

**MEDICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN UN MODELO DE LÍNEA
MONOFÁSICA**

ANTONIO LUIS CONTRERAS PÉREZ

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

2017

**MEDICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN UN MODELO DE LÍNEA
MONOFÁSICA**

ANTONIO LUIS CONTRERAS PÉREZ

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Electricista**

DIRECTOR

JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO

Magister en Potencia eléctrica

CODIRECTOR

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Dr. en Ingeniería Industrial

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

2017

DEDICATORIA

Ante todo, a Dios porque gracias a él esta etapa de mi vida está hecha realidad y sin su ayuda nada hubiese sido posible.

A mi Madre, Elvira Pérez, este triunfo es para ti, te lo dedico con toda mi alma. A mi Padre, Domingo Contreras, por ser ese gran amigo que cada día me demostró que la vida está hecha para la gente que estudia. A mis once hermanos, Esther, Martha, Domiciano, Royers, Edwin, Clara, Daladier, Ana, Lily, Fabián y Emiliano. Les dedico todo este esfuerzo por estar ahí siempre ayudándome. A todos mis sobrinos que de esta experiencia tomen ejemplo y también sean unos profesionales. A mi amigo de infancia Kristhian Flórez, por depositar en mí su confianza. A mi amigo de locuras, Víctor Sierra que Dios te tenga en su santa gloria.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por haberme dado sabiduría y disciplina para llegar a esta etapa. A mi Madre, gracias por tus trasnochos, regaños y consejos, esto me llevo a ser lo que hoy soy. A mi padre, gracias por tus enseñanzas y consejos diarios de ser cada día mejor y llegar a ser un profesional. A mis hermanos, gracias a todos por tener esa confianza en mí de ser un profesional, gracias por su ayuda económica y personal, sus consejos y su tiempo. A mi tía Leo, por acogerme en esta ciudad y brindarme su apoyo.

A mi amigo de convivencia Aldair Angarita, gracias por tantas risas y vivencias. A mi amiga Zully Vallejo, gracias por tus consejos y tu ejemplo de disciplina, fueron esenciales durante todo este proceso.

A mi director de trabajo de grado profesor Julio Chacón y mi codirector profesor Hermann Vargas, por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo. Al profesor Gabriel Ordoñez, por sus valiosos consejos, sin su ayuda quizás esta meta no hubiese sido alcanzada.

A mis profesores y compañeros de la Selección de Taekwondo, profesor William García, profesor Giovanny Vega y mis compañeros Karla, Angélica, Ramón, Saidy, Carolina, Carlos Gómez, Laurita, rocha, mercenario, Willy, Andrés hoyos, Adriana hoyos, óscar, Damián, Cristian, Yury, Margarita. A todos los demás con los que tuve la oportunidad de interactuar, gracias por los aprendizajes vividos.

Al Grupo de Música y Danzas Folclóricas Afrocolombianas “Macondo”, Maestro Nicolás Maestre, compañeros músicos y bailadores. Aldair, Yuridia, Camila, Bengty, María Angélica, Jennifer Blanco, María José, Yira, Frank, Javier, Tavo,

karol, Gustavo, Junior, Daniela Badillo, Oswaldo, Manuel, Melisa, Carlos Quintero, Nemma, Brocate, Genderson, Rayo, Jefferson Oviedo, Geraldine, Laura Gamboa, David, Silvia, María Alejandra, Andrés Gámez, Walter, William Calderón, Carlos Gómez, María del Mar, Camilo, Elayne, Giorgio y todos los demás. Gracias por permitirme compartir momentos inolvidables a su lado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	17
1.1 ECUACIONES DE MAXWELL	18
1.2 LEY DE GAUSS	23
1.3 CAMPO ELÉCTRICO	24
1.4 LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO	25
1.5 POTENCIAL ELECTROSTÁTICO	27
1.6 CAMPO ELÉCTRICO Y POTENCIAL DE UN CONDUCTOR	28
1.7 MÉTODO DE LAS IMÁGENES	29
1.8 MEDIDORES DE CAMPO ELÉCTRICO	34
1.8.1 Medidores Spectran de aaronia	34
1.8.2 Medidores de Gigahertz Solutions	35
1.8.3 Medidor Utilizado	36
1.9 VALORES DE CAMPO ELÉCTRICO	36
1.10 LOS CAMPOS ELÉCTRICOS EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN	40
1.11 CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN UN CONDUCTOR	41
1.12 LÍNEA ELÉCTRICA MONOFÁSICA	46
2. GUÍA PARA EL USO DEL MEDIDOR DE CAMPO ELÉCTRICO SPECTRAN NF-5035.	51
2.1 INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD	51
2.2 ENCENDIDO / APAGADO	52
2.3 RANGO DE FRECUENCIAS	52
2.4 FUNCION AUTORANGE	55

2.5 SELECCIONAR EL SENSOR ADECUADO	56
2.6 ANCHO DE BANDA Y ATENUADOR INTERNO	57
2.7 CONECTOR USB	58
3. PRUEBAS PRELIMINARES	62
3.1 CÁLCULOS DEL CAMPO ELÉCTRICO A DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN Y DISTANCIAS AL CONDUCTOR.	63
3.2 MONTAJE Y MECANISMO PARA SITUAR EL MEDIDOR DE CAMPO ELÉCTRICO SPECTRAN NF-5035	71
3.3 DIMENSIONES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN Y SUS EQUIPOS	74
4. EJECUCIÓN DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO	78
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES	78
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	82
6. CONCLUSIONES	88
7. RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
BIBLIOGRAFÍA	93

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Referencia de los medidores Spectran NF utilizados para medir campo eléctrico a bajas frecuencias	18
Tabla 2. Valores límites de exposición a campos electromagnéticos	19
Tabla 3. Niveles de referencia establecidos por ICNIRP para exposición ocupacional y poblacional a campos eléctricos	20
Tabla 4. Valores límites de umbral de campo eléctrico según la ACGHI	20
Tabla 5. Comparación de niveles de campo eléctrico entre diferentes ciudades y países	21
Tabla 6. Relación del tiempo de muestreo con el ancho de banda de resolución	33
Tabla 7. Conductor para realizar la medición del campo eléctrico con ayuda del dispositivo SPECTRAN NF-5035	38
Tabla 8. Valores de la carga del conductor a diferentes niveles de tensión ...	41
Tabla 9. Valores aproximados del campo eléctrico a una altura de 2 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 niveles de tensión	43
Tabla 10. Valores aproximados del campo eléctrico a una altura de 1,5 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 niveles de tensión	44
Tabla 11. Valores aproximados del campo eléctrico a una altura de 1 metro y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 niveles de tensión	44
Tabla 12. Valores medidos de campo eléctrico a una altura de 2 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 niveles de tensión	50
Tabla 13. Condiciones ambientales dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander	51
Tabla 14. Valores medidos de campo eléctrico a una altura de 1,5 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 niveles de tensión	51
Tabla 15. Condiciones ambientales dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander	51

Tabla 16. Valores medidos de campo eléctrico a una altura de 1 metro y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 niveles de tensión52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Flujo de masa a través de una superficie S	8
Figura 2. Líneas de campo o líneas de dirección	10
Figura 3. Líneas de campo eléctrico correspondientes a un disco con carga eléctrica positiva	11
Figura 4. Superficie conductora plana con la carga puntual en $Z > 0$	13
Figura 5. Líneas de campo eléctrico en la superficie conductor plana con la carga puntual en $Z > 0$	14
Figura 6. Dos cargas con signos opuestos enfrentadas en la superficie conductora plana	15
Figura 7. Cálculo de la tensión en un punto cualquiera en el plano $Z > 0$	16
Figura 8. Elipse descrita por un vector de campo eléctrico, que se encuentra rotando en un plano en el espacio	22
Figura 9. Dos conductores y sus imágenes	25
Figura 10. Cálculo del campo eléctrico en una línea o conductor, método de las imágenes	25
Figura 11. Sistema monofásico o modelo de línea monofásica.....	27
Figura 12. Perturbación del campo eléctrico por objetos conductores	28
Figura 13. Esquema de alimentación al modelo de línea monofásica dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander	38
Figura 14. Puntos de ubicación del dispositivo de medición de campo eléctrico SPECTRAN NF-5035	39
Figura 15. Posición del conductor eléctrico o modelo de línea monofásica a una altura de 2,95 metros	40
Figura 16. Plano cartesiano con sus ejes y cuadrantes	45
Figura 17. Montaje y mecanismo para situar el dispositivo SPECTRAN NF-5035	46

