminación electromagnética no ionizante en el ambiente, es la revisión de los niveles de exposición al campo eléctrico producido por las líneas de alta tensión que componen los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica. Dicha revisión se debe realizar teniendo en cuenta, que las líneas de alta tensión son fuentes artificiales de campos eléctricos y magnéticos de frecuencia industrial, al igual que cualquier otro equipo o aparato que funcione con electricidad.

Gracias al continuo incremento en la demanda energética de la sociedad moderna, la exposición a campos electromagnéticos ha presentado un crecimiento proporcional al desarrollo y la expansión de los sistemas de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica en los últimos años. Si una persona vive o labora en lugares cercanos a las líneas de transporte y suministro de energía eléctrica, se dice que está sometida a la exposición de los campos electromagnéticos que allí se generan.

A su vez, debido al rápido desarrollo de la industria eléctrica y toda su infraestructura, los organismos internacionales, en aras de proteger al ser humano y su entorno, se han dado a la tarea de investigar los efectos de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos sobre los seres vivos. Teniendo como sustento los resultados de las investigaciones realizadas, dichos organismos han desarrollado recomendaciones y estándares de exposición.

Finalmente, son los gobiernos de los países los encargados de adoptar las recomendaciones y estándares internacionales para la elaboración de sus normas nacionales, a través de las cuales se lleva a cabo la implementación de una legislación sobre exposición electromagnética en sus respectivos países.

En el caso de Colombia, es el RETIE<sup>1</sup> la herramienta a través de la cual el gobierno lleva a cabo la implementación de una legislación sobre exposición electromagnética estipulada para la frecuencia a la cual actúa el sistema eléctrico.

El presente trabajo de grado está orientado a examinar el tema de la exposición al campo eléctrico producido en las líneas aéreas de alta tensión, abordándolo desde diferentes enfoques: Efectos sobre la salud humana, caracterización, simulación, medición, normalización y mecanismos de protección y mitigación.

Con base en los aspectos ya mencionados se realizó la organización del conjunto de temáticas dentro de este documento. En el capítulo 1 se da una breve introducción al concepto del campo eléctrico, estableciendo un método analítico para su determinación en las líneas de alta tensión.

En el capítulo 2 se realiza una recopilación de los resultados de las investigaciones realizadas por organismos científicos internacionales, acerca de los efectos sobre la salud humana ocasionados por la exposición al campo eléctrico producido por las líneas de alta tensión.

En el capítulo 3 se hace una revisión del aspecto normativo, en lo que se refiere a la limitación a la exposición al campo eléctrico producido en las instalaciones de transmisión y distribución de la energía eléctrica, haciendo especial énfasis en la normatividad colombiana.

En el capítulo 4 se establece un procedimiento normalizado para llevar a cabo la medición del campo eléctrico bajo las líneas de potencia.

---

<sup>1</sup> RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, es un código emitido por el Ministerio de Minas y Energía que fija las condiciones técnicas que garanticen la seguridad en los procesos de generación, transmisión, transformación, distribución y utilización de la energía eléctrica en todo el territorio nacional. La norma es de obligatorio cumplimiento y está regulada por la norma NTC 2050 “Código Eléctrico Colombiano”.

En el capítulo 5 se hace referencia a la actualización aplicada al programa desarrollado para realizar el cálculo de la intensidad del campo eléctrico en los puntos cercanos a una línea de transmisión, el cual es utilizado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

En el capítulo 6 se realiza la comparación entre el perfil lateral de intensidad de campo eléctrico obtenido a través de la medición directa realizada por una fuente confiable en una línea de alta tensión, con el perfil simulado en el programa que se planea actualizar.

En el capítulo 7 se plantean medidas de protección y métodos de mitigación ante la exposición al campo eléctrico producido por las líneas de alta tensión.

Por último, en el capítulo 8, se elabora un documento de divulgación preparado para la población en general con un lenguaje de fácil comprensión, de manera que haya una sensibilización en la opinión pública acerca de la problemática que implica la exposición incontrolada al campo eléctrico y magnético producido en las líneas de alta tensión.

# 1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## 1.1 CONCEPTO DE CAMPO ELÉCTRICO

De manera preliminar, es necesario establecer el concepto de carga eléctrica. La carga es una propiedad fundamental y característica de las partículas que forman la materia. De hecho, toda la materia se compone fundamentalmente de protones, neutrones y electrones; a partir de esto, se tiene que dos de las partículas anteriormente mencionadas tienen carga. Existen dos clases de carga, positiva y negativa, y un fragmento cualquiera de materia contiene aproximadamente cantidades iguales de cada clase. Por lo tanto, desde el punto de vista macroscópico, la carga se refiere a la carga neta o al exceso de carga.

La definición más general e intuitiva acerca del campo eléctrico, se hace desde la electrostática, y se le puede estudiar mediante la ley de Coulomb. Básicamente esta ley, la cual se aplica a cargas puntuales, se resume en dos principios:

I. Dos cargas puntuales ejercen entre sí fuerzas que actúan a lo largo de la línea que las une y que son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa.

II. Estas fuerzas son también proporcionales al producto de las cargas, son repulsivas para cargas iguales, y atractivas para cargas contrarias.

Matemáticamente, la magnitud de esta fuerza, es igual a:

$$F = |\mathbf{F}| = \frac{KQ_1Q_t}{R_{1t}^2} \quad (1.1)$$

Donde se tiene que  $Q_1$  y  $Q_t$  son las cantidades de carga positiva y/o negativa,  $R_{1t}$  es la distancia de separación entre cargas, y  $K$  es la constante de proporcionalidad, la cual según el Sistema Internacional es equivalente a:  $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ . La constante  $\epsilon_0$  se conoce como permitividad del espacio libre, y numéricamente es igual a  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m.

Si se considera a  $Q_t$  como una carga de prueba y a  $Q_1$  como una carga fija, la *intensidad de campo eléctrico* que ejerce la carga fija sobre la de prueba, se define como la fuerza ejercida por unidad de carga expresado de la siguiente forma:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2} \mathbf{a}_{R_{1t}} \quad (1.2)$$

La intensidad de campo eléctrico se simboliza como  $\mathbf{E}$ , y está obviamente en la misma dirección de la fuerza  $\mathbf{F}$ . Se mide en newtons/coulomb (N/C) ó en volts/metro (V/m).

Por lo tanto, se puede definir al campo eléctrico, como una distorsión o alteración que sufre el espacio debido a la presencia de un cuerpo eléctricamente cargado, representado en este caso como una carga puntual fija ( $Q_1$ ), por lo cual, en dicha región una carga de prueba ( $Q_t$ ) experimenta una fuerza ( $\mathbf{F}$ ). Matemáticamente se describe como un campo vectorial en el cual una carga eléctrica puntual de valor  $Q_t$  sufre los efectos de una fuerza eléctrica  $\mathbf{F}$ .

Otro concepto íntimamente ligado al de intensidad de campo eléctrico, es el de la *diferencia de potencial eléctrico*, y la expresión matemática que los relaciona es:

$$V_{ab} = - \int_b^a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1.3)$$

Donde  $V_{ab}$  es la diferencia de potencial existente entre dos puntos  $a$  y  $b$  de una región donde hay aplicado un campo eléctrico  $\mathbf{E}$ . La diferencia de potencial es una cantidad escalar y se mide en volts (V).

Los campos eléctricos pueden tener su origen tanto en cargas eléctricas como en campos magnéticos variables. La descripción de un campo vectorial se realiza mediante dos de sus propiedades: su divergencia y su rotacional. A la ecuación que describe la divergencia del campo eléctrico se la conoce como ley de Gauss<sup>2</sup> y la de su rotacional es la ley de Faraday<sup>3</sup>. La forma general del patrón del campo eléctrico experimentado en cualquier punto del espacio depende de la distribución de las cargas y de los objetos en sus inmediaciones. En sistemas técnicos, las cargas eléctricas están relacionadas con los voltajes, y no con las corrientes o con la potencia.

El campo eléctrico presente en el medio ambiente puede ser natural o artificial. El campo eléctrico natural es originado en la superficie de la tierra, y varía en gran medida con las condiciones del tiempo y con su localización. La magnitud del campo cerca de la superficie de la tierra bajo un clima despejado, oscila

---

<sup>2</sup> La ley de Gauss establece que el flujo eléctrico que está penetrando a una superficie cerrada es igual a la carga neta encerrada en dicha superficie. De manera alterna, indica que el campo eléctrico diverge hacia una distribución de carga, es decir, el campo eléctrico comienza en una carga y termina en otra. También muestra que la carga sobre un material conductor debe ubicarse sobre la superficie exterior y que justo afuera de la superficie (en el espacio libre),  $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{D}}{\epsilon_0}$ , donde la cantidad vectorial  $\mathbf{D}$  se conoce como la densidad de flujo eléctrico. En su forma diferencial, la ley de Gauss se escribe de la siguiente forma:  $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon_0}$ ; donde se tiene que la cantidad escalar  $\rho_v$  es la densidad volumétrica de carga.

<sup>3</sup> Gracias al trabajo experimental realizado por Michael Faraday, se llegó a determinar que los cambios temporales en el campo magnético inducen un campo eléctrico. Básicamente, la ley de Faraday establece que el voltaje inducido (fuerza electromotriz) en un circuito cerrado es directamente proporcional a la tasa de cambio en el tiempo del flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el mencionado circuito como borde. En su forma diferencial, la ley de Faraday se expresa así:  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  donde se tiene que  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  es la variación en el tiempo de la densidad del flujo magnético que atraviesa la superficie delimitada por el circuito cerrado. La expresión anterior también hace parte de una de las ecuaciones de Maxwell, las cuales describen completamente las características e interacciones de los campos eléctrico y magnético.

entre los 100 y los 150 V/m; pero su magnitud depende generalmente de la altura, la temperatura local, el perfil de humedad y de la presencia de iones en la atmosfera. Una de las fuentes de este tipo de campos se presenta debido a la acumulación de cargas eléctricas en determinadas zonas de la atmósfera por efecto de las tormentas. Por ejemplo, cuando cae un rayo durante una tormenta eléctrica, el campo eléctrico del medio ambiente natural puede llegar a incrementarse a valores de hasta 20 kV/m. El campo eléctrico natural se considera estático, es decir no varía en el tiempo.

El campo eléctrico artificial, es el producido por todas las instalaciones y equipo eléctrico que ha sido construido por el hombre. Entre ellos se pueden encontrar: líneas de transmisión y distribución, transformadores, máquinas eléctricas, artefactos electrodomésticos, radares, instalaciones de radio y televisión, los teléfonos móviles y sus estaciones base, etc. Los campos eléctricos artificiales pueden ser estáticos o variantes en el tiempo. La exposición ambiental a estos últimos es la que presenta actualmente un mayor incremento, debido a que por parte de la población se ha venido presentando una continua demanda de electricidad, además de la creciente utilización de tecnologías inalámbricas y a los cambios de ciertas prácticas laborales y sociales.

## **1.2 EL CAMPO ELÉCTRICO VARIANTE EN EL TIEMPO**

Los campos electromagnéticos variantes en el tiempo o campos CA (de corriente alterna), se propagan en forma de ondas electromagnéticas tanto en el medio material como en el vacío; las cuales lejos del foco emisor, pueden considerarse como ondas transversales planas formadas por un campo magnético  $H$  y por un campo eléctrico  $E$ , perpendiculares entre sí y perpendiculares a su vez a la dirección de propagación.

Tanto el campo eléctrico como el magnético poseen una intensidad y una dirección, pero cuando son campos variando en el tiempo, ambos oscilan en una dirección definida, es decir se pueden describir como una onda sinusoidal a través del tiempo, donde su intensidad de campo pico se conoce como la amplitud. Dichos campos se propagan a la velocidad de la luz, y debido a su naturaleza ondulatoria, transportan energía y están caracterizados por tener asociadas una frecuencia ( $f$ ) y una longitud de onda ( $\lambda$ ). La frecuencia es el número de oscilaciones de la onda por unidad de tiempo, medido en múltiplos de un hertzio (1 Hz = 1 ciclo por segundo), y la longitud de onda es la distancia recorrida por la onda en una oscilación (o ciclo). Para una mayor comprensión del campo electromagnético, este se distribuye energéticamente en un *espectro electromagnético* (ver Anexo A).

El campo eléctrico en un punto en el espacio, es un vector definido por sus componentes espaciales a lo largo de tres ejes ortogonales. Para campos sinusoidales en estado estable, cada componente espacial es un fasor (o número complejo). Las magnitudes de los componentes, son expresadas por sus valores eficaces (rms) en volts por metro (V/m), y no es necesario que sus ángulos de fase sean iguales:

$$\mathbf{E} = E_x(t)\mathbf{a}_x + E_y(t)\mathbf{a}_y + E_z(t)\mathbf{a}_z \quad (1.4)$$

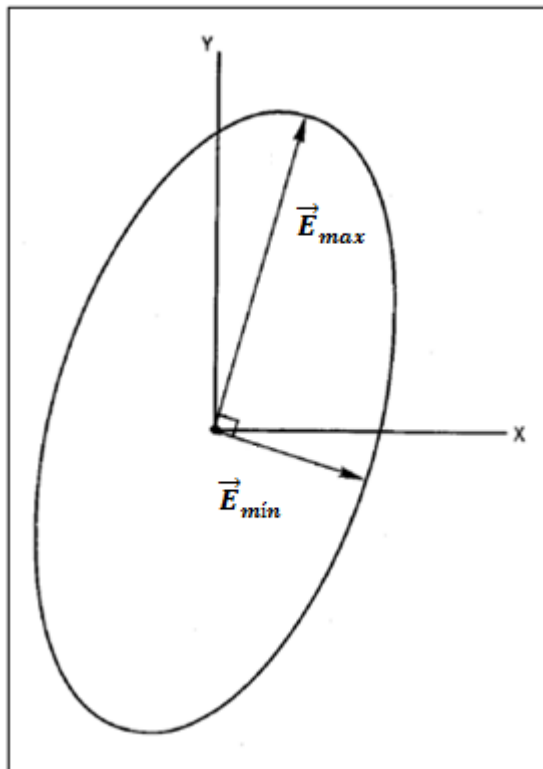
Donde  $\mathbf{a}_x$ ,  $\mathbf{a}_y$ ,  $\mathbf{a}_z$  son los vectores unitarios a lo largo de los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  respectivamente; y a su vez  $E_x(t)$ ,  $E_y(t)$ ,  $E_z(t)$  son fasores expresados como funciones que presentan una variación espacio-temporal, como se ve para la componente dada en la dirección del eje  $x$ :

$$E_x(t) = \text{Re}\{E_{x0}e^{-jkx}e^{j\omega t}\} = E_{x0} \cos(\omega t - kx) \quad (1.5)$$

Donde la magnitud, ángulo de fase y ángulo dependiente del tiempo están dados por  $E_{x0}$ ,  $\phi_x = kx$  y  $\varphi = (\omega t - kx)$ , respectivamente. Es útil

visualizar el vector  $E$ , expresado en la ecuación (1.4), como un vector rotando en un plano en el espacio y describiendo una elipse, donde la longitud de su semieje mayor representa el valor de la máxima intensidad de campo eléctrico, mientras que la longitud de su semieje menor representa la magnitud del campo un cuarto de periodo después de presentarse su máximo valor de intensidad, tal y como se muestra en la Figura 1. Al mismo tiempo, se tiene que el campo eléctrico en la dirección perpendicular al plano de la elipse es nulo.

**Figura 1.** Elipse descrita por un vector de campo eléctrico  $E$ , que se encuentra rotando en un plano en el espacio.



**Fuente:** EPRI. Transmission line reference book 345 kV and above. 1982.

Las ondas electromagnéticas son transportadas por partículas llamadas cuantos de luz (fotones). La propagación de la energía electromagnética como una onda, está descrita en la ecuación de energía de Planck:

$$W_{EM} = hf \quad (1.6)$$

Donde  $h$ , es la constante de Planck que equivale a  $6,62607 \times 10^{-34}$  J/s y  $f$  es la frecuencia de la onda en hertz (Hz). De lo anterior se deduce que los cuantos de luz de ondas electromagnéticas con frecuencias más altas transportan más energía que los de las ondas de menor frecuencia, por lo tanto se hace clara la división del espectro electromagnético en dos tipos de radiaciones: la ionizante y la no ionizante.

- **Radiación ionizante:**

Es aquel tipo de radiación donde sus ondas electromagnéticas transportan tanta energía por cuanto de luz, que son capaces de romper los enlaces químicos existentes entre las moléculas de los seres vivos. De las radiaciones que componen el espectro electromagnético, los rayos gamma que emiten los materiales radioactivos, los rayos cósmicos y los rayos X tienen esta capacidad, es decir, radiaciones cuyo rango de frecuencias está por encima de los 3 PHz (es decir,  $3 \times 10^{15}$  Hz).

- **Radiación no ionizante:**

Es la radiación que está compuesta por cuantos de luz sin energía suficiente para romper los enlaces moleculares. Su rango de frecuencias está comprendido entre los cero (0) y los 300 GHz del espectro.

Por lo tanto, para esta clase de radiaciones, la longitud de onda es mucho mayor que el cuerpo que ha sido sometido a su exposición, y el calentamiento por corrientes inducidas ocurre en raras ocasiones. Una de las fuentes de ondas electromagnéticas a las cuales está asociada este tipo de radiación son las tecnologías que operan a frecuencias industriales, entre las cuales se pueden encontrar las instalaciones del sistema de energía eléctrica, que en el caso de Colombia, producen campos electromagnéticos a una frecuencia de

60 Hz, es decir se encuentran dentro del rango de los campos de FEB<sup>4</sup> o de frecuencia extremadamente baja.

En los sistemas eléctricos, se considera que los campos electromagnéticos de FEB allí generados, tienen un comportamiento cuasiestacionario, lo que permite medir o calcular el campo eléctrico y el campo magnético en forma independiente mediante la teoría cuasiestática, en la cual el campo magnético no se considera acoplado al campo eléctrico, y por lo tanto estos pueden tratarse por separado como si fueran estáticos, tanto para su medición como para su modelamiento.

En adición al concepto de los campos cuasiestáticos, aplicable a cargas en reposo y movimiento, las cargas que presentan una aceleración producen una componente de radiación. A frecuencias extremadamente bajas el campo radiante de una fuente es despreciable, por lo tanto en situaciones prácticas de exposición, la radiación es absolutamente despreciable en el rango de los campos de FEB. La radiación solo llega a ser dominante para distancias que son largas comparadas con la longitud de onda.

Las principales fuentes de campos eléctricos de FEB son el inevitable resultado de la actividad humana, en particular, de la operación de sistemas de potencia o el uso cotidiano de electrodomésticos y aparatos en el hogar. Algunas de estas fuentes de campos artificiales son: las líneas eléctricas aéreas, electrodomésticos, cables subterráneos, subestaciones y la industria de energía eléctrica. En Colombia, dentro de las instalaciones de transporte y distribución de la energía eléctrica, los campos electromagnéticos más significativos son debidos a los tendidos de alta tensión y a las subestaciones eléctricas. En estas tecnologías, se tiene que cualquier conductor eléctrico cargado genera un campo eléctrico asociado, que está presente aunque no fluya la corriente eléctrica. Cuanto mayor sea la tensión, más intenso será el

---

<sup>4</sup> Los campos de FEB, o de frecuencia extremadamente baja (procede de la traducción al español del término que en inglés se lee como: "ELF fields" o "extremely low frequency fields"), son aquellos campos electromagnéticos variables en el tiempo que generalmente operan con frecuencias de hasta 300 Hz. Son producidos por los aparatos eléctricos y las instalaciones de transporte y distribución de energía eléctrica.

campo eléctrico a una determinada distancia. Al mismo tiempo, los campos eléctricos son más intensos cuanto menor es la distancia al conductor cargado que los genera y su intensidad disminuye rápidamente al aumentar la distancia.

### **1.3 CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN**

En los tendidos eléctricos de alta tensión, el campo eléctrico en un punto cercano a la línea se determina por:

- Nivel de tensión de la línea
- Radio de los conductores de la línea
- Disposición y configuración de los conductores de la línea
- Distancia entre fases
- Distancia a tierra de los conductores de la línea

Para sistemas polifásicos, el campo eléctrico resultante en cada punto en el espacio es un campo elíptico rotacional, como ya se mencionó anteriormente. Sin embargo, a nivel de tierra, la elipse se distorsiona y el campo es perpendicular al plano de tierra. Es así, que la componente vertical del campo eléctrico en las proximidades de una línea de transmisión es uniforme y su componente horizontal insignificante en una zona ubicada entre los 0 y 2 metros sobre la superficie de la tierra.

El procedimiento para el cálculo del campo eléctrico producido por la línea, no perturbado por objetos en la tierra, se hace utilizando el método de las imágenes. El método de las imágenes implica la conversión de un campo eléctrico en otro equivalente más fácil de calcular. En dicho método, el campo eléctrico en las cercanías de una línea de alta tensión es calculado asumiendo que en el espacio no hay cargas libres.

Por otra parte, se asume que la tierra es un conductor perfecto debido a que el tiempo requerido para que las cargas se redistribuyan en la superficie de la tierra bajo la acción de un cambio en el campo aplicado, es extremadamente pequeño comparado con el periodo de la frecuencia industrial. Debido a esto la tierra se comporta como una superficie equipotencial frente al campo eléctrico de FEB, haciendo que el campo en la frontera aire-tierra sea perpendicular a la misma. De forma simultánea se supone que la superficie del suelo es plana, horizontal e infinita.

También se asume que la permitividad del aire es prácticamente independiente de las condiciones climáticas y es igual a la permitividad del espacio libre ( $\epsilon = \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m). Otra suposición está en que se desprecia la influencia de las estructuras de soporte de los conductores y de cualquier otro tipo de objeto vecino.

### **1.3.1 El método de las imágenes aplicado al cálculo del campo eléctrico en líneas de alta tensión.**

El método de las imágenes es usado para calcular el campo eléctrico máximo en la superficie de los conductores de una línea de transmisión y en sus cercanías. Para su aplicación, se asume que los conductores son infinitamente largos y paralelos a la tierra, donde ésta última, como ya se había especificado, se considera una buena conductora. Básicamente consta de dos etapas:

- I. Cálculo de las cargas equivalentes por unidad de longitud del conductor.
- II. Cálculo del campo eléctrico producido por éstas cargas.

La relación usada para calcular las cargas inducidas sobre los conductores en un sistema de conductores múltiples es:

$$[Q] = [c][V] \quad (1.7)$$

Donde  $[Q]$  y  $[V]$  son los vectores de las cargas y los potenciales (la tierra a potencial cero) de los conductores respectivamente; y  $[c]$  es la matriz cuadrada de coeficientes de capacitancia. La determinación de  $[c]$  se realiza mediante el cálculo de los coeficientes de Maxwell, que a su vez son los elementos que conforman la matriz  $[P]$ , y donde ambas matrices se encuentran relacionadas a través de la siguiente ecuación:

$$[c] = [P]^{-1} \quad (1.8)$$

Los coeficientes de Maxwell,  $P_{ij}$ , se obtienen por aplicación directa del método de las imágenes. Si  $i = j$ , entonces  $P_{ij} = P_{ii}$ , donde este último es uno de los valores ubicados en la diagonal principal de la matriz  $[P]$  y a su vez corresponde al coeficiente de Maxwell dado para el flujo propio en el conductor  $i$ , producido por la corriente propia transportada por ese conductor. Entonces, se tiene que:

$$P_{ii} = \left( \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \right) \ln \left( \frac{2H_i}{r_i} \right) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (1.9)$$

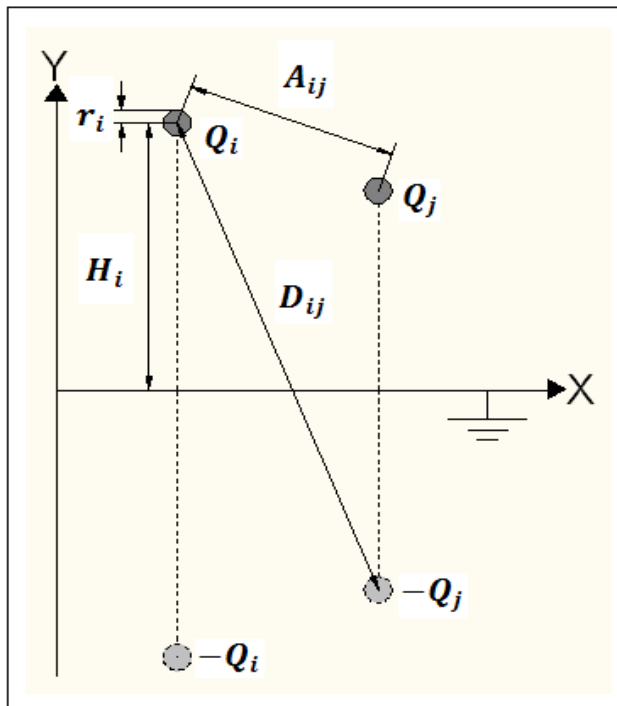
Donde,  $H_i$  es la altura a la cual está el conductor  $i$  respecto del suelo, y  $r_i$  es el radio del mismo conductor, como se muestra en la Figura 2.

De otra parte, si  $P_{ij}$  es uno de los elementos que no se encuentran sobre la diagonal principal de la matriz  $[P]$ , dado que  $i \neq j$ , entonces dicho elemento corresponde al coeficiente de Maxwell dado para el flujo enlazado en el conductor  $i$  debido a la corriente que transporta el conductor  $j$ . Por lo tanto, aquí se tiene que:

$$P_{ij} = \left( \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \right) \left( \ln \left( \frac{D_{ij}}{A_{ij}} \right) \right) \quad \text{para } i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1.10)$$

Donde,  $D_{ij}$  es la distancia entre el conductor  $i$  y la imagen del conductor  $j$ , y  $A_{ij}$  es la distancia aérea entre los conductores  $i$  y  $j$ , como se muestra en la Figura 2. Se tiene además, que  $P_{ij} = P_{ji}$ .

**Figura 2.** Línea compuesta por los conductores  $i$  y  $j$ , con sus correspondientes imágenes.



**Fuente:** BEGAMUDRE, Rakosh Das. Extra high voltage AC transmission engineering. 1986.

Por lo tanto, mediante la aplicación de la ecuación (1.8) y posteriormente de la ecuación (1.7), ya es posible obtener las cargas sobre cada uno de los conductores, sabiendo que para líneas trifásicas los valores fasoriales dados en el vector  $[V]$  corresponden a las tensiones fase-neutro del sistema que a su vez tienen un desfase de  $120^\circ$  entre ellas.

Conocidas las magnitudes de las cargas, el cálculo del campo eléctrico superficial en el conductor  $i$  se realiza utilizando el teorema de Gauss:

$$|E_i| = \frac{|Q_i|}{2\pi\epsilon_0 r_i} \quad (1.11)$$

En líneas de extra alta tensión (superior a 230 kV), es común el empleo de conductores configurados en haz. En estos casos el haz es representado como un conductor cilíndrico único y ficticio, el cual tendría las mismas capacitancias que el haz real con relación a todos los demás conductores. El haz de conductores puede ser reemplazado por un conductor único de radio  $r_{eq}$ , en donde se tiene que:

$$R = \frac{D}{2 \sin(\pi/n)} \quad (1.12)$$

$$r_{eq} = R * \sqrt[n]{nr/R} \quad (1.13)$$

Donde,  $D$  es la distancia entre conductores elementales consecutivos en el haz,  $n$  es el número de conductores elementales dentro del haz,  $R$  es el radio geométrico del haz, y  $r$  es el radio de los conductores elementales, tal y como se muestra en la Figura 3.

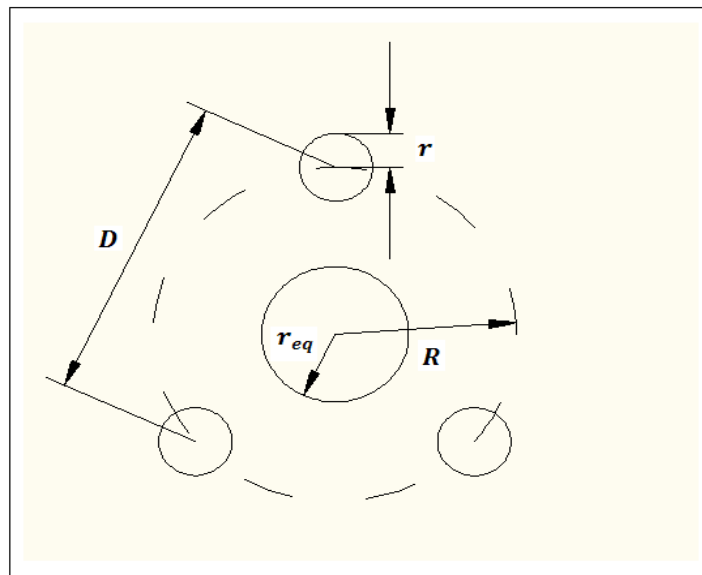
Al introducir el valor de  $r_{eq}$  en las ecuaciones de los coeficientes de potencial  $P_{ij}$ , se determina la magnitud de la carga total del haz  $Q$ , la cual se reparte equitativamente sobre los  $n$  conductores que lo conforman. Posteriormente se puede calcular el gradiente promedio propio de un conductor en el haz, con la siguiente ecuación:

$$E_{prom} = \left(\frac{1}{n}\right) \left(\frac{|Q|}{2\pi\epsilon_0 r}\right) \quad (1.14)$$

Debido al efecto del blindaje mutuo, el gradiente real es más fuerte hacia el exterior del haz, y ya que éste se supone aislado, el valor dado para el gradiente promedio máximo coincide con el del campo eléctrico máximo del haz dado por la siguiente ecuación:

$$E_{max} = (E_{prom}) \left(1 + \frac{r(n-1)}{R}\right) \quad (1.15)$$

**Figura 3.** Representación de un conductor configurado en haz.



**Fuente:** RUGELES, Julio. Conceptos básicos en técnicas de alta tensión. 1991.

Para sistemas con cable de guarda, es necesario ampliar la matriz de coeficientes de potencial, con el objeto de incluir la información de los cables de guarda, pero el desarrollo de los cálculos es idéntico al descrito anteriormente. Entonces se tiene:

$$\begin{bmatrix} [V_c] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P_{cc}] & [P_{cg}] \\ [P_{gc}] & [P_{gg}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q_c] \\ [Q_g] \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Donde,  $P_{cc}$  son los coeficientes de acoplamiento capacitivo entre conductores de fase,  $P_{cg} = P_{gc}$  son los coeficientes de acoplamiento capacitivo entre fases y cables de guarda, y  $P_{gg}$  son los coeficientes de acoplamiento capacitivo entre cables de guarda.

### 1.3.2 Campo eléctrico de una línea trifásica de circuito sencillo.

Este cálculo utiliza también el método de las imágenes como herramienta, el cual requiere la introducción de unas cargas adicionales aparte de las dadas, de una magnitud y posiciones tales que satisfagan las condiciones de frontera. Territorialmente se ubican donde se encuentren las imágenes geométricas de las cargas dadas. Si se selecciona un origen para el sistema de coordenadas, ubicado en el suelo y en la mitad de la estructura, entonces se plantea que las coordenadas del conductor  $i$  de la línea son  $(x_i, y_i)$ . Se requiere calcular el campo eléctrico en un punto A, de coordenadas  $(x, y)$  en el espacio (ver Figura 4).

A partir de los anteriores supuestos, las componentes horizontal y vertical del campo eléctrico producido por un conductor  $i$  en el punto A, debido a la carga de este conductor y a su correspondiente carga imagen, vienen dadas respectivamente por las siguientes relaciones:

$$E_{hi} = \left( \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \right) \left( \frac{x-x_i}{D_i^2} - \frac{x-x_i}{D_i'^2} \right) \quad (1.17)$$

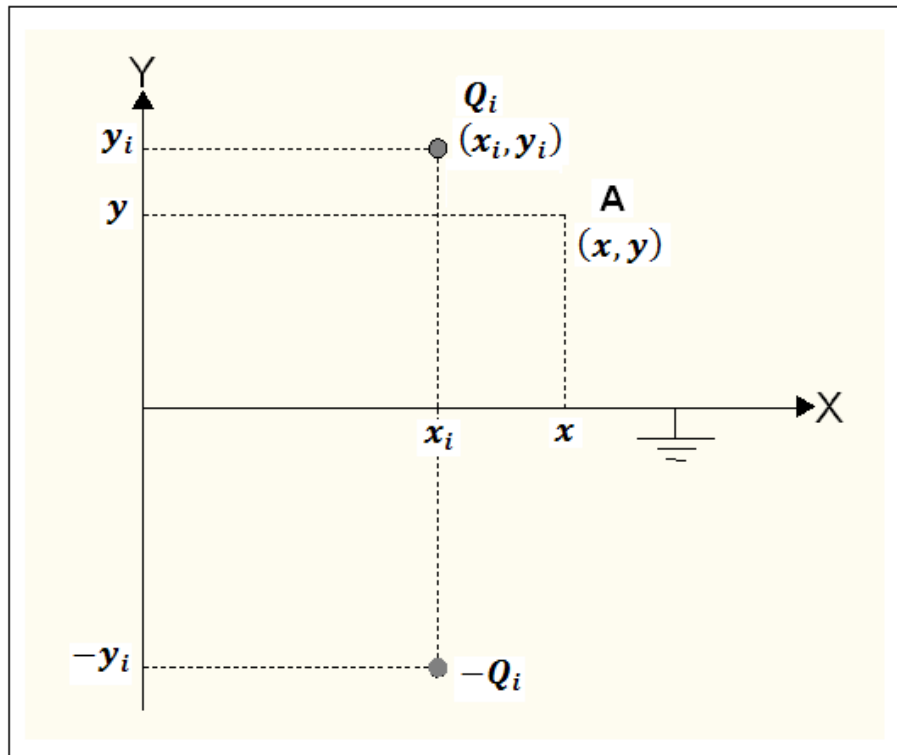
$$E_{vi} = \left( \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \right) \left( \frac{y-y_i}{D_i^2} - \frac{y+y_i}{D_i'^2} \right) \quad (1.18)$$

De las relaciones anteriores se tiene que:

$$D_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \quad (1.19)$$

$$D_i'^2 = (x - x_i)^2 + (y + y_i)^2 \quad (1.20)$$

**Figura 4.** Conductor eléctrico y su imagen.



**Fuente:** BEGAMUDRE, Rakosh Das. Extra high voltage AC transmission engineering. 1986.

En una línea trifásica, se deben evaluar las siguientes igualdades para encontrar las componentes horizontales y verticales del campo eléctrico producidas por un conductor  $i$  que conforma alguna de las tres fases del sistema:

$$J_i = \frac{x - x_i}{D_i^2} - \frac{x - x_i}{D_i'^2} \quad (1.21)$$

$$K_i = \frac{y-y_i}{D_i^2} - \frac{y+y_i}{D_i'^2} \quad (1.22)$$

Entonces, ya habiendo encontrado la matriz de coeficientes de Maxwell de la línea trifásica, hallando la matriz cuadrada de capacitancias nodales (aplicando la ecuación (1.8)) y a partir de la evaluación de la ecuación (1.21) para cada uno de los conductores que conforman las tres fases del sistema se pueden obtener:

$$J_{h1} = J_1 c_{11} + J_2 c_{21} + J_3 c_{31}$$

$$J_{h2} = J_1 c_{12} + J_2 c_{22} + J_3 c_{32} \quad (1.23)$$

$$J_{h3} = J_1 c_{13} + J_2 c_{23} + J_3 c_{33}$$

Si se considera que la expresión fasorial de la tensión de alimentación viene dada por el vector:

$$[V] = V_m [1\angle\varphi; 1\angle(\varphi - 120^\circ); 1\angle(\varphi + 120^\circ)] \quad (1.24)$$

Se tiene que la componente horizontal del campo, en su forma fasorial está dada por:

$$E_{hn} = V_m \left( (J_{h1}\angle\varphi) + (J_{h2}\angle(\varphi - 120^\circ)) + (J_{h3}\angle(\varphi + 120^\circ)) \right) \quad (1.25)$$

Si se asigna la relación:

$$J_h = \sqrt{J_{h1}^2 + J_{h2}^2 + J_{h3}^2 - J_{h1}J_{h2} - J_{h2}J_{h3} - J_{h3}J_{h1}} \quad (1.26)$$

Se puede obtener el valor de la amplitud de la componente horizontal del campo eléctrico total en el punto A:  $(x, y)$  debido a las tres fases, a través de:

$$E_{hn} = J_h V \quad (1.27)$$

Donde  $V$  es el valor del voltaje línea-línea del sistema.

Si se aplica de forma análoga el procedimiento empleado para hallar las ecuaciones dadas en (1.23), pero usando esta vez la relación (1.22) para cada conductor, se puede hallar de manera similar el valor de la componente vertical del campo eléctrico total en el punto A  $(x, y)$  debido a las tres fases ( $E_{vn}$ ). Consecuentemente si  $K_{v1}, K_{v2}, K_{v3}$  son análogos a  $J_{h1}, J_{h2}, J_{h3}$ ; entonces es posible obtener la siguiente relación:

$$K_v = \sqrt{K_{v1}^2 + K_{v2}^2 + K_{v3}^2 - K_{v1}K_{v2} - K_{v2}K_{v3} - K_{v3}K_{v1}} \quad (1.28)$$

Por lo tanto,  $E_{vn}$  esta dado por:

$$E_{vn} = K_v \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (1.29)$$

Debido a las  $n$  fases, la suma de las componentes horizontal y vertical del campo eléctrico en el punto A  $(x, y)$  será:

$$E_{hn} = \sum_{i=1}^n E_{hi} \quad (1.30)$$

$$E_{vn} = \sum_{i=1}^n E_{vi} \quad (1.31)$$

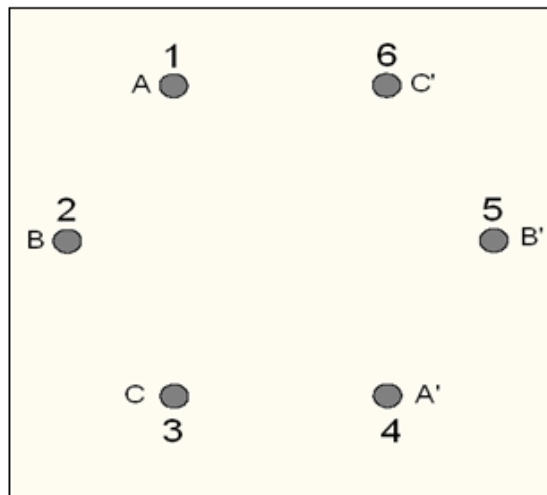
Entonces, el campo eléctrico total en el punto A está dado por:

$$E_n = \sqrt{E_{hn}^2 + E_{vn}^2} \quad (1.32)$$

### 1.3.3 Campo eléctrico para un sistema trifásico de C.A. de doble circuito.

En una configuración doble circuito, la línea trifásica tiene dispuestos 6 conductores, arreglados tal y como lo muestra la Figura 5.

**Figura 5.** Línea trifásica de doble circuito.



**Fuente:** BEGAMUDRE, Rakosh Das. Extra high voltage AC transmission engineering. 1986.

En donde las tensiones del sistema (en su forma fasorial) están aplicadas de la siguiente forma:

- En los conductores 1 y 4:  $V_A = V_{A'} = V_m \angle \varphi$
- En los conductores 2 y 5:  $V_B = V_{B'} = V_m \angle (\varphi - 120^\circ)$
- En los conductores 3 y 6:  $V_C = V_{C'} = V_m \angle (\varphi + 120^\circ)$

Entonces, para este caso la matriz de coeficientes de Maxwell es de orden 6x6, y es necesario hallar los 6 términos de  $J_i$  correspondientes a cada conductor del sistema, aplicando la ecuación (1.21).

Los valores de  $J_{h1}$ ,  $J_{h2}$  y  $J_{h3}$ , son obtenidos al agrupar los coeficientes de la matriz de capacitancias nodales teniendo como referencia aquellos conductores que tienen aplicada la misma tensión, como se muestra a continuación:

Para los conductores 1 y 4, se encuentra  $J_{h1}$ :

$$J_{h1} = J_1(c_{11} + c_{14}) + J_2(c_{21} + c_{24}) + J_3(c_{31} + c_{34}) + J_4(c_{41} + c_{44}) + J_5(c_{51} + c_{54}) + J_6(c_{61} + c_{64}) \quad (1.33)$$

Para los conductores 2 y 5, se encuentra  $J_{h2}$ :

$$J_{h2} = J_1(c_{12} + c_{15}) + J_2(c_{22} + c_{25}) + J_3(c_{32} + c_{35}) + J_4(c_{42} + c_{45}) + J_5(c_{52} + c_{55}) + J_6(c_{62} + c_{65}) \quad (1.34)$$

Para los conductores 3 y 6, se encuentra  $J_{h3}$ :

$$J_{h3} = J_1(c_{13} + c_{16}) + J_2(c_{23} + c_{26}) + J_3(c_{33} + c_{36}) + J_4(c_{43} + c_{46}) + J_5(c_{53} + c_{56}) + J_6(c_{63} + c_{66}) \quad (1.35)$$

El valor de la amplitud total de la componente horizontal del campo eléctrico en el punto A, está dado por:

$$E_{ht} = J_h V \quad (1.36)$$

Donde  $J_h$  se puede hallar aplicando la ecuación (1.26), y  $V$  corresponde a la tensión línea-línea del sistema trifásico, como ya se había indicado anteriormente.

Similarmente, es posible hallar el valor de la amplitud total de la componente vertical del campo eléctrico en el punto A, aplicando:

$$E_{vt} = K_v V \quad (1.37)$$

El valor de  $K_v$  se halla aplicando la ecuación (1.28), donde a su vez se relacionan los valores de  $K_{v1}$ ,  $K_{v2}$  y  $K_{v3}$ , que son análogos a  $J_{h1}$ ,  $J_{h2}$  y  $J_{h3}$ , y que se pueden hallar haciendo el reemplazo directo en las ecuaciones (1.33), (1.34) y (1.35) de los valores encontrados para  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  y  $K_6$  (los cuales fueron obtenidos al aplicar la ecuación (1.22) para cada conductor del sistema) por los de  $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5$  y  $J_6$  dentro de las mencionadas expresiones.

Por lo tanto, el campo eléctrico total en el punto A es:

$$E_t = \sqrt{E_{ht}^2 + E_{vt}^2} \quad (1.38)$$

## **2 RECOPIACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS ACERCA DE LA INFLUENCIA DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS DE FRECUENCIAS EXTREMADAMENTE BAJAS EN EL ORGANISMO HUMANO**

### **2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL ACERCA DE LOS EFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS DE FRECUENCIAS EXTREMADAMENTE BAJAS**

Un efecto biológico es cualquier respuesta medible a un estímulo o cambio en el medio, para el caso en particular, es la respuesta fisiológica ante la exposición al campo electromagnético. Algunos efectos pueden ser respuestas sutiles dentro del rango fisiológico normal o pueden resultar en condiciones patológicas, mientras que otros pueden tener consecuencias benéficas para un organismo.

Según la Comisión Internacional sobre Protección frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP)<sup>5</sup>, durante la exposición a campos de FEB, se inducen corrientes y campos eléctricos dentro del cuerpo. Además se presenta una absorción de energía en los tejidos, lo cual depende de los mecanismos de acoplamiento y de la frecuencia involucrada.