Figura 18. Vista frontal de los equipos dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, estimando las coordenadas (0, 2) metros del medidor	47
Figura 19. Vista lateral derecha de los equipos dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, estimando las coordenadas (1, 2) metros del medidor	48
Figura 20. Vista planta de los equipos dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, estimando las coordenadas (1, 2) metros del medidor	49
Figura 21. Perfil teórico del campo eléctrico en los 4 niveles de tensión, a una altura respecto al suelo de 1 metro	53
Figura 22. Comportamiento experimental del campo eléctrico en los 4 niveles de tensión, a una altura de 1 metro respecto al suelo	53
Figura 23. Perfil teórico del campo eléctrico en los 4 niveles de tensión, a una altura respecto al suelo de 1,5 metros	54
Figura 24. Comportamiento experimental del campo eléctrico en los 4 niveles de tensión, a una altura de 1,5 metros respecto al suelo	54
Figura 25. Perfil teórico del campo eléctrico en los 4 niveles de tensión, a una altura respecto al suelo de 2 metros	55
Figura 26. Comportamiento experimental del campo eléctrico I en los 4 niveles de tensión, a una altura de 2 metros respecto al suelo	56

RESUMEN

Titulo: Medición del campo eléctrico en un modelo de línea monofásica*

Autor: Antonio Luis Contreras Pérez**

Palabras clave: Medición, campo eléctrico, línea monofásica, Spectran nf-5035, tensión.

Descripción

En los últimos años se ha prestado atención a la influencia negativa de los campos eléctricos y magnéticos, los cuales dependiendo de sus magnitudes pueden ocasionar daños (enfermedades, contaminación, etc.) a los seres vivos y al medio ambiente. Se hace necesario considerar valores permisibles y medir estos campos para prevenir dichos daños en los seres vivos. Existen varios estudios acerca de la medición de campo eléctrico alrededor de los aparatos eléctricos y fuentes de alta tensión. Una de las fuentes eléctricas y magnéticas importantes de campo son las líneas de distribución, las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Para este tipo de fuentes el público en general está expuesto a campos electromagnéticos.

Al realizar las mediciones del campo eléctrico en un modelo de línea monofásica se encuentran valores que comparados con los estimados teóricamente presentan diferencias apreciables al realizar cambios del nivel de tensión y también cuando varía la posición del medidor. Se presenta una guía para el uso del medidor, con el fin de facilitar la práctica de medir los campos eléctricos, en las cercanías de un modelo de línea monofásica dentro del laboratorio de Alta tensión. Se hicieron los cálculos pertinentes para encontrar unos valores estimados del campo eléctrico de un conductor, ubicado a: 2,95 metros de altura y con un diámetro de 4,95 centímetros.

Las diferencias entre lo medido y lo estimado teóricamente, se debe posiblemente a las condiciones del entorno del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander. Donde se encuentra situada la línea modelo a energizar, para adquirir dichos valores de campo eléctrico perturbado.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico mecánicas, Escuela de Ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director. Julio Cesar Chacon Velasco

ABSTRACT

Title: Electric field measurement in a single-phase line model*

Author: Antonio Luis Contreras Pérez**

Keywords Measurement, electric field, single-phase line, Spectran nf-5035, high voltage.

Description

In recent years' attention, has been paid to the negative influence of electric and magnetic fields, which depending on their magnitudes can cause damages (diseases, pollution, etc.) to living things and the environment. It is necessary to consider permissible values and measure these fields to prevent such damages in living beings. There are several studies on the measurement of electric field around electrical appliances and high voltage sources. One of the important electrical and magnetic field sources is distribution lines, transmission lines and electrical substations. For this type of sources the general public is exposed to electromagnetic fields.

When performing the measurements of the electric field in a single-phase line model are values that compared with the theoretical estimates have appreciable differences when changing the voltage level and also when the position of the meter varies. A guide for the use of the meter is presented, in order to facilitate the practice of measuring the electric fields, in the vicinity of a single-phase line model inside the high voltage laboratory. The relevant calculations were made to find estimated values of the electric field of a conductor, located at: 2.95 meters in height and with a diameter of 4.95 centimeters.

The differences between the measured and the theoretically estimated are possibly due to the environment conditions of the High Voltage Laboratory of the Industrial University of Santander. Where the model line to be energized is located, to acquire such disturbed electric field values.

* Project of grade

** Faculty of Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering. Director. Julio Cesar Chacon Velasco

INTRODUCCIÓN

En el entorno existen diversas formas de vivir, el ser humano ha optado por tener comodidades aceptables con el fin de convivir de la mejor manera posible. Este busca obtener provecho de las cosas que existen y otras que se han inventado. Todas las ciencias existentes, como la química, la matemática, la física, entre otras, buscan beneficiarlo a la hora de realizar alguna actividad. Una rama de la física la muy utilizada por el ser humano es el electromagnetismo, en donde la corriente eléctrica (movimiento de electrones) produce efectos luminosos, mecánicos, caloríficos y químicos, que son de gran ayuda para satisfacer las necesidades del hombre. La energía eléctrica se describe como la cantidad de potencia eléctrica consumida en un determinado tiempo. Se genera por medio de centrales hidroeléctricas, térmicas, eólicas, también por biomasa, sistemas fotovoltaicos, etc.

La potencia eléctrica viaja a través de líneas de alta tensión para luego ser distribuida a los hogares. Las líneas de transmisión, están diseñadas con un material que ofrece poca resistencia al movimiento de cargas eléctricas (circulación de electrones), con el fin de que haya menos pérdidas de potencia. Cuando las cargas eléctricas son movidas por una fuerza electromagnética generan una perturbación en el espacio que la rodea; esta perturbación es conocida como el campo electromagnético.

En los últimos años se ha prestado atención a la influencia negativa de los campos eléctricos y magnéticos, los cuales dependiendo de sus magnitudes pueden ocasionar daños (enfermedades, contaminación, etc.) a los seres vivos y al medio ambiente. Se hace necesario considerar valores permisibles y medir estos campos para prevenir dichos daños en los seres vivos [1]. Existen varios

estudios acerca de la medición de campo eléctrico alrededor de los aparatos eléctricos y fuentes de alta tensión. Una de las fuentes eléctricas y magnéticas importantes de campo son las líneas de distribución, las líneas de transmisión y subestaciones eléctricas. Para este tipo de fuentes el público en general está expuesto a campos electromagnéticos [2].

En este trabajo se realiza la medición del campo eléctrico en un modelo de línea monofásica. Para ello es necesario tener una guía de uso del instrumento de medida del campo eléctrico. Dicha guía es escrita para que el operario del dispositivo de medida, tenga facilidad de utilizarlo sin ocasionar daños por su mal uso.

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

Los campos eléctricos y magnéticos son fundamentalmente campos de fuerzas que se originan a partir de cargas eléctricas. Si a un campo de fuerzas se le llama eléctrico, magnético o electromagnético, se debe al estado de las cargas eléctricas con relación al punto en que se hacen las observaciones del campo. Las cargas eléctricas en reposo con respecto a un punto de observación, dan lugar a un campo electrostático (independiente del tiempo). Por otra parte, se le llama campos electromagnéticos a los movimientos acelerados que producen campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo [3]. En el campo eléctrico, la fuerza **F** que se ejerce sobre una carga eléctrica **Q**, es igual al producto de dicha carga con la intensidad de campo eléctrico **E**.

$$\mathbf{F} = Q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

1-1

Donde:

v: Velocidad de la carga en movimiento.

B: Densidad de flujo magnético.

Q: Carga eléctrica.

La fuerza está en la misma dirección de la intensidad del campo eléctrico (para una carga positiva) y es directamente proporcional a **E** y **Q**. Si la carga está en movimiento la fuerza en cualquier punto de su trayectoria está dada por la ecuación 1-1. Una partícula cargada y en movimiento en un campo magnético de densidad de flujo magnético, experimenta una fuerza cuya magnitud es proporcional al producto de la carga eléctrica, su velocidad, la densidad de flujo magnético, y el seno del ángulo de los vectores velocidad y flujo. La dirección de la fuerza es perpendicular a la velocidad y el flujo, y está dada por un producto cruz entre la velocidad y la densidad de flujo magnético.

La fuerza sobre una partícula cargada en movimiento debido a campos electromagnéticos se obtiene de la suma de las fuerzas ejercidas a cargas eléctricas de dichos campos, esta fuerza se conoce como fuerza de Lorentz, la cual se transcribe en la ecuación 1-1[4].

La relación existente entre las cargas y fuentes de corriente con los campos magnéticos y eléctricos, la describe un conjunto de relaciones conocidas como ecuaciones de Maxwell.

1.1 ECUACIONES DE MAXWELL

Se presentan dos conceptos: la variación en el tiempo del campo magnético produce un campo eléctrico y la variación del campo eléctrico respecto al tiempo genera un campo magnético. El primero de estos conceptos es el resultado experimental de Michael Faraday y el segundo de los esfuerzos de James Clerk Maxwell. A continuación, se presentan las ecuaciones de Maxwell en forma diferencial [3].

Ley de Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad 1.1-1$$

Ley de Ampere:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad 1.1-2$$

Ley de Gauss para campos eléctricos:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad 1.1-3$$

Ley de Gauss para campos magnéticos:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad 1.1-4$$

Donde:

D: densidad de flujo eléctrico.

E: intensidad de campo eléctrico.

B: densidad de flujo magnético.

H: intensidad de campo magnético.

La ecuación 1.1-3 establece que la carga es una fuente o sumidero de las líneas de flujo eléctrico. Con la ecuación 1.1-4 se reconoce el hecho de que se desconoce la existencia de cargas magnéticas o monopolos magnéticos.

Estas cuatro ecuaciones son la base de toda la teoría electromagnética. Existen ecuaciones auxiliares que relacionan la intensidad de los campos electromagnéticos con la densidad de flujo eléctrico y magnético:

- **D y E:**

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \tag{1.1-5}$$

Donde:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \tag{1.1-6}$$

- **B con H:**

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{1.1-7}$$

Donde:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \tag{1.1-8}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \tag{1.1-9}$$

$$\mathbf{J} = \rho_V \mathbf{V} \tag{1.9-10}$$

Donde:

μ : permeabilidad magnética.

μ_r : permeabilidad magnética relativa.

μ_0 : permeabilidad magnética en el vacío o constante magnética ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$).

ϵ : permitividad eléctrica.

ϵ_r : permitividad eléctrica relativa.

ϵ_0 : permitividad eléctrica en el vacío o constante dieléctrica ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2$).

σ : densidad superficial.

ρ_V : densidad de carga volumétrica [C/m^3].

J: densidad de corriente.

V: volumen.

A continuación, se presentan las ecuaciones de Maxwell en forma integral:

Ley de Faraday:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

1.1-11

Ley de Ampere:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \mathbf{I} + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$$

1.1-12

Ley de Gauss para campos eléctricos:

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_{Vol} \rho_V dV$$

1.1-13

Ley de Gauss para campos magnéticos:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

1.1-14

Donde:

dL: diferencial de longitud L.

I: corriente eléctrica.

dS: diferencial de superficie S.

Los campos electromagnéticos variables en el tiempo se producen siempre y cuando que las fuentes de carga y corriente de los campos sean también variables en el tiempo. Las ecuaciones de Maxwell sujetas a la suposición de estática en el tiempo, $\partial/\partial t$ igual a cero, proporcionan un desacoplamiento de los campos eléctricos estáticos respecto a los campos magnéticos estáticos. Entonces las cargas y las corrientes que originan los campos son estacionarias. Las ecuaciones de Maxwell que rigen los campos estáticos son:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

1.1-15

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

1.1-16

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$$

1.1-17

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

1.1-18

En las ecuaciones 1.1-15 y 1.1-16 se observa que debido a que las densidades de flujo eléctrico y magnitud no son variables en el tiempo, no hay acoplamiento entre las cantidades de campo eléctrico y magnético [3] [4].

1.2 LEY DE GAUSS

La Ley de Gauss está relacionada con el teorema de la divergencia. Conocido también como Teorema de Gauss, el cual fue formulado por Carl Friedrich Gauss en 1835. El flujo de campo eléctrico se define de manera análoga al flujo de masa. El flujo de masa a través de una superficie **S** se define como la cantidad de masa que atraviesa dicha superficie por unidad de tiempo (ver figura 1).

Figura 1. Flujo de masa a través de una superficie S.



Fuente: FORESTALES Gauss [en línea] disponible en:
<http://acer.forestaes.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/electro/gauss.html>

El flujo eléctrico que pasa por cualquier superficie cerrada es igual a la carga total encerrada (Q_{enc}) por esa superficie, lo anterior se conoce como la ley de Gauss. La superficie cerrada para calcular el flujo de campo eléctrico se denomina superficie gaussiana.

$$\Phi = \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_{enc} \quad 1.2-1$$

Donde:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad 1.2-2$$

Analizando el flujo, a través de una superficie cerrada se encuentra que:

$$\oint \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = Q_{enc} \quad 1.2-3$$

La ley de Gauss en su forma diferencial es:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_V}{\epsilon_0}$$

1.2-4

Cuando una distribución de carga tiene una simetría sencilla es posible calcular el campo eléctrico con ayuda de la ley de Gauss [3].

1.3 CAMPO ELÉCTRICO

La idea del campo eléctrico fue propuesta por Faraday al demostrar el principio de inducción electromagnética en el año 1831. Es una alteración del espacio que hace que las partículas cargadas experimenten una fuerza, debido a su carga. Es decir, si en una región determinada una carga eléctrica experimenta una fuerza, entonces en dicha región hay un campo eléctrico. Cuando la intensidad de campo eléctrico en un punto no depende del tiempo, se le conoce como campo electrostático. La intensidad de campo eléctrico en el vacío depende de la carga eléctrica puntual y la distancia [4].

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \mathbf{a}_r$$

1.3-1

Donde:

q : Es la carga eléctrica puntual.

r : La distancia desde la carga puntual q al punto donde se desea calcular el campo eléctrico.

La unidad del campo eléctrico en el Sistema Internacional es Newton por Culombio (N/C) o Voltio por metro (V/m). Un campo eléctrico queda determinado por:

- Intensidad en cada uno de sus puntos.
- Líneas de fuerza o líneas de campo.
- Potencial en cada uno de sus puntos.

La intensidad del campo eléctrico en un punto es una magnitud vectorial que representa la fuerza eléctrica que actúa por unidad de carga de prueba positiva situada en dicho punto.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q'}$$

1.3-2

Dónde:

- \mathbf{F} : es la fuerza eléctrica que sufre la carga q' .
- q' : es la carga eléctrica de prueba positiva.

De aquí se puede deducir que:

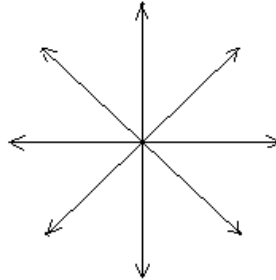
- Si la carga es positiva (q' mayor que cero), la fuerza eléctrica tendrá el mismo signo que el campo y por lo tanto q' se moverá en el sentido del campo.
- Si la carga es negativa (q' menor que cero), la fuerza eléctrica tendrá distinto signo que el campo eléctrico y por lo tanto q' se moverá en sentido contrario al campo.

1.4 LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

Supongamos una pequeña carga de prueba situada en cualquier punto, una distribución simétrica de líneas (cada una a 45°) indica que hay simetría azimutal, es decir, tiene simetría radial alrededor del punto central. Las puntas de las flechas indican la dirección del campo eléctrico. Estas líneas comúnmente se denominan

líneas de campo, también llamadas líneas de flujo y líneas de dirección (ver figura 2) [4].

Figura 2 Líneas de campo eléctrico o líneas de dirección.

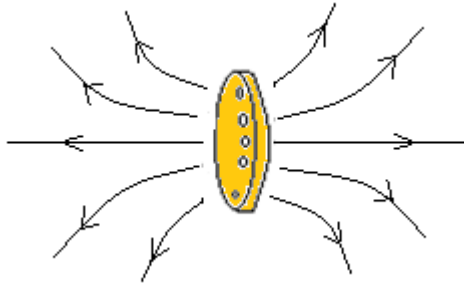


Fuente: HAYT William H., BUCK Jr. John A. Teoría Electromagnética [4].