Para el tema en cuestión, el acoplamiento a campos eléctricos de baja frecuencia, es el mecanismo a través del cual los campos eléctricos variables en el tiempo interactúan con la materia viva. Dicha interacción resulta en un

---

<sup>5</sup> ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, es una comisión científica creada por la Asociación Internacional de Protección contra la Radiación (IRPA) para fomentar la protección contra la radiación no ionizante (RNI) en beneficio de las personas y del medio ambiente. Algunas de sus funciones son proporcionar orientación científica y recomendaciones sobre protección contra la exposición a la RNI y elaborar directrices y límites internacionales de exposición a la RNI independientes y con fundamento científico. La ICNIRP es una organización no gubernamental oficialmente reconocida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Internacional del Trabajo para asuntos relativos a la RNI.

flujo de cargas eléctricas (corriente eléctrica), la polarización de la dirección de las cargas (formación de dipolos eléctricos), y la reorientación de los dipolos eléctricos que ya están presentes en los tejidos. Las magnitudes relativas de estos diferentes efectos dependen de las propiedades eléctricas del cuerpo que son: la conductividad eléctrica (que gobierna el flujo de corriente eléctrica) y la permitividad (que gobierna la magnitud del efecto de polarización). La conductividad eléctrica y la permitividad varían con el tipo de tejido y también dependen de la frecuencia del campo aplicado.

Los campos eléctricos externos al organismo vivo inducen una carga superficial en el cuerpo; produciéndose corrientes inducidas en este último, donde la distribución de dichas corrientes depende tanto de las condiciones de exposición, del tamaño y forma del cuerpo, así como de la posición que presente el cuerpo frente al campo.

A partir de la sinopsis realizada en 1991 por el Dr. Charles Polk, adscrito al departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Rhode Island, Kingston [29]; en la cual se recopila una selección de los resultados provenientes de las investigaciones realizadas sobre los efectos biológicos de los campos eléctrico y magnético de baja frecuencia, se presentará a continuación una descripción general de los aspectos contenidos en dicho documento que se refieren al objeto de estudio del presente trabajo.

Al someter el tejido de un ser vivo a la presencia de un campo eléctrico, sin la existencia de algún contacto con un material conductor, se obtiene que el campo eléctrico en el exterior del tejido debe ser mucho más grande que el campo en el interior del mismo. Esto como consecuencia de las leyes de la física relativas a la conservación de la carga eléctrica y a la continuidad del desplazamiento del campo eléctrico (ley de Gauss). En el caso de campos eléctricos sinusoidales en estado estable operando a una frecuencia  $f$  en una frontera plana entre un medio semi-infinito, el Dr. Polk plantea que la siguiente

relación se cumple para un sistema de cargas en la superficie de una membrana celular<sup>6</sup>, es decir en la frontera aire-tejido:

$$\omega\epsilon_0 E_{out} = \sigma E_{in} \quad (2.1)$$

Donde  $E_{out}$  y  $E_{in}$  son los valores de la intensidad del campo eléctrico perpendicular a la frontera en el exterior e interior del tejido respectivamente,  $\omega$  es la frecuencia en radianes ( $\omega = 2\pi f$ ),  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del aire y  $\sigma$  es la conductividad de la membrana celular, cuyo valor aproximado para tejidos musculares es de 1 S/m para campos de baja frecuencia. Aunque la forma del cuerpo puede causar una distorsión y consecuentemente un acrecentamiento del campo uniformemente aplicado de magnitud  $E_{out}$  en algunos puntos. Como se puede ver en la ecuación (2.1),  $E_{in}$  puede tomar un valor que llega a estar seis órdenes de magnitud por debajo de  $E_{out}$  ( $E_{in} \approx 10^{-6} E_{out}$ ). Entonces se requiere que sea aplicado un campo eléctrico exterior del orden de los kV/m para producir unos valores de campo eléctrico interno comprendidos desde el orden de los  $\mu$ V/m hasta los mV/m. Campos eléctricos del orden de los kV/m solo se pueden encontrar debajo de las líneas de transmisión de alta tensión.

De igual forma, se indica que los campos eléctricos de una magnitud suficiente pueden afectar tanto a cargas eléctricas (como los iones que son abundantes en cualquier organismo vivo) como a las moléculas polarizadas o polarizables.

Los iones con una carga eléctrica “ $q$ ” están directamente sujetos a una fuerza de translación “ $F = qE$ ”, presente tanto para campos eléctricos uniformes como no uniformes. Las moléculas ya polarizadas (dipolos) se orientarán por su cuenta a lo largo de la dirección en la cual está aplicado el campo eléctrico,

---

<sup>6</sup> La membrana celular o plasmática es una estructura laminar formada por lípidos y proteínas, que engloba a las células, define sus límites, y contribuye a mantener el equilibrio entre el interior y el exterior de éstas.

solo si éstas se encuentran en libertad de movimiento. Las moléculas en las cuales las cargas positivas y negativas pueden ser ligeramente desplazadas se convertirán en dipolos, y por consiguiente estarán sometidas a la acción de un par o torque. Si los campos son muy intensos, inicialmente el medio neutro se convierte en ionizado, y los dieléctricos pueden ser destruidos por la formación de caminos conductores de la electricidad.

Finalmente los campos eléctricos espaciales no uniformes causarán un movimiento traslacional de los dipolos eléctricos en la dirección en la cual se incrementa la intensidad del campo eléctrico, independientemente de la dirección del campo.

En el entorno biológico los modos de interacción propios de los campos eléctricos con las cargas y los dipolos pueden conducir a los siguientes efectos producidos sobre las células y tejidos:

- **Electroporación:**

Es el proceso donde los campos eléctricos aplicados externamente tienen la capacidad de producir poros en una membrana celular y debido a este aumento en su permeabilidad, también presenta un incremento en su conductividad eléctrica. La formación de dichos poros se debe básicamente a que el voltaje que atraviesa la membrana plasmática (es decir, la membrana celular) excede su rigidez dieléctrica. Se ha demostrado que pulsos de campo eléctrico de 5 kV/m con una duración superior a 0,1 ms producen una electroporación reversible (los poros se cierran cuando el campo externo es removido), mientras que un campo de aproximadamente 20 kV/m y de una larga duración puede llegar a producir una electroporación irreversible o permanente (los poros no se cierran al remover el campo eléctrico externo). El fenómeno de la electroporación se ha observado para intensidades de campo desde los 5 hasta los 30 kV/m.

- **Estimulación nerviosa periférica (sensación):**

La excitación nerviosa puede ser causada por los campos electromagnéticos iniciando la despolarización de la membrana neuronal<sup>7</sup>. Esto activa los canales iónicos activados por voltaje que a su vez producen una acción propagadora potencial a lo largo de la neurona<sup>8</sup>, y por lo tanto una sensación.

Los umbrales de sensibilidad más observados son para los nervios mielinizados<sup>9</sup> (alrededor de 20 micras de diámetro), con un pulso de campo eléctrico monofásico de 6 V/m que se activa de 100 a 200  $\mu$ s y se repite cada 2 ms.

- **Excitación directa de la célula muscular:**

Las células musculares son estimuladas más comúnmente mediante el mecanismo de estimulación de las neuronas motoras discutido anteriormente. Pero también pueden ser estimuladas por campos que son cerca de diez veces mayores a los requeridos para la estimulación del nervio. Un pulso de campo eléctrico monofásico debe estar presente por cerca de 1 a 10 ms para la estimulación de un músculo esquelético. A su vez, se necesita de un campo de 12 V/m para la estimulación de un músculo cardíaco.

- **Rotación de las células debido al campo rotacional:**

Se presenta en líquidos aislantes, y es un efecto útil para la medición de las constantes dieléctricas. Se manifiesta para niveles de campo eléctrico del orden de los  $10^4$  V/m.

---

<sup>7</sup> La membrana neuronal es la membrana plasmática de las células conocidas como neuronas, la cual es una bicapa de fosfolípidos que cumple un papel importante en la transmisión del impulso nervioso.

<sup>8</sup> Las neuronas, son un tipo de células del sistema nervioso cuya principal característica es la excitabilidad eléctrica de su membrana plasmática; están especializadas en la recepción de estímulos y conducción del impulso nervioso entre ellas o con otros tipos de células.

<sup>9</sup> Los nervios mielinizados, son aquellas células nerviosas en las cuales el axón (que es una prolongación de la neurona especializada en la conducción del impulso nervioso desde el cuerpo celular hacia otra célula) está rodeado por una capa de membranas de células de Schwann, que son aquellas células que poseen una vaina de mielina. La mielina es una lipoproteína que permite la transmisión de los impulsos nerviosos entre las distintas partes del cuerpo en los vertebrados, esto gracias a su efecto aislante.

- **Efectos sutiles en periodos largos (mayores a los 10 minutos):**

Entre los cuales se cuentan la reparación de tejidos de huesos blandos, transcripción<sup>10</sup> y proliferación (o crecimiento) celular. Se presenta para niveles de intensidad de campo eléctrico que están en el orden comprendido entre los  $10^{-3}$  y los  $10^{-5}$  V/m.

- **Electroforesis:**

Es una técnica de separación de moléculas según la movilidad de estas en un campo eléctrico. En este fenómeno se presenta el movimiento de partículas cargadas, iones inorgánicos o células vivas en una solución; pero teniendo en cuenta que la importancia del campo bioeléctrico<sup>11</sup> se manifiesta equilibrando la tendencia a la difusión, la magnitud del campo eléctrico externo puede afectar la velocidad de estas partículas y producir efectos en el metabolismo.

- **Calentamiento de los tejidos por efecto Joule:**

Se presenta por la transferencia de energía del campo eléctrico a las cargas eléctricas a través de las fuerzas que ejerce sobre ellas. El efecto de calentamiento se manifiesta por medio de la potencia que es transferida a las cargas, la cual es directamente proporcional a la conductividad del tejido y al cuadrado de la magnitud del campo eléctrico interno. Debido a que en los campos de FEB, el campo eléctrico inducido o interno es mucho menor al campo eléctrico incidente o externo, el calentamiento producido por este último se considera despreciable.

Los valores más altos para campos eléctricos que actúan a frecuencias industriales y que son accesibles al público en general, se pueden encontrar debajo de los conductores que conforman las líneas de extra alta tensión, pero rara vez exceden los 10 kV/m. Incluso para estos límites altos, los campos que son inducidos por estos campos externos en los tejidos de los seres humanos

---

<sup>10</sup> En genética, la transcripción celular, es la copia de ADN a ARN que ocurre antes de expresarse la proteína.

<sup>11</sup> El campo bioeléctrico, es el campo eléctrico que producen los organismos vivos o que se genera a partir de fuentes biológicas.

que se encuentran aislados, son muy pequeños para producir algún efecto biológico confirmado.

Sin embargo, el contacto con objetos conductores, puede concentrar las corrientes inducidas que dan lugar a campos internos localizados y perceptibles. El estímulo surge de una rápida transferencia de la carga en el momento del contacto, seguido de la aparición de una corriente constante. Además, al introducir objetos conductores en campos eléctricos presentes en el aire, se tiende a intensificar los valores de campo cerca de las extremidades de los objetos. Esta intensificación de los campos externos puede producir un movimiento en el cabello y sensaciones vibrotáctiles<sup>12</sup>.

En los trabajadores que se encuentren en campos que superen los 5 o 6 kV/m, pueden aparecer choques transitorios en el momento de hacer contacto con otros objetos. Para estos mismos niveles de campo eléctrico externo, es posible que la intensificación de campos en la superficie del cuerpo pueda causar un movimiento en el cabello apenas perceptible. La ocurrencia de este tipo de choques, no es en sí misma fisiológicamente nociva.

## **2.2 DESCRIPCIÓN GENERAL ACERCA DE LOS POSIBLES EFECTOS EN LA SALUD HUMANA PRODUCIDOS POR LA EXPOSICIÓN A LOS CAMPOS ELÉCTRICOS DE FRECUENCIAS EXTREMADAMENTE BAJAS**

Un efecto perjudicial para la salud, es el que causa una disfunción detectable de la salud de las personas expuestas o de sus descendientes. Por el contrario, un efecto biológico, puede o no producir un efecto perjudicial para la salud. Sin embargo, cuando un efecto biológico tiene consecuencias en la salud, superando los mecanismos de compensación del cuerpo humano, se le puede considerar como un efecto perjudicial o lesión.

---

<sup>12</sup> Las sensaciones vibrotáctiles, se refieren a la percepción de objetos que oscilan en contacto con la piel.

En los últimos veinte años ha aumentado la preocupación del público ante la posibilidad de que la exposición a campos eléctricos y magnéticos de FEB tenga algún efecto nocivo para la salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS)<sup>13</sup> está examinando los aspectos sanitarios de esta situación en el marco de su *Proyecto Internacional CEM*<sup>14</sup>, ya que los resultados de las investigaciones actuales son frecuentemente contradictorios.

### **2.2.1 Resultados de los estudios realizados.**

A partir de los Criterios de Salud Ambiental para campos electromagnéticos de FEB que fueron establecidos en el año 2007 por la OMS en: *Environmental Health Criteria N° 238* [25], se abordarán los posibles efectos en la salud de la exposición al campo eléctrico producido en las líneas de alta tensión, y las principales conclusiones obtenidas de los estudios realizados para evaluar su potencial riesgo a la salud humana.

- **Mecanismos biofísicos:**

En las investigaciones desarrolladas por la OMS se han examinado los mecanismos de interacción directa e indirecta de los campos eléctricos y magnéticos de FEB. Uno de los mecanismos o efectos de la interacción directa de los campos eléctricos dentro del cuerpo humano, son los campos eléctricos inducidos en las redes neuronales, debido a que estimulan directamente las fibras nerviosas mielinizadas. Dichas fibras nerviosas son aisladas desde el punto de vista biofísico, cuando la intensidad del campo interno es superior a algunos voltios por metro. La transmisión sináptica<sup>15</sup> en las redes neuronales, en contraposición a las células aisladas, se puede ver afectada por campos mucho más débiles. Para discriminar algunos valores en la red neural, se ha

---

<sup>13</sup> OMS, Organización Mundial de la Salud, es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas. Es la responsable de desempeñar una función de liderazgo en los asuntos sanitarios mundiales, configura la agenda de investigaciones en salud, establecer normas, articular opciones de política basadas en la evidencia, prestar apoyo técnico a los países y vigilar las tendencias sanitarias mundiales.

<sup>14</sup> El *Proyecto Internacional CEM* fue creado por la OMS en 1996 para evaluar las pruebas científicas de los posibles efectos sobre la salud de los campos electromagnéticos en el intervalo de frecuencia entre 0 y 300 GHz. Este proyecto fomenta las investigaciones dirigidas a rellenar importantes lagunas de conocimiento y a facilitar el desarrollo de normas aceptables internacionalmente que limiten la exposición a campos electromagnéticos.

<sup>15</sup> La transmisión sináptica del impulso nervioso, hace referencia a la sinápsis o unión intercelular que se presenta especialmente entre neuronas, permitiendo su comunicación mediante la transformación de una señal eléctrica en otra química.

propuesto un límite inferior de 1 mV/m, pero de acuerdo con la evidencia actual parecen más probables valores umbral de alrededor de 10-100 mV/m.

Otras interacciones biofísicas directas de los campos eléctricos de FEB, tales como la ruptura de enlaces químicos y las fuerzas sobre las partículas cargadas, no parecen explicar de manera verosímil las interacciones en los niveles de campo encontrados en los entornos público y ocupacional.

Con respecto a los efectos indirectos, la carga eléctrica superficial inducida por campos eléctricos puede ser percibida y dar lugar a microchoques dolorosos al haber un contacto (tacto o roce) entre la persona y un objeto conductor con un potencial eléctrico diferente, ya que se pueden llegar a producir corrientes de contacto. La ICNIRP ha establecido que en el rango de frecuencia hasta aproximadamente 100 kHz, el flujo de corriente eléctrica desde un objeto conductor en el campo hacia el cuerpo del individuo, puede dar lugar al estímulo de los músculos y/o los nervios periféricos<sup>16</sup>. Con el aumento de los niveles de la corriente esto se puede manifestar como una percepción, dolor por descarga eléctrica y/o quemadura, falta de habilidad para soltar el objeto, dificultad en la respiración y en corrientes muy altas, fibrilación ventricular cardiaca (Tenforde y Kaune, 1987)<sup>17</sup>. Las corrientes de umbral para varios efectos indirectos de campos con frecuencias de 50 y 60 Hz, se resumen en la Tabla 1 (UNEP / OMS / IRPA, 1993)<sup>18</sup>.

Según la OMS, ninguno de los mecanismos anteriormente considerados parece ser una causa posible del aumento de incidencia de enfermedades a los niveles de exposición que se suelen encontrar en la población. Esta ausencia de un mecanismo posible identificado no excluye la posibilidad de efectos

---

<sup>16</sup> Los nervios periféricos, son aquellos que residen o se extienden fuera del sistema nervioso central (constituido por el encéfalo y la médula espinal), hacia los miembros y órganos de todo el cuerpo.

<sup>17</sup> TENFORDE y KAUNE (1987). Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. Citado por: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely low frequency fields [en línea]. Génova (Suiza): World Health Organization, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>.

<sup>18</sup> UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME / WORLD HEALTH ORGANIZATION / INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION (1993). Environmental Health Criteria No. 137: Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). Citado por: INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics [en línea]. 1998, vol. 74, no.4 Health Physics 74 [citado el 10 de septiembre de 2010] p. 494-522. Disponible en internet: <<http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>>.

adversos en la salud, pero hace necesaria la obtención de evidencias más sólidas a partir de la biología y la epidemiología.

**Tabla 1.** Rangos de corriente umbral para efectos indirectos de campos electromagnéticos de 50/60 Hz; incluyendo niños, mujeres y hombres.

<b>Efecto indirecto</b>	<b>Umbral de corriente [mA]</b>
Percepción al tocar	0,2-0,4
Dolor en el dedo que hace contacto	0,9-1,8
Descarga dolorosa / Umbral "let-go"	8-16
Descarga severa / Dificultad para respirar	12-23

**Fuente:** ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). 1998.

- **Neurocomportamiento:**

Con respecto a las consecuencias sobre el neurocomportamiento<sup>19</sup> de las personas, la exposición a campos eléctricos a frecuencias industriales provoca respuestas biológicas bien definidas, que van desde la percepción hasta las molestias, por medio de los efectos de la carga eléctrica superficial. Estas respuestas dependen de la intensidad del campo, las condiciones ambientales y la sensibilidad individual.

La exposición a un campo eléctrico variable en el tiempo puede dar lugar a la percepción del campo como resultado de la carga eléctrica alterna inducida en la superficie del cuerpo, el cual causa que los vellos del cuerpo vibren. Varios estudios han mostrado que la mayoría de la gente que puede percibir campos eléctricos de 50 y 60 Hz mayores a 20 kV/m, y que una pequeña minoría puede

---

<sup>19</sup> El neurocomportamiento se refiere a la evaluación del estado neurológico de la persona mediante la observación de su comportamiento.

percibir campos por debajo de 5 kV/m (UNEP / OMS / IRPA, 1984; Tenforde , 1991)<sup>20</sup>.

La evidencia de otros efectos neurocomportamentales en estudios con voluntarios, tales como los efectos en la actividad eléctrica del cerebro, la cognición, el sueño, la hipersensibilidad y el humor, son menos claras. En general, dichos estudios se han realizado con niveles de exposición por debajo de los necesarios para inducir los efectos descritos anteriormente, y en el mejor de los casos solamente se han obtenido evidencias de efectos sutiles y transitorios.

Las únicas evidencias que la exposición a campos eléctricos y magnéticos de FEB provoca síntomas depresivos o el suicidio son inconsistentes y no concluyentes. Por lo tanto, la evidencia es considerada inadecuada.

- **Sistema neuroendocrino:**

Los resultados de varios estudios en voluntarios, así como de estudios epidemiológicos residenciales y ocupacionales sugieren que el sistema neuroendocrino<sup>21</sup> no es afectado adversamente por la exposición a campos eléctricos o magnéticos en frecuencias industriales. Esto se aplica particularmente a los niveles circulantes de hormonas específicas del sistema neuroendocrino, como la melatonina<sup>22</sup> liberada por la glándula pineal (epífisis), y a varias hormonas liberadas por glándula pituitaria (hipófisis) que intervienen en el control del metabolismo y la fisiología del cuerpo.

---

<sup>20</sup> UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME / WORLD HEALTH ORGANIZATION / INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION (1984). Environmental Health Criteria No. 35: Extremely low frequency (ELF) fields. Citado por: INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics [en línea]. 1998, vol. 74, no.4 Health Physics 74 [citado el 10 de septiembre de 2010] p. 494-522. Disponible en internet: <<http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>>.

TENFORDE (1991). Biological interactions of extremely-low frequency electric and magnetic fields. Citado por: INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics [en línea]. 1998, vol. 74, no.4 Health Physics 74 [citado el 10 de septiembre de 2010] p. 494-522. Disponible en internet: <<http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>>.

<sup>21</sup> El sistema neuroendocrino es una compilación de entradas del sistema nervioso, así como de glándulas a través del cuerpo, que secretan químicos. Utilizando señales nerviosas u hormonas, el sistema neuroendocrino cambia las actividades celulares que alteran el diámetro de los vasos sanguíneos, el ritmo cardíaco y la fuerza de contracción, inclusive la cantidad de fluido que el cuerpo retenga.

<sup>22</sup> La melatonina es una hormona que se produce principalmente en la glándula pineal, y cuyas concentraciones en el cuerpo humano varían de acuerdo al ciclo diurno/nocturno. Esta hormona participa en una gran variedad de procesos celulares, neuroendocrinos y neurofisiológicos.

En los estudios de laboratorio realizados a personas expuestas a campos de FEB, se observaron ligeras diferencias en el tiempo de liberación de los niveles nocturnos de melatonina en voluntarios. Dichas alteraciones se dieron como respuesta a campos eléctricos inducidos de 10 mV/m. Sin embargo, en la mayor parte de estudios no se encontró ningún efecto cuando se tuvo cuidado en el control de los posibles factores de confusión, es decir, los que podrían influir en los niveles hormonales como lo son los factores ambientales y los relacionados al estilo de vida.

- **Trastornos neurodegenerativos:**

Se ha planteado la hipótesis que la exposición a campos de FEB puede estar asociada con varias enfermedades neurodegenerativas<sup>23</sup>. En relación con la enfermedad de Parkinson y la esclerosis múltiple, el número de estudios ha sido pequeño y no hay evidencias de asociación con estas enfermedades. En el caso de la enfermedad de Alzheimer, los pocos estudios en los que se ha investigado las pruebas de su asociación con la exposición a campos eléctricos de FEB son contradictorios e insuficientes.

- **Trastornos cardiovasculares:**

Los estudios experimentales de exposición tanto de corta como de larga duración indican que, si bien el choque eléctrico representa un peligro evidente para la salud, es improbable que se produzcan otros efectos cardiovasculares<sup>24</sup> peligrosos asociados con los campos de FEB a los niveles de exposición ambiental u ocupacional comúnmente encontrados. Aunque se han reportado diversos cambios cardiovasculares en la literatura, la mayoría de los efectos son pequeños y los resultados no han sido consistentes en los estudios entre ellos.

---

<sup>23</sup> Las enfermedades neurodegenerativas agrupan a un género de desordenes cognitivos, tales como, enfermedad de Alzheimer, de Parkinson, de Creutzfeldt-Jakob y esclerosis múltiple. Se deben a un aumento en los procesos de muerte celular, reduciendo el número de neuronas y generando cambios en la conducta.

<sup>24</sup> Los efectos cardiovasculares, están relacionados con el impacto que pueda desencadenar un agente externo sobre el corazón o los vasos sanguíneos (arterias y venas).

Pequeños cambios en la función cardíaca ocurrieron en los humanos voluntarios expuestos a campos eléctricos y magnéticos combinados de 60 Hz (9 kV/m, 20  $\mu$ T) (Cook et al. 1992)<sup>25</sup>. El ritmo cardíaco de descanso estaba levemente, pero significativamente, reducido (por 3 a 5 latidos por minuto) durante o inmediatamente después de la exposición. Esta respuesta estaba ausente en contacto con campos más fuertes (12 kV/m, 30  $\mu$ T) o más débiles (6 kV/m, 10  $\mu$ T) y reducida si el sujeto estaba mentalmente alerta. Ninguno de los sujetos en estos estudios podían detectar la presencia de los campos, y no hubo resultados consistentes en una batería de pruebas sensoriales y perceptivas.

La posibilidad de que exista una asociación específica entre la exposición y el control autónomo alterado del corazón sigue siendo una mera especulación. En conjunto, las pruebas no respaldan una asociación entre la exposición a campos de FEB y las enfermedades cardiovasculares.

- **Reproducción y desarrollo:**

En conjunto, los estudios epidemiológicos no han demostrado que haya una asociación entre resultados adversos en la reproducción humana con la exposición materna o paterna a campos de FEB, por lo cual las pruebas efectos en el desarrollo y la reproducción son insuficientes.

- **Cáncer:**

Con respecto a ésta enfermedad, la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC)<sup>26</sup>, solo ha hecho referencia a los campos magnéticos de FEB, clasificándolos como “posible carcinógeno<sup>27</sup> en humanos” (IARC, 2002)<sup>28</sup>. No

---

<sup>25</sup> COOK et al. (1992). A replication study of human exposure to 60-Hz fields; Effects on neurobehavioral measures. Citado por: INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics [en línea]. 1998, vol. 74, no.4 Health Physics 74 [citado el 10 de septiembre de 2010] p. 494-522. Disponible en internet: <<http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>>.

<sup>26</sup> IARC, International Agency for Research on Cancer, es una agencia de la OMS especializada en la investigación del cáncer.

<sup>27</sup> Un agente carcinógeno (o cancerígeno) es aquel que puede actuar sobre los tejidos vivos de tal forma que produce cáncer.

<sup>28</sup> IARC WORKING GROUP ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS (2002). Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Citado por: WORLD HEALTH

existen pruebas convincentes de que la exposición a los campos de FEB cause directamente daños en las moléculas de los seres vivos, y en particular en su ADN. Por lo tanto, es improbable que pueda desencadenar un proceso de carcinogénesis<sup>29</sup>. Adicionalmente, en recientes estudios realizados en animales no se ha demostrado que la exposición a campos de FEB influya en la incidencia de cáncer.

### **2.2.2 Conclusión general sobre los estudios realizados.**

En definitiva, no hay suficiente evidencia confiable que permita concluir que las exposiciones de larga duración a los niveles de campos eléctricos y magnéticos que se pueden encontrar en las comunidades y ambientes ocupacionales, son adversos a la salud humana o causan alguna enfermedad.

Dada la supuesta falta de pruebas más firmes sobre los efectos de los campos electromagnéticos de FEB que alegan los estamentos de control, solo se han admitido como probadas aquellas respuestas que pudieran deberse a la inducción de cargas y corrientes eléctricas capaces de afectar el funcionamiento de células y tejidos eléctricamente excitables. Para que estas corrientes inducidas sean susceptibles de generar efectos adversos inmediatos, deben ser más intensas que las corrientes fisiológicas. Sin embargo, a los niveles que son habituales en el medio ambiente, la magnitud de estas corrientes es inferior a la de las corrientes que se producen espontáneamente en el organismo de los seres humanos.

Con respecto a los estudios realizados sobre los campos eléctricos en concreto, los datos de que se dispone sugieren que, si se exceptúa la estimulación causada por las cargas eléctricas inducidas en la superficie del cuerpo humano, la exposición a campos no superiores a 20 kV/m produce unos efectos escasos e ino cuos. No está demostrado que los campos eléctricos

---

ORGANIZATION. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely low frequency fields [en línea]. Génova (Suiza): World Health Organization, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>.

<sup>29</sup> La carcinogénesis es el proceso por el cual las células normales se transforman en células cancerosas.

tengan efecto alguno sobre la reproducción o el desarrollo de los animales a intensidades superiores a los 100 kV/m.

### **2.3 ESTUDIOS DE DOSÍMETRIA EN EL CUERPO HUMANO PARA EL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN**

La dosimetría describe la relación existente entre los campos externos y el campo eléctrico y la densidad de corriente que son inducidos en el cuerpo, u otros parámetros asociados con la exposición a campos eléctricos y magnéticos externos de frecuencias extremadamente bajas. Dentro de los estudios realizados en esta materia, se hace necesario definir las cantidades dosimétricas o medidas de la exposición a la radiación producida por los campos electromagnéticos.

Para el rango de frecuencias hasta los 10 MHz (donde se incluyen los campos de FEB), la cantidad dosimétrica de interés es la densidad de corriente  $J$ , la cual está relacionada con el campo eléctrico interno (inducido)  $E_{in}$  y con la conductividad del tejido  $\sigma$  a través de la ley de Ohm:

$$J = \sigma E_{in} \quad (2.2)$$

Los primeros estudios de dosimetría modelaron el cuerpo humano como elipsoides homogéneas u otras formas excesivamente simplificadas. En adición, se han realizado limitadas mediciones de corrientes a través del cuerpo entero y en partes del cuerpo. Durante los últimos años, unos pocos laboratorios de investigación han realizado extensivos cálculos del campo eléctrico inducido y de la densidad de corriente en modelos heterogéneos del cuerpo humano dentro de campos eléctricos o magnéticos a 50 ó 60 Hz.

Los cuerpos de las personas y animales perturban significativamente la distribución espacial de un campo eléctrico de FEB. En bajas frecuencias, el cuerpo es un buen conductor y las líneas del campo perturbado externas al cuerpo son casi perpendiculares a la superficie de éste. En la superficie del cuerpo expuesto se inducen cargas oscilantes, que a su vez inducen corrientes en todo el cuerpo.

Las características fundamentales de la dosimetría para la exposición de las personas a campos eléctricos de FEB son las siguientes:

- El campo eléctrico dentro del cuerpo suele ser de cuatro a siete órdenes de magnitud inferior ( $10^{-4}$  a  $10^{-7}$ ) al campo eléctrico externo imperturbable.
- Dado que la exposición es sobre todo al campo eléctrico vertical, la dirección predominante de los campos inducidos también es vertical. Así mismo, cargas no uniformes son inducidas sobre la superficie del cuerpo y la dirección de la corriente es principalmente vertical.
- Para un campo eléctrico externo determinado, los campos inducidos más fuertes corresponden al cuerpo humano que está eléctricamente aterrizado estableciendo contacto con una tierra perfecta a través de ambos pies (Deno y Zaffanella, 1982)<sup>30</sup>. A su vez, los campos inducidos más débiles corresponden al cuerpo aislado del plano de tierra o modelos de espacio libre; donde para el mismo valor de campo eléctrico externo la proporción máxima del campo interno existente entre el modelo aterrizado y de espacio libre es cercana a dos.
- El flujo total de corriente en un cuerpo en perfecto contacto con la tierra está determinado por el tamaño y la forma del cuerpo (incluida la postura) antes que por la conductividad de los tejidos.

---

<sup>30</sup> DENO y ZAFFANELLA (1982). Field effects of overhead transmission lines and stations. Citado por: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely low frequency fields [en línea]. Génova (Suiza): World Health Organization, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>.

- La distribución de corrientes inducidas a través de los diversos órganos y tejidos está determinada por la conductividad de dichos tejidos. Esta última también afecta la distribución del campo eléctrico inducido, pero en menor medida que la corriente inducida.

En el caso de las líneas aéreas de alta tensión, el campo eléctrico va dirigido desde la línea hasta el suelo y está polarizado verticalmente con respecto a una persona parada bajo el tendido eléctrico. Este campo entra al cuerpo a través de la cabeza y los hombros, pasa por el torso, y sale a través de los pies y las piernas, tal y como se muestra en la Figura 6.

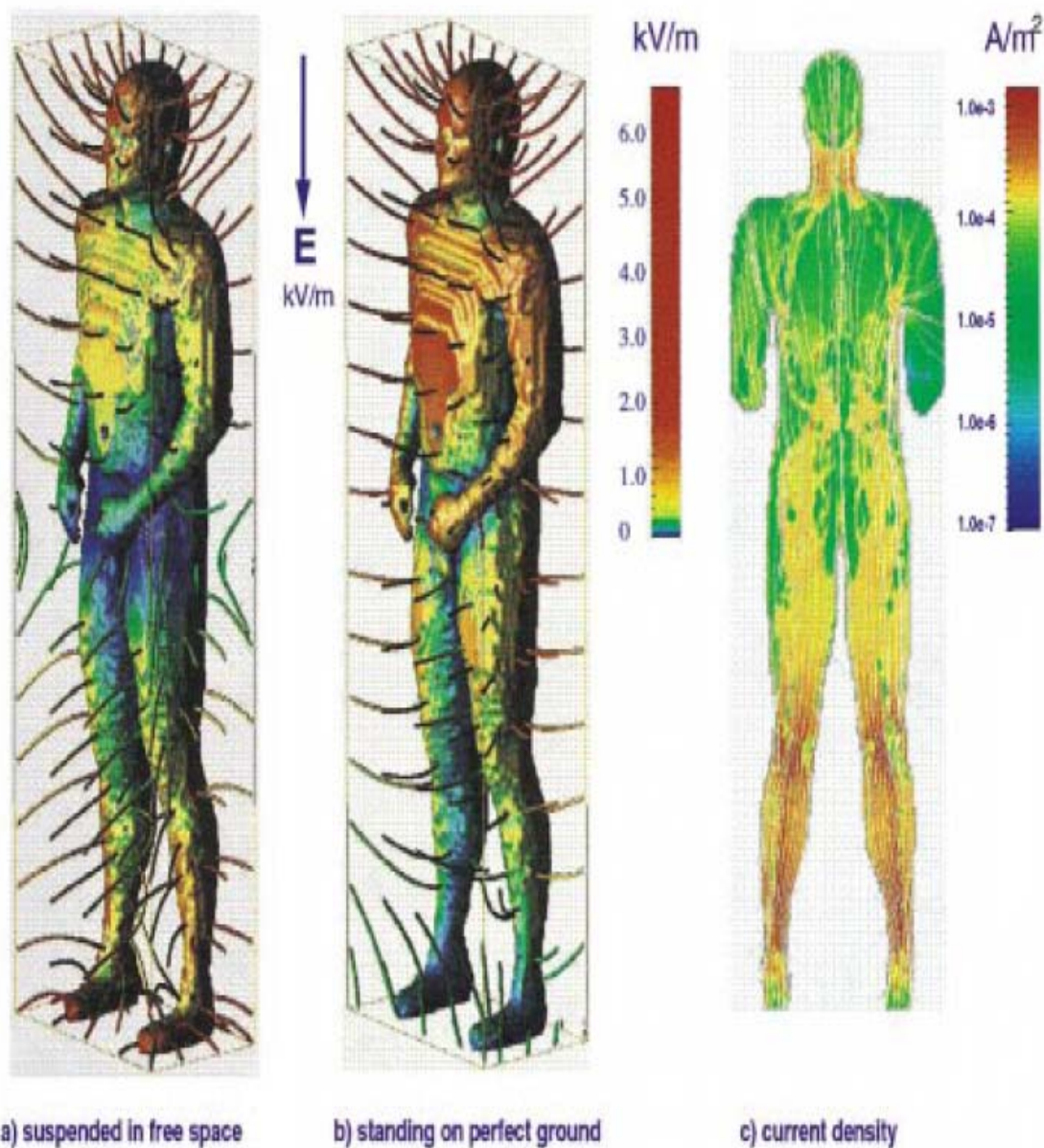
Si la persona está aislada de la tierra (usando zapatillas deportivas o estando parada sobre una superficie seca, por ejemplo), el campo tiende a salir uniformemente desde las piernas, como se ilustra en la Figura 6(a), pero si la persona está aterrizada (usando zapatos con suela de cuero y estando parada sobre la hierba húmeda), la corriente pasa principalmente a través de la planta de los pies, como se muestra en la Figura 6(b).

Usando el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)<sup>31</sup>, se encontró que el valor pico de densidad de corriente en el cuerpo se presenta en la rodilla y el tobillo, como se indica en la Figura 6(c). Esto es debido a que ambas regiones son relativamente óseas (el hueso no es buen conductor de la electricidad) con muy poco material conductor en su sección transversal. La corriente que pasa a través de estas zonas se concentra en regiones relativamente pequeñas de los alrededores del músculo y del tejido graso, produciendo allí una alta densidad de corriente.

---

<sup>31</sup> FDTD, Finite-Difference Time-Domain, es una popular técnica de modelado de la electrodinámica computacional, que a su vez es de fácil implementación en software. Debido a que es un método en el dominio del tiempo, las soluciones pueden cubrir un amplio rango de frecuencias con correr una simple simulación. En este método, las ecuaciones de Maxwell (en forma de derivadas parciales en el tiempo y el espacio), se discretizan utilizando aproximaciones por diferencia finita central.

**Figura 6.** Cuerpo humano dentro de un campo eléctrico uniforme de 1 kV/m a 60 Hz - densidad de carga superficial y campo eléctrico externo para el cuerpo: (a) en el espacio libre, (b) parado sobre un conductor perfecto, y (c) la densidad de corriente en una sección transversal vertical del cuerpo.



**Fuente:** OMS. Environmental Health Criteria 238. 2007.

A su vez se encontró que había regiones con altas densidades de corriente en el torso. Esto se debe a que los pulmones no son buenos conductores también, y la corriente debe fluir a través de la región externa del torso, principalmente en las regiones del músculo. Por lo tanto, debido a ésta alta concentración de la corriente, en los músculos de la espalda que están ubicados justamente detrás de los pulmones, hay varias regiones que presentan una densidad de corriente alta.

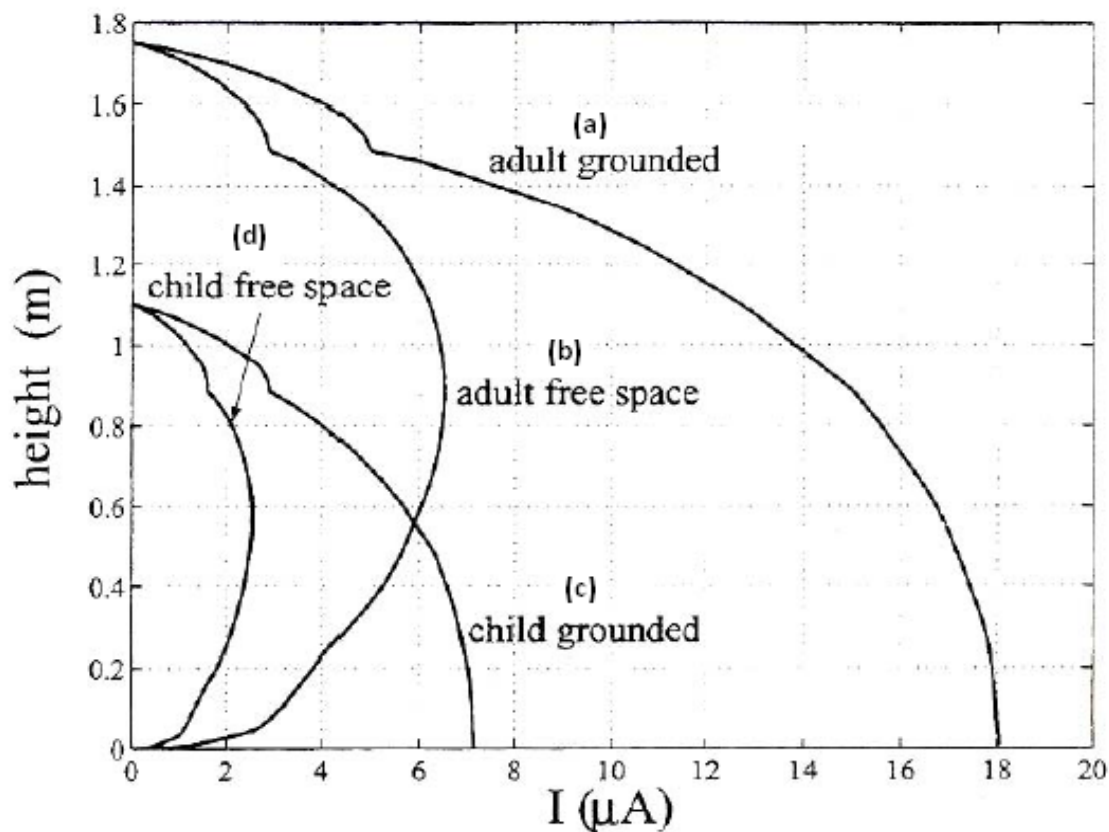
La OMS ha recopilado algunos cálculos de dosimetría, que provienen de los resultados obtenidos mediante la utilización de métodos de cálculo numérico (p. ej. el FDTD) sobre modelos del cuerpo humano, los cuales estuvieron apoyados en el empleo de herramientas de software desarrolladas para estos propósitos.

Por ejemplo, en la Figura 7 se muestra la corriente vertical calculada en modelos de un adulto y un niño expuestos a un campo eléctrico vertical en el espacio libre y en contacto con una tierra perfecta (Hirata et al., 2001)<sup>32</sup>. En su eje vertical está la altura desde el suelo en metros y en el eje horizontal la corriente inducida en micro Amperes.

---

<sup>32</sup> HIRATA et al. (2001). Dosimetry in models of child and adult for low-frequency electric field. Citado por: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely low frequency fields [en línea]. Génova (Suiza): World Health Organization, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>.

**Figura 7.** Corriente en las secciones transversales de un modelo del cuerpo humano sometido a un campo eléctrico externo de 1 kV/m y 60 Hz para: (a) un adulto aterrizado, (b) un adulto en el espacio libre, (c) un niño aterrizado, y (d) un niño en el espacio libre.



**Fuente:** OMS. Environmental Health Criteria 238. 2007.

La Tabla 2 proporciona una variedad de medidas dosimétricas para el modelo del cuerpo humano en un campo eléctrico de 1 kV/m a 60 Hz (Dawson, Caputa y Stuchly, 1998; Kavet et. al., 2001)<sup>33</sup>.

<sup>33</sup> DAWSON, CAPUTA y STUCHLY (1998). High resolution organ dosimetry to human exposure to low-frequency electric fields. Citado por: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely low frequency fields [en línea]. Génova (Suiza): World Health Organization, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>. KAVET et al. (2001). Evaluation of biological effects, dosimetric models, and exposure assessment related to ELF electric and magnetic field guidelines. Citado por: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely low frequency fields [en línea]. Génova (Suiza): World Health Organization, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>.

**Tabla 2.** Campos eléctricos inducidos de un modelo de cuerpo humano aterrizado en un campo eléctrico vertical de 1 kV/m y 60 Hz.

Tejido/Organo	Campo eléctrico inducido [mV/m]	
	Valor medio	Valor máximo
Hueso	3,55	40,8
Músculo	1,57	32,1
Próstata	1,68	3,05
Músculo cardiaco	1,42	3,63
Pulmón	1,38	3,57
Bazo	1,79	3,22
Riñón	1,44	4,47
Sangre	1,43	23,8
Materia gris	0,86	3,70
Fluido cerebro-espinal (CSF)	0,35	1,58
Testículos	0,48	1,63

**Fuente:** OMS. Environmental Health Criteria 238. 2007.

Así mismo, la Tabla 3 proporciona las medidas dosimétricas para un modelo simplificado de un niño de cinco años de edad, de 1,10 m y 18,7 kg (Hirata et al., 2001).

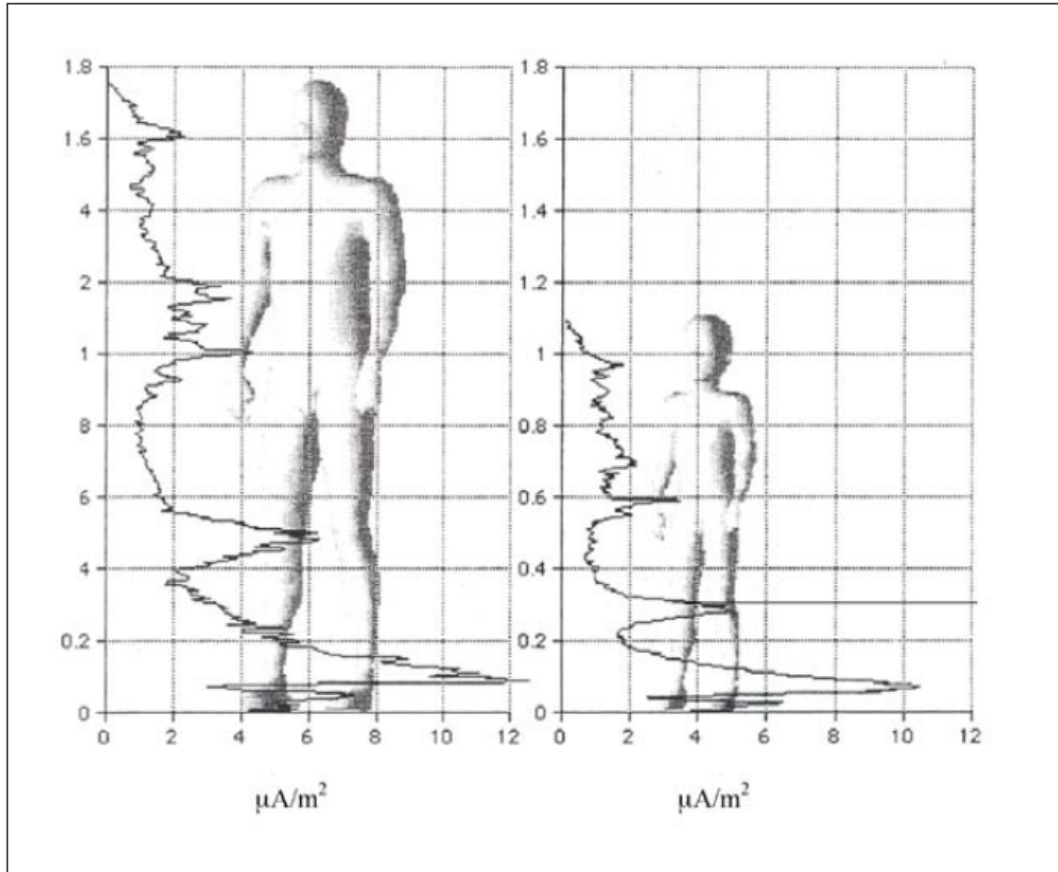
**Tabla 3.** Campos eléctricos inducidos de un modelo del cuerpo de un niño aterrizado en un campo eléctrico vertical uniforme de 1 kV/m y 60 Hz.

Tejido/Organo	Campo eléctrico inducido [mV/m]	
	Valor medio	Valor máximo
Sangre	1,52	18,06
Médula ósea	3,70	41,87
Cerebro	0,70	3,07
Fluido cerebro-espinal (CSF)	0,28	1,37
Corazón	1,60	3,69
Pulmones	1,55	3,69
Músculo	1,65	30,56

**Fuente:** OMS. Environmental Health Criteria 238. 2007.

La densidad de corriente promediada sobre 1 cm<sup>2</sup>, que es la unidad base de exposición estipulada dentro de las directrices de la ICNIRP, se ilustra en la Figura 8 (Hirata et. al., 2001). En esta figura se puede apreciar que para dos modelos del cuerpo humano aterrizados, un adulto y un niño, que se encuentran expuestos a un campo eléctrico de 1 kV/m y 60 Hz, se calculó que la máxima densidad de corriente se induce a unos 10 cm de altura promedio sobre el nivel del suelo. Igualmente, se puede observar que la máxima densidad de corriente es inducida a la altura de la tibia y el peroné en ambos modelos del cuerpo humano, registrándose valores que exceden los 12  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  y los 10  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  en los modelos aterrizados del adulto y el niño respectivamente.

**Figura 8.** Densidad de corriente máxima en  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  promediada sobre  $1\text{ cm}^2$  en capas verticales del cuerpo para modelos aterrizados expuestos a un campo eléctrico vertical de  $1\text{ kV}/\text{m}$  y  $60\text{ Hz}$ .



**Fuente:** OMS. Environmental Health Criteria 238. 2007.

A su vez, la OMS también ha tenido en cuenta los estudios en los cuales se han realizado mediciones del campo eléctrico inducido en modelos del cuerpo humano. Kaune y Forsythe (1985)<sup>34</sup> realizaron mediciones de corrientes en modelos que consistieron en maniqués parados en un campo eléctrico vertical con ambos pies aterrizados.

<sup>34</sup> KAUNE y FORSYTHE (1985). Current densities measured in human models exposed to 60-Hz electric fields. Citado por: WORLD HEALTH ORGANIZATION. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely low frequency fields [en línea]. Génova (Suiza): World Health Organization, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>.

El modelo o fantoma<sup>35</sup> fue llenado con una solución salina cuya conductividad es igual a la promedio de los tejidos humanos. Los resultados de las mediciones se muestran en la Figura 9, donde se puede observar que para un modelo del cuerpo humano aterrizado a través de ambos pies y que está sometido a la exposición de un campo eléctrico vertical de 10 kV/m y 60 Hz, la máxima densidad de corriente medida fue de 12 mA/m<sup>2</sup> y se registro sobre las extremidades inferiores del modelo.

La Tabla 4 muestra una comparación de la corriente vertical a través de algunas secciones transversales del cuerpo humano calculada (Dawson, Caputa y Stuchly, 1998) con las mediciones (Tenforde y Kaune, 1987). Dada las diferencias de modelamiento entre laboratorios, la concordancia de resultados puede considerarse muy aceptable.

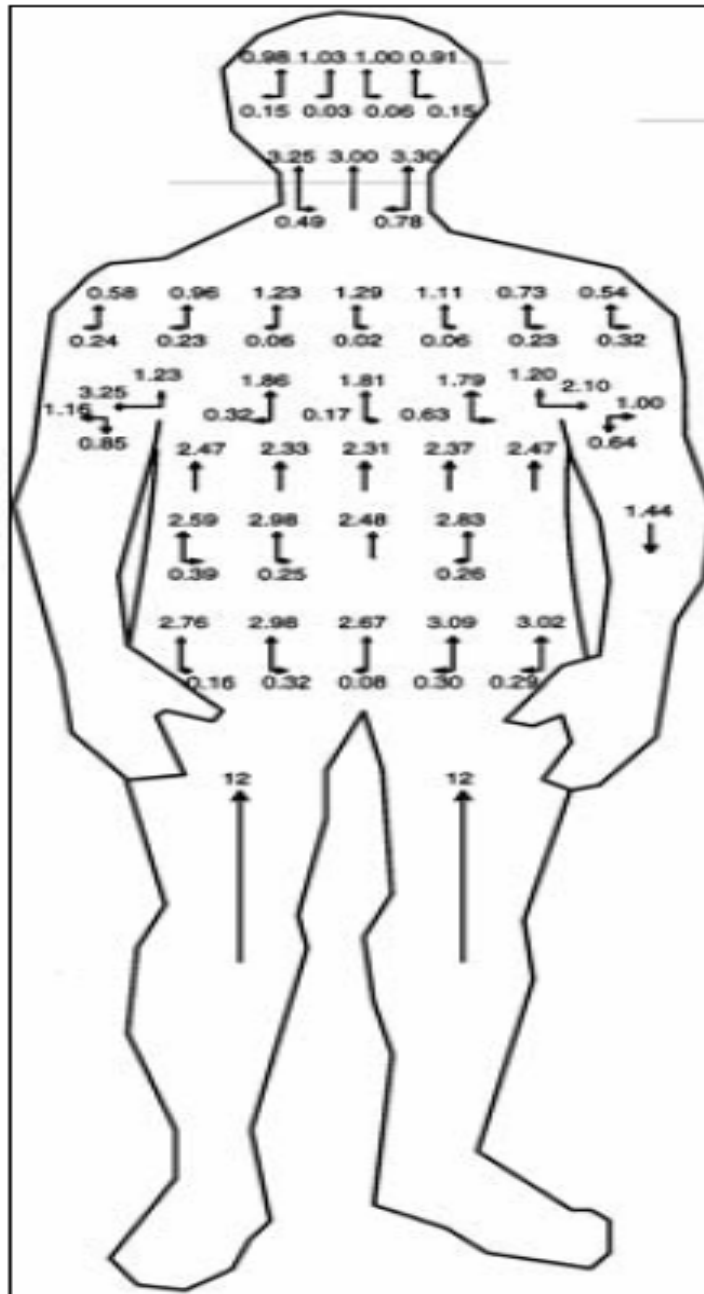
**Tabla 4.** Corriente vertical inducida ( $\mu\text{A}$ ) en un modelo de cuerpo humano en un campo eléctrico vertical uniforme de 1 kV/m y 60 Hz.

Posición del cuerpo	Aterrizado		Elevado sobre el suelo		En el espacio libre	
	Valor calculado [ $\mu\text{A}$ ]	Valor medido [ $\mu\text{A}$ ]	Valor calculado [ $\mu\text{A}$ ]	Valor medido [ $\mu\text{A}$ ]	Valor calculado [ $\mu\text{A}$ ]	Valor medido [ $\mu\text{A}$ ]
Cuello	4,9	5,4	3,7	4,0	2,9	3,1
Pecho	9,8	13,5	7,0	8,7	5,3	5,4
Abdomen	13,8	14,6	9,1	9,3	6,6	5,7
Muslo	16,6	15,6	9,7	9,4	6,1	5,6
Tobillo	17,6	17	7,3	8,0	3,0	3,0

**Fuente:** OMS. Environmental Health Criteria 238. 2007

<sup>35</sup> Según la OMS, el fantoma es un modelo físico que contiene un material equivalente a los tejidos y el cual es empleado para simular al cuerpo humano en una medición experimental de dosis.

**Figura 9.** Densidad de corriente medida en mA/m<sup>2</sup> para un fantoma relleno de una solución salina homogénea, que se encuentra aterrizado a través de ambos pies. La magnitud del campo eléctrico externo es de 10 kV/m, el vector del campo está direccionado a lo largo del eje del cuerpo, y la frecuencia es de 60 Hz.



**Fuente:** OMS. Environmental Health Criteria 238. 2007.

### 3 REVISIÓN DE NORMAS Y ESTÁNDARES APLICABLES A LA LÍMITACIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

#### 3.1 RESTRICCIONES BÁSICAS PARA LA EXPOSICIÓN POBLACIONAL Y OCUPACIONAL ESTABLECIDOS POR ALGUNOS ORGANISMOS INTERNACIONALES

Las restricciones básicas se hacen teniendo en cuenta las limitaciones a la exposición poblacional y ocupacional<sup>36</sup> a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo, que están basadas directamente en los efectos sobre la salud ya establecidos. La protección contra efectos adversos sobre la salud requiere que estas restricciones básicas no sean excedidas.

En esta parte del trabajo se considerarán las recomendaciones desarrolladas en esta materia por la ICNIRP y el IEEE<sup>37</sup>.

- **ICNIRP:**

La ICNIRP en: *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz)* [16], estableció que la cantidad física usada para especificar estas restricciones es la densidad de corriente, esto con el objeto de prevenir daños funcionales en el sistema nervioso. En la Tabla 5, se pueden apreciar las restricciones básicas que

---

<sup>36</sup> La OMS definió a la exposición ocupacional, como toda exposición a los campos electromagnéticos que es experimentada por las personas durante la ejecución de su trabajo. A su vez, definió a la exposición poblacional o pública, como toda exposición a los campos electromagnéticos que es experimentada por los miembros del público en general, excluyendo la exposición ocupacional y la exposición durante procedimientos médicos.

<sup>37</sup> IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, es una asociación internacional sin ánimo de lucro cuyo objetivo es la permanente actualización profesional en el campo de las ciencias electromagnéticas, de la electrotecnología y de la informática.

fueron establecidas por la ICNIRP, para la exposición a campos electromagnéticos de frecuencia industrial.

**Tabla 5.** Restricciones básicas establecidas por la ICNIRP para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para un rango de frecuencias de 4 Hz a 1 kHz.

<b>Características de la exposición</b>	<b>Densidad de corriente para cabeza y tronco [mA/m<sup>2</sup>] (rms)</b>
Exposición ocupacional	10
Exposición al público en general	2

*Notas:*

- (1) *Debido a que el cuerpo humano no es eléctricamente homogéneo, las densidades de corriente deberían ser promediadas sobre una sección transversal de 1 cm<sup>2</sup>, perpendicular a la dirección de la corriente*
- (2) *Los valores pico de la densidad de corriente pueden obtenerse multiplicando el valor rms (de la Tabla 5) por 1,414.*

**Fuente:** ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). 1998.

De igual forma se considera que hay información insuficiente sobre los efectos biológicos producidos en personas y animales debidos a la exposición a campos electromagnéticos de FEB, como para proporcionar factores de seguridad estrictos para todos los rangos de frecuencia y todas las modulaciones. Adicionalmente, parte de la incertidumbre con respecto al factor de seguridad apropiado, proviene de la falta de conocimiento concerniente a la apropiada dosimetría (Repacholi, 1998)<sup>38</sup>.

Sin embargo, y en vista de las condiciones de seguridad ya mencionadas, la ICNIRP estableció que para el rango de frecuencias de 4 Hz a 1 kHz, la

---

<sup>38</sup> REPACHOLI (1998). Low-level exposure to radiofrequency fields: health effects and research needs. Citado por: INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics [en línea]. 1998, vol. 74, no.4 Health Physics 74 [citado el 10 de septiembre de 2010] p. 494-522. Disponible en internet: <<http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>>.

exposición ocupacional debería estar limitada a campos que induzcan densidades de corriente menores a  $10 \text{ mA/m}^2$ , es decir se usa un factor de seguridad de 10. Para el público en general un factor adicional de 5 es aplicado, dando una restricción básica de la exposición de  $2 \text{ mA/m}^2$ .

- **IEEE:**

En: *IEEE Std C95.6-2002: Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz* [14], se tomó el máximo campo eléctrico inducido *in situ*<sup>39</sup>,  $E_i$ , como cantidad física para llevar a cabo la especificación de las restricciones básicas. Los valores de referencia para varias regiones del cuerpo se pueden ver en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Restricciones básicas aplicadas a varias regiones del cuerpo, que fueron establecidas por el IEEE para una frecuencia de 60 Hz.

Tejido expuesto	$E_i$ - rms [V/m]	
	Público en general	Ambiente controlado
Cerebro	0,01767	0,0531
Corazón	0,943	0,943
Manos, muñecas, pies y tobillos	2,10	2,10
Otro tejido	0,701	2,10

**Fuente:** IEEE Std C95.6. 2002.

<sup>39</sup> *In situ*, hace referencia en el *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields 0-3 kHz*, a la localización dentro de un tejido biológico.

### **3.2 NIVELES DE REFERENCIA Y/O MÁXIMOS VALORES PERMISIBLES PARA LA EXPOSICIÓN POBLACIONAL Y OCUPACIONAL ESTABLECIDOS POR ALGUNOS ORGANISMOS INTERNACIONALES**

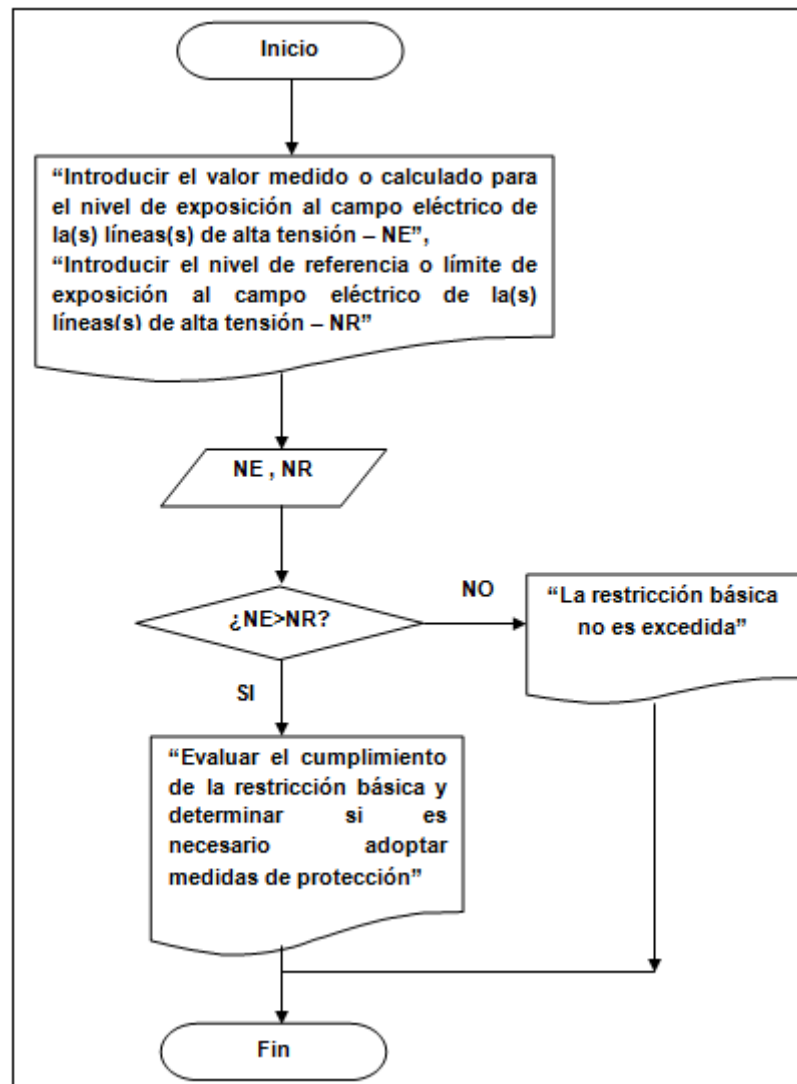
Dado que las restricciones básicas son frecuentemente especificadas como cantidades que no pueden ser prácticas para su medición, otras cantidades son introducidas para propósitos prácticos de evaluación de la exposición a fin de determinar si éstas serán posiblemente excedidas. Estos niveles de referencia o niveles de exposición máximos permisibles corresponden a las restricciones básicas bajo condiciones de exposición del peor de los casos para una o más de las siguientes cantidades físicas: intensidad del campo eléctrico, intensidad de campo magnético, densidad de flujo magnético, densidad de potencia, corriente en las extremidades, corriente de contacto y, para campos pulsantes, absorción específica de energía. Para el caso de estudio del presente trabajo, la cantidad física de interés es la intensidad de campo eléctrico, medida en V/m o kV/m.

Los niveles de referencia son obtenidos a partir de las restricciones básicas mediante el uso de modelos matemáticos y por extrapolación de los resultados de las investigaciones de laboratorio en frecuencias específicas. Para el caso de campos de baja frecuencia, en los estudios realizados se desarrollaron por modelos de medición y de cómputo para derivar los niveles de referencia de intensidad de campo a partir de las restricciones básicas.

Respetar los niveles de referencia asegurará que se respeten las restricciones básicas relevantes. Si los valores medidos o calculados exceden los niveles de referencia, no necesariamente son excedidas las restricciones básicas. Sin embargo, siempre que un nivel de referencia sea excedido, es necesario evaluar el cumplimiento de la restricción básica relevante y determinar si son necesarias medidas de protección adicionales.

El procedimiento descrito anteriormente, aplicado esta vez al objeto de estudio del presente trabajo, se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 10:

**Figura 10.** Diagrama de flujo para realizar la verificación del cumplimiento de los niveles de referencia o valores límites de exposición al campo eléctrico en líneas de alta tensión.



**Fuente:** Autores. 2010.

Al igual que en la sección anterior, en esta parte del trabajo también se considerarán las recomendaciones desarrolladas en esta materia por la ICNIRP

y el IEEE. Adicionalmente se tendrá en cuenta los valores límites de exposición a ocupacionales aportados por la ACGIH<sup>40</sup>.

- **ICNIRP:**

En la Tabla 7 se pueden apreciar los niveles de referencia para exposición ocupacional y poblacional a campos eléctricos de frecuencias industriales establecidos por la ICNIRP:

**Tabla 7.** Niveles de referencia establecidos por la ICNIRP para exposición ocupacional y poblacional a campos eléctricos en un rango de frecuencias de 0,025 kHz a 0,82 kHz (valores rms no perturbados).

<b>Tipo de exposición</b>	<b>Intensidad de campo eléctrico [kV/m]</b>
Ocupacional	500 / $f$
Poblacional	250 / $f$

Notas:

(1)  $f$  es la frecuencia en Hz.

(2) Los valores pico de intensidad de campo eléctrico pueden obtenerse multiplicando el valor rms (de la Tabla 7) por 1,414.

(3) Asumiendo que se cumplen las restricciones básicas y que se pueden excluir los efectos indirectos adversos los valores de las intensidades de campo pueden ser excedidos.

**Fuente:** ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). 1998.

Para el rango de frecuencias hasta 1 kHz, los niveles de referencia de campo eléctrico para el público en general son la mitad de los valores para exposición ocupacional.

---

<sup>40</sup> ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, es una asociación profesional de higienistas industriales y practicantes de profesiones relacionadas, que tiene presencia en los EE.UU. Uno de sus objetivos es promover la protección del trabajador, proporcionando información oportuna, objetiva y científica a los profesionales de la salud ocupacional y ambiental.

Los valores para exposición ocupacional de 10 kV/m para 50 Hz o de 8,3 kV/m para 60 Hz, incluye un margen suficiente de seguridad para prevenir los efectos de estimulación de las corrientes inducidas de contacto bajo todas las condiciones posibles.

Los valores para exposición del público en general son de 5 kV/m para 50 Hz o 4,2 kV/m para 60 Hz, con el objeto de prevenir los efectos adversos indirectos para más del 90% de los individuos expuestos.

En el caso de los niveles de referencia para exposición del público en general de 5 kV/m y 4,2 kV/m, la ICNIRP ha establecido que estos valores corresponden bajo las peores condiciones, a la presencia de una corriente inducida de cerca de 2 mA/m<sup>2</sup> en el cuello y tronco del cuerpo si el vector de campo eléctrico es paralelo al eje del cuerpo.

Sin embargo, la densidad de corriente inducida por 5 kV/m o 4,2 kV/m, cumplirá con las restricciones básicas bajo las condiciones reales de exposición que se presentan en el peor de los casos.

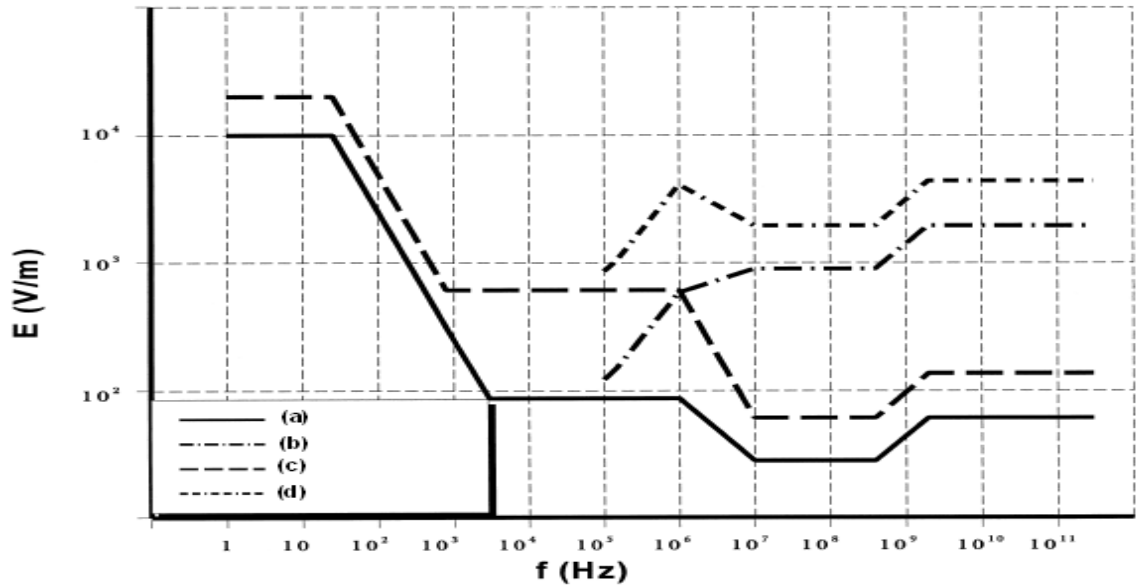
En la Figura 11 se pueden comparar los niveles de referencia de la Tabla 6 para los dos tipos de exposición.

- **IEEE:**

El IEEE estableció en el *IEEE Std C95.6-2002: Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz* [14], los máximos valores de exposición permisibles para campos eléctricos en el ambiente.

En la Tabla 8 se pueden apreciar los máximos límites de campo eléctrico en términos del campo del ambiente no perturbado,  $E$ . Se asume que el campo no perturbado es constante en magnitud, dirección, y fase relativa sobre una extensión espacial que se adaptaría al cuerpo humano.

**Figura 11.** Niveles de referencia de la ICNIRP para la exposición a campos eléctricos variantes en el tiempo: (a) para público en general, (b) valor pico para público en general, (c) para ocupacionales y (d) valor pico para ocupacionales.



**Fuente:** ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). 1998.

**Tabla 8.** Máximos valores de exposición permisibles, establecidos por el IEEE para el campo eléctrico en el ambiente con una exposición de cuerpo entero.

Tipo de exposición	$E - rms$ [kV/m]
Público en general	5 <sup>(1,3,5)</sup>
Ambiente controlado	20 <sup>(2,4,6)</sup>

Notas:

- (1) Valor aplicado para el rango de frecuencias entre 1-368 Hz.
- (2) Valor aplicado para el rango de frecuencias entre 1-272 Hz.
- (3) Dentro de las zonas de servidumbre ("rights-of-way") de una línea de energía eléctrica, el máximo valor de exposición permisible para el público en general es de 10 kV/m bajo condiciones normales de carga.
- (4) Las descargas dolorosas son encontradas fácilmente a 20 kV/m y son posibles a 5-10 kV/m sin las medidas de protección adecuadas.
- (5) A 5 kV/m las descargas de chispa inducidas serán dolorosas en aproximadamente el 7% de los adultos (que se encuentran individualmente bien aislados de tocar tierra).
- (6) El límite de 20 kV/m puede ser excedido en el ambiente controlado cuando un trabajador no está dentro del alcance de un objeto conductor aterrizado.

**Fuente:** IEEE Std C95.6. 2002.

El IEEE señala que el concepto de las zonas de servidumbre de las líneas de transporte de energía eléctrica, se ubica en algún lugar entre las definiciones de ambiente “controlado” y “no controlado” para el caso de la población en general.

En este estándar se considera que el ambiente controlado es aquel al cual se expone la población ocupacional, entre ellos, los empleados de compañías de suministro eléctrico que trabajan en el mantenimiento de líneas de transmisión activas. Esto se debe a que dichos trabajadores pueden tomar medidas de protección personal que son brindadas por la empresa donde laboran, como por ejemplo, el uso de ropa y equipo con material aislante que permita un apantallamiento del campo eléctrico en sus lugares de trabajo, es decir, dentro de las zonas de servidumbre de las líneas de alta tensión.

- **ACGIH:**

En los Estados Unidos, la ACGIH es una institución gubernamental encargada de publicar los “Valores límites de umbral” para varios agentes físicos. Los Valores límites de umbral para campos eléctricos de 60 Hz que se muestran en la Tabla 9, son identificados como guías de control de exposición; por lo tanto no están destinados para demarcar niveles de seguridad o peligro.

**Tabla 9.** Valores límites de umbral de la ACGIH en EE.UU., para campos eléctricos de 60 Hz.

<b>Observación</b>	<b>Campo eléctrico [kV/m]</b>
Exposición ocupacional que no debe ser excedida	25
La prudencia aconseja el uso de prendas de protección por encima	15
Exposición para trabajadores con marcapasos que no debe ser excedida	1

**Fuente:** ACGIH. 2001.

Finalmente, la comparación entre los valores límites de exposición al campo eléctrico de 60 Hz que fueron establecidos por las tres instituciones internacionales anteriormente mencionadas, se pueden apreciar en la Tabla 10.

En la Tabla 10 se puede apreciar la gran variabilidad de los valores reportados por las diferentes normas y estándares, esto se debe básicamente a la alternancia que existe de los factores de seguridad que son recomendados dentro de cada estándar.

Se puede observar que los valores recomendados por el ICNIRP son los más reducidos con respecto a los sugeridos por las otras dos normas. El IEEE para el público en general presenta un valor promedio de 5 kV/m para un rango de frecuencia de 1 a 368 Hz, que concuerda en buena medida con lo planteado por la ICNIRP para las frecuencias industriales.

Sin embargo, el ICNIRP permite un margen de seguridad en la exposición a este tipo de campos, con el objeto de prevenir efectos nocivos tanto en el ambiente ocupacional como en el público bajo cualquier condición de riesgo. De lo anterior se puede deducir que las directrices de la ICNIRP son las más restrictivas.

**Tabla 10.** Comparación entre los niveles de referencia para la exposición al campo eléctrico establecidos por ICNIRP, IEEE y ACGIH.

Tipo de exposición	Máximo valor de exposición al campo eléctrico [kV/m]			
	ICNIRP-1998		IEEE-2002 (1 – 368 Hz)	ACGIH-2001 (60Hz)
	50 Hz	60 Hz		
Ocupacional	10	8,3	20	25
Público en general	5	4,2	5	NA

**Fuente:** Autores. 2010.

Es de gran importancia anotar que, tanto las restricciones básicas como los niveles de referencia o máximos valores límites para la exposición, que son identificados por los estándares y normas internacionales mencionados anteriormente, se basan en los efectos a corto plazo de la interacción del campo eléctrico de FEB con el cuerpo humano. Aún no hay claridad científica en cuanto a la interacción a largo plazo del campo eléctrico de FEB con el mecanismo del cuerpo humano, y las investigaciones que han sido realizadas en ese aspecto conducen a resultados contradictorios.

### **3.3 ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN ESTABLECIDOS DENTRO DE LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA**

#### **3.3.1 Valores límites de exposición establecidos por la normatividad colombiana.**

En Colombia, el Gobierno adoptó los límites de exposición de las personas a campos electromagnéticos determinados por la ICNIRP a través de la Resolución N° 18-1294 del 2008 expedida por el Ministerio de Minas y Energía, donde se realiza la última actualización al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) [8].

En el Artículo 14° de dicha reglamentación se puede citar: *“El presente Reglamento define requisitos para intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético para las zonas donde pueda permanecer público, independientemente del tiempo, basado en criterios de la OMS y la institución internacional ICNIRP para la protección de la población y el medio ambiente*

frente a las radiaciones no-ionizantes y, en particular, proporciona guías y recomendaciones para evitar la exposición a dichas radiaciones”<sup>41</sup>.

Así mismo, en el Artículo 14.4 de la mencionada normativa, se especifican los “Valores límites de exposición a campos electromagnéticos para seres humanos”. Allí se precisa que se deben tener en cuenta el tiempo y el tipo de personas que son expuestas a campos electromagnéticos generados en las instalaciones eléctricas y a frecuencia de la señal eléctrica.

Los valores límites de intensidad de campo eléctrico que se establecen en la Tabla 11, se aplican a las personas que por sus actividades están expuestas a campos electromagnéticos o el público en general, y no deben ser superados para el caso de las instalaciones que son objeto del RETIE.

**Tabla 11.** Valores límites de exposición a campos eléctricos, establecidos por el RETIE.

<b>Tipo de exposición</b>	<b>Intensidad de campo eléctrico [kV/m]</b>
Exposición ocupacional en un día de trabajo de 8 horas	10
Exposición del público en general hasta 8 horas continuas	5

**Fuente:** RETIE. 2008.

En el Artículo 14.4 también se tienen en cuenta algunas consideraciones para limitar la exposición al campo eléctrico, las cuales se precisan a continuación:

---

<sup>41</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 18-1294 (6, agosto, 2008). Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2008. p. 56.

*“En las instalaciones objeto del presente reglamento, los valores de campo eléctrico se deben evaluar a la mayor tensión de la instalación y la densidad de flujo magnético a la mayor corriente de operación y si los valores calculados en sitios donde pueda estar expuesto el público o una persona durante varias horas superan a los establecidos, se deben tomar medidas para corregir tal situación.*

*Para líneas de transmisión, los valores de exposición ocupacional no deben ser superados a 1 m de altura dentro de la zona de servidumbre, y el valor de exposición al público en general en el límite exterior de la servidumbre. Para circuitos de distribución, el valor de exposición al público debe medirse a partir de las distancias de seguridad o donde se tenga la posibilidad de permanencia prolongada (hasta 8 horas) de personas, que no puedan tomar medidas para contrarrestar posibles efectos”<sup>42</sup>.*

### **3.3.2 Valores límites de exposición establecidos por los reglamentos técnicos de otros países.**

En la Tabla 12 se muestran los niveles de referencia para la exposición al campo eléctrico que fueron establecidos por algunos países (obtenidos de [3], [4], [9], [13], [23] y [34]), con el objeto de regular la radiación no ionizante producida por las instalaciones eléctricas a través de cada una de las normas publicadas por los gobiernos en sus legislaciones respectivas. En dicha tabla se puede observar que los límites de campo eléctrico para la exposición ocupacional están en una franja entre 3 y 25 kV/m, mientras que para el público en general varía entre 0,5 y 11,8 kV/m.

---

<sup>42</sup> Ibid., p. 58.

**Tabla 12.** Comparación entre los diferentes niveles de referencia, establecidos por algunos países, para la exposición al campo eléctrico de las instalaciones eléctricas.

País(es) / Estado		Intensidad de campo eléctrico [kV/m]	
		Público general	Ocupacional
EE.UU.	Florida	8-10 <sup>(2,4)</sup> / 2 <sup>(2,5)</sup>	25 <sup>(2)</sup>
	Minnesota	8 <sup>(2,4)</sup>	
	Montana	7 <sup>(2,4,6)</sup> / 1 <sup>(2,5)</sup>	
	New Jersey	3 <sup>(2,5)</sup>	
	New York	11,8 <sup>(2,4)</sup> / 7-11 <sup>(2,4,6)</sup> / 1,6 <sup>(2,5)</sup>	
	Oregon	9 <sup>(2,4)</sup>	
Canadá, Corea del Sur, Paraguay, Sudáfrica, Venezuela		4,2 <sup>(2,3)</sup>	8,3 <sup>(2,3)</sup>
Argentina		3 <sup>(1,5)</sup>	25 <sup>(1)</sup>
Brasil		5 <sup>(2)</sup>	25 <sup>(2)</sup>
Costa Rica		2 <sup>(2)</sup>	
Japón		3 <sup>(1,2)</sup>	3 <sup>(1,2)</sup>
Rusia		0,5 <sup>(1,7)</sup> / 1 <sup>(1,8)</sup>	5 <sup>(1,9)</sup>
Australia y la Unión Europea <sup>(10)</sup>		5 <sup>(1,3)</sup> / 4,2 <sup>(2,3)</sup>	10 <sup>(1,3)</sup> / 8,3 <sup>(2,3)</sup>

**Notas:**

- (1) Aplicable para una frecuencia de 50 Hz.
- (2) Aplicable para una frecuencia de 60 Hz.
- (3) Basado en las recomendaciones de ICNIRP/OMS.
- (4) Se aplica sobre la zona de servidumbre de las líneas de alta tensión.
- (5) Se aplica en el borde y fuera de la zona de servidumbre de las líneas de alta tensión.
- (6) Máximo para cruces de carretera y otros tipos de cruces de vía.
- (7) Se aplica dentro de las edificaciones que estén ubicadas en áreas públicas.
- (8) Se aplica fuera de las edificaciones que estén ubicadas en áreas públicas.
- (9) Se aplica para un tiempo de exposición de 8 horas, que corresponde a la duración de 1 día de trabajo.
- (10) La Unión Europea está conformada por los siguientes Estados miembros: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, República Checa, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Polonia, Portugal, el Reino Unido, Rumanía y Suecia.

**Fuente:** Autores. 2010.

Gracias a las recomendaciones internacionales que han sido elaboradas por las instituciones que están desarrollando actualmente estudios acerca de los efectos sobre la salud humana de los campos de FEB (como por ejemplo, la ICNIRP), muchos organismos reguladores alrededor del mundo se han apoyado en dichas recomendaciones para generar normas nacionales. Sin embargo, en algunos países como Argentina, Costa Rica, Japón y Rusia; los valores límites de exposición al campo eléctrico para la población en general son más restrictivos, y están muy por debajo de los niveles recomendados por la ICNIRP ó el IEEE.

Como conclusión, debido a la falta de criterios unificados en cuanto a las consecuencias de los efectos de los campos electromagnéticos en el cuerpo humano, se presenta una considerable variación en los diferentes niveles de referencia para la exposición al campo eléctrico de frecuencia industrial que son especificados en las normas de cada país. Esto se presenta aún cuando estos niveles se derivan de la misma restricción básica, es decir, de la densidad de corriente inducida.

### **3.3.3 Criterios requeridos para realizar la comparación de los valores límites de exposición establecidos por la normatividad colombiana.**

Para poder llevar a cabo el análisis de los valores límites de exposición que fueron establecidos dentro de la normatividad colombiana, mediante su confrontación y comparación con los niveles que están dispuestos en las normas y reglamentos técnicos internacionales, se deben identificar ciertos requerimientos que permiten evaluar si los estándares establecidos realmente protegen la salud del público y los trabajadores de la exposición a los campos electromagnéticos.

### **3.3.3.1 Tipo de población expuesta.**

Se puede proteger a los diferentes grupos existentes en una población que pueden tener diferencias en sus habilidades para tolerar una exposición particular a los campos electromagnéticos, al realizar una distinción entre los miembros del público en general y la población trabajadora adulta expuesta a condiciones conocidas.

Mediante esa distinción, se reconoce la habilidad que deben tener las industrias y empresas emisoras para controlar mejor los niveles y duración de las exposiciones ocupacionales, complementando estas acciones con la instrucción y el entrenamiento a los trabajadores. Adicionalmente, los trabajadores usualmente son una población adulta saludable con monitoreo médico disponible, que generalmente están expuestos bajo condiciones conocidas, y que a su vez son entrenados para estar conscientes del riesgo potencial y para tomar las protecciones adecuadas.

En contraste, la población general está compuesta de personas con un amplio rango de sensibilidades de salud, edades y enfermedades. En muchos casos los miembros del público no están conscientes de su exposición a los campos electromagnéticos. Más aún, no se puede esperar que los miembros individuales del público tomen precauciones razonables para minimizar o evitar su exposición.

Las consideraciones anteriormente mencionadas, sirven como soporte en la adopción de restricciones más estrictas para la exposición del público en general, que para la población expuesta ocupacionalmente. Por lo tanto, es razonable que un factor de seguridad sea incorporado dentro de los límites de exposición para el público y estos deberían tomar en cuenta a su vez las condiciones de exposición continua.

En este aspecto, la norma colombiana si ha realizado la distinción anteriormente mencionada, en concordancia con las recomendaciones de la OMS y de la ICNIRP.

### **3.3.3.2 Frecuencia.**

Dado que la absorción de la radiación electromagnética es dependiente de la frecuencia, no se pueden aplicar los mismos límites en todo el rango de frecuencias.

En este aspecto, la ICNIRP ha establecido que para campos eléctricos sinusoidales a frecuencias menores a 10 MHz, la magnitud de la densidad de corriente inducida dentro del cuerpo se incrementa con la frecuencia.

Con respecto a este parámetro, los valores límites de exposición establecidos dentro del RETIE, aparentemente no concuerdan con los niveles de referencia que dispuso el ICNIRP dentro de sus recomendaciones. Cabe aclarar que las recomendaciones del ICNIRP sirvieron como documento base para el organismo regulador colombiano en esta materia. Esta inconformidad radica en que, tanto los 10 kV/m para la exposición ocupacional, como los 5 kV/m para la exposición al público en general que fueron contemplados en el reglamento técnico colombiano, son los niveles de referencia que el ICNIRP estableció para una frecuencia de 50 Hz.

En las disposiciones contenidas en el Capítulo IV del RETIE se definen los requisitos específicos para el proceso de transmisión, refiriéndose a las prescripciones técnicas mínimas que deben cumplir las líneas eléctricas aéreas de alta y extra alta tensión [8]. Allí se puede citar: *“Las disposiciones contenidas en el presente capítulo se refieren a las prescripciones técnicas que deben cumplir las líneas eléctricas aéreas de alta tensión de corriente alterna trifásica a 60 Hz de frecuencia nominal”*<sup>43</sup>.

---

<sup>43</sup> Ibid., p. 117.

Por lo tanto, dado que en nuestro país la frecuencia de servicio es de 60 Hz, y si basados en este parámetro se quiere establecer un valor límite de exposición al campo eléctrico producido por las instalaciones de transporte y distribución de energía eléctrica que este acorde con las recomendaciones dispuestas por el ICNIRP, los niveles de referencia para la exposición ocupacional y del público en general deberían ser (de acuerdo con la Tabla 7):

a) Para exposición ocupacional:  $500/f = 500/60 = 8,3333 \text{ kV/m} \approx 8,3 \text{ kV/m}$

b) Para exposición del público en general:  $250/f = 250/60 = 4,1667 \approx 4,2 \text{ kV/m}$

Donde,  $f$  es la frecuencia nominal en Hz del campo eléctrico producido por el sistema o instalación eléctrica.

En el caso de los 5 kV/m, es claro que se asumió la recomendación de el IEEE, que unificó este valor para el rango de frecuencias entre 1 y 368 Hz.

### **3.3.3.3 Nivel de exposición.**

El nivel de exposición puede ser prácticamente expresado en términos de los niveles de referencia.

Como se expuso en el numeral anterior, la especificación del nivel de referencia o valor límite de exposición, según las recomendaciones del ICNIRP, depende del valor que se haya tomado para la frecuencia. De acuerdo con esto, el RETIE no precisó los valores límites de exposición basado en las recomendaciones dadas por el ICNIRP para campos eléctricos de 60 Hz.

Sin embargo, si se toma como referencia las recomendaciones del IEEE para las líneas de alta tensión, donde se establece un valor de 5 kV/m para el público en general en regiones fuera de la zona de servidumbre, y a su vez se permite un valor de intensidad de campo de 10 kV/m para exposición dentro de la zona de servidumbre bajo condiciones normales de carga; se puede

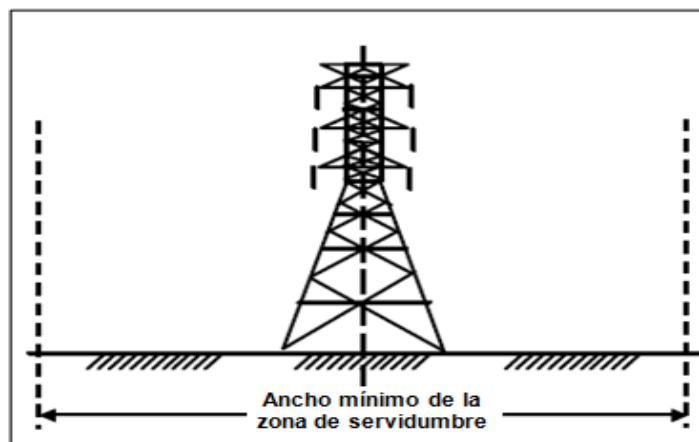
encontrar una relación de correspondencia con las disposiciones contenidas en el RETIE.