El espacio entre ellas indica la densidad de campo eléctrico \mathbf{D} . En las regiones en donde las líneas están cercanas entre sí, esta se intensifica, mientras que donde están muy separadas es menor. De aquí se deduce que la densidad de líneas es proporcional al campo. Así, un campo uniforme estará representado por líneas de campo igualmente espaciadas, rectas y paralelas. A mayor concentración de líneas, mayor módulo.

En el siguiente ejemplo de un disco cargado ver figura 3, la densidad de flujo eléctrico es mayor en las cercanías del disco y disminuye a medida que se aleja de él.

Figura 3 Líneas de campo eléctrico correspondientes a un disco con carga eléctrica positiva.



Fuente: WIKIPEDIA ENCICLOPEDIA LIBRE Líneas de campo [en línea] disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADneas_de_campo

1.5 POTENCIAL ELECTROSTÁTICO

El potencial electrostático en un punto del espacio es la energía potencial eléctrica que adquiere una unidad de carga positiva situada en dicho punto.

$$V = \frac{W_p}{q'}$$

1.5-1

Dónde:

- V: es el potencial eléctrico en un punto del campo eléctrico. Su unidad en el sistema internacional es el Julio por culombio (J/C) que en honor a Alesandro Volta recibe el nombre de Voltio.
- Wp: es la energía potencial eléctrica que adquiere una carga testigo positiva q' al situarla en ese punto.

1.6 CAMPO ELÉCTRICO Y POTENCIAL DE UN CONDUCTOR

El campo electrostático dentro de un conductor \mathbf{k} es nulo, de lo contrario el campo forzaría el movimiento de los electrones de conducción. Lo anterior define que en el interior del conductor \mathbf{k} debe ser una región con potencial eléctrico constante, es decir, V_k no puede variar de un punto a otro. La superficie está al mismo potencial que en el interior, por lo que la carga eléctrica del conductor \mathbf{k} se encuentra en su superficie, con una densidad superficial σ .

$$V_k = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L}$$

1.6-1

V_k : es la tensión o potencial aplicado a un conductor eléctrico \mathbf{k} .

Si σ está uniformemente distribuida por la superficie del conductor, y \mathbf{A} es su área, entonces la carga del conductor es igual a la densidad superficial por el área.

$$Q = \sigma A$$

1.6-2

Si por el contrario σ es variable dentro de la superficie entonces la carga del conductor es igual:

$$Q = \oint \sigma dS$$

1.6-3

1.7 MÉTODO DE LAS IMÁGENES

El método de las imágenes implica la conversión de un sistema en otro equivalente para facilitar el cálculo de la intensidad de campo eléctrico. En ciertos casos es posible sustituir un conductor por una o más cargas imágenes de modo que las superficies conductoras se sustituyen por superficies equipotenciales.

Para el cálculo del campo eléctrico en las cargas imágenes que sustituyen el conductor se tiene en cuenta el teorema de unicidad, el cual permite encontrar soluciones por analogías con problemas conocidos. Normalmente es necesario añadir cargas fuera del dominio original [5].

El teorema de unicidad garantiza la existencia de soluciones.

- En el problema general del potencial.

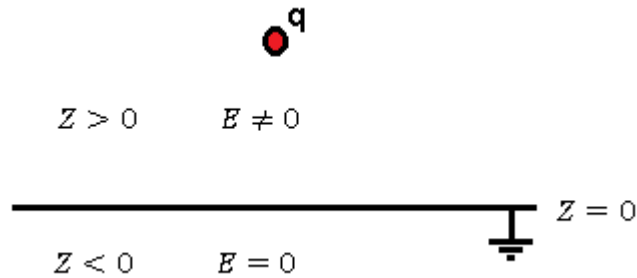
$$\nabla^2 V_k = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{1.7-1}$$

$$V_k \rightarrow 0 \quad (r \rightarrow \infty) \tag{1.7-2}$$

- Puede demostrarse que existe solución y esta es única.
- También hay solución única si lo que se conoce es Q_k , la cual es la carga generada por el conductor k (es directamente proporcional a la tensión del conductor).
- A lo anterior, se recomienda comprobar dos soluciones: se cumple la ecuación y se satisfacen las condiciones de contorno.

Supongamos una superficie conductora plana de gran extensión puesta a tierra, frente a ella se encuentra solamente una carga puntual q . El plano divide el espacio en dos regiones, $Z < 0$ (donde $E = 0$) y $Z > 0$ (donde $E \neq 0$).

Figura 4 Superficie conductora plana con la carga puntual en $Z > 0$.



Fuente: LA PLACE Imágenes [en línea] disponible en:
<http://laplace.us.es/campos/teoria/grupo2/imagenes.pdf>

En la región $Z < 0$ la solución es trivial:

$$\nabla^2 V_k = 0 \quad (Z < 0) \tag{1.7-3}$$

$$V_k = 0 \quad (Z = 0) \quad V_k \rightarrow 0 \tag{1.7-4}$$

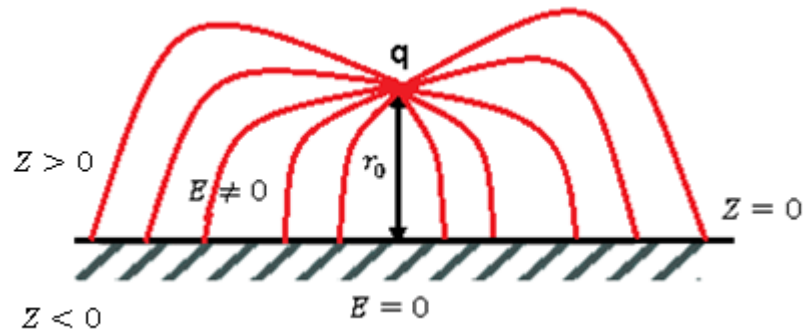
Por lo tanto:

$$V_k = 0 \tag{1.7-5}$$

$$E = 0 \tag{1.7-6}$$

En la figura 5, se muestra como las líneas de campo eléctrico se distribuyen en el plano $Z > 0$. El campo eléctrico en el plano $Z < 0$ es igual cero, debido a que no se sitúa una carga a la cual se le aplique una tensión V_k en dicho espacio, por lo tanto, no se genera intensidad de campo eléctrico.

Figura 5 Líneas de campo eléctrico en la superficie conductora plana con la carga puntual en $Z > 0$.



Fuente: LA PLACE Imágenes [en línea] disponible en: <http://laplace.us.es/campos/teoria/grupo2/imagenes.pdf>

En la figura 6, se observa el comportamiento de las líneas de campo eléctrico, entre las dos cargas de diferente polaridad. En un sistema formado por dos cargas **+q** y **-q** situadas en r_0 y r_1 , el potencial que se crea es:

$$\nabla^2 V_k = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q}{|r - r_0|} - \frac{q}{|r - r_1|} \right] \tag{1.7-7}$$

Este potencial cumple la ecuación de Poisson $\forall z$:

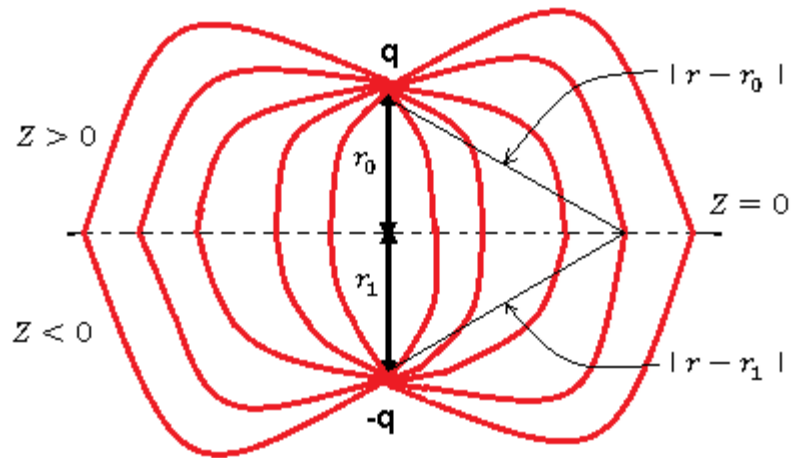
$$\nabla^2 V_k = -\frac{1}{\epsilon_0} (q\delta(r - r_0) - q\delta(r - r_1)) \tag{1.7-8}$$

Pero en $Z > 0$, el término: $\delta(r - r_1) = 0$

Entonces:

$$\nabla^2 V_k = -\frac{q}{\epsilon_0} \delta(r - r_0) \tag{1.7-9}$$

Figura 6. Dos cargas de signos opuestos enfrentadas en la superficie conductora plana.