Dicha relación se establece en cuanto a los valores límites de exposición (ver Tabla 11) y a los requisitos específicos de las zonas de servidumbre para el proceso de transmisión de energía eléctrica contemplados en el Artículo 24º, de donde se puede citar: *“En la zona de servidumbre a un metro de altura del piso los campos electromagnéticos no deben superar los valores establecidos en el Artículo 14º del presente Anexo General para exposición ocupacional y fuera de las áreas de servidumbre los valores de exposición del público en general”*<sup>44</sup>.

#### 3.3.3.4 Zonas de servidumbre.

En cuanto al tema de las zonas de servidumbre, el RETIE ha fijado los valores mínimos requeridos en el ancho de las mismas, cuyo centro es el eje de la línea. Los valores de ancho de la zona servidumbre establecidos por el reglamento técnico colombiano se muestran en la Tabla 13, de acuerdo con la ilustración dada en la Figura 12.

**Figura 12.** Ancho de la zona de servidumbre



**Fuente:** RETIE. 2008.

<sup>44</sup> Ibid., p. 118.

**Tabla 13.** Ancho de la zona de servidumbre establecido por el RETIE para diferentes niveles de tensión de líneas.

<b>Tipo de estructura</b>	<b>Tensión [kV]</b>	<b>Ancho mínimo [m]</b>
Torres	500	60
Torres	220/230	32
	220/230	30
Postes	220/230	30
	220/230	28
Torres	110/115	20
	110/115	20
Postes	110/115	15
	110/115	15
Torres/postes	57,5/66	15

**Fuente:** RETIE. 2008.

Así mismo, este reglamento estipula: *“No se deben construir edificaciones o estructuras en la zona de servidumbre, debido al riesgo que genera para personas, animales y la misma estructura.”*<sup>45</sup>.

Sin embargo, los problemas ocasionados por la presencia de construcciones en las zonas de servidumbre se han venido consolidando como los de mayor frecuencia, sobre todo en líneas que fueron cedidas por otras empresas. El alto índice de expansiones urbanísticas en algunas zonas donde están ubicadas las líneas de transmisión ha sido otro factor que incrementa la lista de construcciones en estas condiciones. Algunas de las dificultades que contribuyen al acrecentamiento de esta problemática, son la demora en los trámites legales y los desacuerdos en la negociación, porque por lo general los propietarios de los predios manejan altas pretensiones económicas.

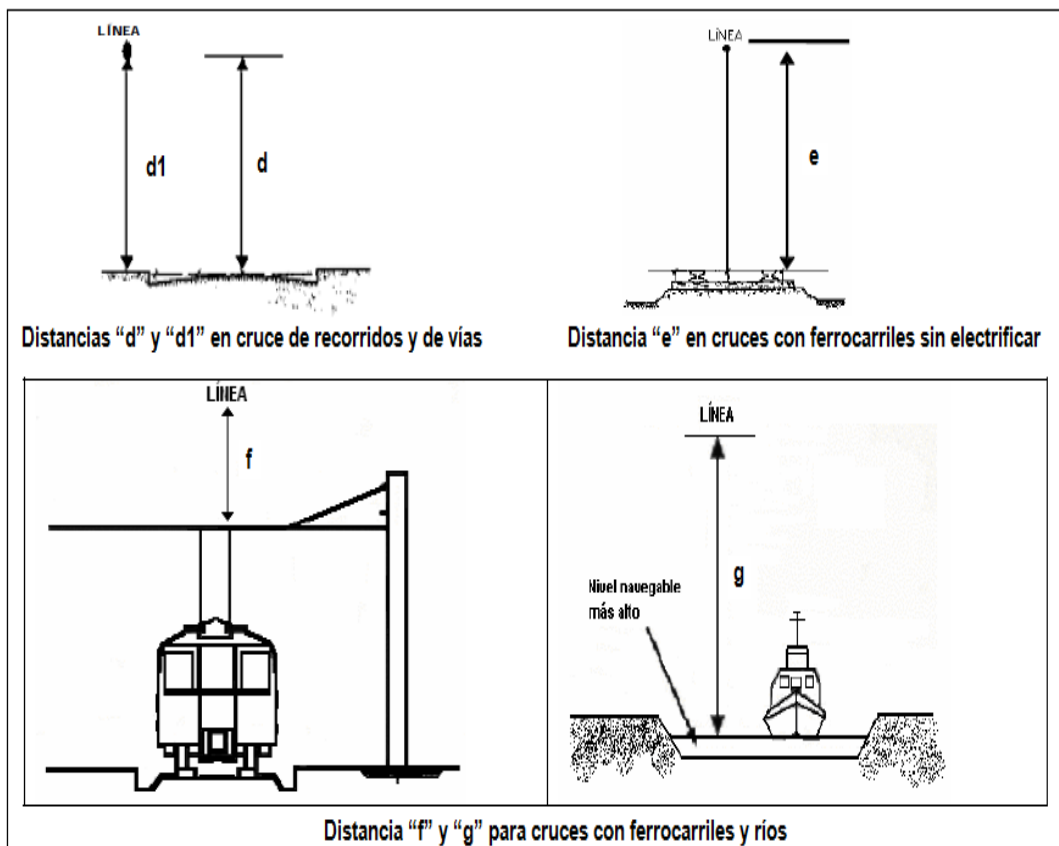
<sup>45</sup> Ibid., p. 118.

### 3.3.3.5 Distancias de seguridad.

Usualmente, cuando se asegura el cumplimiento de unas distancias de seguridad normalizadas en las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica, los valores de intensidad de campo eléctrico y magnético encontrados debajo de las mismas, son inferiores a los límites recomendados por las organizaciones internacionales para la exposición poblacional.

El RETIE, en el Artículo 13.2 estipula las distancias mínimas de seguridad, discriminando así la altura respecto del piso o rodamiento de vía a la cual deben estar los conductores en las líneas de transmisión o redes de distribución. Las distancias se pueden ver en la Tabla 14, y para su interpretación se debe tener en cuenta la Figura 13.

**Figura 13.** Distancias mínimas de seguridad para diferentes lugares y situaciones.



**Fuente:** RETIE. 2008.

**Tabla 14.** Distancias mínimas de seguridad establecidas por el RETIE para diferentes situaciones.

<b>Descripción</b>	<b>Tensión nominal entre fases (kV)</b>	<b>Distancia (m)</b>
Distancia mínima al suelo “d” en cruces con carreteras, calles, callejones, zonas peatonales, áreas sujetas al tráfico vehicular.	500	11,5
	230/220	8,5
	115/110	6,1
	66/57,5	5,8
	44/34,5/33	5,6
	13,8/13,2/11,4/7,6	5,6
Cruce de líneas aéreas de baja tensión en grandes avenidas	<1	5
	<1	5,6
Distancia mínima al suelo “d1” desde líneas que recorren avenidas, carreteras y calles	500	11,5
	230/220	8
	115/110	6,1
	66/57,5	5,8
	44/34,5/33	5,6
	13,8/13,2/11,4/7,6	5,6
Distancia mínima al suelo “d” en bosques de arbustos, áreas cultivadas, pastos, huertos, etc.	<1	5
	500	8,6
	230/220	6,8
	115/110	6,1
	66/57,5	5,8
	44/34,5/33	5,6
Distancia mínima al suelo “e” en cruces con ferrocarriles sin electrificar o funiculares.	13,8/13,2/11,4/7,6	5,6
	500	11,1
	230/220	9,3
	115/110	8,6
	66/57,5	8,3
	44/34,5/33	8,1
Distancia vertical “f” en cruce con ferrocarriles electrificados, teleféricos, tranvías y trole-buses.	13,8/13,2/11,4/7,6	8,1
	500	4,8
	230/220	3
	115/110	2,3
	66/57,5	2
	44/34,5/33	1,8
Distancia vertical “g” en cruce con ríos, canales navegables o flotantes adecuados para embarcaciones con altura superior a 2 m y menor de 7 m.	13,8/13,2/11,4/7,6	1,8
	500	12,9
	230/220	11,3
	115/110	10,6
	66/57,5	10,4
	44/34,5/33	10,2
	13,8/13,2/11,4/7,6	10,2
	<1	9,6

**Tabla 14. (Continuación)**

Descripción	Tensión nominal entre fases (kV)	Distancia (m)
Distancia vertical "g" en cruce con ríos, canales navegables o flotantes no adecuados para embarcaciones con altura mayor a 2 m.	500	7,9
	230/220	6,3
	115/110	5,6
	66/57,5	5,4
	44/34,5/33	5,2
	13,8/13,2/11,4/7,6	5,2
	<1	4,6
Distancia vertical al piso en cruce por campos deportivos abiertos.	500	14,6
	230/220	12,8
	115/110	12
	66/57,5	12
	44/34,5/33	12
	13,8/13,2/11,4/7,6	12
	<1	12
Distancia horizontal en cruce por campos deportivos abiertos.	500	11,1
	230/220	9,3
	115/110	7
	66/57,5	7
	44/34,5/33	7
	13,8/13,2/11,4/7,6	7
	<1	7

Notas:

- (1) Las distancias de seguridad establecidas en la Tabla 14, aplican a conductores desnudos. Igualmente, las distancias verticales se toman siempre desde el punto energizado más cercano al lugar de posible contacto.
- (2) En el caso de tensiones mayores a 57,5 kV entre fases, las distancias de aislamiento eléctrico especificadas en las tablas se incrementan en un 3% por cada 300 m que sobrepasen los 900 metros sobre el nivel del mar..
- (3) Para redes públicas o de uso general no será permitida la construcción de edificaciones debajo de las redes; en caso de presentarse tal situación el operador de red (OR) solicitará a las autoridades competentes tomar las medidas pertinentes. Tampoco será permitida la construcción de redes para uso público por encima de las edificaciones.
- (4) Para tensiones línea-tierra que superen 98 kV, las distancias de la Tabla 14 se podrán aumentar o el campo eléctrico disminuir, considerando que el vehículo o equipo más grande esperado bajo la línea fuera conectado a tierra para limitar a 5 mA la corriente de estado estacionario debida a los efectos electrostáticos. Para calcular está condición los conductores deben estar desenergizados y la flecha a 50°C.

**Fuente:** RETIE. 2008.

### 3.3.3.6 Duración de la exposición.

En muchos estándares se ha establecido un valor límite determinado para la exposición durante 8 ó 24 horas diarias, pero niveles de exposición más altos generalmente son permisibles para periodos cortos de tiempo. Con respecto a esto, la OMS resalta la importancia del tiempo al cual el nivel de exposición es

promediado y exige que en los estándares que se desarrollen se debe indicar claramente la forma exacta de promediar las exposiciones de manera que no se genere confusión en las personas responsables de su cumplimiento.

En este aspecto, el RETIE establece que un lugar donde debe medirse el valor de exposición al público, en el caso de los circuitos de distribución, debe ser donde se tenga la posibilidad de una permanencia prolongada de personas que no puedan tomar medidas para contrarrestar posibles efectos. Dicha permanencia puede ser de hasta 8 horas continuas.

Sin embargo, un factor a considerar para la escogencia de niveles de referencia más restrictivos, es que se debe tener en cuenta que el público en general está comprendido por personas de todas las edades y condiciones de salud, las cuales en la mayoría de las ocasiones no tienen conocimiento de la exposición a la cual se encuentran sometidos, que podría ser de 24 horas al día durante toda la vida.

#### **3.3.3.7 Exposición de cuerpo parcial o total.**

Para los casos en los cuales solo algunas partes del cuerpo humano están cerca de la fuente de campos electromagnéticos cercanos, la OMS sugiere que deberían proporcionarse recomendaciones suplementarias para la exposición del cuerpo parcial adicionalmente a la exposición de cuerpo entero.

Lo anterior se fundamenta en que, dependiendo de las condiciones de exposición y del tamaño, forma y posición del cuerpo expuesto al campo eléctrico; la densidad de carga superficial que es inducida puede variar en gran medida. Dicha variación puede resultar en la presencia de una distribución de corriente no uniforme dentro del cuerpo.

A su vez, se debe tener en cuenta que la distribución de la densidad de corriente inducida varía inversamente con la sección transversal del cuerpo, y puede ser relativamente alta en el cuello y los tobillos.

La normatividad colombiana, en este aspecto no hace ningún tipo de distinción.

## **4 ASPECTOS GENERALES EN LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS PUNTOS CERCANOS A UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN**

El propósito fundamental de este capítulo es establecer un procedimiento para realizar la medición del campo eléctrico en las líneas de alta tensión, dada la importancia de poder contar con un protocolo normalizado que permita desarrollar este tipo de mediciones en ambientes donde hay presencia de líneas de alta tensión.

El conjunto de procedimientos uniformes que el IEEE ha establecido para realizar la medición de campos eléctricos y magnéticos en las inmediaciones de las líneas aéreas de alta tensión de CA, y que a su vez servirán de referencia para esta parte del trabajo, se encuentran recopilados en: *IEEE Std 644-1994: Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines* [15].

Los procedimientos que se describirán a continuación, aplican para la medición del campo eléctrico cercano al nivel del suelo.

### **4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MEDIDORES DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO**

Existen dos tipos de medidores descritos dentro de la literatura técnica, y que son usados para medir la intensidad de campo eléctrico de las líneas de alta tensión de CA: el medidor de cuerpo libre “Free-Body meter” y el medidor referenciado a tierra “Ground-Reference-Type meter”. Las técnicas de medición que se presentan a continuación, solo se aplican para el medidor de cuerpo libre.

El medidor de cuerpo libre (también conocido como medidor a potencial flotante) es apropiado para las mediciones de tipo inspección debido a que es portátil, permite mediciones por sobre el plano de tierra, y no requiere de una referencia de tierra conocida. Por lo tanto, este tipo de medidor es recomendado para mediciones a la intemperie ó en terreno, cerca de las líneas de alta tensión.

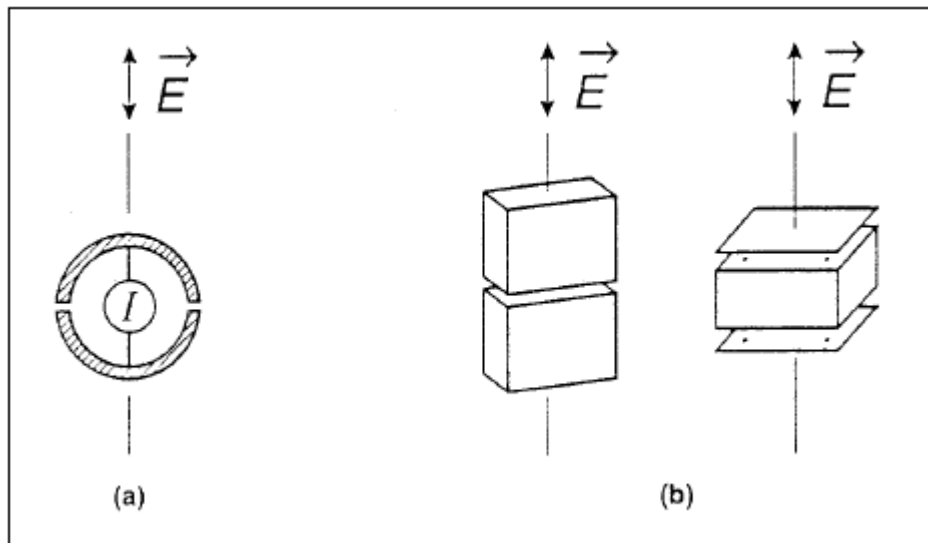
Básicamente, un medidor de intensidad de campo eléctrico se compone de dos partes, la sonda y el detector. Para los medidores de cuerpo libre disponibles comercialmente, el detector está contenido usualmente dentro de la sonda, o es una parte integral de esta última. La sonda y el detector son introducidos dentro del campo eléctrico a medir, por medio de una pértiga aislante. El detector mide la corriente inducida de estado estable o la carga oscilante entre las mitades conductoras (electrodos) de la sonda.

Cuando se efectúa una medida de la intensidad del campo eléctrico, se recomienda que el observador esté lo suficientemente retirado de la sonda para evitar una perturbación significativa del campo eléctrico en las proximidades de dicha sonda. El tamaño de la sonda debe ser tal, que las distribuciones de carga sobre las superficies de frontera generadoras del campo eléctrico (superficies energizadas y aterrizadas) son, a lo sumo, débilmente perturbadas cuando la sonda es introducida para la medición. El campo eléctrico debe ser aproximadamente uniforme en la región donde la sonda será introducida.

Las sondas pueden ser de cualquier forma; sin embargo, los medidores disponibles comercialmente en los EE.UU. generalmente tienen la forma de cajas rectangulares. Algunas de las formas geométricas para las sondas de campo eléctrico se muestran en la Figura 14.

Los medidores son calibrados para leer el valor eficaz de la componente del campo eléctrico de frecuencia industrial a lo largo del eje eléctrico (el eje de susceptibilidad más grande a la intensidad del campo eléctrico).

**Figura 14.** Geometrías típicas de las sondas para la medición del campo eléctrico: (a) sonda esférica, y (b) sondas comerciales en EE.UU.



**Fuente:** IEEE Std 644. 1994.

Además existen medidores de cuerpo libre diseñados para la visualización remota de la intensidad del campo eléctrico. En este caso, una porción del circuito para el tratamiento de la señal está contenido dentro de la sonda y el resto del detector está dentro de un cercamiento separado con un visualizador analógico o digital. Un enlace de fibra óptica conecta la sonda a la unidad del visualizador. Este tipo de sonda también se introduce en un campo eléctrico a través de una pértiga aislante.

Para desarrollar medidas lo suficientemente exactas, es necesario ejecutar los procedimientos de calibración que garanticen que los equipos efectúen mediciones dentro de los rangos aceptados. El medidor de intensidad de campo eléctrico debe ser calibrado periódicamente, ya que la estabilidad de dicho dispositivo depende en parte de la frecuencia con la cual se realicen las calibraciones.

Los controles de calibración deben efectuarse antes y después de un período prolongado de uso del medidor de intensidad de campo eléctrico. Los valores de campo registrados en el proceso de calibración del medidor, permitirán la determinación de los factores de corrección, los cuales deben ser aplicados a las lecturas del medidor de campo cuando son realizadas las mediciones en las inmediaciones de las líneas de potencia. La incertidumbre asociada con el proceso de calibración es igual a  $\pm 3\%$  una vez que hayan sido aplicados los factores de corrección a las lecturas del medidor de campo. Se deben hacer registros de la temperatura y la humedad al momento de realizar la calibración y los controles de calibración, esto con el objeto de permitir hacer las correcciones de esos parámetros, si es necesario, cuando son realizadas las mediciones debajo de las líneas de potencia.

#### **4.2 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO EN LOS PUNTOS CERCANOS A UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN**

El vector de campo eléctrico que se genera en una línea de potencia, rota en el espacio y describe una elipse, como se vio anteriormente (ver Figura 1). Debajo de los conductores, a una altura entre 0 y 2 m sobre el nivel del suelo, la componente vertical del campo eléctrico, que cambia de valor con la posición horizontal, varía poco con la altura. En esta región, la componente horizontal del campo eléctrico es pequeña, pero puede volverse significativa cuando aumenta la distancia lateral desde los conductores.

Tomando ciertas precauciones, se pueden efectuar las mediciones en varios puntos de esta región sin que se presenten errores significativos. Dichos errores resultan de la perturbación de las distribuciones de carga sobre el plano del suelo y sobre los objetos vecinos, ocasionada por la presencia de la sonda y del observador.

Las mediciones se deben efectuar a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, tal y como se muestra en la Figura 15. Las mediciones a otras alturas de interés deben estar explícitamente indicadas. La sonda debe estar orientada para leer la componente vertical de la intensidad del campo eléctrico, debido a que esta cantidad es muchas veces usada para caracterizar los efectos de inducción en objetos cerca del nivel del suelo.

**Figura 15.** Configuración que permite sostener el medidor de intensidad de campo eléctrico en una posición correcta, conservando la altura estipulada en la norma (1 m) y manteniendo una distancia prudente al observador para minimizar el efecto de proximidad.



**Fuente:** APONTE, Guillermo. Experiencia en la medición de campos eléctricos y magnéticos en redes eléctricas. 2006.

La distancia entre el medidor de intensidad de campo eléctrico y el operador debe ser de al menos 2,5 m. Esta distancia reducirá el error por efecto de

proximidad en un rango entre 1,5% y 3%, asumiendo la presencia de un observador de 1,8 m de altura que se encuentre estableciendo perfecto contacto con el suelo a través de ambos pies (eléctricamente aterrizado). Esta distancia dependerá en parte de la altura de la sonda sobre el nivel del suelo y la talla del observador. Una menor perturbación será introducida cuando el observador esté parado en la región de intensidad de campo eléctrico más baja mientras se realiza la medición.

Bajo las condiciones ideales de una línea de transmisión eléctrica dispuesta horizontalmente, con respecto a la superficie de la tierra bajo ella, el plano de la elipse es perpendicular a la dirección de los conductores. Este es el caso aproximado para las líneas de transmisión donde hay ausencia de objetos próximos y donde el terreno no es muy accidentado.

Para realizar las mediciones en dicho plano, la línea observador-medidor de campo debe ser paralela a los conductores (es decir, con la pértiga paralela a la línea), tal y como se muestra en la Figura 16.

En la locación donde se realiza la medición puede haber presencia de objetos permanentes, es decir, aquellos objetos que no pueden ser removidos o desplazados del sitio donde se encuentran ubicados (p. ej. árboles, casas, vallas, etc.). También puede haber presencia de objetos no permanentes (p. ej. vehículos, animales, personas, etc.), los cuales necesariamente deben ser retirados del área donde se realiza la medición.

La distancia entre el medidor y los objetos no permanentes, debe ser de al menos tres veces la altura del objeto, con el fin de medir el valor del campo no perturbado. La distancia entre el medidor y los objetos permanentes debe ser de aproximadamente 1 m o más para asegurar una exactitud suficiente en la medida del campo perturbado del ambiente.

#### 4.2.1 Perfil lateral o transversal.

El perfil lateral o transversal, de la intensidad del campo eléctrico a lo ancho de la zona de servidumbre, debe ser medido en intervalos seleccionados iguales y en una dirección normal a la línea a 1 m por encima del nivel del suelo.

**Figura 16.** Orientación del medidor de intensidad de campo eléctrico con la pértiga paralela a los conductores de la línea de potencia.

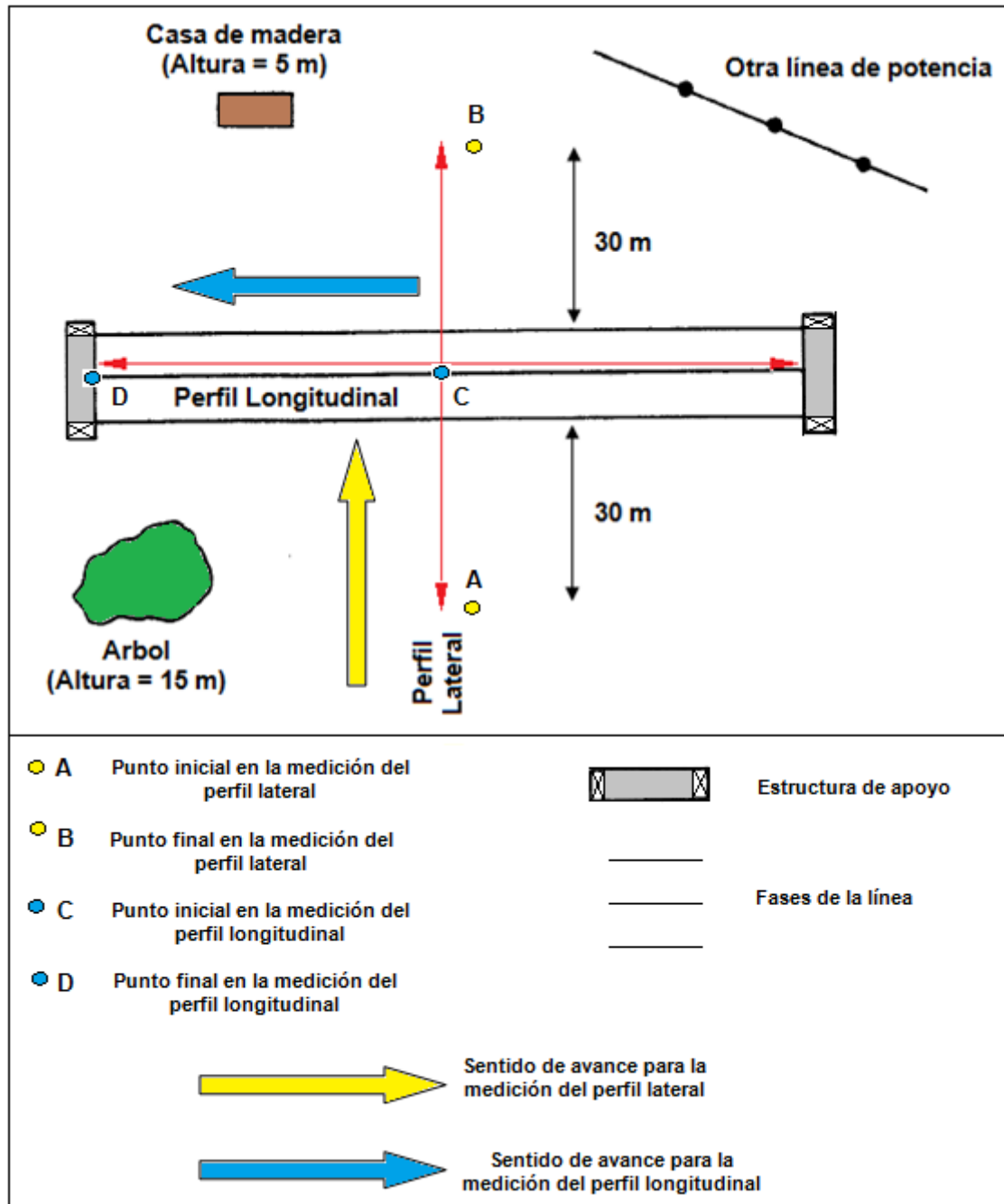


**Fuente:** APONTE, Guillermo. Experiencia en la medición de campos eléctricos y magnéticos en redes eléctricas. 2006.

Se deben realizar por lo menos 5 mediciones equidistantes mientras se está bajo los conductores. Las mediciones de perfil completas deben comenzar en la región de interés (que generalmente es el centro del vano), desde una distancia lateral no menor a 30 m, más allá del conductor más externo; avanzando sucesivamente en línea recta hasta el lado opuesto de la zona de

servidumbre (ver Figura 17). La hora local debe ser registrada periódicamente en la hoja de datos durante las mediciones.

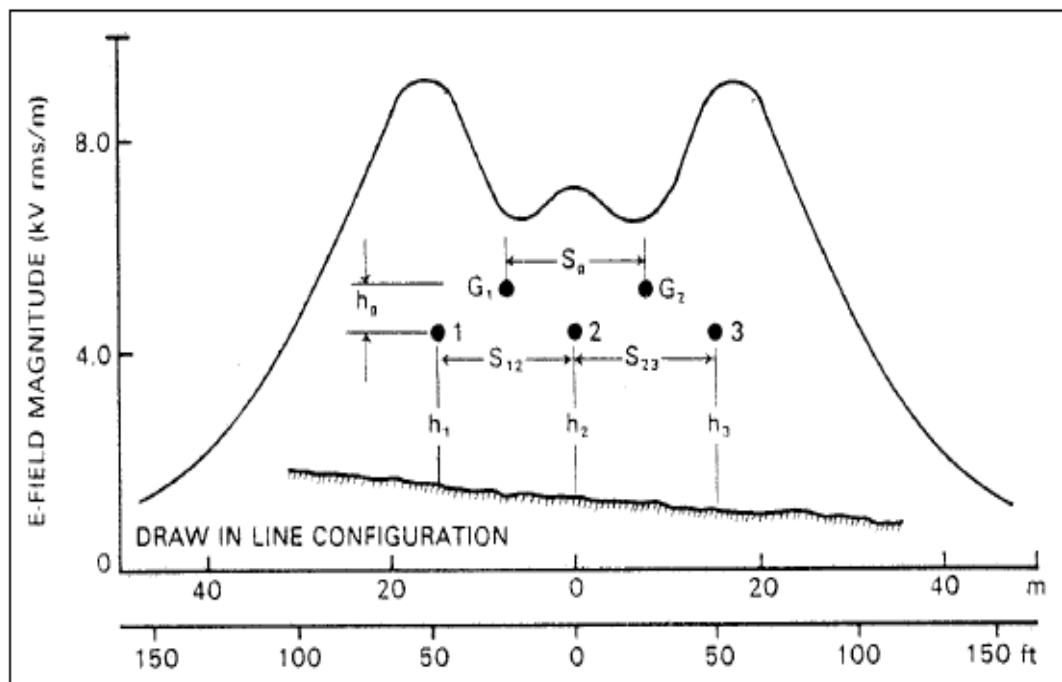
**Figura 17.** Ejemplo de una vista típica de planta obtenida para la medición de la intensidad del campo eléctrico vertical en el punto medio del vano de una línea de alta tensión.



Fuente: IEEE Std 644. 1994.

En la Figura 18 se puede apreciar el ejemplo de un perfil lateral obtenido al realizar la medición de la intensidad del campo eléctrico en el punto medio del vano de una línea de alta tensión de configuración horizontal. En el eje vertical se encuentran los valores eficaces medidos para la intensidad del campo eléctrico, mientras que en el eje horizontal se encuentran los desplazamientos realizados a lo largo de la zona de servidumbre, teniendo como punto de referencia (0 m) la coordenada horizontal del conductor central de la línea de potencia.

**Figura 18.** Ejemplo de un perfil lateral obtenido de la medición de la intensidad del campo eléctrico vertical en el punto medio del vano de una línea de alta tensión.



*Nota:*  
 Los símbolos:  $h_1$ ,  $S_{12}$ , etc., representan las alturas y espaciamientos del conductor.

**Fuente:** IEEE Std 644. 1994.

#### **4.2.2 Perfil longitudinal.**

El perfil longitudinal de la intensidad de campo eléctrico debe ser medido en el lugar del eje de la línea donde el campo es máximo, en el punto medio del vano o en otros puntos de interés. Así como se determinó para el perfil lateral, la medición se debe realizar con la pértiga del medidor paralela a la línea, a 1 m del nivel del suelo. Se deben hacer por lo menos 5 mediciones del perfil longitudinal, con incrementos consecutivos iguales en ambas direcciones partiendo desde el punto medio del vano (ver Figura 17).

#### **4.2.3 Parámetros que afectan la exactitud de las medidas de la intensidad de campo eléctrico.**

##### **4.2.3.1 Locaciones donde se realiza la medición.**

Con el fin de hacer mediciones de la intensidad del campo eléctrico que representen el campo no perturbado en una locación dada, el área debe estar despejada, tanto como sea posible, de otras líneas de potencia, torres, árboles, vallas, vegetación alta, u otras irregularidades. Es preferible que la locación sea relativamente plana. Se debe reportar la ubicación con respecto a la línea y las dimensiones de los objetos que no pueden ser retirados o desplazados.

Debe notarse que la influencia de la vegetación sobre la intensidad del campo eléctrico puede ser significativa. En general, la intensificación del campo ocurre cerca de la cima de la vegetación y la atenuación ocurre cerca de los lados. La perturbación del campo puede depender notablemente del contenido de agua presente en la vegetación.

##### **4.2.3.2 Fugas en la pértiga de sujeción de la sonda.**

Debido a que pueden degradarse las propiedades dieléctricas de la pértiga que sujeta la sonda, por la contaminación de su superficie o por la humedad, se

puede generar una indicación incorrecta del aparato de medida. Esto último se debe a que, por las causas anteriormente mencionadas, se puede presentar una corriente de fuga entre el observador y la tierra.

Para verificar que no haya presencia de una corriente de fuga en la pértiga, es conveniente orientar el aparato de medida con su eje geométrico perpendicular al plano descrito por la elipse de campo eléctrico, donde, bajo condiciones ideales se debe medir una intensidad de campo eléctrico nula. Durante este tipo de verificaciones se asume que el eje geométrico de la sonda coincide con su eje eléctrico.

#### **4.2.3.3 Humedad.**

Cuando hay presencia de humedades altas en el sitio de medición, se puede formar una película de condensación superficial en la carcasa del aparato de medida, que puede resultar en una corriente de fuga significativa entre los electrodos activos de la sonda, cortocircuitando parcialmente el circuito interno de medida. Por lo tanto, es necesario tomar precauciones si se desarrollan medidas cuando la humedad relativa en la locación supera el 80%. Es conveniente mantener limpios y secos el aparato de medida, su aislamiento interno y la pértiga; con el propósito de minimizar las corrientes de fuga que pueden producir errores en la medida.

#### **4.2.3.4 Temperatura.**

Según los ensayos realizados en medidores de campo eléctrico de cuerpo libre, se ha mostrado que la influencia de la temperatura puede afectar la indicación del instrumento hasta en un 8%, cuando se incrementa la temperatura desde 0 °C hasta 40 °C. Si la temperatura durante la medición es muy diferente de la temperatura de calibración, debe anotarse la diferencia. Si es posible, debe determinarse la dependencia del aparato de medida con la temperatura (mediante el uso de una cámara climatizada).

#### **4.2.3.5 Contenido de armónicos.**

La respuesta de ciertos medidores de intensidad de campo eléctrico está influenciada por los altos niveles en el contenido de armónicos, lo cual depende en gran medida del diseño del circuito del detector. Las magnitudes de las componentes armónicas en la corriente inducida son intensificadas por el número del armónico. Por lo tanto, si es posible, debe observarse la forma de onda del campo o de su señal derivada (la corriente inducida) para obtener una estimación de las cantidades en el contenido de armónicos.

La respuesta a la frecuencia de un medidor de cuerpo libre puede ser determinada experimentalmente inyectando una corriente alterna a varias frecuencias y observando su respuesta, mediante el uso de analizador de onda.

#### **4.2.3.6 Campos magnéticos ambientales.**

Debido a que en fuentes que funcionan a frecuencia industrial, los campos magnéticos se generan simultáneamente con los campos eléctricos, los aparatos de medida de intensidad de campo eléctrico deben tener cierta inmunidad a la interferencia que puedan causar los niveles de campo magnético presentes en el ambiente durante la medición bajo una línea de transmisión. Las posibles perturbaciones de este tipo que se puedan presentar en la operación del medidor de intensidad de campo eléctrico, deben estar expresadas como porcentajes y haber sido cuantificadas por el fabricante y suministradas al usuario. Este último debe incluirlas en los reportes de medición si son significativas.

#### **4.2.3.7 Inclinación del aparato de medida.**

La indicación de un aparato de medida de cuerpo libre puede depender de la inclinación. Este efecto puede ser una fuente de incertidumbre en la medida del

aparato, si este último se usa con una orientación diferente a la que existió en el proceso de calibración en un campo uniforme.

Rotar el aparato alrededor de la línea observador-medidor de campo (la cual coincide con la pértiga), permitirá la determinación de las componentes máximas y mínimas de campo (al obtener las desviaciones máxima y mínima en el indicador); y sus correspondientes direcciones (donde las direcciones de las componentes máxima y mínima, coinciden con las del eje mayor y el eje menor en el plano de la elipse descrita por el campo respectivamente).

En el caso de un medidor con visualizador analógico, el desequilibrio mecánico de las partes móviles puede convertirse en una fuente de error en la medida. Si las partes móviles no están lo suficientemente bien balanceadas, se recomienda que el medidor debe ser utilizado con la misma orientación con respecto a la vertical que existía durante la calibración del aparato. Una estimación de la magnitud de este tipo de error puede obtenerse rotando el medidor en la ausencia de un campo eléctrico y observando el desplazamiento de la aguja. El reemplazo del visualizador analógico por uno de visualizador digital, eliminará los errores debidos a un pobre balance mecánico.

#### **4.2.3.8 Campo no uniforme.**

La no uniformidad del campo bajo las líneas de transmisión, no reduce sustancialmente la precisión de la medida, debido a que el aparato de medida se calibra con un campo uniforme. Por lo tanto, el error causado por este tipo de situación, se considera despreciable para todo caso práctico.

#### **4.2.3.9 Efectos de proximidad.**

El efecto de proximidad del observador sobre la medida en un punto dado del espacio, puede ser determinado experimentalmente fijando la pértiga de la

sonda sobre una columna vertical aislante, como se muestra en la configuración para el soporte de la sonda de la Figura 15.

Se puede determinar efecto de proximidad anotando los cambios de la lectura del valor de la intensidad del campo eléctrico en función de la distancia del observador a la sonda. Se debe posicionar el visualizador (analógico o digital), de tal forma que el observador sea capaz de verlo con seguridad durante la realización de las medidas.

Cuando se efectúan medidas de la intensidad del campo eléctrico, se recomienda limitar los efectos de proximidad, de tal forma que el error producido por este fenómeno sea de menos del 3%.

### **4.3 INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO**

El procedimiento matemático requerido para estimar la incertidumbre asociada a los resultados de la medición de la intensidad de campo eléctrico, se presenta en el Anexo B.

La incertidumbre durante la medición en práctica a campo abierto usando medidores de cuerpo libre comercialmente disponibles, es típicamente cercana al 10%, aunque esta cifra puede reducirse bajo condiciones más controladas.

Las principales fuentes de incertidumbre son la dificultad en el posicionamiento del medidor, errores de lectura, efectos de la temperatura, efectos de proximidad del observador y la presencia de corrientes de fuga en la pértiga del medidor en algunos casos.

Las incertidumbres en la medición que se deben a los parámetros mencionados anteriormente y a otros factores como la calibración, temperatura

e interferencia por campos magnéticos ambientales; deben ser combinadas en una sola (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados), la cual debe reportarse posteriormente como la incertidumbre total estimada de la medición. La incertidumbre total no debe exceder  $\pm 10\%$ .

#### **4.4 PRESENTACIÓN DE INFORMES EN LA MEDICIÓN DE CAMPOS**

La información de fondo, como las condiciones ambientales (p. ej. temperatura, humedad, cobertura del suelo), parámetros de la línea de transmisión (p. ej. tensiones y corrientes de línea, geometría del conductor, locaciones donde se realiza la medición), y la instrumentación usada; debe ser registrada. En el Anexo C se muestra un ejemplo de la planilla u hoja de datos para la información de fondo que se debe diligenciar antes de realizar las mediciones en terreno de campos eléctricos y magnéticos en líneas de transmisión.

Dependiendo de los objetivos de la medición (p. ej. la comparación de perfiles laterales con una predicción teórica vs. la medición de un perfil lateral típico), la información requerida en la hoja de datos puede ser menor.

Se recomienda incluir los gráficos de los campos eléctricos, tal como se ha representado en la Figura 18. También se recomienda incluir una vista de planta, como se muestra en la Figura 17, para proporcionar detalles adicionales de las condiciones ambientales y de los parámetros de la línea.

#### **4.5 LA MEDICIÓN DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA**

Con respecto al proceso de medición de campos electromagnéticos, el RETIE dispone en su Artículo 14.5: “*En líneas de transmisión y distribución, se debe*

*medir a un metro de altura sobre el nivel del piso, en sentido transversal al eje de la línea dentro de la zona de servidumbre, para otros casos se debe medir en el lugar de permanencia frecuente del trabajador para exposición ocupacional y donde pueda circular o permanecer una persona del público en general. El equipo con el que se realicen las mediciones debe poseer un aseguramiento metrológico por medio del certificado de calibración y además, debe utilizar un método de medición normalizado.”<sup>46</sup>.*

De lo anterior, se puede concluir que el proceso de medición establecido por el RETIE en el Artículo 14.5, coincide en sus aspectos fundamentales con las recomendaciones estipuladas dentro del estándar IEEE 644 de 1994.

---

<sup>46</sup> Ibid., p. 58.

## 5 PROGRAMA PARA REALIZAR EL CÁLCULO DE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS PUNTOS CERCANOS A UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN

Mediante el uso del método analítico presentado en la Sección 1.3, se han elaborado programas de simulación que permiten calcular la intensidad del campo eléctrico producido por una línea de transporte de energía eléctrica. Con base en lo anterior, en el año 2000 se desarrolló en una tesis de pregrado [10] un programa llamado *PERFILES.m*, que realizó la implementación de un algoritmo que permite realizar los cálculos ya mencionados aprovechando las ventajas que brindaba el ambiente de computación MATLAB desarrollado hasta esos años. Dicho programa se ha convertido en una de las herramientas de software de uso frecuente en el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

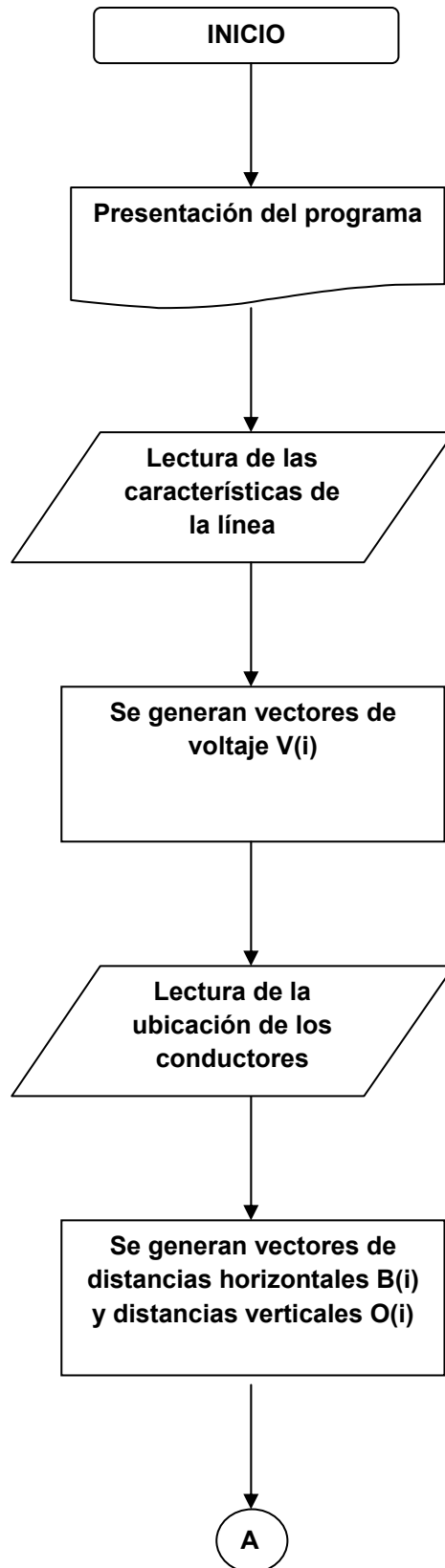
El programa desarrollado en el presente trabajo se llama *E\_perfiles.m*, donde se realizó una actualización del programa *PERFILES.m* que consistió en la creación de una interfaz gráfica de usuario; esto con el objeto de facilitar la interacción del usuario con el sistema operativo del ordenador.