Fuente: LA PLACE Imágenes [en línea] disponible en:
<http://laplace.us.es/campos/teoria/grupo2/imagenes.pdf>

Este potencial cumple:

$$V_k \rightarrow 0 \tag{1.7-10}$$

Como se muestra en la figura 6, se tiene que la magnitud de la distancia desde la carga positiva hasta el plano $Z = 0$, es igual a la magnitud de la distancia desde la carga negativa al mismo plano.

$$|r - r_0| = |r - r_0| \tag{1.7-11}$$

Por lo tanto:

$$V_k = 0 \text{ en } Z = 0 \tag{1.7-12}$$

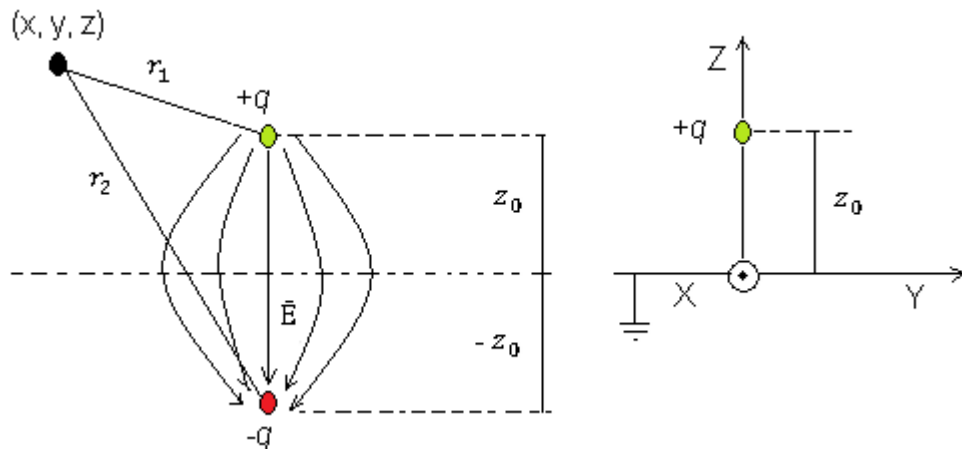
A continuación, un ejemplo de cómo calcular el potencial en cualquier punto.

Ejemplo:

Una carga $+q$ está situada en la posición $(0,0, Z_0)$. El plano XY ubicado en $Z = 0$ es un plano conductor infinito conectado a tierra (potencial nulo). Calcular el potencial en cualquier punto de la región $Z > 0$. Por tanto, se requiere resolver la ecuación de Poisson en la región $Z > 0$ con las condiciones de contorno $V_k = 0$ en $Z = 0$ y en el infinito, lo cual es complicado.

Se sustituye el plano conductor por una carga imagen $-q$ situada en la posición $(0,0,-Z_0)$. Esto no cambia el potencial en la región $Z > 0$ ni las condiciones de contorno. En la figura 7 se observa la ubicación de un punto cualquiera en el cual se va a calcular el potencial.

Figura 7 Cálculo de la tensión en un punto cualquiera en el plano $Z > 0$.



Fuente: UCLM Metodo imágenes [en línea] disponible en:
https://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/EMO2_2013/Metodo_imagenes.pptx

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - z_0)^2}$$

1.7-13

$$r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + z_0)^2}$$

1.7-14

$$V_k(x, y, z) = \frac{Q_k}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] = \frac{Q_k}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - z_0)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z + z_0)^2}} \right]$$

1.8-15

Véase que en todos los puntos del plano XY ($Z = 0$) se cumplen las condiciones $V_k(x, y, 0) = 0$ y también $V_k = 0$ en el infinito. De acuerdo con el teorema de unicidad, esta es por tanto la solución correcta [4].

1.8 MEDIDORES DE CAMPO ELÉCTRICO

Un medidor de intensidad de campo eléctrico se compone de dos partes, la sonda y el detector. Para los medidores disponibles comercialmente, el detector está contenido usualmente dentro de una sonda o es parte integral de esta. El detector mide la corriente inducida de estado estable o la carga oscilante entre las mitades conductoras (electrodos) de la sonda.

Es posible medir la intensidad del campo eléctrico en líneas de alta tensión utilizando este tipo de medidores.

1.8.1 Medidores Spectran de aaronia: Recomendados para realizar mediciones de los campos electromagnéticos en lugares de trabajo y hogares. Los equipos miden tanto el componente magnético como el eléctrico de los campos electromagnéticos de baja y alta frecuencia generados por transformadores, líneas de alta tensión, equipos médicos e industriales, entre otros equipos eléctricos. Los medidores Spectran muestran el espectro de frecuencias de los campos electromagnéticos detectados, puede medir la intensidad del campo eléctrico en líneas de alta tensión a cualquier frecuencia, dentro del rango del medidor. Estos medidores pueden grabar mediciones en su memoria interna [6].

Tienen diferentes referencias y son utilizados dependiendo el tipo de campo eléctrico y magnético a medir. Por ejemplo, hay medidores tanto para alta y baja frecuencia. En la tabla 1 muestra las referencias existentes del medidor SPECTRAN a bajas frecuencias.

Tabla 1 Referencia de los medidores Spectran NF utilizados para medir campo eléctrico a bajas frecuencias.

MEDIDOR SPECTRAN	FRECUENCIA	CAMPO ELÉCTRICO
NF-1010E	10 Hz a 2 kHz	1 V/m a 2 kV/m
NF-3020	10 Hz a 400 kHz	0,1 V/m a 5 kV/m
NF-5030	1 Hz a 300 MHz	0,1 V/m a 20 kV/m
NF-5035	1 Hz a 300 MHz	0,1 V/m a 20 kV/m
NF-5030S	1 Hz a 300 MHz	1 V/m a 50 kV/m

1.8.2 Medidores de Gigahertz Solutions: ME 3030B medidor de campo electromagnético: recomendado para uso particular, para la realización de mediciones de campo electromagnético. Es un equipo de manejo fácil, preciso y fiable que mide tanto el componente magnético, como el eléctrico de los campos electromagnéticos de baja y alta frecuencia generados por transformadores, líneas de alta tensión y demás equipos eléctricos. Mide el campo electromagnético en el rango de frecuencias de 16 Hz a 2 kHz. [7] [8]

El NFA 1000, es un medidor de campos electromagnéticos de uso profesional, mide el campo magnético total, en tercera dimensión que dispone de un registro de datos. Igual que el ME 3030B, mide tanto el componente magnético en [nano Teslas], como el eléctrico [V/m] en bajas y altas frecuencias generados por transformadores, líneas de alta tensión y equipos eléctricos en el rango de frecuencias de 5Hz – 1000 kHz [9].

1.8.3 Medidor Utilizado El instrumento de medida del campo eléctrico a utilizar en este trabajo para la medición de los campos eléctricos es el SPECTRAN NF-5035 de Aaronia. Este hace posible la medición del campo eléctrico a bajas frecuencias. Sus características principales son: una pantalla LCD, una batería interna de 9 Voltios, un teclado para las configuraciones del instrumento; el rango de medida del campo eléctrico y el rango de frecuencias, que son las estipuladas en la tabla 1 [6] [10].

1.9 VALORES DE CAMPO ELÉCTRICO

El campo eléctrico natural originado en la superficie de la tierra es de 100 V/m a 150 V/m. A diferencia de las descargas de un rayo hacia la superficie de la tierra, que alcanzan valores de campo eléctrico hasta de 2 MV/m. De acuerdo a la reglamentación colombiana existen unos límites de campo eléctrico a la cual puede ser expuesto el público en general. Estos límites permisibles son expuestos en el artículo 14 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE [2].

El reglamento establece valores de máxima intensidad de campo eléctrico en baja frecuencia, en las zonas donde puedan permanecer personas, independientemente del tiempo de permanencia. Estos están basados en los criterios de la OMS y la institución internacional para la protección de la población y el medio ambiente, frente a las radiaciones no-ionizantes, ICNIRP (revisión 2009).

Por otra parte en Colombia en el reglamento técnico de instalaciones eléctricas RETIE, las personas que se exponen por sus actividades laborales o el público en general a campos electromagnéticos, no debe someterse a campos que superen los valores establecidos en la tabla 14.1 del reglamento, la cual se transcribe a continuación [2].

Tabla 2 Valores límites de exposición a campos electromagnéticos.