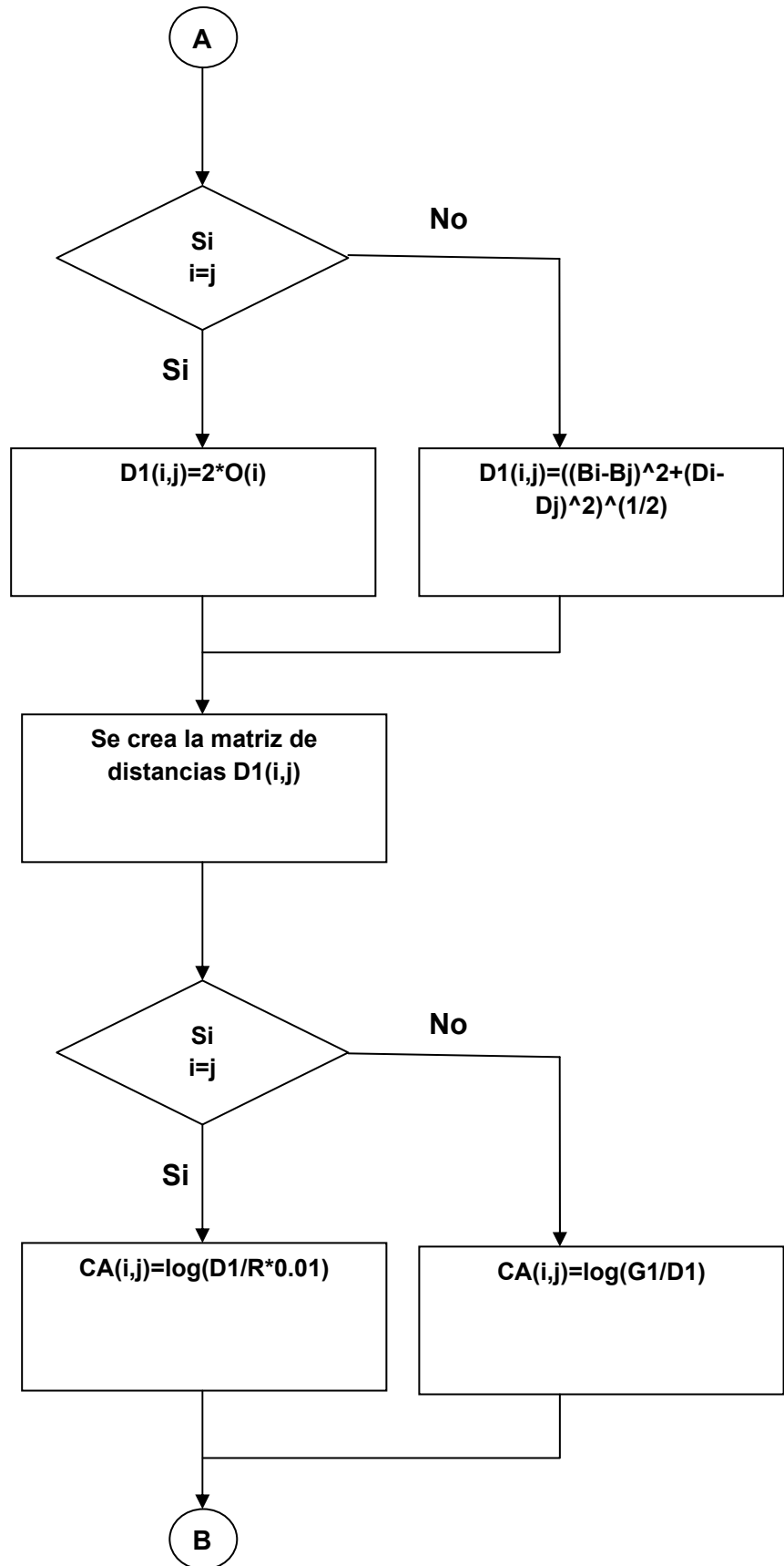
También se mejoraron algunos aspectos en cuanto a la presentación de los resultados, ya que *E\_perfiles.m* grafica los perfiles transversales completos a lo largo de un intervalo de distancias horizontales, permitiéndole observar al usuario la simetría existente en estas gráficas. Otra ventaja de este programa, es que permite realizar la comparación de los resultados obtenidos al realizar uno o más cambios en los parámetros de entrada de la línea, superponiendo los perfiles simulados cada vez que se realiza una variación.

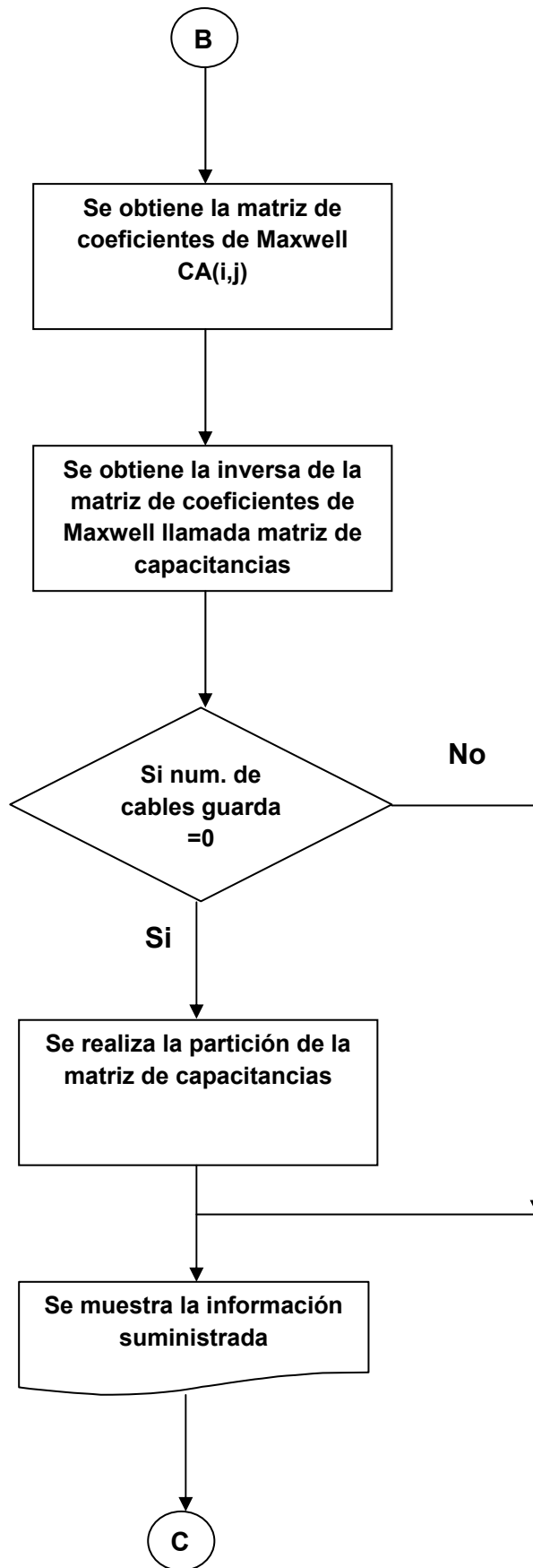
Vale la pena señalar que el programa desarrollado sólo es eficaz al realizar el cálculo de la intensidad del campo eléctrico en los puntos cercanos al nivel del

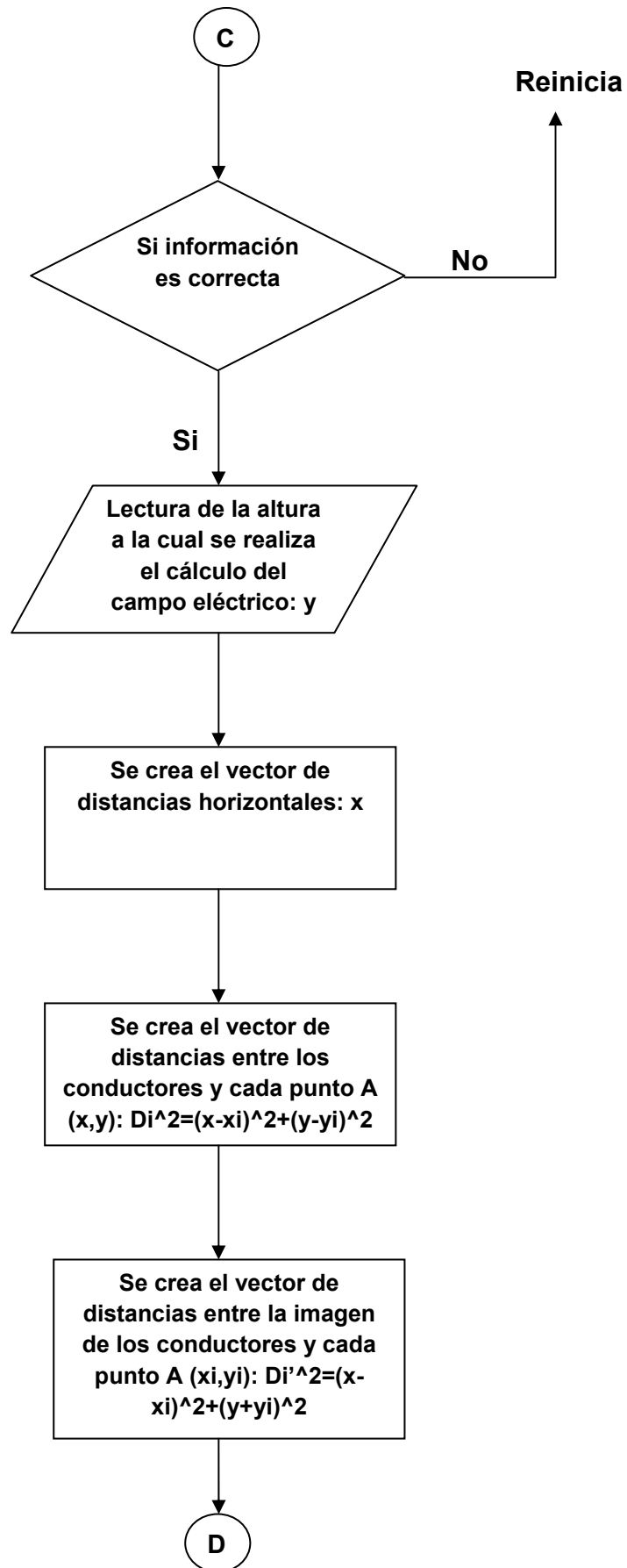
suelo (entre los 0 y 2 m), ya que los resultados obtenidos para alturas más grandes no son confiables. Por esta razón, no es conveniente utilizar este programa para realizar la estimación de los niveles de exposición al campo eléctrico para el personal que trabaja en línea viva, donde la altura en la cual se requiere calcular estos valores es muy cercana a la de los conductores.

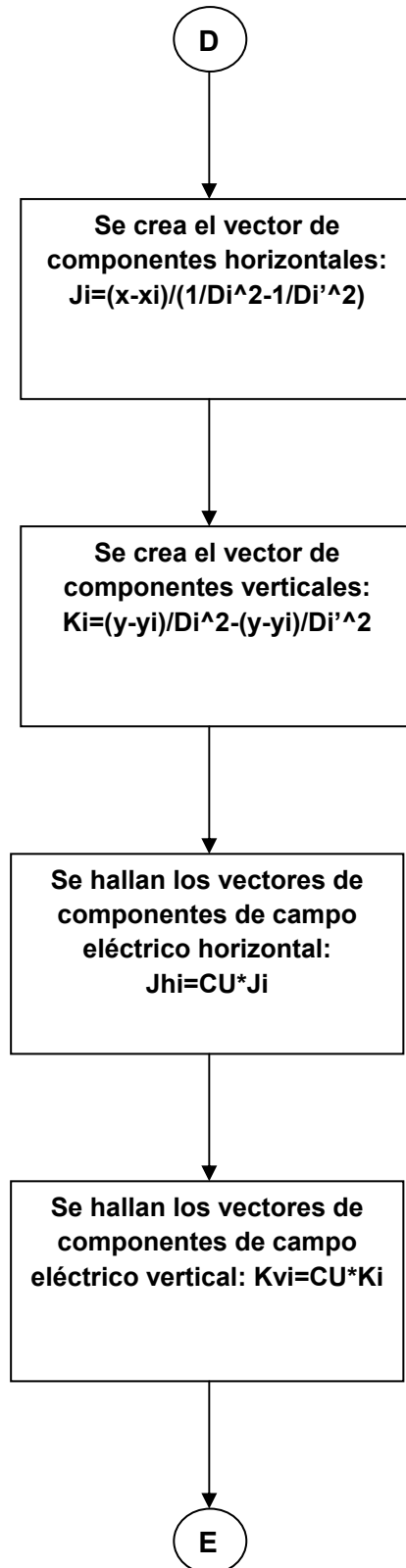
El manual de uso del programa *E\_perfiles.m* se muestra en el Anexo D, mientras que la estructura del algoritmo escrita en el lenguaje de programación MATLAB, se muestra en el Anexo E. El diagrama de flujo del programa se presenta a continuación.

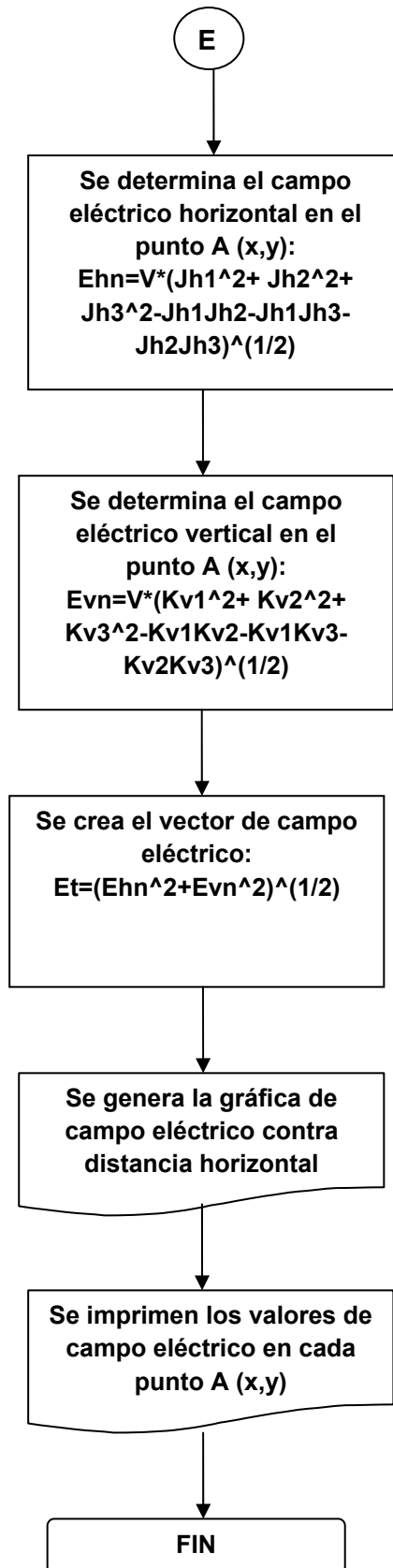












## **6 COMPARACIÓN ENTRE LOS PERFILES LATERALES DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO OBTENIDOS A TRAVÉS DE MEDICIÓN Y SIMULACIÓN EN UNA LÍNEA DE ALTA TENSIÓN**

Con el propósito de llevar a cabo una verificación de los resultados o datos de salida que proporciona el programa *E\_perfiles.m*, los cuales son obtenidos al efectuar la simulación en una línea de alta tensión, se realizará una comparación de los perfiles laterales de intensidad de campo eléctrico obtenidos a través de medición y simulación en una línea real.

La comparación se realizará sobre un caso de medición especificado en la tesis de pregrado realizada por Rodrigo Pérez Barco, titulada: *Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de extremada baja frecuencia en líneas y subestaciones* [28]. Dicho documento fue uno de los resultados parciales de un proyecto [2] que se llevo a cabo en la Universidad del Valle con la participación de COLCIENCIAS<sup>47</sup> y la EPSA<sup>48</sup>.

### **6.1 PERFIL LATERAL OBTENIDO A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO EN LA LÍNEA JUANCHITO-CANDELARIA DE 115 kV**

El método de medición adoptado fue el que se estableció en: *IEEE Std 644-1994: Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines* [15], que presenta una metodología clara basada en los estándares internacionales. Así mismo, el equipo de medición utilizado<sup>49</sup> poseía (por lo menos hasta el momento de realizar la

---

<sup>47</sup> COLCIENCIAS, Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación.

<sup>48</sup> EPSA, Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P.

<sup>49</sup> Los equipos que se utilizaron para realizar la mencionada medición, hacen parte de los recursos del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle, y corresponden principalmente al medidor *EMDEX II* y al sensor *E-probe*. Ambos dispositivos son marcas registradas de la empresa *Enertech Consultants*.

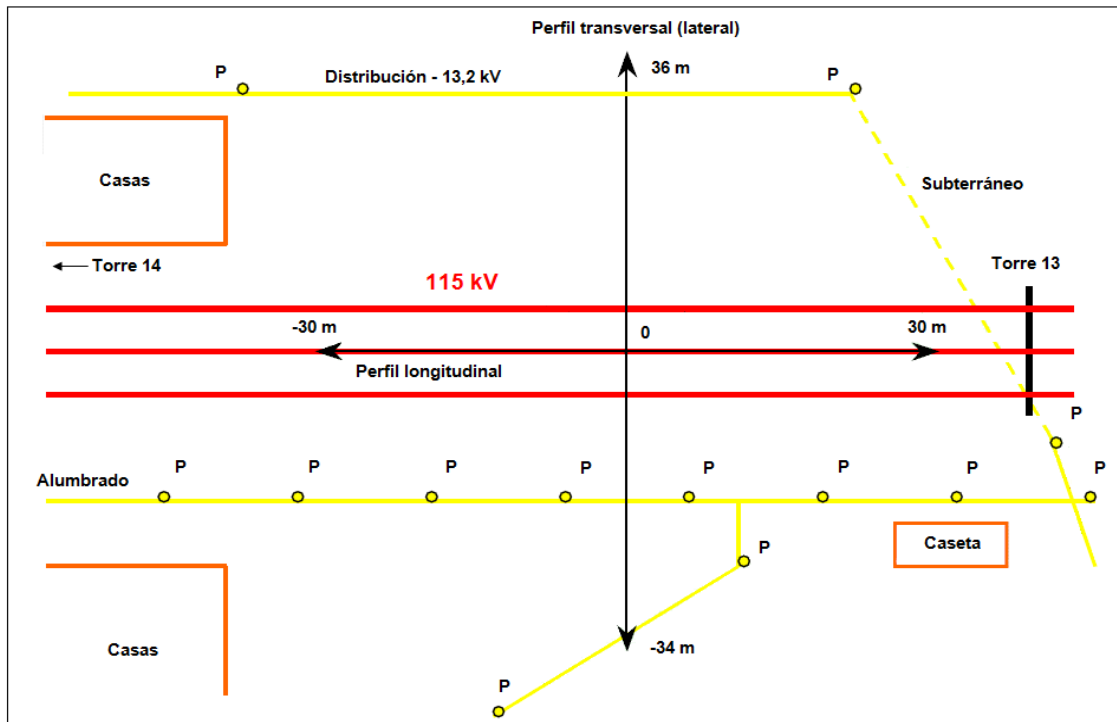
medición) un aseguramiento metrológico mediante un certificado de calibración, tal y como lo dispone el RETIE dentro de los requisitos establecidos para este tipo de operaciones.

Se seleccionó la medición realizada en la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV de tensión nominal, perteneciente al Sistema de Transmisión Regional (STR) de la EPSA, debido a que solo para esta línea en particular se realizó un reporte completo de los datos de la línea (p. ej. la configuración geométrica de la línea y las características de los conductores que la conforman) dentro del trabajo de grado que se tomó como referencia para este capítulo. La importancia de lo anterior radica en que es necesario conocer la información completa de la línea con la cual se va a trabajar, con el propósito de contar con todos los datos de entrada que permitan realizar su posterior simulación en el programa desarrollado.

En la Figura 19 se muestra una vista de planta del lugar donde se realizó la experiencia, de donde se puede observar que la medición para obtener el perfil lateral de intensidad de campo eléctrico se realizó cubriendo una distancia lateral total de 70 m a lo ancho de la zona de servidumbre de la línea. También se puede observar la presencia de construcciones y redes de distribución y alumbrado en la zona (donde los postes se denotaron con la letra "P").

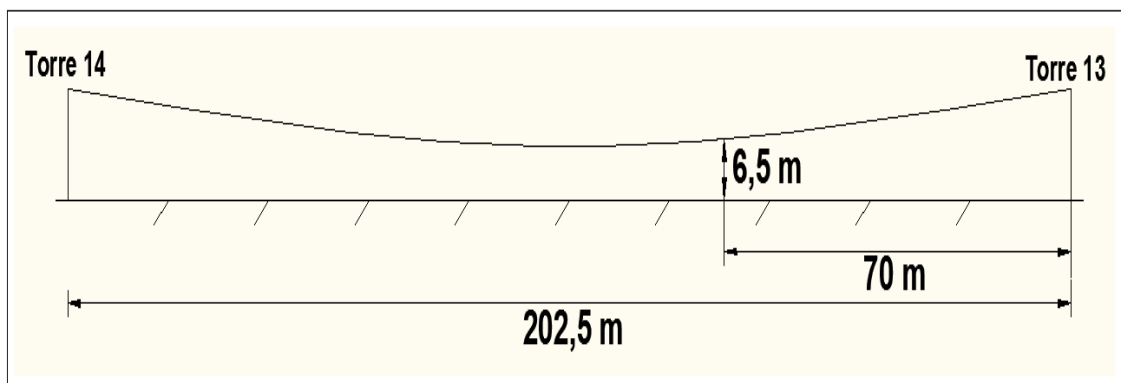
Así mismo, la medición en esta línea se realizó a 1 m de altura sobre el nivel del suelo, en una zona ubicada a una distancia de 70 m medida desde la estructura de soporte más cercana (Torre 13) donde la altura del conductor de fase al suelo es de 6,5 m, tal y como se muestra en la Figura 20.

**Figura 19.** Vista de planta de la locación donde se realizó la medición.



**Fuente:** PÉREZ, Rodrigo. Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de extremada baja frecuencia en líneas y subestaciones. 2001.

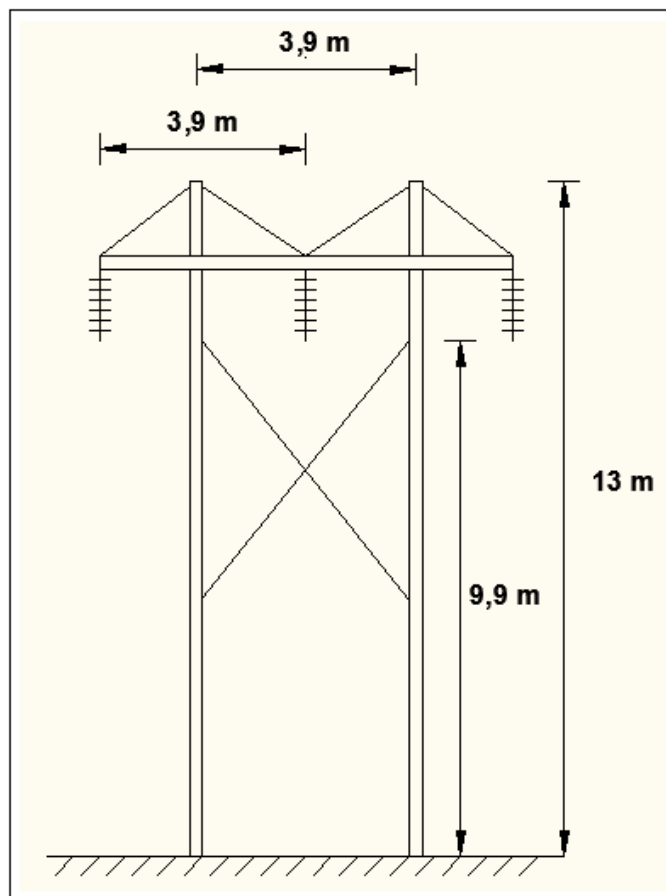
**Figura 20.** Localización de la zona donde se realizó la medición dentro de la vista de perfil del vano "Torre 13-Torre 14" de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.



**Fuente:** PÉREZ, Rodrigo. Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de extremada baja frecuencia en líneas y subestaciones. 2001.

En la Figura 21, se muestra la configuración de la estructura de soporte de la línea, donde se puede ver el espaciamiento entre los conductores de fase y de guarda, así como la altura a la cual se encuentran en la torre.

**Figura 21.** Configuración geométrica de la estructura de soporte en la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.



**Fuente:** PÉREZ, Rodrigo. Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de extremada baja frecuencia en líneas y subestaciones. 2001.

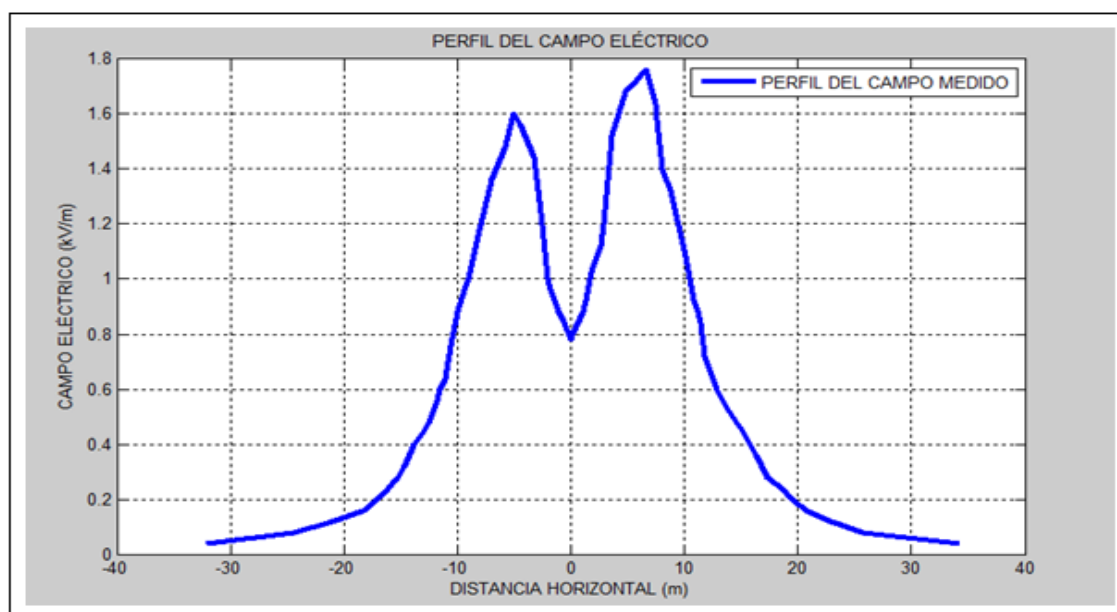
Adicionalmente, en la Tabla 15 se incluye la información acerca de las características de la línea. Finalmente, en la Figura 22 se incluye el perfil lateral obtenido a través de la medición de la intensidad de campo eléctrico realizada en la mencionada línea.

**Tabla 15.** Información de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.

Característica		Valor
Tensión [kV/m]		119,7
Configuración de la línea		Horizontal (Plana)
Tipo de línea		Circuito sencillo
Configuración de los conductores		Un solo conductor
Conductor de fase	Designación-Calibre	Oriole-336,4 MCM
	Diámetro [mm]	18,821
Conductor de guarda	Designación-Calibre	Shrike-33,185 MCM
	Diámetro [mm]	8,03
Flecha máxima [m]		6,8
Vano (Torre 13-Torre 14) [m]		202,5

**Fuente:** PÉREZ, Rodrigo. Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de extremada baja frecuencia en líneas y subestaciones. 2001.

**Figura 22.** Perfil lateral obtenido de la medición de la intensidad de campo eléctrico en la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.



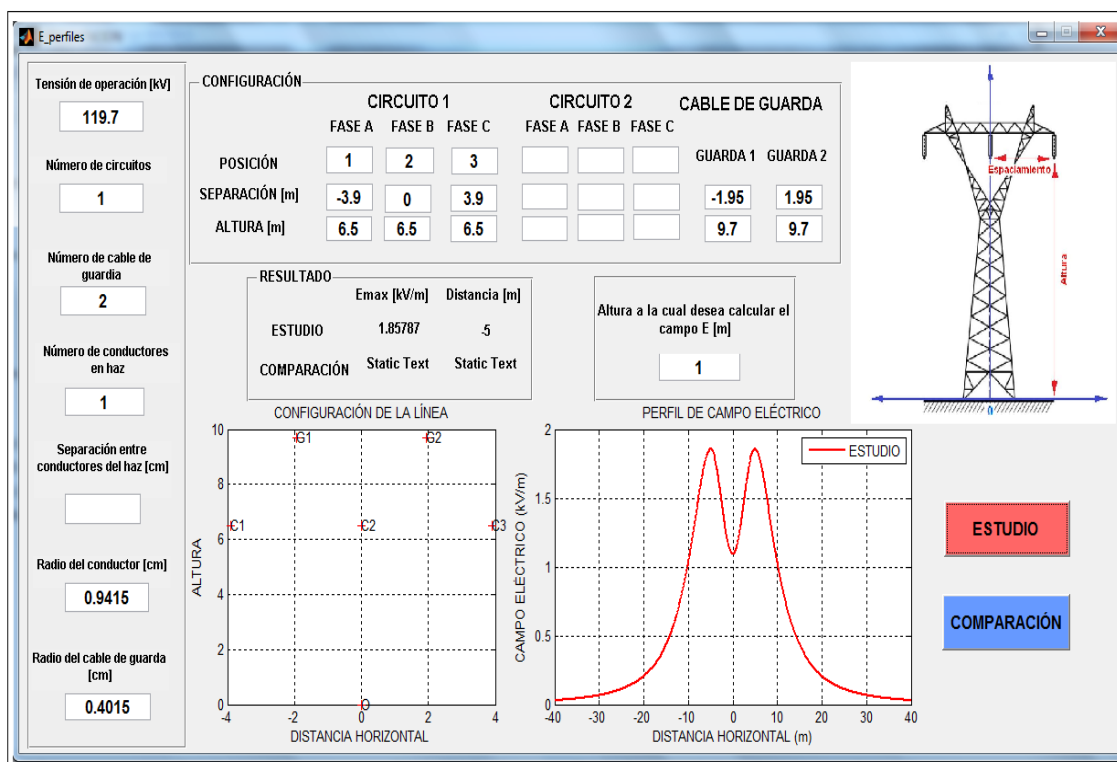
**Fuente:** Fuente: PÉREZ, Rodrigo. Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de extremada baja frecuencia en líneas y subestaciones. 2001.

## 6.2 PERFIL LATERAL OBTENIDO A TRAVÉS DEL CÁLCULO (REALIZADO MEDIANTE SIMULACIÓN) DE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO EN LA LÍNEA JUANCHITO-CANDELARIA DE 115 kV

Con el fin de llevar a cabo la confrontación de los valores de intensidad de campo eléctrico medidos con los calculados, se realizó la simulación en el programa *E\_perfiles.m* de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.

En la Figura 23 se muestra una captura de pantalla realizada durante la ejecución del programa *E\_perfiles.m*, donde se indican los datos de entrada necesarios para realizar la simulación de la línea.

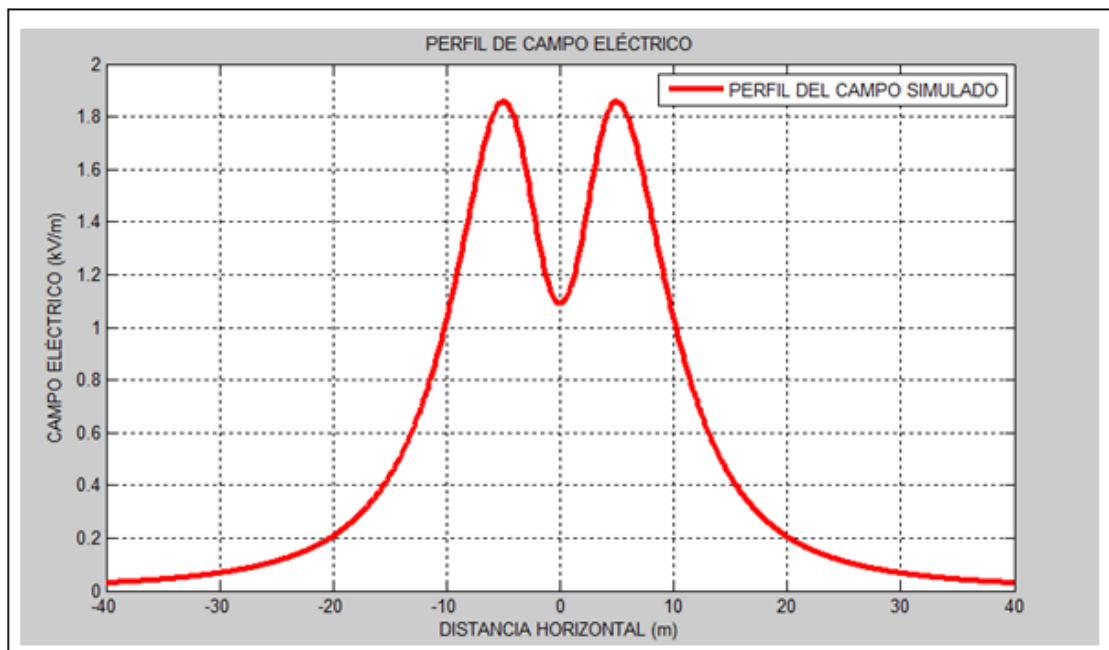
**Figura 23.** Datos de entrada para la simulación de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV en el programa *E\_perfiles.m*.



Fuente: Autores. 2010.

El perfil lateral que corresponde a la salida obtenida del programa *E\_perfiles.m* tras realizar la simulación de la línea, se indica en la captura de pantalla mostrada en la Figura 24.

**Figura 24.** Perfil lateral obtenido tras realizar la simulación de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV en el programa *E\_perfiles.m*.

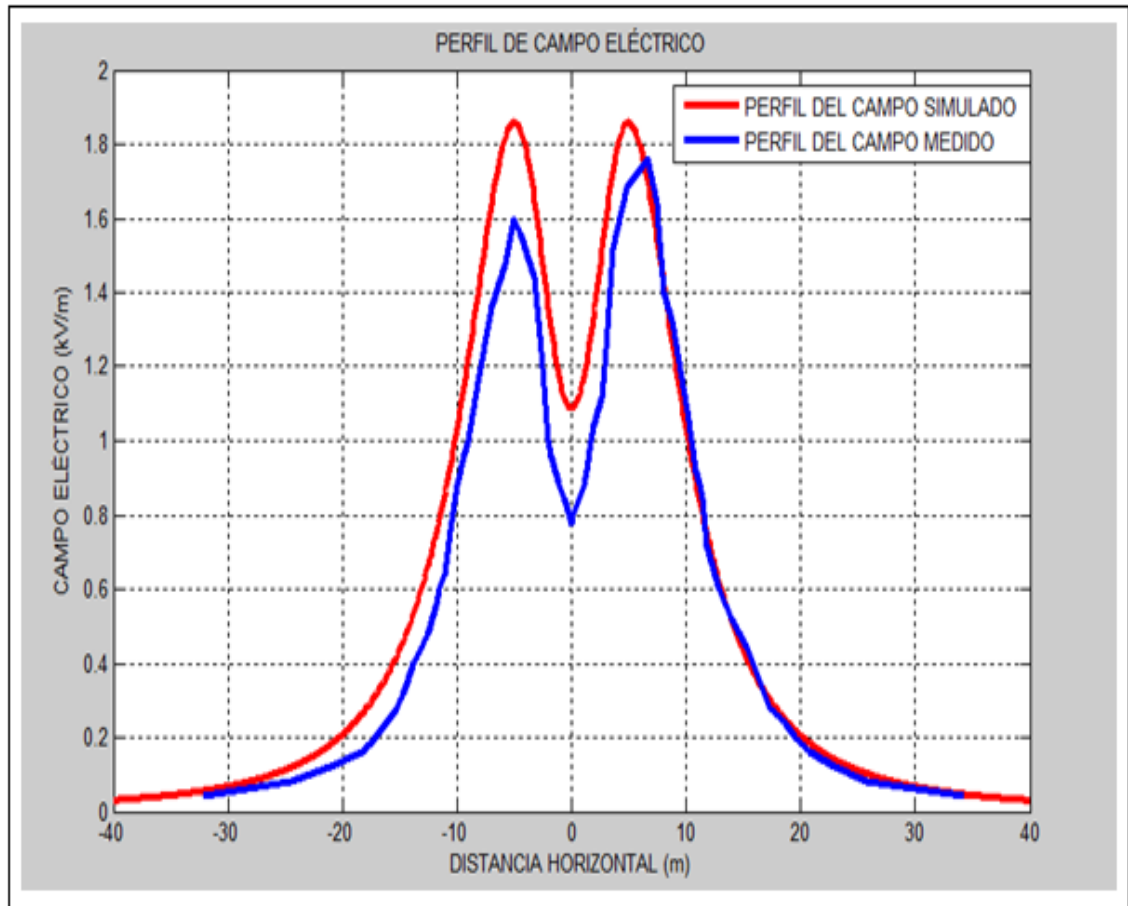


**Fuente:** Autores. 2010.

### 6.3 COMPARACIÓN DE LOS PERFILES LATERALES MEDIDOS Y SIMULADOS

En la Figura 25 se muestran, en la misma gráfica, el perfil lateral medido y el simulado, con el propósito de visualizar las diferencias entre ambos resultados.

**Figura 25.** Comparación entre los perfiles laterales obtenidos a través de la medición y el cálculo (mediante simulación) de la intensidad del campo eléctrico en la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.



**Fuente:** Autores. 2010.

En la Tabla 16 se indican los valores de intensidad de campo eléctrico obtenidos tras la ejecución de ambas metodologías (medición y simulación), para algunas distancias horizontales medidas a lo largo de la zona de servidumbre, donde se tomó como punto de origen (0) la ubicación del conductor central de la línea (como se muestra en la Figura 19). También se incluyen los datos de error porcentual para cada distancia.

**Tabla 16.** Valores de intensidad de campo eléctrico obtenidos mediante medición y simulación para distintos puntos a lo largo de la zona de servidumbre de la línea Juanchito-Candelaria de 115 kV.

<b>Distancia horizontal [m]</b>	<b>Intensidad de campo eléctrico medido - <math>E_{med}</math> [kV/m]</b>	<b>Intensidad de campo eléctrico simulado - <math>E_{sim}</math> [kV/m]</b>	<b>Error porcentual</b> $\epsilon \% = \left( \frac{E_{sim} - E_{med}}{E_{med}} \right) * 100\%$
-30	0,05	0,06645	32,9%
-25	0,075	0,1116	48,8%
-20	0,1356	0,2076	53,097%
-15	0,3	0,4354	45,133%
-10	0,88	1,034	17,500%
-5	1,595	1,858	16,489%
0	0,78	1,09	39,744%
5	1,69	1,858	9,941%
10	1,1	1,034	-6%
15	0,455	0,4354	-4,3077%
20	0,185	0,2076	12,216%
25	0,09	0,1116	24%
30	0,06	0,06645	10,75%

**Fuente:** Autores. 2010.

#### 6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En general, se puede observar una notoria disminución de la intensidad del campo eléctrico en la zona central de la línea en ambos perfiles laterales. Esto

se debe a que en esta región ocurre una cancelación fasorial de los campos generados por cada conductor.

La asimetría con respecto a la posición del conductor central de la figura mostrada en el perfil lateral obtenido a través de la medición (ver Figura 22), se puede deber a que en la situación real hay un leve desequilibrio en las tensiones de las fases. Otras posibles causas que pudieron influir en la asimetría de la gráfica, habrían sido la interferencia de los campos producidos por la línea de distribución cercana de 13,2 kV y el efecto de proximidad ocasionado por los objetos permanentes de la zona, como las casas y los postes de las redes de alumbrado público y de distribución.

En la medición, el valor máximo de intensidad de campo eléctrico obtenido fue de 1,741 kV/m, producido a una distancia de 6,6 m desde el punto de origen. Por el contrario, en la simulación, se obtuvo un valor máximo de intensidad de campo eléctrico de 1,8577 kV/m a una distancia de 5 m desde el punto de origen. El error porcentual para estos valores es del 6,703%. Ambos niveles están por debajo del valor límite de exposición para el público en general de 5 kV/m, establecido por el RETIE.

Las distancias horizontales en la Tabla 16 se tomaron abarcando un rango total de 60 m (30 m a ambos lados de la posición del conductor central) a lo largo de la zona de servidumbre, donde se realizaron incrementos de 5 m para escoger los puntos. En la comparación realizada entre los niveles de intensidad de campo eléctrico obtenidos mediante medición y simulación para los puntos escogidos, el máximo valor de error porcentual para ambos datos fue de 53,097% presentado a una distancia de 20 m.

También se pudo observar que en el intervalo de distancias horizontales que se encuentran sobre el semieje negativo de los perfiles (-40 m a 0 m), los errores porcentuales fueron más altos y por consiguiente se obtuvo una mayor dispersión entre los datos obtenidos de ambas gráficas. Por el contrario, sobre

el semieje positivo de los perfiles los errores porcentuales se redujeron, obteniéndose una mayor concordancia entre los datos para el intervalo de distancias horizontales comprendidas entre los 6,6 m y los 36 m; ya que al superponer ambos perfiles se puede observar que en algunos puntos los valores de intensidad de campo eléctrico aparentemente coinciden.

## **7 MEDIDAS DE PROTECCIÓN Y MÉTODOS DE MITIGACIÓN ANTE LA EXPOSICIÓN AL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN**

En la situación en la cual la exposición al campo eléctrico producido en las líneas de transmisión no cumple con los límites recomendados por los estándares internacionales, se deben tomar las acciones administrativas necesarias para reducir el riesgo a este tipo de exposición, las cuales son complementadas por las labores de ingeniería. Las industrias o compañías causantes de la exposición a campos eléctricos y magnéticos, son las responsables de asegurar el cumplimiento de todos los aspectos pertinentes a las medidas de protección y los métodos de mitigación que se deben gestionar a nivel administrativo y técnico.

Los campos eléctricos son más intensos cuanto menor es la distancia a la carga o conductor cargado que los genera, y su intensidad disminuye rápidamente al aumentar la distancia. Se ha comprobado que a distancias laterales del doble de la altura de la línea, la intensidad del campo eléctrico disminuye con la distancia aproximadamente de forma lineal.

En el caso de la exposición a ocupacionales, la ICNIRP establece que las medidas de protección para los trabajadores deben incluir controles de ingeniería y administrativos, programas de protección personal y vigilancia médica. A su vez, las medidas apropiadas de protección deben ser implementadas cuando la exposición en el lugar de trabajo excede las restricciones básicas.

Como primer paso deberían iniciarse controles de ingeniería donde sea posible, para reducir las emisiones de campos a niveles que sean aceptables. Tales controles deben incluir diseños seguros y el uso de apantallamientos o mecanismos similares de protección donde sea necesario.

Algunos de los controles administrativos que deberían implementarse en conjunción con los controles de ingeniería son: limitar el acceso a zonas donde los límites de exposición son excedidos poniendo advertencias audibles y visibles, educar a los trabajadores sobre los riesgos para la salud asociados a la exposición de campos electromagnéticos, cambiar las prácticas laborales de los empleados y formar comités para estudiar las posibles acciones de ingeniería que estén destinadas a aliviar este tipo de problemáticas.

Medidas personales de protección, tales como el uso de prendas apropiadas, aunque útiles en ciertas circunstancias, deberían ser consideradas como un último recurso para garantizar la seguridad del trabajador. Por lo tanto, se deben priorizar donde sea posible, los controles de ingeniería y administrativos.