TIPO DE EXPOSICIÓN	INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO (kV/m)	DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO (μT)
Exposición ocupacional en un día de trabajo de ocho horas.	8,3	1000
Exposición del público en general.	4,16	200

Fuente: Tomado del Artículo 14, Tabla 14.1 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE 2013 [2].

En la tabla 3, se presenta los 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).

Tabla 3 Niveles de referencia establecidos por la ICNIRP para la exposición ocupacional y poblacional a campos eléctricos.

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

Fuente: ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). 1998. f Es la frecuencia en Hz [1]

En la tabla 4, se exponen los valores límites de umbral de la ACGIH (American Conference of Governmental Industry Hygienists). Una organización de profesionales de organismos gubernamentales o instituciones educativas que participan en la seguridad y los programas de salud en EE. UU, para campos eléctricos de 60 Hz.

Tabla 4 Valores límites de umbral de campo eléctrico según la ACGIH.

Observación	Campo eléctrico [kV/m]
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.

En la tabla 5, se muestra una comparación entre los diferentes niveles de referencia, establecidos por algunos países, para la exposición al campo eléctrico de las instalaciones eléctricas.

Tabla 5 Comparación de niveles permisibles de campo eléctrico entre diferentes ciudades y países. Tomada de: Trabajo de Grado.

País(es) / Estado		Intensidad de campo eléctrico [kV/m]	
		Público general	Ocupacional
EE.UU.	Florida	8-10 ^(2,4) / 2 ^(2,5)	25 ⁽²⁾
	Minnesota	8 ^(2,4)	
	Montana	7 ^(2,4,6) / 1 ^(2,5)	
	New Jersey	3 ^(2,5)	
	New York	11,8 ^(2,4) / 7-11 ^(2,4,6) / 1,6 ^(2,5)	
	Oregón	9 ^(2,4)	
Canadá, Corea del Sur, Paraguay, Sudáfrica, Venezuela		4,2 ^(2,3)	8,3 ^(2,3)

País(es) / Estado	Intensidad de campo eléctrico [kV/m]	
	Público general	Ocupacional
Argentina	3 ^(1,5)	25 ⁽¹⁾
Brasil	5 ⁽²⁾	25 ⁽²⁾
Colombia	4,16 ⁽²⁾	8,3 ⁽²⁾
Costa Rica	2 ⁽²⁾	
Japón	3 ^(1,2)	3 ^(1,2)
Rusia	0,5 ^(1,7) / 1 ^(1,8)	5 ^(1,9)
Alemania	5 ^(1,3)	10 ^(1,3)
Australia y la Unión Europea ⁽¹⁰⁾	5 ^(1,3) / 4,2 ^(2,3)	10 ^(1,3) / 8,3 ^(2,3)

Fuente: CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN CRÍTICA DE SUS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN TENIENDO COMO REFERENCIA LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA, 2011 [11].

Notas:

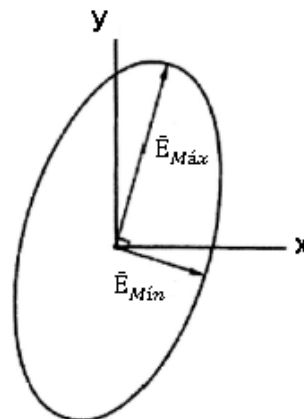
- (1) Aplicable para una frecuencia de 50 Hz.
- (2) Aplicable para una frecuencia de 60 Hz.
- (3) Basado en las recomendaciones de ICNIRP.
- (4) Se aplica sobre la zona de servidumbre de las líneas de alta tensión.
- (5) Se aplica en el borde y fuera de la zona de servidumbre de las líneas de alta tensión.
- (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 recomienda 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.

1.10 LOS CAMPOS ELÉCTRICOS EN UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En las líneas de transmisión de alta tensión se generan campos eléctricos con una intensidad que dependen de diversos factores tales como la tensión de línea, la potencia que transportan, la geometría del apoyo, el número de conductores por fase, la distancia de los cables al suelo, etc. El campo eléctrico producido en una línea de transmisión, es un campo elíptico rotacional como puede observarse en la figura 8, no obstante, a nivel de tierra la elipse se deforma y el campo es perpendicular al plano de tierra, es decir la componente vertical y horizontal del campo eléctrico son uniforme pero esta última componente es insignificante, puede volverse significativa cuando aumenta la distancia lateral desde los conductores [12].

Figura 8 Elipse descrita por un vector de campo eléctrico, que se encuentra rotando en un plano en el espacio.



Fuente: Electra CIGRÉ [13].

El valor del campo eléctrico inicialmente es uniforme, pero se distorsiona con la presencia de objetos dentro de este, dependiendo del tamaño, forma, etc.

1.11 CÁLCULO DEL CAMPO ELÉCTRICO EN UN CONDUCTOR

Antes de realizar la aplicación teórica (formula) que obtiene valores de campo eléctrico en una línea de transmisión o una línea monofásica, se recomienda estudiar y comprender el método de las imágenes.

Las cargas sobre la superficie de la tierra son simuladas por cargas imágenes de igual magnitud, pero con polaridad contraria a las cargas sobre el conductor. Estas cargas imágenes son apreciadas debajo de la superficie de la tierra, como si estas se asemejaran a un gran espejo perfecto reflejando los conductores [14].

Las cargas son calculadas conociendo la tensión V_k , aplicada a cada conductor k , y la geometría del problema. Esto es requerido para resolver la ecuación 1.1-1.

$$[Q_k] = [P]^{-1}[V_k] \tag{1.11-1}$$

Dónde:

$[Q_k]$: es el vector de cargas por línea del conductor k [C/m]

$[V_k]$: es el vector de tensiones del conductor k [V]

$[P]$: es la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell [m/F]

Las cargas y tensiones son cantidades alternantes a la frecuencia de red y pueden ser expresados por números complejos. La tensión del conductor se representa:

$$V_k(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \varphi) \quad 1.11-2$$

Puede ser escrito como:

$$\mathbf{V}_k = V_{kr} + jV_{ki} \quad 1.11-3$$

Dónde:

V_{kr} : es el valor rms de la componente real (ángulo fase igual a cero)

V_{ki} : es el valor rms de la componente imaginaria (ángulo de fase igual a 90°)

$$V_{kr} = \sqrt{2} |V_k| \cos(\omega t) \quad 1.11-4$$

$$V_{ki} = \sqrt{2} |V_k| \cos(\omega t + 90^\circ) \quad 1.11-5$$

La ecuación 1.11-1 puede ser escrita por ambas cantidades, real e imaginaria.

$$[Q_{kr}] = [P]^{-1}[V_{kr}] \quad 1.11-6$$

$$[Q_{ki}] = [P]^{-1}[V_{ki}] \quad 1.11-7$$

Los coeficientes de potencial $[P_{kk}]$ y $[P_{kl}]$ para un sistema de conductores paralelos tienen la siguiente expresión:

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left[\frac{4H_k}{d_k}\right]$$

1.11-8

$$P_{kl} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left[\frac{S'_{kl}}{S_{kl}}\right]$$

1.11-9

Dónde:

P_{kk} : es el coeficiente de potencial propio del conductor k.

P_{kl} : es el coeficiente de potencial mutuo entre conductores k y l.

d_k : es el diámetro del conductor k.

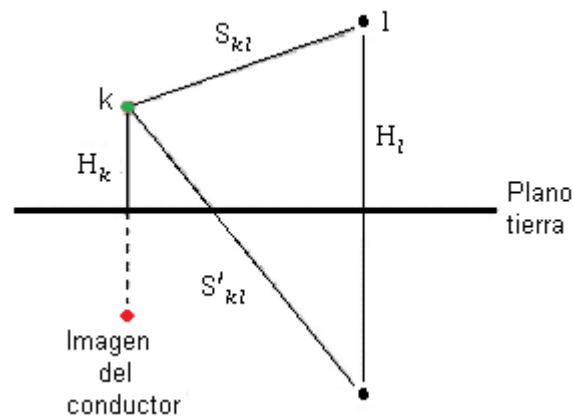
H_k : es la altura sobre el suelo del conductor k.

S_{kl} : es la distancia entre el conductor k y el conductor l.

S'_{kl} : es la distancia entre el conductor k y la imagen del conductor l (ver figura 9).

La matriz de coeficientes de potencial es simétrica: $P_{kl} = P_{lk}$

Figura 9 Dos conductores y sus imágenes.