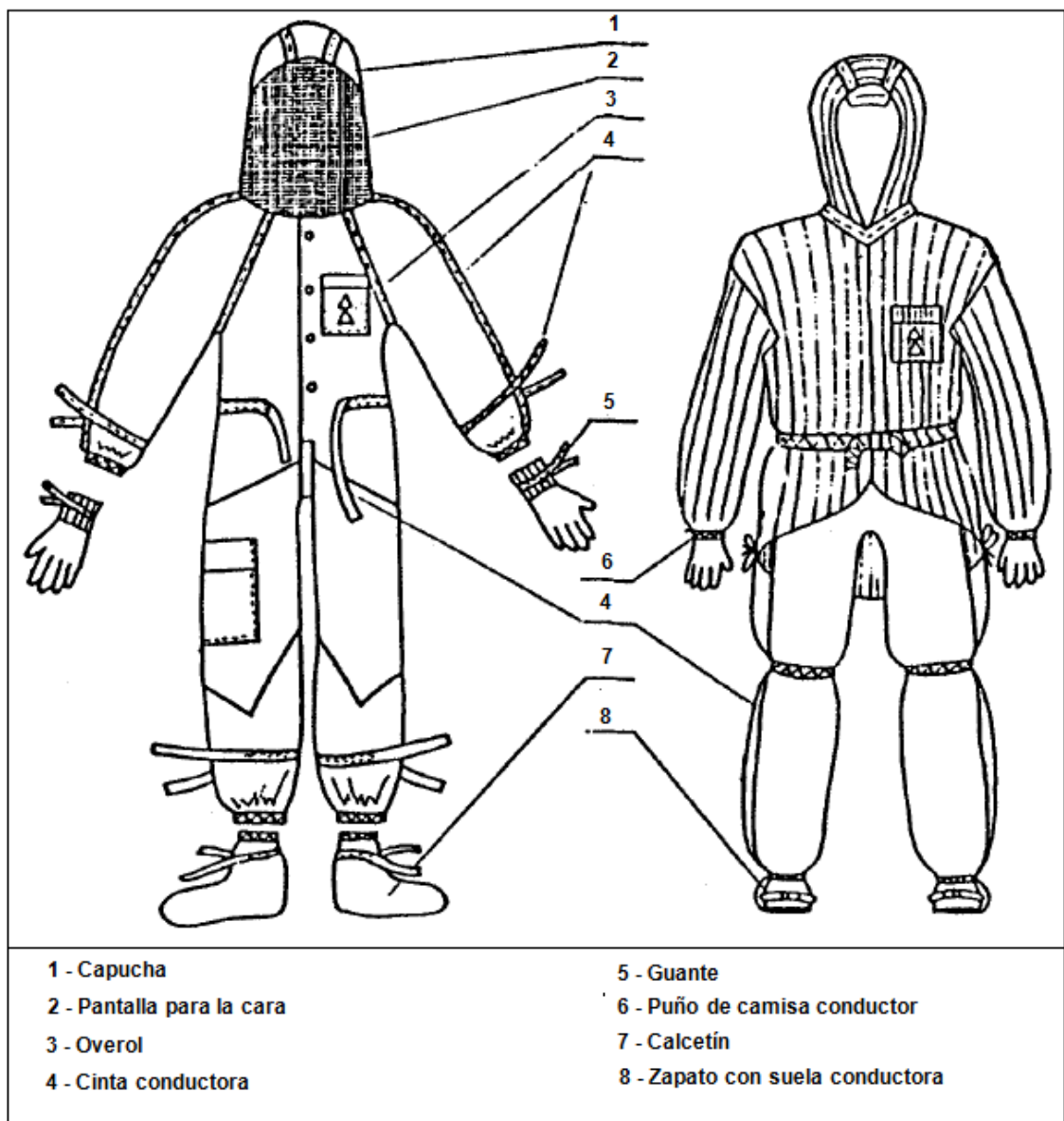
Los juegos de prendas protectoras, se han convertido en uno de los medios más económicos y eficientes para la protección del personal contra el impacto de los campos eléctricos. Estas prendas están hechas de una tela especial con hilos conductores especiales. Algunos bosquejos de juegos de prendas protectoras que brindan un apantallamiento contra este tipo de campos al personal que realiza trabajo en línea viva y en tierra, se puede ver en la Figura 26, cuya implementación para su uso se realizó inicialmente en Ucrania, donde se elaboró un reporte de investigación sobre los métodos de protección personal contra el impacto de los campos electromagnéticos [37].

En Colombia, el RETIE en el Artículo 20.2, estipula los procedimientos de ejecución como requisitos para trabajo en media y alta tensión. De allí se puede citar: *“Ningún operario podrá participar en un trabajo en tensión si no dispone en la zona de trabajo de sus elementos de protección personal, que comprende, los siguientes elementos:*

- *En todos los casos: Casco aislante de protección y guantes de protección.*
- *En cada caso particular, los equipos previstos en los procedimientos de ejecución a utilizar serán, entre otros: Botas dieléctricas o calzado especial*

con suela conductora para los trabajos a potencial, dos pares de guantes aislantes del modelo apropiado a los trabajos a realizar, gafas de protección contra rayos ultravioleta, manguitos aislantes, herramientas aislantes<sup>50</sup>.

**Figura 26.** Juegos individuales de prendas protectoras para realizar trabajo en línea viva (izquierda) y en tierra (derecha).



**Fuente:** UDOS E. I., TALOVERYA V. L. y NIJNIK L. P. Shielding of workers from electric and magnetic fields during live line work in Ukraine. 1995.

<sup>50</sup> Ibid., p.112

Exceptuando el uso de prendas apropiadas y otros mecanismos de protección de tipo personal, las mismas medidas pueden ser aplicadas al público en general, siempre que exista la posibilidad de que sean excedidos los niveles de referencia para la exposición al campo eléctrico de este tipo de población.

## **7.1 TÉCNICAS DE INGENIERÍA QUE PUEDEN SER USADAS PARA MINIMIZAR LA EXPOSICIÓN AL CAMPO ELÉCTRICO PRODUCIDO POR LAS LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN**

Algunas de las técnicas de ingeniería usadas para mitigar la exposición a campos eléctricos de frecuencia industrial proveniente de las líneas de alta tensión se explicarán a continuación. Algunas prácticas involucran un cambio en la geometría de la línea, mientras que otras implican el uso de los métodos de apantallamiento más conocidos.

### **7.1.1 Efectos por cambios en la geometría de la línea.**

El campo eléctrico al nivel del suelo en las inmediaciones de una línea de transmisión, está en función de los parámetros físicos que configuran la línea. Por lo tanto, los efectos del campo pueden ser minimizados en cierta medida con un diseño apropiado para la línea. Algunos cambios en el diseño de la línea pueden afectar el campo eléctrico debajo o cerca de la línea (donde existe el máximo valor de campo).

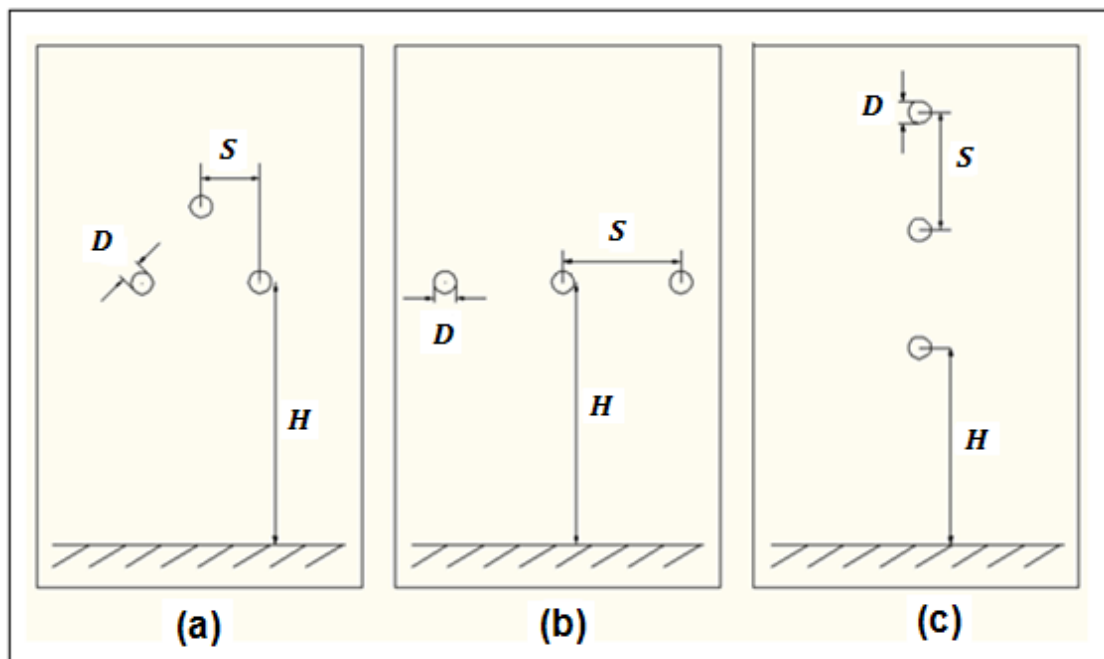
Dentro de las modificaciones en el diseño de las líneas de alta tensión que son realizadas para reducir la intensidad de campo eléctrico al nivel del suelo, los siguientes parámetros son considerados: configuración de la línea, altura, flecha, dimensiones del conductor, espaciamiento entre fases y cables de guarda.

### 7.1.1.1 Configuración de la línea.

En la Figura 27 se muestran los tres modelos que se van a considerar para la configuración de líneas de transmisión: delta equilátero, horizontal y vertical. En esta figura  $S$  es la distancia mínima entre fases,  $H$  es la altura mínima desde el centro de la línea a la tierra y  $D$  es el diámetro equivalente del conductor configurado en haz.

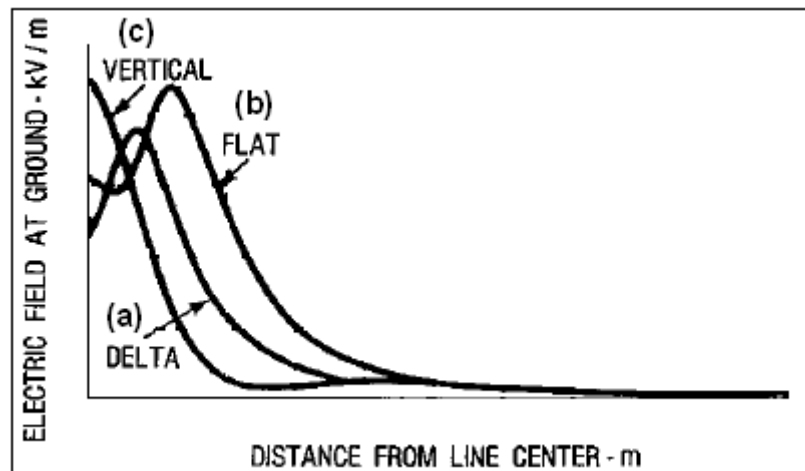
Además se supone que el nivel de tensión, el espaciamiento entre fases, el diámetro del conductor y la altura sobre el piso son iguales para los tres casos. El valor más bajo para el campo eléctrico máximo al nivel del suelo se presenta en la configuración delta equilátera, mientras que el valor más alto se da para las configuraciones vertical y horizontal. Para la configuración delta equilátera, el perfil de campo eléctrico al nivel del suelo se sitúa entre los de las configuraciones horizontal y vertical, tal y como se muestra en la Figura 28.

**Figura 27.** Tipos de configuración de línea: (a) delta equilátera, (b) horizontal, y (c) vertical.



**Fuente:** EPRI. Transmission line reference book 345 kV and above. 1982.

**Figura 28.** Perfiles laterales de campo eléctrico al nivel del suelo para líneas de configuración: (a) delta equilátera, (b) horizontal, y (c) vertical.



**Fuente:** EPRI. Transmission line reference book 345 kV and above. 1982.

El campo eléctrico fuera del corredor de transmisión es extremadamente bajo para líneas con configuración vertical, y es el más alto para líneas con configuración horizontal. Hay que señalar, sin embargo, que las líneas con configuración vertical requieren de torres más altas.

#### 7.1.1.2 Altura de la línea.

El incremento en la altura de la línea es la técnica de cambio de diseño más efectiva para reducir el campo máximo al nivel del suelo. Sin embargo, un incremento en la altura de la línea requiere del uso de torres más altas y que estén dispuestas de forma más frecuente. La relación entre la altura,  $H$ , y el campo,  $E$ , se puede expresar por medio de la ecuación empírica:

$$\left(\frac{E_1}{E_2}\right) = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^m \quad (7.1)$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$ , son los valores máximos de campo para las líneas de alturas mínimas  $H_1$  y  $H_2$ , respectivamente. El valor de  $m$  depende de la geometría. Para  $S/H = 1$  y  $S/D = 3,3$ ,  $m = -1,4$  en líneas trifásicas de configuración horizontal, y  $m = -1,6$  en líneas trifásicas de configuración delta equilátera.

El campo eléctrico al nivel del suelo fuera del corredor de transmisión está influenciado de una forma completamente diferente por el cambio en la altura de la línea. En la Figura 29 se muestra que un incremento en la altura de la línea causa un decremento en el campo sobre una distancia crítica,  $L_c$ , desde el centro de la línea pero causa un incremento en el campo a distancias más grandes que  $L_c$ . La distancia crítica,  $L_c$ , a la cual un cambio en la altura de la línea no causa un cambio en el campo eléctrico está en función de los parámetros de la línea.

#### **7.1.1.3 Flecha de la línea.**

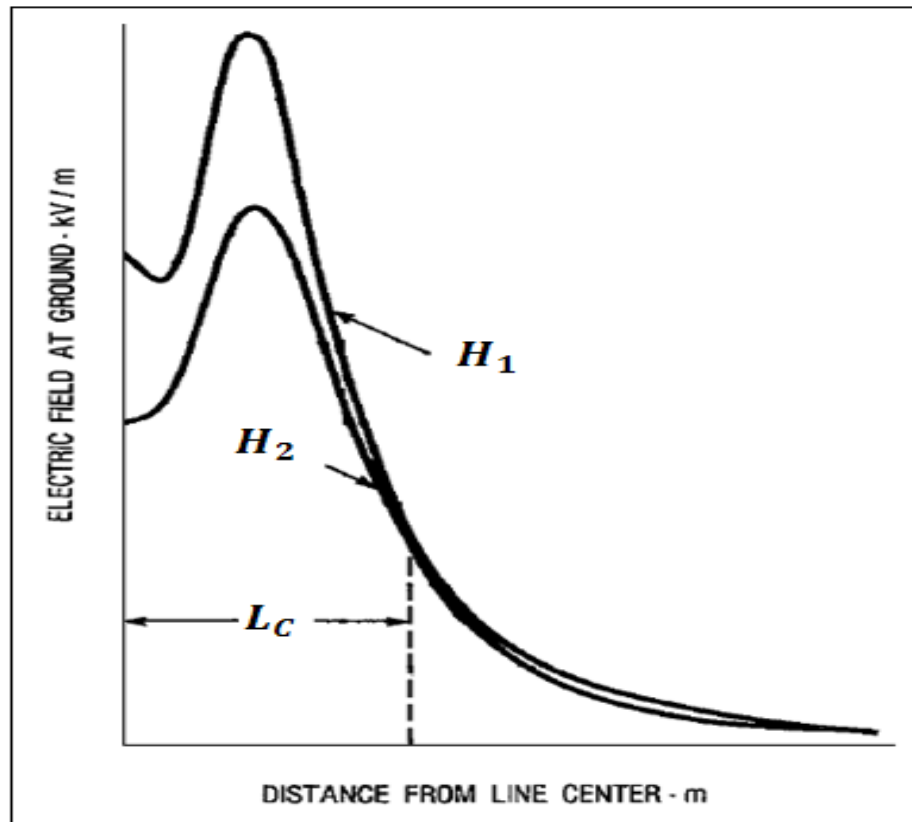
El efecto de la flecha es generalmente despreciado si el perfil lateral es tomado en el punto más bajo de la catenaria. En ese caso, la diferencia en los cálculos del campo eléctrico al nivel del suelo, con y sin consideración de la flecha, es de menos del  $\pm 1\%$  dentro del corredor de transmisión.

#### **7.1.1.4 Dimensiones del conductor.**

El efecto de las dimensiones del conductor puede ser evaluado usando, en el caso de aquellos que están configurados en forma de haz, el radio equivalente del conductor expresado por la Ecuación 1.13.

El efecto del diámetro equivalente del conductor ( $D$ ) sobre el campo fuera del corredor de transmisión es prácticamente el mismo que el efecto sobre el campo máximo, esto es, que en todos los puntos el campo eléctrico cambia en proporción a las cargas sobre los conductores.

**Figura 29.** Efecto del cambio en la altura de la línea ( $H_1 < H_2$ ) sobre el campo eléctrico al nivel del suelo.



**Fuente:** EPRI. Transmission line reference book 345 kV and above. 1982.

Para líneas trifásicas, la dependencia del campo al nivel del suelo sobre el diámetro de los conductores puede ser expresada por la ecuación de aproximación:

$$E_1/E_2 \approx \frac{\ln(2S/D_2)}{\ln(2S/D_1)} \quad (7.2)$$

Donde  $E_1$  y  $E_2$  son los campos eléctricos al nivel del suelo para líneas con un espaciamiento entre fases  $S$  y diámetros  $D_1$  y  $D_2$ , respectivamente. Usando la Ecuación 7.2, el efecto del diámetro puede ser fácilmente verificado.

Sin embargo, se requieren cambios drásticos en las dimensiones del conductor para afectar apreciablemente el campo al nivel del suelo. Estos cambios no siempre están entre las opciones más recomendables debido a costos, efecto corona, u otras razones.

#### **7.1.1.5 Espaciamiento entre fases.**

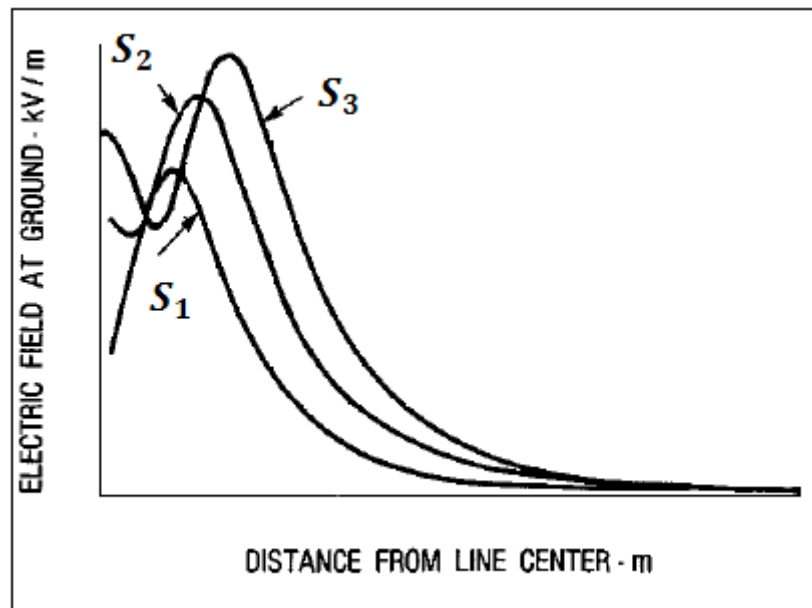
Las líneas de alta tensión más compactas producen un menor campo eléctrico al nivel del suelo. Este efecto se puede mostrar claramente en la Figura 30 para una línea de configuración horizontal.

Por lo tanto, la compactación de líneas de extra-alta tensión es muy atractiva para propósitos de reducción del campo eléctrico, sin embargo, requiere de torres sin miembros metálicos entre fases, lo que puede causar un deterioro de la línea por causa del efecto corona. A su vez, una reducción en el espaciamiento entre fases puede requerir de conductores más largos y en mayor número, para evitar un incremento en el ruido audible y en las señales de radio.

#### **7.1.1.6 Cable(s) de guarda.**

Prácticamente, los cables de guarda para protección ante rayo, no tienen influencia sobre el campo eléctrico al nivel del suelo. Su presencia causa una reducción de no más del 1-2% del campo eléctrico en tierra, esto es debido a que los cables de guarda están sobre el conductor de fase, a una mayor distancia del suelo, y no se encuentran energizados.

**Figura 30.** Efecto del cambio en el espaciamiento entre fases de la línea ( $S_1 < S_2 < S_3$ ) sobre el campo eléctrico al nivel del suelo.



**Fuente:** EPRI. Transmission line reference book 345 kV and above. 1982.

### 7.1.2 Métodos de apantallamiento.

Los materiales conductores, como los metales, proporcionan una protección eficaz contra los campos eléctricos. Los árboles y los materiales de construcción, también presentan cierta capacidad protectora. Por consiguiente, las paredes, los edificios y los árboles reducen la intensidad de los campos eléctricos de las líneas de conducción eléctrica situadas en el exterior de las casas.

Apantallar el área de interés de los conductores de alta tensión, se ha convertido en un método eficaz para minimizar los efectos del campo eléctrico. Diferentes métodos de apantallamiento se han convertido en medios alternativos para alcanzar este objetivo. Cualquier opción que se escoja, depende de algunas consideraciones subjetivas que usualmente están en función de las condiciones locales. Los métodos de apantallamiento se pueden

clasificar en pasivos si el apantallamiento está provisto por un aterramiento de objetos conductores, o en activos si el apantallamiento está provisto de conductores energizados a tensiones apropiadas. Algunos de estos métodos son:

- El apantallamiento mediante una malla de cables aterrizados, dispuesta horizontalmente o verticalmente. Para ello se emplean cables paralelos, que son sostenidos mediante apoyos que se encuentran conectados sólidamente a tierra. Los cables que conforman la pantalla adquieren el campo eléctrico generado por la línea de transmisión, y las corrientes inducidas se neutralizan conduciéndolas a tierra. Se deben realizar todos los cálculos pertinentes para determinar el espaciamiento entre los cables de protección, lo cual es necesario para obtener la eficiencia deseada para el apantallamiento.
- El apantallamiento conseguido a través de medios naturales, mediante la siembra de árboles o con la construcción de edificaciones cerca de las líneas de alta tensión. Por ejemplo, los arboles, se han convertido en una solución efectiva de protección al campo eléctrico de las líneas de alta tensión, cuyas ventajas en el aspecto estético y algunas veces en el económico, superan con creces a las ofrecidas por el apantallamiento a través de una malla de cables. Sin embargo, el crecimiento hasta tamaños indeseados y la muerte natural acompañada de la posterior caída del árbol, se han convertido en algunas de sus desventajas.

## 8 DOCUMENTO DE DIVULGACIÓN

Este capítulo se diseñó con el propósito de crear una herramienta informativa, que en cierto sentido de respuesta a la necesidad que hay en la población de comprender los efectos potencialmente perjudiciales sobre la salud de las personas que tienen los campos eléctricos y magnéticos producidos en las líneas de alta tensión.

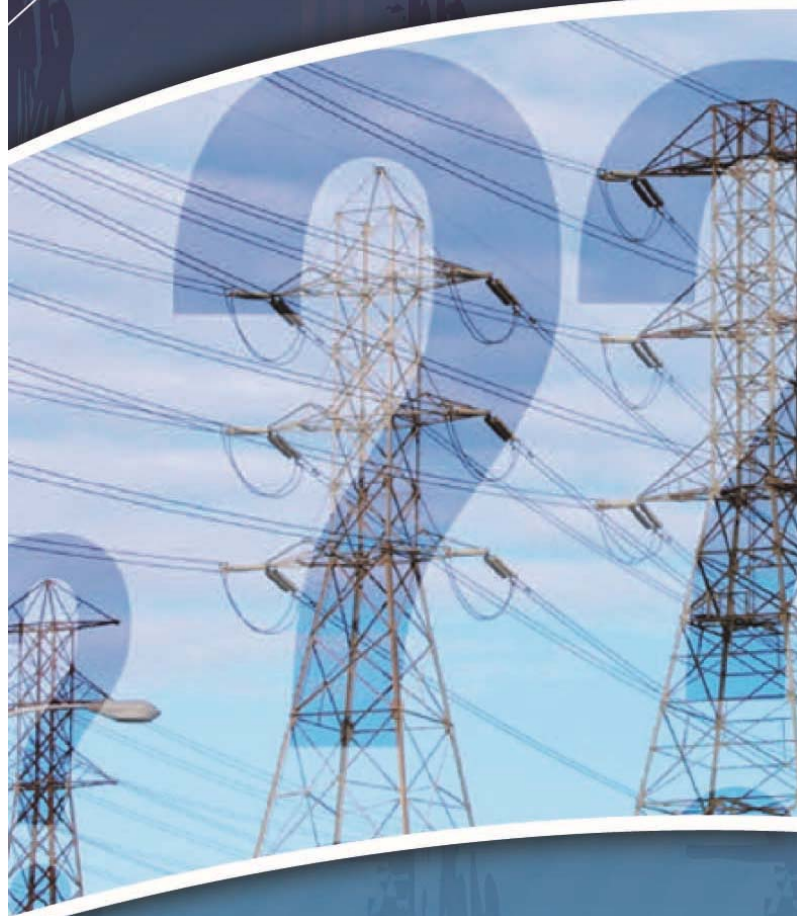
La comunidad científica y las organizaciones internacionales comunican los resultados técnicos derivados de las investigaciones a través de publicaciones de diferente valor científico, revisiones de expertos y evaluaciones de riesgo. Adicionalmente, la información científica ha comprobado ser valiosa para la toma de decisiones en salud pública, y los resultados de sus investigaciones pueden ser incorporados en el desarrollo e implementación de políticas y estándares.

Sin embargo, debido a que los resultados de las investigaciones actuales son frecuentemente contradictorios y a la complejidad con la cual puede ser presentada esta información; es posible que se pueda llegar a generar inquietudes y especulaciones en la población, conduciendo a la deducción de conclusiones incorrectas en la opinión pública debido al desconocimiento del tema.

Para dar respuesta a lo anterior, se pensó en la elaboración de un folleto que sirva como un instrumento divulgativo, proporcionando así, la información de una manera que sea comprensible para el público en su totalidad. La divulgación se debe realizar simplificando el mensaje emitido por los organismos internacionales, mediante el uso de un lenguaje accesible a los miembros de la comunidad afectada por la presencia de líneas de transmisión y distribución, ya sea en el sector público u ocupacional.

A continuación, se muestra el folleto diseñado por los autores, con el cual se pretende sensibilizar a la población acerca de la problemática que comprende la exposición incontrolada al campo eléctrico y magnético producido en las líneas de alta tensión y las posibles consecuencias sanitarias asociadas a este hecho.

# CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN



Preguntas y respuestas acerca de  
su exposición a la población



En la sociedad moderna, los campos eléctricos y magnéticos se pueden encontrar en todas partes. Todos estamos expuestos continuamente a una mezcla compleja de campos eléctricos y magnéticos a una gran variedad de frecuencias, en el hogar y en el trabajo. Algunas de las principales fuentes de campos eléctricos y magnéticos son: las líneas de energía, los artefactos electrodomésticos, los radares, las instalaciones de radio y televisión, los teléfonos móviles y sus estaciones base.

Los campos eléctricos y magnéticos se pueden considerar como líneas invisibles de fuerza creadas por cualquier carga eléctrica. A medida que nos alejemos de la fuente, la magnitud de esas fuerzas decrece rápidamente.

Los campos eléctricos tienen su origen en las diferencias de potencial o tensiones eléctricas. Cuanto mayor sea la tensión del conductor eléctrico, mayor será la intensidad del campo eléctrico a una determinada distancia de dicho conductor. Su intensidad se mide en Volts por metro (V/m).

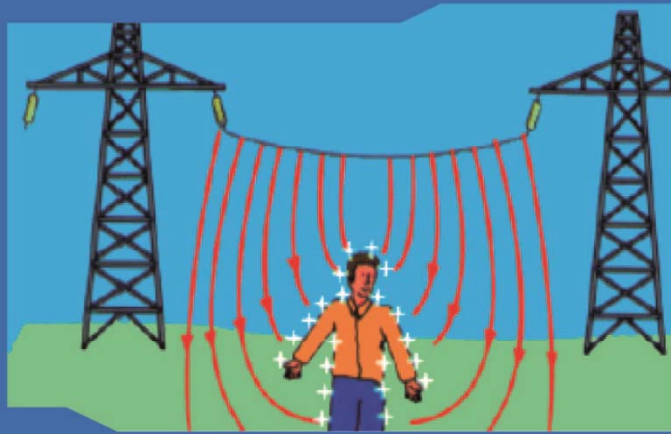
Los campos magnéticos tienen su origen en las corrientes eléctricas. Cuanto mayor sea la corriente que fluye por un conductor, mayor será la intensidad del campo magnético a una determinada distancia de dicho conductor. La cantidad usada para determinar su intensidad, es la densidad de flujo magnético, la cual se mide en Teslas (T).

En Colombia, los campos asociados con las líneas de alta tensión tienen una frecuencia de 60 Hz. Por esta razón se consideran campos de frecuencia extremadamente baja (campos FEB).

¿Qué ocurre cuando usted está expuesto a campos eléctricos y magnéticos que se generan en las líneas de alta tensión?

Los efectos de la exposición externa a campos eléctricos y magnéticos en el cuerpo humano, dependen fundamentalmente de la frecuencia y de la magnitud o intensidad de los campos.

Los campos eléctricos de baja frecuencia no penetran en el cuerpo significativamente, pero influyen la distribución de las cargas eléctricas en la superficie de los tejidos y causan el flujo de corrientes eléctricas en el cuerpo.



Los campos magnéticos de baja frecuencia inducen corrientes que circulan dentro del cuerpo humano. La intensidad de estas corrientes inducidas depende de la magnitud del campo magnético externo. Cuando estas corrientes son lo suficientemente grandes, pueden causar la estimulación de los nervios y músculos.



▶ 3

#### ►4

Según la Organización Mundial de la Salud - OMS, a pesar del gran número de estudios realizados, no hay evidencia confiable que permita concluir que exposiciones a los niveles de campos eléctricos y magnéticos que se pueden encontrar en las comunidades y ambientes ocupacionales, son adversos a la salud humana o causan alguna enfermedad.

Sólo se han admitido como probadas aquellas respuestas que pudieran deberse a la inducción de cargas y corrientes eléctricas capaces de afectar el funcionamiento de células y tejidos eléctricamente excitables. Sin embargo, a los niveles que son habituales en el medio ambiente, la magnitud de las corrientes inducidas por estos campos es inferior a la de las corrientes que se producen espontáneamente en el organismo de los seres humanos durante algunos de sus procesos naturales, como la transmisión de señales nerviosas o la actividad cerebral.

En lo que se refiere a los resultados de los estudios sobre los campos eléctricos, los datos que se disponen sugieren que, si exceptuamos la estimulación causada por las cargas eléctricas inducidas en la superficie de nuestro cuerpo, la exposición a campos no superiores a 20 kV/m (20 000V/m) produce unos efectos escasos e inoocuos.

En cuanto a los resultados de los estudios sobre los campos magnéticos, existen escasas pruebas experimentales confirmadas de que los campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas afecten la fisiología y el comportamiento humanos en las intensidades habituales en el medio ambiente.

¿Qué reglamentación limita la exposición a los campos eléctricos y magnéticos que se producen en las líneas de alta tensión?

En Colombia, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE, es el instrumento a través del cual se establecen los requisitos para intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético para las zonas donde puede permanecer público, independientemente del tiempo. La especificación de estos requisitos se realizó basándose en los criterios de la OMS y de la

► 5

Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes - ICNIRP.

Los valores límites de exposición a campos electromagnéticos para seres humanos que se establecieron en el RETIE, se muestran a continuación:

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico	Densidad de flujo magnético
Exposición ocupacional en un día de trabajo de 8 horas	10 kV/m (10 000 V/m)	500 $\mu$ T (0,0005 T)
Exposición del público en general hasta 8 horas continuas	5 kV/m (5000 V/m)	100 $\mu$ T (0,0001 T)

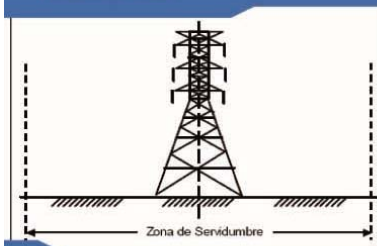
La exposición ocupacional es toda exposición a campos eléctricos y magnéticos que es experimentada por las personas durante la ejecución de su trabajo (por ejemplo, los empleados de las compañías de suministro eléctrico que trabajan en el mantenimiento de líneas de transmisión activas). La exposición del público en general es la exposición a campos eléctricos y magnéticos que es experimentada por los miembros de una población, excluyendo la exposición ocupacional.

Paras las líneas de transmisión, los valores de exposición ocupacional no deben ser superados a 1 m de altura dentro de la zona de servidumbre, y el valor de exposición al público en general en el límite exterior de la servidumbre.

¿Qué es la zona de servidumbre de una línea de alta tensión?

La zona de servidumbre, también conocida como zona de seguridad o derecho de vía, es una franja de terreno que se debe dejar a lo largo de una línea de transmisión cuya tensión nominal sea igual o mayor a 57,5 kV (57 500 V), para garantizar que bajo ninguna circunstancia se presenten accidentes con personas o animales, en cuanto a contactos directos e indirectos. Las restricciones que se apliquen sobre esta zona permiten que el campo electromagnético formado alrededor de una línea de transporte de energía eléctrica no cause perturbaciones al medio ambiente y menos a quienes lo habitan en la cercanía.

**No se debe construir dentro de la franja de servidumbre de las líneas de transmisión, ni mucho menos debajo de los cables.**



La empresa que preste el servicio de energía debe negárselo a quien construya invadiendo las áreas de servidumbre. A su vez, las oficinas de planeación municipal y las curadurías deberán tener en cuenta las zonas de servidumbre de las líneas y redes eléctricas, y no otorgar licencias de construcción en esos espacios.

## ►6 Algunas recomendaciones adicionales:

- El público en general debe establecer una actitud abierta y de diálogo con la empresa suministradora de electricidad durante las etapas de planificación de la instalación de un nuevo tendido eléctrico, lo cual va a permitir que se facilite la comprensión y la aceptación de la nueva instalación en los miembros de la comunidad.



- Se debe mantener una observancia estricta de las normas nacionales e internacionales existentes, en lo que se refiere a la limitación a la exposición a los campos electromagnéticos generados por las instalaciones de transmisión y distribución de la energía eléctrica.

- Las empresas públicas y privadas prestadoras del servicio de energía eléctrica son las responsables de asegurar el cumplimiento de los niveles de exposición al campo electromagnético generado en sus instalaciones. La población debe exigir que estas empresas realicen las correspondientes mediciones en las zonas de influencia de las líneas de transporte de energía eléctrica, con el propósito de corroborar que no se sobrepasen los niveles límites de exposición establecidos en el RETIE.

### **Para más información, consulte los siguientes sitios web:**

Ministerio de Minas y Energía (Descarga del RETIE última versión:  
Anexo General Resolución 18-1294 del 2008)

► <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivos/SoporteRevistas/3337.pdf>

Organización Mundial de la Salud – OMS

► [http://www.who.int/topics/electromagnetic\\_fields/es/](http://www.who.int/topics/electromagnetic_fields/es/)

Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes – ICNIRP.

► <http://www.icnirp.de/documents/emfgdlesp.pdf>

► **Elaborado por:**  
Alvaro Julián Fuentes Barrera y Rito Alberto Perico Arias  
Estudiantes de Ingeniería Eléctrica UIS

► **Revisado por:**  
Ing. M.P.E. Julio César Chacón Velasco  
Profesor asociado de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones UIS

## 9 CONCLUSIONES

- A pesar de todos los estudios en los que se ha investigado acerca de los posibles efectos en la salud humana de los campos eléctricos de frecuencias extremadamente bajas, los resultados obtenidos han sido contradictorios e inconsistentes. Según la OMS, la exposición a campos eléctricos no superiores a 20 kV/m produce unos efectos escasos e inocuos.
- La ICNIRP y el IEEE han dispuesto restricciones básicas, las cuales son limitaciones sobre la exposición a campos eléctricos y magnéticos, que están basadas directamente en los efectos en la salud ya demostrados. Así mismo, dentro de sus recomendaciones también han estipulado niveles de referencia (ICNIRP) ó máximos niveles de exposición permisibles (IEEE), los cuales son establecidos con el propósito de evaluar en forma práctica las exposiciones para determinar la posibilidad de que las restricciones básicas sean excedidas; utilizando la intensidad de campo eléctrico como cantidad física para su especificación.
- En Colombia, el RETIE se ha basado en los criterios de la OMS y de la ICNIRP para definir los valores límites de exposición a campos eléctricos para seres humanos; estableciendo intensidades de campo eléctrico de 10 kV/m y 5 kV/m para exposiciones de tipo ocupacional y poblacional (público en general) respectivamente, ambas contempladas para una exposición continua de 8 horas.
- Los niveles de referencia establecidos por el RETIE no se diferencian en mucho a los estipulados en las normas de la mayoría de países, sin embargo, son altos comparados con los límites de exposición al campo eléctrico dispuestos en algunas naciones como Argentina, Costa Rica, Japón, Rusia y en algunos Estados de EE.UU.

- Dentro de los estándares y recomendaciones de exposición se deben incluir ciertos requisitos; como el tipo de población expuesta (ocupacional o público general), la frecuencia, el nivel de exposición (nivel de referencia), duración de la exposición y si la exposición de cuerpo es parcial y/o total.
- Asegurando el cumplimiento de las distancias de seguridad normalizadas y respetando la restricción que hay sobre no construir edificaciones en las zonas de servidumbre de las líneas de transmisión de energía eléctrica; los valores de intensidad de campo eléctrico y magnético a los cuales está expuesto el público general que habita en los lugares próximos a este tipo de estructuras, son inferiores a los límites recomendados por las organizaciones internacionales para la exposición poblacional.
- En el estándar IEEE 644-1994 se establece una metodología normalizada para realizar la medición de la intensidad del campo eléctrico producido por las líneas de alta tensión, en los puntos cercanos al nivel del suelo empleando un medidor de cuerpo libre.
- Mediante el uso del software MATLAB, se desarrolló el programa *E\_perfiles.m*, que realiza el cálculo de la intensidad del campo eléctrico en los puntos cercanos a una línea de alta tensión, y el cual cuenta con algunos aspectos mejorados del programa utilizado últimamente para este mismo propósito en el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.
- Al confrontar los resultados obtenidos al realizar cálculo de la intensidad de campo eléctrico en una línea de 115 kV (efectuando su simulación con el programa *E\_perfiles.m*), con los resultados de las mediciones registradas para esa misma línea; se encontró que el máximo valor estimado para el error porcentual fue del 53,097%.

- Es posible reducir los niveles de exposición al campo eléctrico que son generados por una línea de alta tensión empleando algunas técnicas de ingeniería, como realizando el diseño de algún método de apantallamiento o cambiando algunos de los parámetros de la línea (rediseño de la línea). Sin embargo, también es efectiva la implementación de algunos controles administrativos, como la limitación del acceso a las zonas donde los límites de exposición son excedidos. También es efectivo el uso de prendas de protección personal en los trabajadores.
- El folleto diseñado durante la elaboración del presente trabajo de grado, es la representación de un instrumento divulgativo dirigido a la población en general, que permite proporcionar con un lenguaje de fácil comprensión, la información presentada por los organismos internacionales acerca de la problemática que comprende la exposición al campo eléctrico y magnético producido en las líneas de alta tensión.

## 10 RECOMENDACIONES

- Ante la falta de criterios unificados acerca de los riesgos que produce la exposición a campos electromagnéticos de FEB, por parte de las instituciones científicas que realizan dichos estudios; es necesario que la legislación colombiana aplique el principio de precaución (o cautela). Según la OMS, el principio de precaución (o cautela) es aplicado cuando hay un alto grado de incertidumbre científica y existe la necesidad de tomar acciones para riesgos potencialmente serios sin esperar resultados de más investigaciones científicas.
- A pesar de la dificultad existente para encontrar mediciones de intensidad de campo eléctrico en líneas de alta tensión en donde se realice un reporte completo de las características y parámetros físicos del tendido eléctrico, es necesario realizar más comparaciones de los resultados obtenidos a partir del programa *E\_perfiles.m* para casos reales en los cuales se disponga con resultados de mediciones. Estas comparaciones se deben efectuar con el propósito de poder contar con más ejemplos de confrontación que permitan realizar una verificación experimental de los valores calculados que componen los datos de salida del programa, los cuales son obtenidos cuando se desarrolla la simulación de líneas reales.
- La adquisición del equipo de medición de campo eléctrico y magnético por parte de la Universidad, permitirá que la institución pueda desarrollar estudios en lo que se refiere al tema de la contaminación generada por este tipo de campos en las instalaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica. La necesidad de que se empiecen a desarrollar este tipo de estudios en la región, se justifica desde el punto de vista ambiental, de salud pública, y de cumplimiento de las disposiciones legales que prevén esta problemática.

- Para que los valores límites de exposición estipulados por el RETIE concuerden con los niveles de referencia recomendados por el ICNIRP para campos eléctricos de 60 Hz, es necesario que en la normatividad colombiana se adopten los valores de intensidad de campo eléctrico de 8,3 kV/m y 4,2 kV/m como límites para la exposición ocupacional y del público en general.
- Para que se pueda evitar la contaminación debido a la presencia de niveles excesivos de campo eléctrico, es necesario que haya un cumplimiento cabal de la normatividad colombiana por parte de las empresas encargadas de la transmisión y distribución de la energía eléctrica; en lo que se refiere a las distancias mínimas de seguridad que se deben guardar entre las líneas eléctricas y los elementos físicos existentes a lo largo de su trazado, así como las zonas de servidumbre reglamentarias que deben de poseer las líneas de transmisión.
- Con respecto a la exposición del campo eléctrico a ocupacionales, las empresas encargadas de la transmisión y distribución de la energía eléctrica deben establecer medidas de protección a sus trabajadores, donde se incluyan controles administrativos y de ingeniería, programas de protección personal y vigilancia médica continua.
- Es necesario que la población tenga una observancia estricta de las normas nacionales e internacionales existentes, en lo que se refiere a la limitación a la exposición a los campos electromagnéticos generados por las instalaciones de transmisión y distribución de la energía eléctrica. Esta labor se debe realizar para que la ciudadanía tome las debidas precauciones cuando sienta vulnerado su derecho a la salud y a gozar de un ambiente sano, por parte de las empresas públicas y privadas prestadoras del servicio de energía eléctrica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. APONTE, Guillermo. Experiencia en la medición de campos eléctricos y magnéticos en redes eléctricas [diapositivas]. En: Encuentros ambientales 2006 – Foro: Contaminación electromagnética (27, abril: Barranquilla, Atlántico). Santiago de Cali: Universidad del Valle – Grupo GRALTA, 2006. 115 diapositivas.

[2]. APONTE, Guillermo, CADAVID Héctor, PÉREZ Rodrigo, ESCOBAR Adolfo, MORA Adolfo y BOLAÑOS Henry. Electric and magnetic fields measured in colombian lines and substations. En: IEEE Conferences: The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compability (11-16, mayo: Estambul, Turquía) [base de datos en línea]. Santiago de Cali: Universidad del Valle – COLCIENCIAS – EPSA, 2003, vol. 2, p. 1195-1198 [citado en septiembre de 2010]. Disponible en IEEE Xplore Digital Library.

[3]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. NBR 5422. Rio de Janeiro, Brasil.: 2003. 135 p.

[4]. AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AGENCY. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. Radiation Health Series [en línea]. 1989, no. 30 [citado el 15 de septiembre de 2010] 27 p. Disponible en internet: <<http://www.arpansa.gov.au/pubs/rhs/rhs30.pdf>>.

[5]. BEGAMUDRE, Rakosh Das. Extra high voltage AC transmission engineering. New York: John Wiley & sons; 1986. 460 p.

[6]. CARSTENSEN, Edwin. Biological effects of power frequency electric fields. En: Journal of Electrostatics [base de datos en línea]. Journal of Electrostatics

39, (1997); p. 157-174 [citado en septiembre del 2010] Disponible en ScienceDirect (Elsevier Data base).

[7]. CHRISTENSEN Douglas, FURSE Cynthia y DURNEY Carl. Basic introduction to bioelectromagnetics. En: CRC Press [base de datos en línea]. 2 ed., (2009); cap. 1, 2 y 5 [citado en septiembre de 2010]. Disponible en CRCnetBASE.

[8]. COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 18-1294 (6, agosto, 2008). Por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2008. 164 p.

[9]. COMISIÓN VENEZOLANA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma venezolana: Radiaciones ionizantes - Límites de exposición – Medidas de protección y control. COVENIN 2238. Caracas, Venezuela.: 2000. 16 p.

[10]. DÍAZ, Julián. Campo eléctrico. Determinación en líneas de alta tensión y estudio de su influencia en los seres humanos. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2000. 161 p.

[11]. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Transmission Line Reference Book 345 kV and above. 2 ed. Palo Alto, CA: EPRI. 1982. 625 p.

[12]. ESTÉVEZ, Samuel. Visión global, análisis y unificación de criterios para la atención de servidumbres en ISA. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2006. 152 p.

[13]. EUROPEAN UNION COUNCIL. Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz), (1999/519/EC) [en línea]. Disponible en internet: <[http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/electrical/files/lv/rec519\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/electrical/files/lv/rec519_en.pdf)> [citado el 15 de septiembre de 2010].

[14]. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields 0-3 KHz. IEEE Std C95.6. New York, USA: IEEE, 2002. 43 p.

[15]. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC power lines. IEEE Std 644. New York, USA: IEEE, 1994. 25 p.

[16]. INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics [en línea]. 1998, vol. 74, no. 4 [citado el 10 de septiembre de 2010] p. 494-522. Disponible en internet: <<http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>>.

[17]. INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS, WORKING GROUP 36-01 (INTERFERENCE AND FIELDS). Electric and magnetic fields produced by transmission systems: Description of phenomena – Practical guide for calculation. En: CIGRÉ International Conference on Large High Voltage Electric Systems. (1980: B<sup>d</sup> Haussmann, Paris, Francia). Memorias. Paris: 1980. 139 p.

[18]. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings – Special requirements for instruments and guidance for measurements. IEC 61786. 1 ed. Génova, Suiza: IEC, 1998. 177 p.

[19]. JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. 1 ed. Sèvres Cedex, Francia: JCGM member organizations (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML), 2008. 134 p.

[20]. LLAMOSA Enrique y TORRES Javier. Fundamentos para una propuesta de norma técnico ambiental sobre radiaciones electromagnéticas de frecuencia extremadamente baja (FEB). En: Revista Scientia et Technica. Octubre, 2003. no. 22, p. 143-148.

[21]. MATHWORKS. Creating a GUI with Guide [en línea]. Disponible en internet: <<http://www.mathworks.com/videos/matlab/creating-a-gui-with-guide.html>> [citado el 22 de noviembre de 2010].

[22]. MATHWORKS. MATLAB Getting started guide [en línea]. Disponible en internet: <[http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf)> [citado el 22 de noviembre de 2010].

[23]. NATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL HEALTH SCIENCES. Electric and magnetic fields associated with the use of electric power: questions & answers [en línea]. Disponible en internet: <<http://www.niehs.nih.gov/health/docs/emf-02.pdf>> [citado el 15 de septiembre de 2010].

[24]. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Estableciendo un diálogo sobre los riesgos de los campos electromagnéticos [en línea]. Ginebra (Suiza): Organización Mundial de la Salud, 2005 [citado el 21 de octubre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/emf\\_handbook\\_spanish.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/emf_handbook_spanish.pdf)>.

[25]. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Environmental Health Criteria No. 238: Extremely Low Frequency Fields [en línea]. Ginebra (Suiza):

Organización Mundial de la Salud, 2007 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/elf\\_ehc/en/index.html](http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)>.

[26]. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Marco para el desarrollo de estándares de campos electromagnéticos basados en la salud [en línea]. Lima (Perú): Organización Mundial de la Salud, 2006 [citado el 10 de septiembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.who.int/peh-emf/publications/EMF\\_standards\\_framework\\_ES.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/EMF_standards_framework_ES.pdf)>.

[27]. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. ¿Qué son los campos electromagnéticos? Definiciones y fuentes [en línea]. Disponible en internet: <<http://www.who.int/peh-emf/about/whatisEMF/es>> [citado el 10 de septiembre de 2010].

[28]. PÉREZ, Rodrigo. Medición y simulación de campos eléctricos y magnéticos de extremada baja frecuencia en líneas y subestaciones. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Santiago de Cali: Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2001.

[29]. POLK, Charles. Biological effects of low frequency electric and magnetic fields: an overview. En: IEEE Conferences: Proceedings of the 1992 Eighteenth IEEE Annual Northeast Bioengineering Conference (12-13, marzo: Kingston, Rhode Island, U.S.A) [base de datos en línea]. Department of Electrical Engineering, University of Rhode Island, 1992, p. 55-57 [citado en septiembre de 2010]. Disponible en IEEE Xplore Digital Library.

[30]. REITZ John, MILFORD Frederick y CHRISTY Robert. Fundamentos de la teoría electromagnética. 4 ed. Barcelona: Addison-Wesley Iberoamericana, 1996. 641 p.

[31]. RUGELES, Julio. Conceptos básicos en técnicas de alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Publicaciones UIS; 1991. 90 p.

[32]. SADIKU, Matthew. Elementos de electromagnetismo. 3 ed. México: Oxford University Press, 2003. 765 p.

[33]. SCHMID Wolfgang y LAZOS Rubén. Guía para estimar la incertidumbre de la medición [en línea]. El Marqués, Qro. (México): CENAM, 2000 [citado el 10 de noviembre de 2010]. Disponible en internet: <[http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/default.aspx?arch=/GUIA\\_P\\_ESTIMAR\\_INCERTIDUMBRE\\_Med%202004\\_09\\_27.pdf](http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/default.aspx?arch=/GUIA_P_ESTIMAR_INCERTIDUMBRE_Med%202004_09_27.pdf)>.

[34]. SKVARCA, Jorge. Overview of electromagnetic fields standards in Latin America: Current situation and policies. ICNIRP 6<sup>th</sup> International non-ionizing radiation workshop (2008: Río de Janeiro, Brazil) [en línea]. Disponible en internet: <<http://www.icnirp.de/NIR2008/Skvarka.pdf>> [citado el 15 de septiembre de 2010].

[35]. TORRES Javier y AGUDELO Luz Elena. Situación actual de la contaminación electromagnética no ionizante en Colombia. En: Revista Scientia et Technica. Agosto, 2007. no. 35, p. 427-432.

[36]. TROYA María y ZABALA Jamile. Influencia de la salud de la población expuesta a radiaciones no ionizantes con frecuencias comprendidas entre 0 Hz a 300 GHz, revisión documental. Trabajo de grado Especialista en Salud Ocupacional. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Enfermería – Facultad de Medicina. 2008, 116 p.

[37]. UDOD E. I., TALOVERYA V. L. y NIJNIK L. P. Shielding of workers from electric and magnetic fields during live line work in Ukraine. En: IEEE Conferences: Esmo-95 Proceedings The Seventh International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance (29 de

octubre – 3 de noviembre: Columbus, Ohio, U.S.A) [base de datos en línea].  
Ukrainian Power Research Institute – Ukrainian Mathematic Institute, 1995,  
p. 163-170 [citado en diciembre de 2010]. Disponible en IEEE Xplore Digital  
Library.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

### ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

TIPO DE RADIACIÓN	FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	UTILIZACIÓN
Radiación ionizante: Rayos cósmicos Rayos gamma Rayos X	>3000 THz	<100 nm	
Ultravioleta: • U.V. - C. • U.V. - B. • U.V. - A.	3000-1070 THz 1070-952 THz 952-750 THz	100-280 nm 280-315 nm 315-400 nm	
Luz visible	750-385 THz	400-779 nm	Iluminación
Radiofrecuencias:  • EHF (extremadamente alta frecuencia)  • SHL (súper alta frecuencia)  • UHF (ultra alta frecuencia)  • VHF (muy alta frecuencia)  • HF (alta frecuencia)  • MF (frecuencia media)	300-30 GHz  30-3 GHz  3-0,3 GHz  300-30 MHz  30-3 MHz  3-0,3 MHz	1-10 mm  1-10 mm  1-10 mm  1-10 mm  1-10 mm	Radar, hornos microondas  Satélites, radioaficionados  TV UHF, taxis, telefonía celular  Policía, TV VHF, radio FM  Comunicaciones internacionales, radio de onda corta  Radioteléfonos, radio AM, navegación
Bajas frecuencias:  • LF (baja frecuencia)  • VLF (muy baja frecuencia)  • ELF (extremadamente baja frecuencia)  • Estática	3000-30 kHz  30-0,3 kHz  300-3 Hz  0 Hz	1-10 mm  1-10 mm  >1000 km	Radiodifusión onda larga  Emisión catódica (TV, PC's)  Redes y sistemas eléctricos

## ANEXO B

### GENERALIDADES ACERCA DE LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN

Teniendo como referencia la *Guía para estimar la incertidumbre de la medición* publicado por el CENAM<sup>51</sup> [33] y la guía publicada por el JGCM<sup>52</sup> en *JGCM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)* [19], se hará una revisión del procedimiento necesario realizar la estimación de las incertidumbres de las mediciones cuando se lleva a cabo el tratamiento de datos experimentales.

La imperfección natural de la realización de las mediciones, hace imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de una magnitud. Por lo tanto, toda medición lleva implícita una incertidumbre, definida como un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurando<sup>53</sup> ( $Y$ ). En otras palabras, la incertidumbre de la medición, son los límites dentro de los cuales se espera que deban encontrarse el valor verdadero de lo que se está midiendo. El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mensurando y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor.

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurando y las variables físicas o químicas relevantes para la medición. Este modelo físico se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático. Considerando la medición como un proceso, se identifican las magnitudes de entrada<sup>54</sup> denotadas por el conjunto  $\{X_i\}$ ,

---

<sup>51</sup> CENAM, Centro Nacional de Metrología (México).

<sup>52</sup> JGCM, Joint Committee for Guides in Metrology, el cual es un comité adscrito al BIPM (Bureau International des Poids et Mesures).

<sup>53</sup> El mensurando es la magnitud física que está sometida a medición.

<sup>54</sup> Las magnitudes de entrada en un modelo de medición, son las cantidades que se deben medir, o cuyos valores pueden ser obtenidos de alguna otra manera, con el fin de calcular el valor medido de un mensurando. También pueden ser las que provienen de fuentes externas, tales como manuales o certificados. Pueden necesitar de correcciones de sus lecturas o de algunas magnitudes que las influyen. Mientras que la magnitud de salida en un

expresión en la cual el índice  $i$  toma valores entre 1 y el número de magnitudes de entrada  $N$ . La relación entre las magnitudes de entrada y el mensurando  $Y$  como la magnitud de salida se representa como la función expresada en la ecuación 1.

$$Y = f(\{X_i\}) = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

El mejor estimado del valor del mensurando es el resultado de calcular el valor de la función evaluada en el mejor estimado de cada magnitud de entrada, así como se expresa en la ecuación 2.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

Posteriormente, se deben identificar las posibles fuentes de incertidumbre. Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición, como por ejemplo: los resultados de la calibración del instrumento, la incertidumbre del patrón o del material de referencia, la repetibilidad<sup>55</sup> de las lecturas, la reproducibilidad<sup>56</sup> de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos, características del propio instrumento (como resolución, histéresis, deriva, etc.), variaciones de las condiciones ambientales, la definición del propio mensurando, el modelo particular de la medición y las variaciones en las magnitudes de influencia.

## I. Evaluación de la incertidumbre estándar.

En la literatura se distinguen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El *Método de Evaluación Tipo A* está basado en un

---

modelo de medición, es la cantidad que representa el valor medido, el cual es calculado usando los valores de entrada en un modelo de medición.

<sup>55</sup> La repetibilidad hace referencia al grado de concordancia entre los resultados de las mediciones sucesivas de un mismo mensurando, llevadas a cabo totalmente bajo las mismas condiciones de medición. Dichas condiciones incluyen el mismo procedimiento de medición, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas locaciones y condiciones de operación.

<sup>56</sup> La reproducibilidad hace referencia al grado de concordancia entre los resultados de las mediciones de un mismo mensurando, llevadas a cabo haciendo variar las condiciones de medición.

análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras el *Método de Evaluación Tipo B* comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre.

- **Método de evaluación Tipo A de la incertidumbre estándar.**

En el *Método de Evaluación Tipo A*, la incertidumbre de una magnitud de entrada  $X_i$  obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales. Si  $X_i$  se determina por  $n$  mediciones independientes, resultando en valores  $q_1, q_2, \dots, q_n$ ; el mejor estimado  $x_i$  para el valor de  $X_i$  es la media de los resultados individuales, tal y como se expresa en la ecuación 3.

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (3)$$

La dispersión de los resultados de la medición  $q_1, q_2, \dots, q_n$  para la magnitud de entrada  $X_i$  se expresa por su desviación estándar experimental, dada en la ecuación 4.

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (4)$$

La incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de  $X_i$  se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media, como se expresa en la ecuación 5.

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

- **Método de evaluación Tipo B de la incertidumbre estándar.**

En el *Método de Evaluación Tipo B*, las fuentes de incertidumbre son cuantificadas usando información externa u obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser: Certificados de calibración, manuales y especificaciones del instrumento de medición, normas o literatura, valores de mediciones anteriores y el conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

Es necesario asociar una distribución de probabilidad a cada fuente de incertidumbre, a la cual se debe referir el valor calculado. Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son la normal, rectangular y triangular. En general, cuando hay exclusivamente conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular. Este es el caso de la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En una distribución rectangular, cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad (es decir, una densidad de probabilidad constante en ese intervalo).

Luego, para obtener la incertidumbre estándar en el *Método de Evaluación Tipo B*, donde la magnitud de entrada presenta una distribución rectangular, cuyos límites superior e inferior son  $a_+$  y  $a_-$  respectivamente; se recurre a la ecuación 6.

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad (6)$$

En el caso donde se utilice equipos de medición con indicación digital, la expresión en el numerador de la ecuación 6 (indicada como la diferencia:  $a_+ - a_-$ ) puede ser reemplazada por el dato de la resolución del instrumento. La incertidumbre estándar también se puede calcular a través de la ecuación 7:

$$u(x_i) = \frac{(a/2)}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Donde  $a/2$  es el semi-ancho del intervalo  $a$ , con  $a = a_+ - a_-$ . Los datos de los errores proporcionados dentro de las especificaciones técnicas del fabricante (tales como los que se expresan en la exactitud, la estabilidad y/o la tolerancia del equipo de medición) y de los errores estimados para los parámetros expuestos en la sección 4.2.3 (como los errores por efectos de proximidad, campos no uniformes, etc.), se pueden introducir en la ecuación 7, realizando el reemplazo de la expresión en el numerador (indicada como:  $a/2$ ) por el del dato suministrado.

Cuando se dispone de la incertidumbre expandida  $U$  aportada dentro de los certificados de calibración del equipo de medición (para este tipo de fuentes de incertidumbre se asigna una distribución de probabilidad normal), el cálculo de la incertidumbre estándar se hace a partir de este dato, así como lo expresa la ecuación 8:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (8)$$

Donde  $k$  es el factor de cobertura, obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado.

Cuando la magnitud de entrada es afectada por varias fuentes de incertidumbre (que pueden ser por ejemplo la resolución del instrumento, la dispersión de datos obtenida por mediciones repetidas y la incertidumbre de la calibración del instrumento), se puede utilizar la ecuación 9 para calcular la incertidumbre total con cada magnitud de entrada  $X_i$  por la suma geométrica de las incertidumbres individuales.

$$u(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{M_i} [u_j(x_i)]^2} \quad (9)$$

Donde  $u_j(x_i)$  es la incertidumbre estándar de la fuente de incertidumbre número  $j$  de las  $M_i$  fuentes relacionadas con la magnitud de entrada  $X_i$ . Los valores de  $u(x_i)$  encontrados con la relación anterior, se introducen posteriormente en la ecuación 10 para encontrar la incertidumbre combinada ( $u_c(y)$ ).

## II. Determinación de la incertidumbre estándar combinada.

La incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$  se utiliza para expresar cuantitativamente la incertidumbre del resultado de una medición, y se puede obtener usando las incertidumbres estándar individuales asociadas con las magnitudes de entrada en un modelo de medición, tal y como lo expresa la ecuación 10:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right]^2} \quad (10)$$

Debido a que en las mediciones directas que se consideran en este trabajo, las cantidades de entrada son independientes entre sí (no correlacionadas), los coeficientes de sensibilidad de la ecuación 10 definidos por:  $\frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_N}$ ; son iguales a 1. Entonces, la incertidumbre combinada  $u_c(y)$  del resultado de la medición, a partir de la incertidumbre estándar estadística (*Método de Evaluación Tipo A*) y las incertidumbres evaluadas por

otros métodos (*Método de Evaluación Tipo B*), está determinada por la ecuación 11.

$$u_c(y) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (11)$$

### III. Determinación de la incertidumbre expandida.

Aunque la incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$  puede ser usada universalmente para expresar la incertidumbre del resultado de una medición, en algunas aplicaciones comerciales, industriales y regulatorias, y cuando se está involucrado en temas que se refieren a la salud y la seguridad; es a menudo necesario proporcionar una medida de la incertidumbre que define un intervalo sobre el resultado de la medición en la que se pueda esperar que abarque un gran fragmento de la distribución de los valores que puedan ser razonablemente atribuidos al mensurando. La medida adicional de la incertidumbre que cumple con el requisito de proporcionar la clase de intervalo mencionado anteriormente, es denominada como la incertidumbre expandida, y se denota con  $U$ .

Para poder estimar la incertidumbre expandida  $U$ , se debe conocer el número efectivo de grados de libertad  $v_{eff}$ , para lo cual se utiliza la relación de Welch-Satterthwaite:

$$v_{eff} = (u_c(y))^4 / \left( \sum_{i=1}^N \frac{(u_i(y))^4}{v_i} \right) \quad (12)$$

Donde  $v_i$  corresponde al número de grados de libertad de la variable aleatoria continua  $X_i$  determinada por  $n$  mediciones independientes, los cuales se pueden calcular con:

$$v_i = n - 1 \quad (13)$$

La incertidumbre expandida se calcula de acuerdo con la ecuación 14:

$$U = u_c(y) \cdot t_p(v_{eff}) \quad (14)$$

Donde  $t_p(v_{eff})$  es el factor derivado de la distribución-t de Student (que es igual al factor de cobertura  $k$ ) obtenido de la Tabla 1 para un nivel de confianza  $p$  escogido y con un número efectivo de grados de libertad  $v_{eff}$ .

#### **IV. Expresión de la incertidumbre.**

La expresión de la incertidumbre expandida ( $U$ ) incluye su indicación como intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando ( $y$ ), la afirmación donde se indique el valor elegido para el nivel de confianza ( $p$ ) y el número efectivo de grados de libertad ( $v_{eff}$ ), cuando sea requerido. Una manera de expresar el resultado de la medición es:

$$Y = y \pm U \quad (15)$$

El número de cifras significativas en la expresión de la incertidumbre es generalmente uno, o dos cuando la exactitud es alta. Además debe asegurarse que el número de cifras significativas del valor del mensurando sea consistente con el de la incertidumbre.

**Tabla 1.** Valores de  $t_p(v_{eff})$  de la distribución-t de Student para un número efectivo de grados de libertad  $v_{eff}$  que definen un intervalo de  $-t_p(v_{eff})$  a  $+t_p(v_{eff})$  que abarca la fracción  $p$  de la distribución.

$v_{eff}$	$p$					
	68,27%	90%	95%	95,45%	99%	99,73%
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
$\infty$	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

**Fuente:** JGCM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.

## ANEXO C

### HOJA DE DATOS TÍPICA PARA REGISTRAR LA INFORMACIÓN DE FONDO REQUERIDA PARA LAS MEDICIONES EN TERRENO DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE POTENCIA DE CA

- A. Voltaje de línea, kV / Corriente de línea, A
  - 1) Nominal
  - 2) Actual
- B. Conductores de la línea y cables de guarda
  - 1) Tipo
  - 2) Diámetro, cm
  - 3) Altura, m
  - 4) Relación de fases entre conductores
  - 5) Bosquejo de la configuración de las líneas
- C. Condiciones atmosféricas
  - 1) Temperatura, °C
  - 2) Humedad relativa
  - 3) Presión barométrica, Pa
  - 4) Velocidad del viento, m/s
  - 5) Despejado, lluvia, niebla, etc.
- D. Torres
  - 1) Metal
  - 2) Madera
  - 3) Otros
  - 4) Bosquejo con dimensiones
- E. Armónicos
  - 1) Contenido, Porcentaje
  - 2) Naturaleza de la fuente
  - 3) Distancia a la fuente, m
- F. Número de mediciones
- G. Instrumentos
  - 1) Tipo de medidor
    - a) Fabricante
    - b) Modelo
  - 2) Sonda y circuito de acondicionamiento de la señal
    - a) Descripción (forma)
    - b) Dimensiones
    - c) Circuito equivalente
    - d) Respuesta de frecuencia
    - e) Características direccionales
    - f) Intensidad de campo "Corona Onset"
    - g) Efectos de
      - I. Campos eléctricos o magnéticos
      - II. Temperatura
      - III. Humedad
    - h) Características de lectura (rms, etc.)
    - i) Precisión y sensibilidad
  - 3) Dispositivos de sujeción
    - a) Longitud
    - b) Características eléctricas

## **ANEXO C (Continuación)**

- 4) Cable de conexión (si el circuito de acondicionamiento de la señal está separado de la sonda)
  - a) Longitud
  - b) Tipo
- 5) Información de calibración (breve descripción)

## ANEXO D

### MANUAL DE USO DEL PROGRAMA *E\_perfiles.m*

El programa *E\_perfiles* realiza el cálculo de la intensidad de campo eléctrico que se produce por una línea de alta tensión en los puntos cercanos a la misma, realizando la gráfica del perfil lateral o transversal a lo largo de la zona de su servidumbre.

Igualmente, el programa está guardado en un archivo .m en lenguaje del ambiente de programación MATLAB, por lo cual, para obtener su funcionamiento es necesario llamarlo desde el espacio ejecutable que tiene MATLAB. Adicionalmente, se realizó la compilación del archivo ya mencionado (quedando como un archivo ejecutable o .exe), para que el programa pueda correr desde cualquier ordenador que no tenga instalado MATLAB.

Este programa selecciona puntos a lo largo del eje de la abscisa que compone las distancias horizontales que son transversales con respecto a la disposición a la línea de alta tensión. El usuario puede escoger cualquier punto como origen a lo largo de esta abscisa ( $-40 \text{ m} \leq X \leq 40 \text{ m}$ ), y posteriormente indicar la coordenadas de la ubicación de los conductores de fase y de guarda con referencia al punto de origen ya fijado.

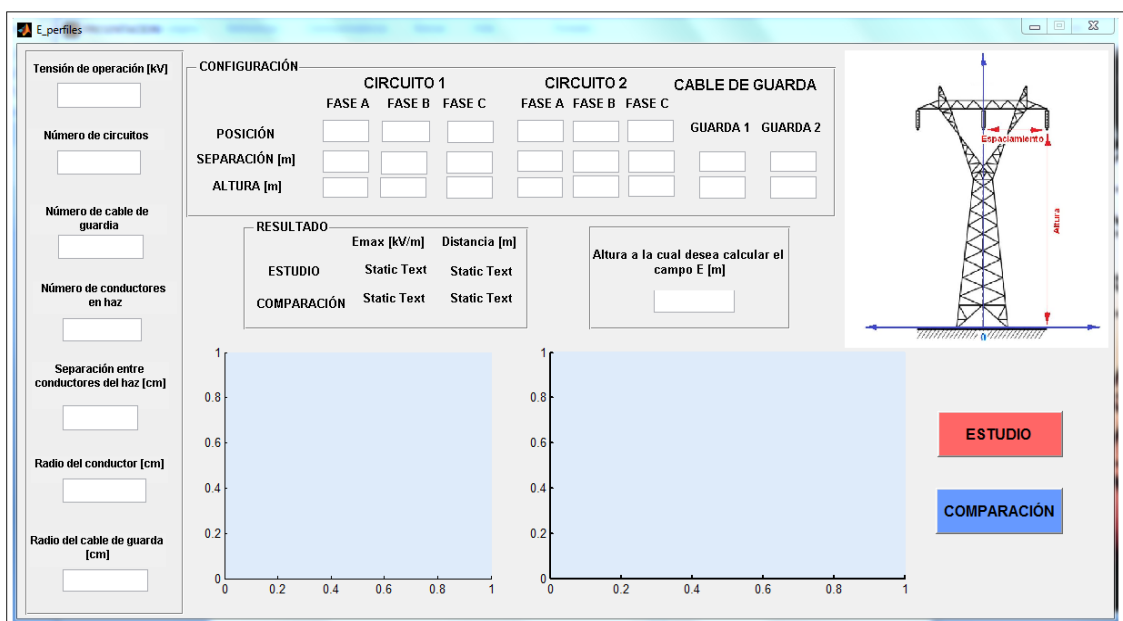
El usuario escoge la altura sobre la superficie del suelo a la cual se desea hacer el cálculo de la intensidad del campo eléctrico. Este valor es rotulado en el programa como "HE". Con base a lo anterior, el programa realiza el cálculo de la intensidad del campo eléctrico para cada punto de coordenadas "(X,HE)". Con los datos obtenidos el programa realiza la gráfica del perfil lateral o transversal del campo eléctrico generado, mediante la cual se puede analizar su comportamiento con respecto a la distancia horizontal.

## 1. Presentación del programa

La presentación del programa *E\_perfiles*, corresponde a dos archivos .fig. El primero es la ventana de presentación, en donde encontramos el título del programa y los nombres de sus autores y del director del proyecto.



En esta interfaz se encuentra un “pushbutton” llamado **SIMULAR**, con el cual se pasa a la siguiente ventana, que corresponde a la interfaz gráfica donde se da la entrada de los datos para simular un caso nuevo.



## **2. Entrada de datos**

### **2.1. Tensión de operación**

Se debe digitar la tensión línea-línea del sistema, en kilovoltios (kV).

### **2.2. Número de circuitos**

Se debe digitar el número de circuitos en el sistema (1 ó 2).

### **2.3. Número de cables de guarda**

Se debe digitar el número de cables de guarda (1 ó 2), si no posee cable de guarda se debe digitar 0.

### **2.4. Número de conductores en haz**

Se debe digitar el número de conductores del haz (si la línea posee una configuración de conductores en haz). Si solo tiene un conductor, digitar "1".

### **2.5. Separación entre los conductores del haz**

Si el número de conductores en haz es diferente de "1", se debe digitar la separación entre conductores del haz. Si la línea no posee una configuración de conductores en haz, este espacio debe dejarse en blanco.

### **2.6. Radio del conductor**

Se debe digitar el radio del conductor en centímetros (cm).

### **2.7. Radio del cable de guarda**

Se debe digitar el radio del cable de guarda en centímetros (cm).

### **2.8. Circuitos 1 y 2**

La ubicación de los conductores en cada circuito de la línea se realiza teniendo en cuenta que implícitamente el programa toma las siguientes referencias angulares por defecto:

- La fase A está a  $0^\circ$ .
- La fase B está a  $-120^\circ$ .
- La fase C está a  $120^\circ$ .

Por lo tanto, antes de que el programa pida las coordenadas de los conductores, primero solicita que se le asigne la fase correspondiente (A, B o C) a cada uno de los conductores que conforman la disposición geométrica de la línea (Conductor 1, 2, 3, 4, 5 ó 6); ya que el mencionado programa realiza la asignación de las coordenadas geométricas de acuerdo al número de conductor, más no a la fase a la cual corresponde.

## **2.9. Coordenadas**

Las coordenadas están compuestas por dos recuadros que corresponden a los valores que representan la separación entre los conductores y la altura sobre el nivel del suelo a la cual se encuentran. El programa solicita estos datos de entrada tanto para los conductores de fase como para los de guarda.

### **2.9.1. Separación**

El dato de la separación del conductor con respecto al punto de origen, se introduce en el programa teniendo en cuenta la distancia horizontal (en metros) a la cual se encuentra el conductor de fase con referencia al mencionado punto de origen, el cual fue definido inicialmente por el usuario (que por lo general coincide con la ubicación del conductor central de la línea o con la del eje simétrico de la estructura).

### **2.9.2. Altura**

La altura es la distancia vertical (en metros) a la cual se encuentra el conductor (fase o guarda) con referencia a la coordenada vertical del punto de origen, que siempre va a ser el suelo.

## **2.10. Altura a la cual se desea calcular el campo eléctrico**

En este recuadro se debe digitar la altura sobre el nivel del suelo (en metros) a la cual se desea calcular el campo eléctrico.

### 3. Opción ESTUDIO

Después de introducir completamente los datos de entrada en las áreas mostradas anteriormente, la activación de este “pushbutton” permite visualizar en la pantalla: el perfil lateral de intensidad de campo eléctrico, la configuración geométrica de la línea y en el panel de **RESULTADO** muestra el valor calculado para la intensidad máxima de campo eléctrico en la línea simulada, junto con la distancia horizontal en la cual se presenta dicho valor.

### 4. Opción COMPARACIÓN

Esta opción permite que el usuario pueda contrastar los resultados obtenidos al realizar uno o más cambios en los parámetros de entrada de la línea; ya que cuando se realizan estas variaciones en el caso que se ha simulado anteriormente, la selección del “pushbutton” que activa esta opción va a desplegar la nueva grafica superpuesta en la gráfica de estudio.

Se van a mostrar simultáneamente los dos perfiles laterales correspondientes al caso de simulación inicial y el caso alterado por los cambios efectuados. De forma similar, la selección de esta opción va a permitir comparar los valores de intensidad de campo máximos y la distancia horizontal en la cual se presentan, tanto para el caso inicial como para el caso alterado por los cambios efectuados.

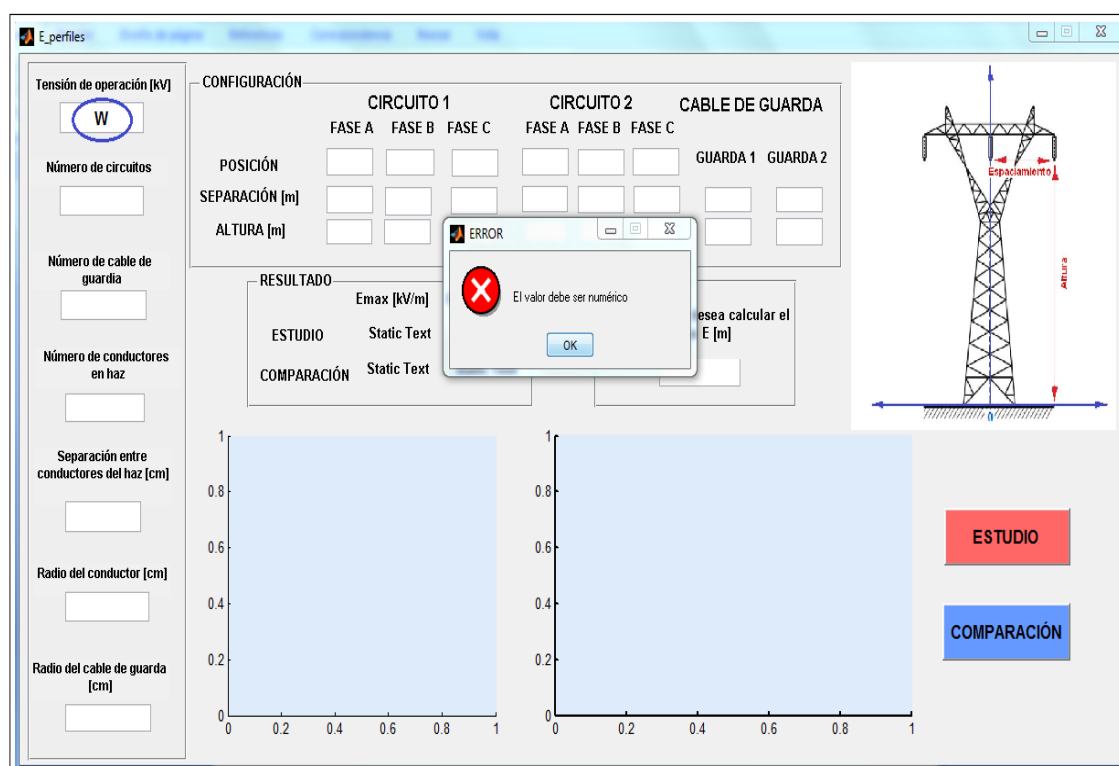
### 5. Resultados

Se presentan en el panel inferior demarcado con el nombre **RESULTADO**, en los espacios situados a la derecha de las opciones **ESTUDIO** y **COMPARACIÓN**. Durante la etapa de introducción de los datos de entrada, aparece la demarcación “Static Text” en estos espacios. Luego de seleccionar la opción **ESTUDIO** para simular un caso inicial, se mostrarán en el espacio adyacente a esta opción, los resultados correspondientes a la intensidad de campo eléctrico máximo ( $E_{max}$ ) y la distancia horizontal a la cual se presentan este valor.

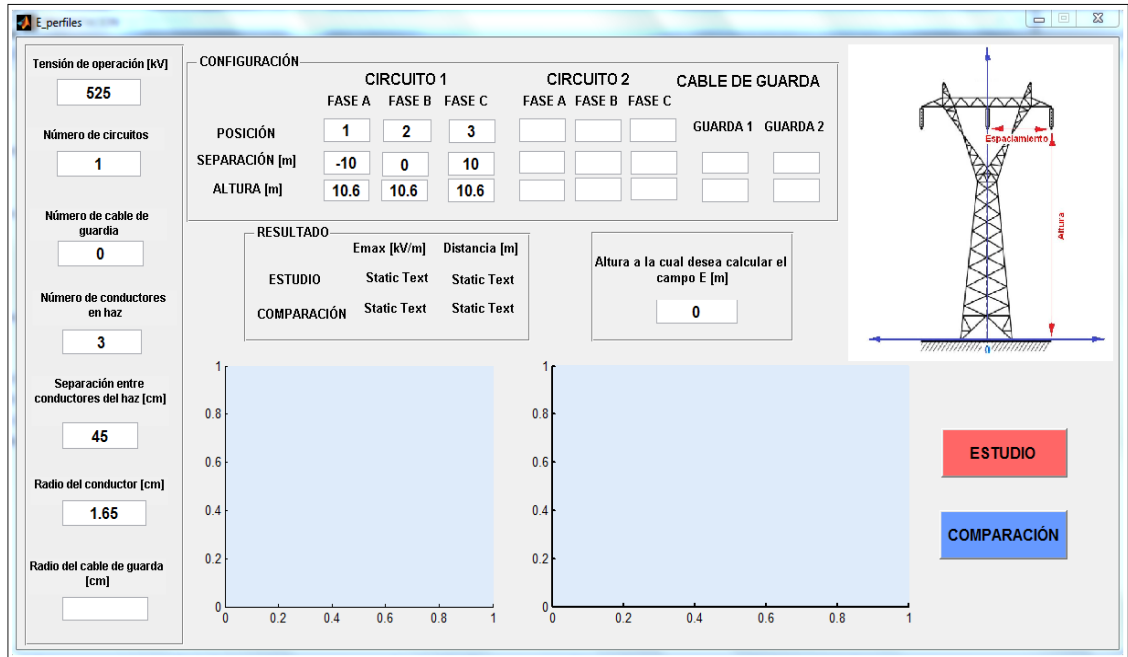
Igualmente, si posteriormente se selecciona la opción **COMPARACIÓN** (al realizar algún cambio en los parámetros iniciales de la línea), en el espacio adyacente a esta opción se mostrarán los resultados de intensidad de campo eléctrico máximo ( $E_{max}$ ) y la distancia horizontal a la cual se presenta este valor, ambos correspondientes al nuevo caso simulado.

**Nota:**

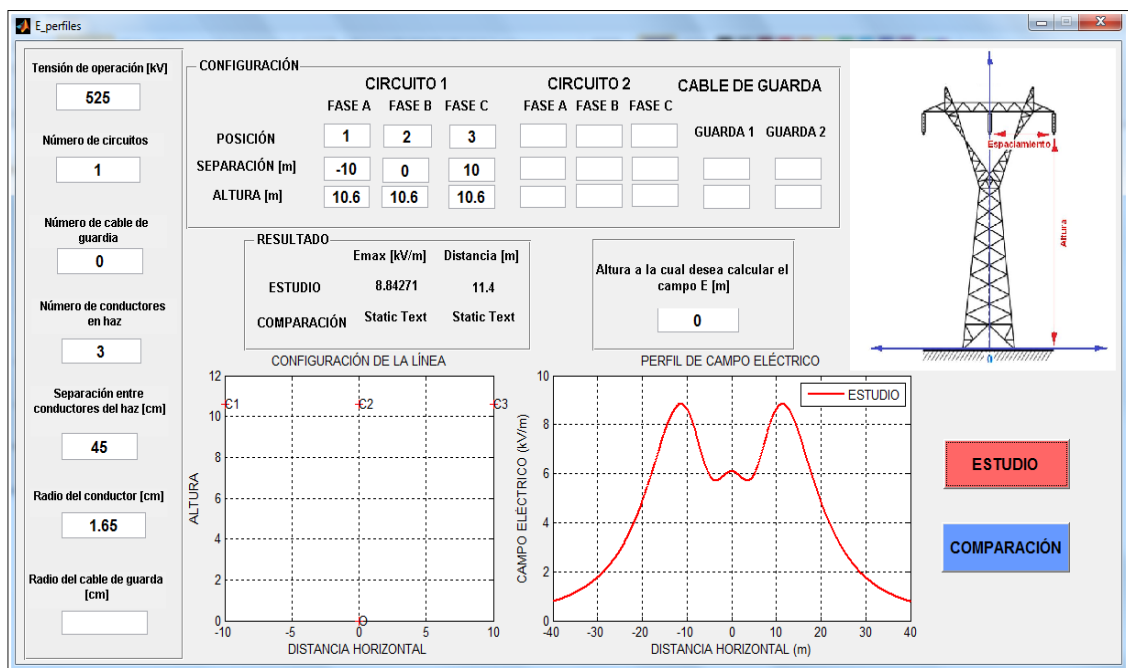
1. Los espacios que no se deban llenar (debido a que las características de la línea o la configuración del sistema no los requiere), se tienen que dejar en blanco.
2. Un mensaje de error aparecerá si la entrada es no válida, es decir, si se ingresan datos que no son numéricos.



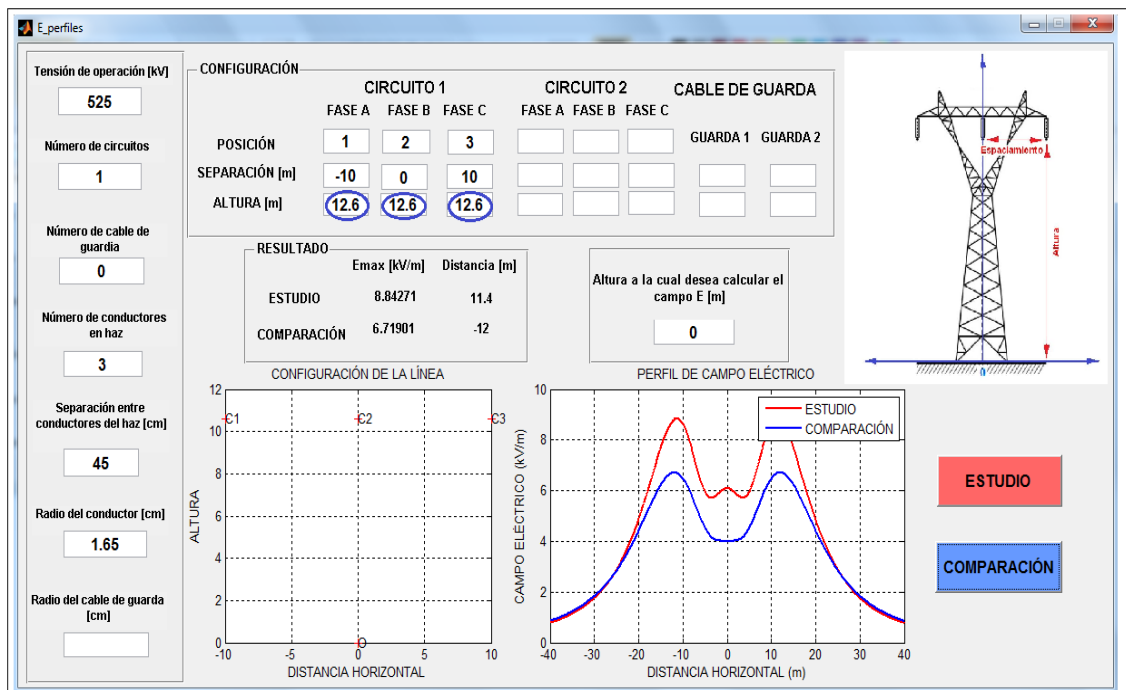
Como un ejemplo práctico que explica el modo de uso del programa, se va a realizar la simulación de un caso mostrado en el capítulo 8 del documento de la EPRI [11], donde los datos de entrada se muestran a continuación:



Como se ve en la siguiente captura de pantalla, al seleccionar el “pushbutton” **ESTUDIO** se obtienen las gráficas de configuración geométrica de la línea y de perfil lateral de campo, así como también se muestra en el panel **RESULTADOS** la intensidad de campo eléctrico máxima y la distancia respectiva a la cual se presenta.



Al realizar el cambio en la altura de la línea (indicado dentro de los círculos azules, en la captura de pantalla mostrada a continuación), y seleccionar posteriormente el “pushbutton” **COMPARACIÓN**, se despliegan simultáneamente la gráfica del perfil lateral de campo para caso en estudio y comparación, mostrándose en el panel **RESULTADOS**, el valor de la intensidad de campo máximo con la distancia en la cual se presenta, ambos datos de salida correspondientes al caso con los cambios efectuados.