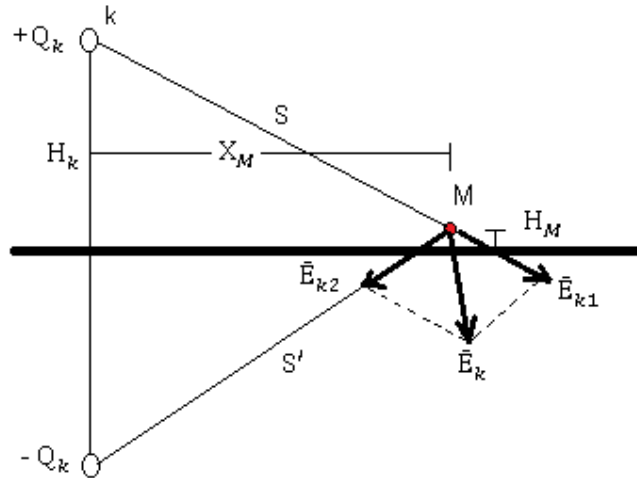


Fuente: Capítulo 7, Transmission line reference book epri, tercera edición [14].

El campo eléctrico es calculado adicionando las contribuciones de todas las cargas con referencia a la figura 10. El campo eléctrico \mathbf{E}_k causado por la línea de carga \mathbf{Q}_k en el punto M sobre el conductor k, es la suma vectorial de los campos \mathbf{E}_{k1} y \mathbf{E}_{k2} debido a la carga y a su imagen procedente del interior de la tierra.

En la figura 10, muestra cómo se descompone el campo eléctrico en el punto M.

Figura 10 Cálculo del campo eléctrico de una línea o conductor, método de las imágenes.



Fuente: capítulo 7, Transmission line reference book epri, tercera edición [14].

La distancia horizontal desde el conductor k y la altura por encima del suelo del punto de medición M son indicados con X_M y H_M respectivamente, mientras H_k indica la altura del conductor k .

La magnitud de las componentes horizontales y verticales del campo eléctrico causado por las cargas en el conductor k , E_{kx} y E_{ky} , son dados por las 1.11-10 y 1.11-11.

Conociendo que, $\mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_{kr} + \mathbf{Q}_{ki} = Q_k + jQ_k$ se tiene:

$$\mathbf{E}_{kx} = \frac{(Q_k + jQ_k)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{X_M}{X_M^2 + (H_k - H_M)^2} - \frac{X_M}{X_M^2 + (H_k + H_M)^2} \right]$$

1.11-10

$$\mathbf{E}_{ky} = \frac{(Q_k + jQ_k)}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{(H_M - H_k)}{X_M^2 + (H_k - H_M)^2} - \frac{(H_M + H_k)}{X_M^2 + (H_k + H_M)^2} \right]$$

1.11-11

Las componente horizontal y vertical del vector campo eléctrico, son calculadas respectivamente adicionando contribuciones de todos los conductores.

$$\mathbf{E}_x = \sum_k \mathbf{E}_{kx} = E_{rx} + jE_{ix}$$

1.11-12

$$\mathbf{E}_y = \sum_k \mathbf{E}_{ky} = E_{ry} + jE_{iy}$$

1.11-13

En la ecuación 1.1-14 se visualiza la magnitud del vector campo eléctrico de la componente horizontal \mathbf{E}_x y vertical \mathbf{E}_y en valor rms :

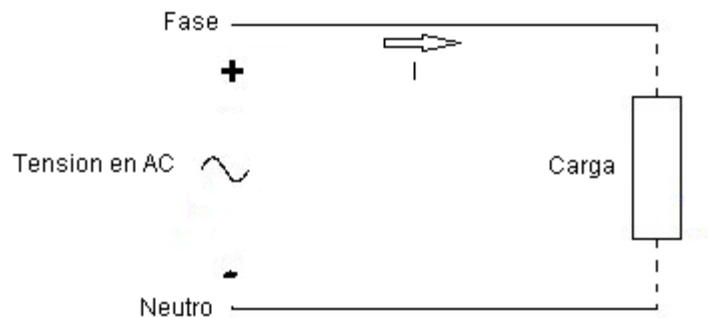
$$E_{rms} = \sqrt{E_{rx}^2 + E_{ix}^2 + E_{ry}^2 + E_{iy}^2}$$

1.11-14

1.12 LÍNEA ELÉCTRICA MONOFÁSICA

Es un sistema para la distribución y consumo de energía eléctrica, formado por una sola fase donde el circuito funciona con dos hilos los cuales uno es dicha fase y el otro se denomina neutro, véase la figura 11. Una línea eléctrica monofásica puede modelarse como un solo conductor que está sometido a una única tensión de fase y corriente.

Figura 11 Sistema monofásico o modelo de línea monofásica

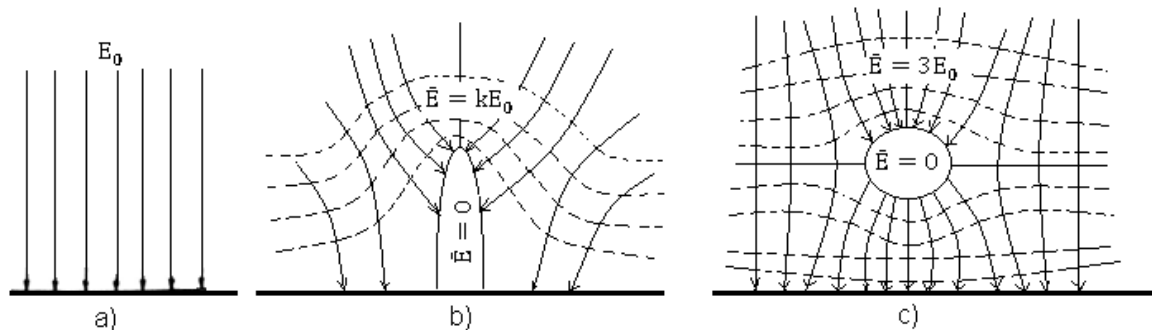


Los sistemas monofásicos son muy utilizados en zonas residenciales de bajo estrato, generalmente 1 y 2. Para estratos mayores a 1 y 2, el sistema monofásico o línea monofásica no es muy utilizado, debido a que en estos estratos se tiende a utilizar sistemas bifásicos o trifásicos.

1.13 CAMPOS ELÉCTRICOS PERTURBADOS

Cuando un objeto conductor de cualquier tipo se sumerge en un campo eléctrico, dicho objeto provoca una migración de las cargas eléctricas, las cuales se organizan ellas mismas sobre la superficie del objeto. Este fenómeno es el primer descubrimiento de la electricidad, llamado “efecto de influencia” o “inducción electrostática”. Las cargas se sitúan en la superficie del objeto creando un campo eléctrico que es sobrepuesto a el campo original. Esto acarrea a que el campo total en la vecindad del objeto cambie, por esta razón el campo se describe como “perturbado” [13]. En la figura 12, se observa la perturbación que ocasiona un objeto conductor ubicado en el área donde se está generando un campo eléctrico.

Figura 12 Perturbación del campo eléctrico por objetos conductores.



Fuente: Electra CIGRÉ [13].

- a) Campo no perturbado
- b) Objeto en el terreno o área donde existe un campo eléctrico.
- c) Objeto de potencial flotante.

Por lo anterior es esencial distinguir entre la intensidad del campo eléctrico no perturbado o el que existía antes de la introducción de algunos objetos (vehículo, animal, vegetal, estructura, equipo eléctrico, etc.) y las diferentes intensidades en la perturbación del campo eléctrico que actualmente existe en la presencia de objetos.

Cuando el campo eléctrico producido por una línea es inducido en objetos, se definen unas cantidades eléctricas las cuales son:

- La corriente, I_{sc} , que fluiría en un corto circuito de los objetos a tierra o a otro objeto conectado a tierra.
- La tensión, V_{og} , inducida entre el objeto y el suelo, u otro objeto.
- La energía, J , que es descargada en una chispa que ocurre cuando se hace contacto entre el objeto y el suelo, u otro objeto conectado a tierra. Si la chispa ocurre en el pico de la onda de tensión J representa la máxima energía guardada (excluyendo los efectos de carga atrapados).