## ANEXO E

### ESTRUCTURA DEL PROGRAMA *E\_perfiles.m*

```
function varargout = E_perfiles(varargin)
% E_PERFILES M-file for E_perfiles.fig
%     E_PERFILES, by itself, creates a new E_PERFILES or
raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = E_PERFILES returns the handle to a new E_PERFILES
or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     E_PERFILES('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...)
calls the local
%     function named CALLBACK in E_PERFILES.M with the given
input arguments.
%
%     E_PERFILES('Property','Value',...) creates a new
E_PERFILES or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property
value pairs are
%     applied to the GUI before E_perfiles_OpeningFcn gets
called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes
property application
%     stop. All inputs are passed to E_perfiles_OpeningFcn
via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI
allows only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help
E_perfiles

% Last Modified by GUIDE v2.5 08-Oct-2010 15:51:26

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @E_perfiles_OpeningFcn,
                  ...
                  'gui_OutputFcn',  @E_perfiles_OutputFcn,
                  ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
```

```

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before E_perfiles is made visible.
function E_perfiles_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% varargin   command line arguments to E_perfiles (see
VARARGIN)
axes(handles.axes3)
b = imread('configuracion2.jpg');
image(b)
axis off;

% Choose default command line output for E_perfiles
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes E_perfiles wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command
line.
function varargout = E_perfiles_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout  cell array for returning output args (see
VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit1 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit1=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorldg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit1,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit2 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit2=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorldg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit2,'String',0);

```

```

NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit3 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit3=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
    errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit3,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit4 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit4=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit4,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as
text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit5 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit5=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorldg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit5,'String',0);
NewVal=0;
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit6 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit6=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorldg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit6,'String',0);
NewVal=0;
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit7 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit7=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit7,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit8 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit8=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit8,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit9 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit9=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)

```

```

errorDlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit9,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit10 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit10=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorDlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit10,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit11 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit11=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit11,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit30_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit30 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit30 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit30 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit30=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit30,'String',0);
NewVal=0;
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit30_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to edit30 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit31_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to edit31 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see
GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit31 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit31 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit31=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit31,'String',0);
NewVal=0;
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit31_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit31 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit32_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit32 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit32 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit32 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit32=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
    errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit32,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit32_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit32 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit33_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit33 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit33 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit33 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit33=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorldg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit33,'String',0);
NewVal=0;
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit33_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit33 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.

```

```

%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit34_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit34 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit34 as
text

```

```

%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit34 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit34=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación

```

```

if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit34,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit34_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit34 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit35_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit35 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit35 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit35 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit35=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit35,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit35_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit35 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit36_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit36 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit36 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit36 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit36=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit36,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit36_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit36 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit37_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit37 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit37 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit37 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit37=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorldg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit37,'String',0);
NewVal=0;
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit37_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit37 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit38_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit38 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit38 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit38 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit38=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errorldg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit38,'String',0);
NewVal=0;
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit38_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit38 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit39_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit39 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit39 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit39 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit39=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
    errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit39,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit39_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit39 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit40_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit40 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit40 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit40 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit40=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit40,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit40_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit40 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit41_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit41 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit41 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit41 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double

```

```

handles.edit41=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit41,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit41_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit41 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit42_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit42 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit42 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit42 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit42=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit42,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit42_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit42 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit43_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit43 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit43 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit43 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit43=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit43,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit43_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit43 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit44_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit44 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit44 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit44 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit44=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit44,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit44_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit44 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit45_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit45 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit45 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit45 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit45=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit45,'String',0);

```

```

NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit45_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit45 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit46_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit46 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit46 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit46 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit46=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
    errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit46,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit46_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit46 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit47_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit47 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit47 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit47 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit47=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit47,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit47_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit47 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit48_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit48 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit48 as
text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit48 as a double
NewStrVal=get(hObject,'String'); %Almacenar valor ingresado
NewVal = str2double(NewStrVal); %Transformar a formato double
handles.edit48=NewVal; %Almacenar en puntero
guidata(hObject,handles); %Salvar datos de la aplicación
if isnan(NewVal)
errordlg('El valor debe ser numérico','ERROR')
set(handles.edit48,'String',0);
NewVal=0;
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit48_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit48 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% PROGRAMA PERFILES.m PARA CALCULAR EL CAMPO ELÉCTRICO EN
SITIOS;
% CERCANOS A LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN;

D=1;
SALIDA=0.0001;

V=handles.edit5;%input('Tensión de la línea (kV):');
N=handles.edit6;%input ('Número de circuitos:');
G=handles.edit7;%input ('Número de cables de guarda :');
C=handles.edit8;%input('Número de conductores en haz:');

if C~=1;
    S=handles.edit30;%input('Separación entre subconductores
(cm) :');
end

K=(3*N)+G;

```

```

B=[1:K]';
AVAN=[1:K]';
O=[1:K]';
T=[1:(3*N)]';

if G~=0;
    if N==1;
        I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
            end
        T(I)=[1+0i];
        I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
            end
        T(I)=[-0.5-0.866i];
        I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
            end
        T(I)=[-0.5+0.866i];
        if N==2;
            disp(' ');
            disp(' ');
            disp('En el segundo circuito');
            disp(' ');
            disp(' ');
            I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
                end
            T(I)=[1+0i];
            I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
                end
            T(I)=[-0.5-0.866i];
            I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
                end
            T(I)=[-0.5+0.866i];
        else
            end
        T1=V.*T;
        l=V/(sqrt(3));
    end
end

```

```

    u=1.*T;
else
    disp('En el primer circuito');
    disp(' ');
    disp(' ');
    I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[1+0i];
    I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[-0.5-0.866i];
    I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[-0.5+0.866i];
    if N==2;
        disp(' ');
        disp(' ');
        disp('En el segundo circuito');
        disp(' ');
        disp(' ');
        I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[1+0i];
        I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[-0.5-0.866i];
        I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[-0.5+0.866i];
    else
    end
    T1=V.*T;
    l=V/(sqrt(3));
    u=1.*T;
end

```

```

else
    if N==1;
        disp('En el primer circuito');
        disp(' ');
        disp(' ');
        I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[1+0i];
        I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[-0.5-0.866i];
        I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[-0.5+0.866i];
        if N==2;
            disp(' ');
            disp(' ');
            disp('En el segundo circuito');
            disp(' ');
            disp(' ');
            I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
            end
            T(I)=[1+0i];
            I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
            end
            T(I)=[-0.5-0.866i];
            I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
            end
            T(I)=[-0.5+0.866i];
        else
        end
        T1=V.*T;
        l=V/(sqrt(3));
        u=l.*T;
    else

```

```

disp('En el primer circuito');
disp(' ');
disp(' ');
I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
    error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[1+0i];
I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
    error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5-0.866i];
I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
    error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5+0.866i];
if N==2;
    disp(' ');
    disp(' ');
    disp('En el segundo circuito');
    disp(' ');
    disp(' ');
    I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[1+0i];
    I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[-0.5-0.866i];
    I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[-0.5+0.866i];
else
end
T1=V.*T;
l=V/(sqrt(3));
u=l.*T;
end
end
H=1;Z=3*N;

```

```

R=handles.edit9;%input('Radio del conductor (cm):');
disp(' ');
if R==SALIDA;
    error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else

end
R1=R;
if N==1;
    AVAN(1)=handles.edit32;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(2)=handles.edit34;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(3)=handles.edit36;%input('                Abcisa (m)
:');
    O(1)=handles.edit33;%input('                Ordenada (m):');
    O(2)=handles.edit35;%input('                Ordenada (m):');
    O(3)=handles.edit37;%input('                Ordenada (m):');
    if N==2
        AVAN(4)=handles.edit41;%input('                Abcisa (m)
:');
        AVAN(5)=handles.edit43;%input('                Abcisa (m)
:');
        AVAN(6)=handles.edit45;%input('                Abcisa (m)
:');
        O(4)=handles.edit42;%input('                Ordenada (m):');
        O(5)=handles.edit44;%input('                Ordenada (m):');
        O(6)=handles.edit46;%input('                Ordenada (m):');
    else
    end
else
    AVAN(1)=handles.edit32;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(2)=handles.edit34;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(3)=handles.edit36;%input('                Abcisa (m)
:');
    O(1)=handles.edit33;%input('                Ordenada (m):');
    O(2)=handles.edit35;%input('                Ordenada (m):');
    O(3)=handles.edit37;%input('                Ordenada (m):');
    if N==2
        AVAN(4)=handles.edit41;%input('                Abcisa
(m) :');
        AVAN(5)=handles.edit43;%input('                Abcisa
(m) :');
        AVAN(6)=handles.edit45;%input('                Abcisa
(m) :');
        O(4)=handles.edit42;%input('                Ordenada
(m):');
        O(5)=handles.edit44;%input('                Ordenada
(m):');
        O(6)=handles.edit46;%input('                Ordenada
(m):');
    else
    end
end
for I=H:Z;

```

```

L=I;
if D~=1;
    L=I-(3.*N);
else
end
B(I)= AVAN(I)+(AVAN(2)-AVAN(1));
end
if G~=0;
    RG=handles.edit10;%input('Radio del cable de guarda,
(cm):');
    disp(' ');
    if RG==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    H=Z+1;Z=K;D=D+1;
    if N==1
        if G==1
            AVAN(4)=handles.edit1;%input('                Abcisa
(m)  :');
            O(4)=handles.edit2;%input('                Ordenada
(m):');
            if G==2
                AVAN(4)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m)  :');
                AVAN(5)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m)  :');
                O(4)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m):');
                O(5)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m):');
            else
            end
        else
            AVAN(4)=handles.edit1;%input('                Abcisa
(m)  :');
            O(4)=handles.edit2;%input('                Ordenada
(m):');
            if G==2
                AVAN(4)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m)  :');
                AVAN(5)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m)  :');
                O(4)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m):');
                O(5)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m):');
            end
        end
    else
        if N==2
            if G==1
                AVAN(7)=handles.edit1;%input('                Abcisa
(m)  :');
                O(7)=handles.edit2;%input('                Ordenada
(m):');
                if G==2
                    AVAN(7)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m)  :');

```

```

        AVAN(8)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m) :');
        O(7)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m):');
        O(8)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m):');
        else
        end
    else
        AVAN(7)=handles.edit1;%input('          Abcisa
(m) :');
        O(7)=handles.edit2;%input('          Ordenada
(m):');
        if G==2
            AVAN(7)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m) :');
            AVAN(8)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m) :');
            O(7)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m):');
            O(8)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m):');
            end
        end
    end
end

else
end
D=D+1;
for I=(3*N+1):K
    L=I;

    if D~=1;
        L=I-(3.*N);
    else
    end
    B(I)= AVAN(I)+(AVAN(2)-AVAN(1));
end

if C==1;
    Y=R1;RE=R1;
else
    Y=S./(2.*sin(pi./C));
    RE=(C.*R1.*(Y).^(C-1)).^(1./C);
end
D1(K,K)=[1];
G1(K,K)=[1];
for I=1:K;
    for J=1:K;
        if I==J;
            D1(I,J)=2.*O(I);
        else
            D1(I,J)=sqrt((B(I)-B(J)).^2+((O(I)-O(J))).^2);
        end
        G1(I,J)=sqrt((B(I)-B(J)).^2+((O(I)+O(J))).^2);
    end
end
end

```

```

PA(K,K)=[1];
CA(K,K)=[1];
for I=1:K;
    for J=1:K;
        RC=RE;
        if I==J;
            if G~=0;
                if N==1;
                    if I>=4;
                        RC=RG;
                    else
                        end
                else
                    if I>=7;
                        RC=RG;
                    else
                        end
                end
            else
                end
            PA(I,J)=log(D1(I,J)./(RC*0.01));
            CA(I,J)=PA(I,J);
        else
            PA(I,J)=log(G1(I,J)./D1(I,J));
            CA(I,J)=PA(I,J);CA(J,I)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K==(3*N)
    CU=inv(CA);
else
end
if K>(3*N);
    for I=1:(3*N);
        for J=1:(3*N);
            P1(I,J)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K>(3*N);
    for I=1:(3*N);
        for J=((3*N)+1):K;
            P12(I,J)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K==(3*N)+1;
    P2(:,1)=P12(:,((3*N)+1));
else
end
if K==(3*N)+2;
    P2(:,1)=P12(:,((3*N)+1));
    P2(:,2)=P12(:,((3*N)+2));
else
end
if K>(3*N);
    for I=((3*N)+1):K;
        for J=1:(3*N);
            P13(I,J)=CA(I,J);

```

```

        end
    end
end
if K==(3*N)+1
    P3(1,:)=P13(((3*N)+1),:);
else
end
if K==(3*N)+2;
    P3(1,:)=P13(((3*N)+1),:);
    P3(2,:)=P13(((3*N)+2),:);
else
end
if K>(3*N);
    for I=((3*N)+1):K;
        for J=((3*N)+1):K;
            P14(I,J)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K==(3*N)+1;
    P24(1,:)=P14(((3*N)+1),:);
    P4(1,:)=P24(:,((3*N)+1));
else
end
if K==(3*N)+2;
    P24(1,:)=P14(((3*N)+1),:);
    P24(2,:)=P14(((3*N)+2),:);
    P4(:,1)=P24(:,((3*N)+1));
    P4(:,2)=P24(:,((3*N)+2));
else
end
if K>(3*N);
    P5=inv(P4);
    P6=P5*P3;
    P7=P2*P6;
    P8=P1-P7;
    P9=inv(P8);
    CU=P9;
else
end
HE=handles.edit11;%input('A que altura desea calcular el
campo E (m):');
if HE==SALIDA;
    error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
%%%%%%%%%%%%%%
B1=[0;AVAN];
O1=[0;0];
axes(handles.axes1)
plot(B1,O1,'+r');
xlabel('DISTANCIA HORIZONTAL');ylabel('ALTURA');
title('CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA');
text(B1(1,1),O1(1,1),'O');
text(B1(2,1),O1(2,1),'C1');
text(B1(3,1),O1(3,1),'C2');
text(B1(4,1),O1(4,1),'C3');
if G==1;
    text(B1(5,1),O1(5,1),'G1');
end

```

```

else
end
if G==2;
    text(B1(5,1),O1(5,1),'G1');
    text(B1(6,1),O1(6,1),'G2');
else
end
if N==2
    text(B1(5,1),O1(5,1),'C4');
    text(B1(6,1),O1(6,1),'C5');
    text(B1(7,1),O1(7,1),'C6');
    if G==1;
        text(B1(8,1),O1(8,1),'G1');
    else
    end
    if G==2;
        text(B1(8,1),O1(8,1),'G1');
        text(B1(9,1),O1(9,1),'G2');
    else
    end
else
end
grid
%ban=input('PRESIONE "0" PARA REINICIAR Y "1" PARA CONTINUAR:
' );
%if ban==1;
    X=[-40:0.1:40];
if V==34.5;
    if B(1)-B(2)==0;
        U=0;
    else
        p=max(B)-min(B);
        U=p/2;
    end
else
    p=max(B)-min(B);
    U=p/2;
end
J=length(X);
B1=ones(I,J);
for I=1:K;
    M(I)=B(I)-U;
    DE=M';
end
for I=1:K;
    BI1(I)=O(I)-HE;
    BO1(I)=O(I)+HE;
    BA1(I)=HE-O(I);
    BE1(I)=HE+O(I);
end
BA=BA1';
BE=BE1';
BI=BI1';
BO=BO1';
for I=1:K;
    for J=1:length(X);
        B1(I,J)=X(J)-DE(I);
        B2(I,J)=DE(I)-X(J);
    end
end

```

```

end
for I=1:K;
    for J=1:length(X);
        f1(I,J)=(BA(I)./((B1(I,J))^2+(BI(I))^2))-
        (BE(I)./((B1(I,J))^2+(BO(I))^2));
        f2(I,J)=(B2(I,J)./((B1(I,J))^2+(BI(I))^2))-
        (B2(I,J)./((B1(I,J))^2+(BO(I))^2));
    end
end
if N==1;
    for J=1:length(X);

kv1(J)=(f1(1,J).*CU(1,1))+(f1(2,J).*CU(2,1))+(f1(3,J).*CU(3,1
));

kv2(J)=(f1(1,J).*CU(1,2))+(f1(2,J).*CU(2,2))+(f1(3,J).*CU(3,2
));

kv3(J)=(f1(1,J).*CU(1,3))+(f1(2,J).*CU(2,3))+(f1(3,J).*CU(3,3
));

kv4(J)=(f2(1,J).*CU(1,1))+(f2(2,J).*CU(2,1))+(f2(3,J).*CU(3,1
));

kv5(J)=(f2(1,J).*CU(1,2))+(f2(2,J).*CU(2,2))+(f2(3,J).*CU(3,2
));

kv6(J)=(f2(1,J).*CU(1,3))+(f2(2,J).*CU(2,3))+(f2(3,J).*CU(3,3
));
    end
else
    if angle(T1(1,1))==angle(T1(4,1));
        TE=4;
        if angle(T1(2,1))==angle(T1(5,1));
            TO=5;
            TU=6;
        else
            TO=6;
            TU=5;
        end
    end
    else
    end
    if angle(T1(1,1))==angle(T1(6,1));
        TE=6;
        if angle(T1(2,1))==angle(T1(5,1));
            TO=5;
            TU=4;
        else
            TO=4;
            TU=5;
        end
    end
    else
    end
    if angle(T1(1,1))==angle(T1(5,1));
        TE=5;
        if angle(T1(2,1))==angle(T1(4,1));
            TO=4;
            TU=6;
        else
    end

```

```

        TO=6;
        TU=4;
    end
else
end
for J=1:length(X);

kv1(J)=(f1(1,J).*(CU(1,1)+CU(1,TE)))+(f1(2,J).*(CU(2,1)+CU(2,
TE)))+(f1(3,J).*(CU(3,1)+CU(3,TE)))+(f1(4,J).*(CU(4,1)+CU(4,T
E)))+(f1(5,J).*(CU(5,1)+CU(5,TE)))+(f1(6,J).*(CU(6,1)+CU(6,TE
)));

kv2(J)=(f1(1,J).*(CU(1,2)+CU(1,TO)))+(f1(2,J).*(CU(2,2)+CU(2,
TO)))+(f1(3,J).*(CU(3,2)+CU(3,TO)))+(f1(4,J).*(CU(4,2)+CU(4,T
O)))+(f1(5,J).*(CU(5,2)+CU(5,TO)))+(f1(6,J).*(CU(6,2)+CU(6,TO
)));

kv3(J)=(f1(1,J).*(CU(1,3)+CU(1,TU)))+(f1(2,J).*(CU(2,3)+CU(2,
TU)))+(f1(3,J).*(CU(3,3)+CU(3,TU)))+(f1(4,J).*(CU(4,3)+CU(4,T
U)))+(f1(5,J).*(CU(5,3)+CU(5,TU)))+(f1(6,J).*(CU(6,3)+CU(6,TU
)));

kv4(J)=(f2(1,J).*(CU(1,1)+CU(1,TE)))+(f2(2,J).*(CU(2,1)+CU(2,
TE)))+(f2(3,J).*(CU(3,1)+CU(3,TE)))+(f2(4,J).*(CU(4,1)+CU(4,T
E)))+(f2(5,J).*(CU(5,1)+CU(5,TE)))+(f2(6,J).*(CU(6,1)+CU(6,TE
)));

kv5(J)=(f2(1,J).*(CU(1,2)+CU(1,TO)))+(f2(2,J).*(CU(2,2)+CU(2,
TO)))+(f2(3,J).*(CU(3,2)+CU(3,TO)))+(f2(4,J).*(CU(4,2)+CU(4,T
O)))+(f2(5,J).*(CU(5,2)+CU(5,TO)))+(f2(6,J).*(CU(6,2)+CU(6,TO
)));

kv6(J)=(f2(1,J).*(CU(1,3)+CU(1,TU)))+(f2(2,J).*(CU(2,3)+CU(2,
TU)))+(f2(3,J).*(CU(3,3)+CU(3,TU)))+(f2(4,J).*(CU(4,3)+CU(4,T
U)))+(f2(5,J).*(CU(5,3)+CU(5,TU)))+(f2(6,J).*(CU(6,3)+CU(6,TU
)));
    end
end
for J=1:length(X);
    gv1(J)=sqrt((kv1(J).^2)+(kv2(J).^2)+(kv3(J).^2)-
(kv1(J).*kv2(J))-(kv2(J).*kv3(J))-(kv3(J).*kv1(J)));
    gv2(J)=sqrt((kv4(J).^2)+(kv5(J).^2)+(kv6(J).^2)-
(kv4(J).*kv5(J))-(kv4(J).*kv6(J))-(kv5(J).*kv6(J)));
    end
gv=sqrt(gv1.^2+gv2.^2);
ev=gv.*V/sqrt(3);
axes(handles.axes2);
cla;
plot(X,ev,'r','LineWidth',2);
legend('ESTUDIO');
%ishold;
hold on
grid on;
xlabel('DISTANCIA HORIZONTAL (m)');
ylabel('CAMPO ELÉCTRICO (kV/m)');
title('PERFIL DE CAMPO ELÉCTRICO');
clc
for J=1:length(X);
    gu(J)=ev(J);

```

```

        if gu(J)==max(ev),break;end
end
disp(' ');
ub=X(J);
set(handles.dos,'String',X(J));
Em=max(ev);
set(handles.uno,'String',Em);
%disp(' VALOR MÁXIMO');
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf(' Emax=%1.3f (kV/m)',max(ev)),fprintf(' X=%1.3f
(m)',ub);
%disp(' ');
%disp(' ');
%disp(' ');
%disp(' ');
%disp(' ¿DESEA VER TODOS LOS RESULTADOS ?');
%disp(' ');
%bun=input(' PRESIONE "1" PARA CONTINUAR Y "0" PARA
TERMINAR: ');
%else
    %perfilesR;
%end
%if bun==1;
    % disp(' ');
%disp(' ');
%disp('RESULTADOS OBTENIDOS');
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf('ALTURA SOBRE EL PISO=%1.3f(m)',HE);
%disp(' ');
%disp(' ');
%for J=1:length(X);
    % disp(' ');
    %fprintf('X=%1.3f(m)
',X(J)),fprintf('E=%1.3f(kV/m)',ev(J));
    % disp(' ');
%end
%else
%end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)

D=1;
SALIDA=0.0001;
V=handles.edit5;%input('Tensión de la línea (kV):');
N=handles.edit6;%input ('Número de circuitos:');
G=handles.edit7;%input ('Número de cables de guarda :');
C=handles.edit8;%input('Número de conductores en haz:');

if C~=1;

```

```

    S=handles.edit30;%input('Separación entre subconductores
(cm) :');

end
K=(3*N)+G;
B=[1:K]';
AVAN=[1:K]';
O=[1:K]';
T=[1:(3*N)]';

if G~=0;
    if N==1;
        I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
            end
        T(I)=[1+0i];
        I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
            end
        T(I)=[-0.5-0.866i];
        I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
            end
        T(I)=[-0.5+0.866i];
        if N==2;
            disp(' ');
            disp(' ');
            disp('En el segundo circuito');
            disp(' ');
            disp(' ');
            I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
                end
            T(I)=[1+0i];
            I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else
                end
            T(I)=[-0.5-0.866i];
            I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
            if I==SALIDA;
                error('SALIDA DEL PROGRAMA');
            else

```

```

        end
        T(I)=[-0.5+0.866i];
    else
    end
    T1=V.*T;
    l=V/(sqrt(3));
    u=l.*T;
else
    disp('En el primer circuito');
    disp(' ');
    disp(' ');
    I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[1+0i];
    I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[-0.5-0.866i];
    I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
    if I==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    T(I)=[-0.5+0.866i];
    if N==2;
        disp(' ');
        disp(' ');
        disp('En el segundo circuito');
        disp(' ');
        disp(' ');
        I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[1+0i];
        I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[-0.5-0.866i];
        I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
        if I==SALIDA;
            error('SALIDA DEL PROGRAMA');
        else
        end
        T(I)=[-0.5+0.866i];

```

```

else
end
T1=V.*T;
l=V/(sqrt(3));
u=l.*T;
end
else
if N==1;
disp('En el primer circuito');
disp(' ');
disp(' ');
I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[1+0i];
I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5-0.866i];
I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5+0.866i];
if N==2;
disp(' ');
disp(' ');
disp('En el segundo circuito');
disp(' ');
disp(' ');
I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[1+0i];
I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5-0.866i];
I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5+0.866i];

```

```

else
end
T1=V.*T;
l=V/(sqrt(3));
u=l.*T;
else
disp('En el primer circuito');
disp(' ');
disp(' ');
I=handles.edit31;%input ('La fase A está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[1+0i];
I=handles.edit38;%input ('La fase B está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5-0.866i];
I=handles.edit39;%input ('La fase C está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5+0.866i];
if N==2;
disp(' ');
disp(' ');
disp('En el segundo circuito');
disp(' ');
disp(' ');
I=handles.edit40;%input ('La fase A está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[1+0i];
I=handles.edit47;%input('La fase B está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5-0.866i];
I=handles.edit48;%input('La fase C está en el
conductor:');
if I==SALIDA;
error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
T(I)=[-0.5+0.866i];
else
end

```

```

        T1=V.*T;
        l=V/(sqrt(3));
        u=l.*T;
    end
end
H=1;Z=3*N;

R=handles.edit9;%input('Radio del conductor (cm):');
disp(' ');
if R==SALIDA;
    error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else

end
R1=R;
if N==1;
    AVAN(1)=handles.edit32;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(2)=handles.edit34;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(3)=handles.edit36;%input('                Abcisa (m)
:');
    O(1)=handles.edit33;%input(' Ordenada (m):');
    O(2)=handles.edit35;%input(' Ordenada (m):');
    O(3)=handles.edit37;%input(' Ordenada (m):');
    if N==2
        AVAN(4)=handles.edit41;%input('                Abcisa (m)
:');
        AVAN(5)=handles.edit43;%input('                Abcisa (m)
:');
        AVAN(6)=handles.edit45;%input('                Abcisa (m)
:');
        O(4)=handles.edit42;%input(' Ordenada (m):');
        O(5)=handles.edit44;%input(' Ordenada (m):');
        O(6)=handles.edit46;%input(' Ordenada (m):');
    else
    end
else
    AVAN(1)=handles.edit32;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(2)=handles.edit34;%input('                Abcisa (m)
:');
    AVAN(3)=handles.edit36;%input('                Abcisa (m)
:');
    O(1)=handles.edit33;%input(' Ordenada (m):');
    O(2)=handles.edit35;%input(' Ordenada (m):');
    O(3)=handles.edit37;%input(' Ordenada (m):');
    if N==2
        AVAN(4)=handles.edit41;%input('                Abcisa
(m) :');
        AVAN(5)=handles.edit43;%input('                Abcisa
(m) :');
        AVAN(6)=handles.edit45;%input('                Abcisa
(m) :');
        O(4)=handles.edit42;%input(' Ordenada
(m):');
        O(5)=handles.edit44;%input(' Ordenada
(m):');
    end
end
end

```

```

        O(6)=handles.edit46;%input('
(m):');
        else
        end
end

for I=H:Z;
    L=I;
    if D~=1;
        L=I-(3.*N);
    else
    end
    B(I)= AVAN(I)+(AVAN(2)-AVAN(1));
end
if G~=0;
    RG=handles.edit10;%input('Radio del cable de guarda,
(cm):');
    disp(' ');
    if RG==SALIDA;
        error('SALIDA DEL PROGRAMA');
    else
    end
    H=Z+1;Z=K;D=D+1;
    if N==1
        if G==1
            AVAN(4)=handles.edit1;%input('
(m)  :');
            O(4)=handles.edit2;%input('
(m):');
            if G==2
                AVAN(4)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m)  :');
                AVAN(5)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m)  :');
                O(4)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m):');
                O(5)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m):');
            else
            end
            else
                AVAN(4)=handles.edit1;%input('
(m)  :');
                O(4)=handles.edit2;%input('
(m):');
                if G==2
                    AVAN(4)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m)  :');
                    AVAN(5)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m)  :');
                    O(4)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m):');
                    O(5)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m):');
                end
            end
        else
        if N==2
            if G==1

```

```

                AVAN(7)=handles.edit1;%input('
(m) ');
                O(7)=handles.edit2;%input('
(m)');
                if G==2
                AVAN(7)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m) ');
                AVAN(8)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m) ');
                O(7)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m)');
                O(8)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m)');
                else
                end
                else
                AVAN(7)=handles.edit1;%input('
(m) ');
                O(7)=handles.edit2;%input('
(m)');
                if G==2
                AVAN(7)=handles.edit1;%input('
Abcisa (m) ');
                AVAN(8)=handles.edit3;%input('
Abcisa (m) ');
                O(7)=handles.edit2;%input('
Ordenada (m)');
                O(8)=handles.edit4;%input('
Ordenada (m)');
                end
                end
                end
                end

else
end
D=D+1;
for I=(3*N+1):K
    L=I;

    if D~=1;
        L=L-(3.*N);
    else
    end
    B(I)= AVAN(I)+(AVAN(2)-AVAN(1));
end

if C==1;
    Y=R1;RE=R1;
else
    Y=S./(2.*sin(pi./C));
    RE=(C.*R1.*(Y).^(C-1)).^(1./C);
end
D1(K,K)=[1];
G1(K,K)=[1];
for I=1:K;
    for J=1:K;
        if I==J;

```

```

        D1(I,J)=2.*O(I);
    else
        D1(I,J)=sqrt((B(I)-B(J)).^2+((O(I)-O(J))).^2);
    end
    G1(I,J)=sqrt((B(I)-B(J)).^2+((O(I)+O(J))).^2);
end
end
PA(K,K)=[1];
CA(K,K)=[1];
for I=1:K;
    for J=1:K;
        RC=RE;
        if I==J;
            if G~=0;
                if N==1;
                    if I>=4;
                        RC=RG;
                    else
                        end
                else
                    if I>=7;
                        RC=RG;
                    else
                        end
                    end
                end
            else
                end
            end
        PA(I,J)=log(D1(I,J)./(RC*0.01));
        CA(I,J)=PA(I,J);
    else
        PA(I,J)=log(G1(I,J)./D1(I,J));
        CA(I,J)=PA(I,J);CA(J,I)=CA(I,J);
    end
end
end
if K==(3*N)
    CU=inv(CA);
else
end
if K>(3*N);
    for I=1:(3*N);
        for J=1:(3*N);
            P1(I,J)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K>(3*N);
    for I=1:(3*N);
        for J=((3*N)+1):K;
            P12(I,J)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K==(3*N)+1;
    P2(:,1)=P12(:,((3*N)+1));
else
end
if K==(3*N)+2;
    P2(:,1)=P12(:,((3*N)+1));
end

```

```

    P2(:,2)=P12(:,((3*N)+2));
else
end
if K>(3*N);
    for I=((3*N)+1):K;
        for J=1:(3*N);
            P13(I,J)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K==(3*N)+1
    P3(1,:)=P13(((3*N)+1),:);
else
end
if K==(3*N)+2;
    P3(1,:)=P13(((3*N)+1),:);
    P3(2,:)=P13(((3*N)+2),:);
else
end
if K>(3*N);
    for I=((3*N)+1):K;
        for J=((3*N)+1):K;
            P14(I,J)=CA(I,J);
        end
    end
end
if K==(3*N)+1;
    P24(1,:)=P14(((3*N)+1),:);
    P4(1,:)=P24(:,((3*N)+1));
else
end
if K==(3*N)+2;
    P24(1,:)=P14(((3*N)+1),:);
    P24(2,:)=P14(((3*N)+2),:);
    P4(:,1)=P24(:,((3*N)+1));
    P4(:,2)=P24(:,((3*N)+2));
else
end
if K>(3*N);
    P5=inv(P4);
    P6=P5*P3;
    P7=P2*P6;
    P8=P1-P7;
    P9=inv(P8);
    CU=P9;
else
end
HE=handles.edit11;%input('A que altura desea calcular el
campo E (m):');
if HE==SALIDA;
    error('SALIDA DEL PROGRAMA');
else
end
%disp(' ');
%clc
%disp('INFORMACIÓN SUMINISTRADA');
%disp(' ');
%disp(' ');

```

```

%fprintf('TENSIÓN DEL CONDUCTOR N°1 V=%1.3f kV
',abs(T1(1,1))),
fprintf('ANGULO=%1.3f°',(angle(T1(1,1))*57.295779));
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf('TENSIÓN DEL CONDUCTOR N°2 V=%1.3f kV
',abs(T1(2,1))),
fprintf('ANGULO=%1.3f°',(angle(T1(2,1))*57.295779));
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf('TENSIÓN DEL CONDUCTOR N°3 V=%1.3f kV
',abs(T1(3,1))),
fprintf('ANGULO=%1.3f°',(angle(T1(3,1))*57.295779));
%disp(' ');
%disp(' ');
%if N==2;
% fprintf('TENSIÓN DEL CONDUCTOR N°4 V=%1.3f kV
',abs(T1(4,1))),
fprintf('ANGULO=%1.3f°',(angle(T1(4,1))*57.295779));
% disp(' ');
% disp(' ');
% fprintf('TENSIÓN DEL CONDUCTOR N°5 V=%1.3f kV
',abs(T1(5,1))),
fprintf('ANGULO=%1.3f°',(angle(T1(5,1))*57.295779));
% disp(' ');
% disp(' ');
% fprintf('TENSIÓN DEL CONDUCTOR N°6 V=%1.3f kV
',abs(T1(6,1))),
fprintf('ANGULO=%1.3f°',(angle(T1(6,1))*57.295779));
% disp(' ');
% disp(' ');
%else
%end
%fprintf('          NÚMERO DE CIRCUITOS=%1.3f',N);
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf('          NÚMERO DE CABLES DE GUARDA=%1.3f',G);
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf('          NÚMERO DE CONDUCTORES EN HAZ=%1.3f',C);
%disp(' ');
%disp(' ');
%if C~=1;
% fprintf('          SEPARACIÓN ENTRE
SUBCONDUCTORES=%1.3f(cm)',S);
% disp(' ');
% disp(' ');
%else
%end
%fprintf('          RADIO DEL CONDUCTOR=%1.3f(cm)',R);
%disp(' ');
%disp(' ');
%if G~=0;
% fprintf('          RADIO DEL CABLE DE GUARDA=%1.3f(cm)',RG);
% disp(' ');
% disp(' ');
%else
%end
B1=[0;AVAN];

```

```

O1=[0;0];
%figure
%plot(B1,O1,'+r');
%xlabel('DISTANCIA HORIZONTAL');ylabel('ALTURA');
%title('CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA');
%axes(handles.axes1);
%text(B1(1,1),O1(1,1),'O');
%text(B1(2,1),O1(2,1),'C1');
%text(B1(3,1),O1(3,1),'C2');
%text(B1(4,1),O1(4,1),'C3');
%if G==1;
% text(B1(5,1),O1(5,1),'G1');
%else
%end
%if G==2;
% text(B1(5,1),O1(5,1),'G1');
% text(B1(6,1),O1(6,1),'G2');
%else
%end
%end
%if N==2
% text(B1(5,1),O1(5,1),'C4');
% text(B1(6,1),O1(6,1),'C5');
% text(B1(7,1),O1(7,1),'C6');
%if G==1;
% text(B1(8,1),O1(8,1),'G1');
% else
% end
% end
%if G==2;
% text(B1(8,1),O1(8,1),'G1');
% text(B1(9,1),O1(9,1),'G2');
%else
%end
%end
%end
%grid on
%ban=input('PRESIONE "0" PARA REINICIAR Y "1" PARA CONTINUAR:
');
%if ban==1;
X=[-40:0.1:40];
if V==34.5;
if B(1)-B(2)==0;
U=0;
else
p=max(B)-min(B);
U=p/2;
end
else
p=max(B)-min(B);
U=p/2;
end
end
J=length(X);
B1=ones(I,J);
for I=1:K;
M(I)=B(I)-U;
DE=M';
end
for I=1:K;
BI1(I)=O(I)-HE;
BO1(I)=O(I)+HE;

```

```

        BA1(I)=HE-O(I);
        BE1(I)=HE+O(I);
    end
    BA=BA1';
    BE=BE1';
    BI=BI1';
    BO=BO1';
    for I=1:K;
        for J=1:length(X);
            B1(I,J)=X(J)-DE(I);
            B2(I,J)=DE(I)-X(J);
        end
    end
    for I=1:K;
        for J=1:length(X);
            f1(I,J)=(BA(I)./((B1(I,J))^2+(BI(I))^2))-
            (BE(I)./((B1(I,J))^2+(BO(I))^2));
            f2(I,J)=(B2(I,J)./((B1(I,J))^2+(BI(I))^2))-
            (B2(I,J)./((B1(I,J))^2+(BO(I))^2));
        end
    end
    if N==1;
        for J=1:length(X);

kv1(J)=(f1(1,J).*CU(1,1))+(f1(2,J).*CU(2,1))+(f1(3,J).*CU(3,1
));

kv2(J)=(f1(1,J).*CU(1,2))+(f1(2,J).*CU(2,2))+(f1(3,J).*CU(3,2
));

kv3(J)=(f1(1,J).*CU(1,3))+(f1(2,J).*CU(2,3))+(f1(3,J).*CU(3,3
));

kv4(J)=(f2(1,J).*CU(1,1))+(f2(2,J).*CU(2,1))+(f2(3,J).*CU(3,1
));

kv5(J)=(f2(1,J).*CU(1,2))+(f2(2,J).*CU(2,2))+(f2(3,J).*CU(3,2
));

kv6(J)=(f2(1,J).*CU(1,3))+(f2(2,J).*CU(2,3))+(f2(3,J).*CU(3,3
));
        end
    else
        if angle(T1(1,1))==angle(T1(4,1));
            TE=4;
            if angle(T1(2,1))==angle(T1(5,1));
                TO=5;
                TU=6;
            else
                TO=6;
                TU=5;
            end
        end
    else
        if angle(T1(1,1))==angle(T1(6,1));
            TE=6;
            if angle(T1(2,1))==angle(T1(5,1));
                TO=5;
                TU=4;
            end
        end
    end
end

```

```

        else
            TO=4;
            TU=5;
        end
    else
        end
    if angle(T1(1,1))==angle(T1(5,1));
        TE=5;
        if angle(T1(2,1))==angle(T1(4,1));
            TO=4;
            TU=6;
        else
            TO=6;
            TU=4;
        end
    else
        end
    for J=1:length(X);

kv1(J)=(f1(1,J).*(CU(1,1)+CU(1,TE)))+(f1(2,J).*(CU(2,1)+CU(2,
TE)))+(f1(3,J).*(CU(3,1)+CU(3,TE)))+(f1(4,J).*(CU(4,1)+CU(4,T
E)))+(f1(5,J).*(CU(5,1)+CU(5,TE)))+(f1(6,J).*(CU(6,1)+CU(6,TE
)));

kv2(J)=(f1(1,J).*(CU(1,2)+CU(1,TO)))+(f1(2,J).*(CU(2,2)+CU(2,
TO)))+(f1(3,J).*(CU(3,2)+CU(3,TO)))+(f1(4,J).*(CU(4,2)+CU(4,T
O)))+(f1(5,J).*(CU(5,2)+CU(5,TO)))+(f1(6,J).*(CU(6,2)+CU(6,TO
)));

kv3(J)=(f1(1,J).*(CU(1,3)+CU(1,TU)))+(f1(2,J).*(CU(2,3)+CU(2,
TU)))+(f1(3,J).*(CU(3,3)+CU(3,TU)))+(f1(4,J).*(CU(4,3)+CU(4,T
U)))+(f1(5,J).*(CU(5,3)+CU(5,TU)))+(f1(6,J).*(CU(6,3)+CU(6,TU
)));

kv4(J)=(f2(1,J).*(CU(1,1)+CU(1,TE)))+(f2(2,J).*(CU(2,1)+CU(2,
TE)))+(f2(3,J).*(CU(3,1)+CU(3,TE)))+(f2(4,J).*(CU(4,1)+CU(4,T
E)))+(f2(5,J).*(CU(5,1)+CU(5,TE)))+(f2(6,J).*(CU(6,1)+CU(6,TE
)));

kv5(J)=(f2(1,J).*(CU(1,2)+CU(1,TO)))+(f2(2,J).*(CU(2,2)+CU(2,
TO)))+(f2(3,J).*(CU(3,2)+CU(3,TO)))+(f2(4,J).*(CU(4,2)+CU(4,T
O)))+(f2(5,J).*(CU(5,2)+CU(5,TO)))+(f2(6,J).*(CU(6,2)+CU(6,TO
)));

kv6(J)=(f2(1,J).*(CU(1,3)+CU(1,TU)))+(f2(2,J).*(CU(2,3)+CU(2,
TU)))+(f2(3,J).*(CU(3,3)+CU(3,TU)))+(f2(4,J).*(CU(4,3)+CU(4,T
U)))+(f2(5,J).*(CU(5,3)+CU(5,TU)))+(f2(6,J).*(CU(6,3)+CU(6,TU
)));
        end
    end
    for J=1:length(X);
        gv1(J)=sqrt((kv1(J).^2)+(kv2(J).^2)+(kv3(J).^2)-
(kv1(J).*kv2(J))-(kv2(J).*kv3(J))-(kv3(J).*kv1(J)));
        gv2(J)=sqrt((kv4(J).^2)+(kv5(J).^2)+(kv6(J).^2)-
(kv4(J).*kv5(J))-(kv4(J).*kv6(J))-(kv5(J).*kv6(J)));
    end
    gv=sqrt(gv1.^2+gv2.^2);
    ev=gv.*V/sqrt(3);
    %figure

```

```

plot(X,ev,'LineWidth',2);
hold all
grid on
axes(handles.axes2);
legend('ESTUDIO','COMPARACIÓN');
%hold on
xlabel('DISTANCIA HORIZONTAL (m)');
ylabel('CAMPO ELÉCTRICO (kV/m)');
title('PERFIL DE CAMPO ELÉCTRICO');
%plot([-32.155 -24.462 -21.08 -18.31 -17.07 -16.15 -15.23 -
14.62 -13.82 -13.08 -12.46 -11.84 -11.5 -11.1 -10.62 -10 -9.4
-9.07 -8.15 -6.925 -5.81 -5.08 -4.465 -3.23 -2 -1.8 -
1.07 -0.647 0 0.152 1.07 1.382 1.72 1.9 2.617 2.92 3.6 4.77
5.8 6.615 7.4 7.54 8.1 8.815 10.11 10.825 11.2 11.41 11.84
12.21 12.89 14 15.23 16.33 17.38 18.62 19.54 20.77 22.92
25.69 34.3],[0.04 0.08 0.12 0.16 0.2 0.24 0.28 0.32 0.4 0.44
0.48 0.56 0.6 0.64 0.76 0.88 0.96 1 1.16 1.36 1.48 1.6 1.56
1.44 1.24 1 0.96 0.88 0.84 0.78 0.8 0.88 0.92 1 1.04 1.12 1.2
1.52 1.68 1.72 1.76 1.64 1.58 1.4 1.32 1.08 0.92 0.88 0.84
0.72 0.68 0.6 0.52 0.44 0.36 0.28 0.24 0.2 0.16 0.12 0.08
0.04])
%grid on
clc
for J=1:length(X);
    gu(J)=ev(J);
    if gu(J)==max(ev),break;end
end
disp(' ');
ub=X(J);
set(handles.text76,'String',X(J));
Em=max(ev);
set(handles.text77,'String',Em);
%disp(' VALOR MÁXIMO');
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf(' Emax=%1.3f (kV/m)',max(ev)),fprintf(' X=%1.3f
(m)',ub);
%disp(' ');
%disp(' ');
%disp(' ');
%disp(' ');
%disp(' ¿DESEA VER TODOS LOS RESULTADOS ?');
%disp(' ');
%bun=input(' PRESIONE "1" PARA CONTINUAR Y "0" PARA
TERMINAR: ');
%else
    %perfilesR;
%end
%if bun==1;
    % disp(' ');
%disp(' ');
%disp('RESULTADOS OBTENIDOS');
%disp(' ');
%disp(' ');
%fprintf('ALTURA SOBRE EL PISO=%1.3f(m)',HE);
%disp(' ');
%disp(' ');
%for J=1:length(X);
    % disp(' ');

```

```
    fprintf('X=%1.3f(m)\n',X(J)),fprintf('E=%1.3f(kV/m)',ev(J));  
    % disp(' ');  
%end  
%else  
%end
```