Los parámetros eléctricos de un objeto son:

- El área equivalente de la superficie (S) del objeto. Esta cantidad se define como el área que tendría una placa plana que acoge la misma corriente de corto circuito (I_{sc}), como el objeto. La placa es colocada a nivel del suelo en un campo uniforme del mismo valor, que del campo eléctrico uniforme no perturbado a la que el objeto se expone.
- La impedancia a frecuencia de red (Z_{og}) del objeto. Para algunos objetos esta puede ser representada como una impedancia de Norton, consiste en una resistencia en paralelo con una capacitancia.
- La capacitancia de descarga (C_s). Es la capacitancia entre un objeto y tierra y es descargada con una constante de tiempo corta. Si el objeto está bien aislado del suelo la impedancia a frecuencia de red se debe solo a esta capacitancia [14].

$$Z_{og} = \frac{1}{2\pi f C_s}$$

1.13-1

Dado el campo eléctrico promedio no perturbado, E , y los parámetros eléctricos del objeto S , Z_{og} y C_s , las cantidades de inducción son calculadas así:

$$I_{sc} = j2\pi f \epsilon_0 \bar{E} S$$

1.13-2

$$I_{sc} = \frac{ES}{3 \times 10^8}$$

1.13-3

$$V_{og} = I_{sc} Z_{og}$$

1.13-4

$$J = \frac{1}{2} C_s (\sqrt{2} V_{og})^2 = C_s V_{og}^2$$

1.13-5

Donde J es la energía que se descarga cuando la tensión entre el objeto y tierra está en su valor pico que es $\sqrt{2}$ veces mayores que el valor eficaz. El campo eléctrico uniforme no perturbado, en la ubicación del objeto representa la fuente de inducción. Lo anterior permite evaluar la inducción de un objeto, sin tener en cuenta la geometría y los parámetros eléctricos de los conductores que generan campo eléctrico.

2. GUÍA PARA EL USO DEL MEDIDOR DE CAMPO ELÉCTRICO SPECTRAN NF-5035.

La medición del campo eléctrico en este trabajo se va a realizar con ayuda del dispositivo SPECTRAN NF-5035 de Aaronia. A continuación se plantea un paso a paso de cómo se debe utilizar el equipo de medida y de cómo obtener los datos de la medición comunicando el equipo con el ordenador o computador portátil [6].


2.1 INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

El SPECTRAN NF-5035 cuenta con las siguientes instrucciones de seguridad:

- Evitar contacto del dispositivo con agua, no usarlo cuando llueva ya que podría causar daños en la electrónica sensible del dispositivo.
- No exponerlo al calor excesivo, no dejarlo en el auto ó al sol.
- Es muy sensible a golpes o choques, no dejarlo caer, esto llevaría a destruirlo por completo debido a su alta sensibilidad causando daños al sensor y la pantalla del dispositivo.
- Mantenerlo fuera del alcance de los niños.
- No requiere mantenimiento, limpiar solo su exterior con un paño húmedo. No use ningún agente de limpieza.
- Evitar la conexión del cargador a tensiones que sobrepasen la nominal, sino la electrónica altamente sensible podría ser destruida.

2.2 ENCENDIDO / APAGADO

Se aconseja tener en cuenta las siguientes recomendaciones:


- Pulsar el botón ENCENDIDO  si no hay respuesta es porque la batería no está cargada.
- Conectar el cargador a un punto de alimentación de 120 V y al SPECTRAN.
- Apagar el dispositivo, la batería se carga automáticamente.
- Con el acumulado de 1300 mAh, la carga completa toma aproximadamente 24 horas.
- Después del proceso se realiza el encendido nuevamente.








2.3 RANGO DE FRECUENCIAS

El rango de frecuencias se puede determinar tanto automáticamente como manualmente. En el dispositivo está pre memorizada la configuración de frecuencias óptimas para corriente de red (60Hz), estas están configuradas en las letras numéricas del 1 al 5, la tecla número 2 es la más óptima [6].


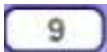

También es posible determinar el rango de frecuencias manualmente con el fin de adaptarse a cualquier tipo de señal para medirla en un valor exacto. Para la determinación del rango de frecuencias es necesario conocer la frecuencia inicial y final he introducirlas al equipo.

Un paso a paso de cómo se determina un rango de frecuencias es el siguiente:

- Pulsar la tecla  y automáticamente queda configurado el rango de frecuencias de 45 – 65 Hz. También se puede hacer manualmente.

- Pulsar la tecla Menú  seleccione opción **fLow** para la frecuencia inicial.
- Seleccionar Hz mediante las teclas de flecha.
- Confirmar con la tecla Enter 
 - Aparece un cero en la indicación principal, además el campo ESTADO indica START.
 - Introduzca la frecuencia inicial con ayuda del teclado numérico del dispositivo escriba, 10 por ejemplo.
- Pulsar la tecla Enter  para confirmar.
- Pulsar la tecla Menú  seleccione **fHigh** para la frecuencia final.
- Confirmar su selección mediante la tecla Enter 
 - Aparece un cero en la indicación principal, además el campo ESTADO indica STOP.
 - Introduzca la frecuencia final con ayuda del teclado numérico del dispositivo escriba, 110 por ejemplo.
- Pulsar la tecla Enter  para confirmar.
- Pulsando la tecla  se regresa al menú principal.

Nota: Un rango de frecuencias amplio sirve para una breve comparación, pero no se recomienda para una medición exacta.

- Pulsar la tecla menú  o la tecla  seleccionar **RBW** (ancho de banda de resolución).
- Seleccionar un ancho de banda de 10 Hz para el ejemplo¹
- Pulsar la tecla Enter  para confirmar.

El parámetro SPAN determina el ancho de frecuencias en el que se realiza la medición. La frecuencia inicial y final se adaptan automáticamente. En el ejemplo, el SPAN sería igual a la frecuencia final menos la frecuencia inicial:

$$\begin{aligned} \text{SPAN} &= f_{\text{High}} - f_{\text{Low}} \\ \text{SPAN} &= 110 \text{ Hz} - 10 \text{ Hz} \\ \text{SPAN} &= 100 \text{ Hz} \end{aligned}$$



El **SpTime** se relaciona con el **RBW** de la siguiente manera:

Tabla 6 Relación del tiempo de muestreo con el ancho de banda de resolución.

RBW	SpTime
10 Hz	70 segundos
30 Hz	30 segundos
100 Hz	7 segundos
300 Hz	3 segundos
1 kHz	700 milisegundos

- Pulsar menú  o la tecla  seleccionar mediante las teclas de flecha **SpTime** (tiempo de muestreo).

⁵ Nota: Se recomienda seleccionar un ancho de banda que sea aproximadamente 10 veces más pequeño que el SPAN.

- Confirmar con la tecla Enter 
- Aparece un cero en la indicación principal, además el campo ESTADO indica SWEEP.
- Introduzca el tiempo de muestro en segundos [ms] mediante las teclas numéricas.
- Para el ejemplo ingrese el número 5000, pulsar la tecla Enter  para confirmar.

2.4 FUNCION AUTORANGE





Los valores de campo eléctrico al ser medidos pueden diferir considerablemente y el SPECTRAN cubre un rango de medición extremadamente ancho, la indicación de los diferentes niveles medidos, solo sería posible con una pantalla numérica de varias decenas de dígitos. Con el fin de hacer una indicación informativa con 4 dígitos, el dispositivo ofrece la función “**Autorange**”.

En este trabajo se utilizó el prefijo kilo representado con la letra **k**. Por lo general el SPECTRAN adapta el prefijo automáticamente. No es necesario seleccionarlo manualmente. A través de la opción **UScale** del menú del dispositivo, también es posible determinar el prefijo fijo para los valores que se indican en la pantalla, en este caso la función **Autorange** se suprime.


2.5 SELECCIONAR EL SENSOR ADECUADO

Para realizar la medición del campo eléctrico el dispositivo necesita un sensor el cual se encuentra integrado dentro de él. El sensor de campos eléctricos solo mide unidireccionalmente, se obtiene una orientación óptima cuando el campo entra lateralmente al dispositivo (eje Y). Este se encuentra en la esquina superior izquierda del dispositivo, bajo la indicación del estado audio.

La configuración del dispositivo para medir campos eléctricos es la siguiente:

- Pulsar la tecla menú  o la tecla , seleccionar la opción **Dim** para la medición de campo eléctrico y escoja la opción 1D (una dimensión).
- Pulsar la tecla  seleccionar el sensor **E-Fld**.
- Pulsar la tecla Enter  hasta que aparezca "SPECTRUM" en el campo MODO OPERATIVO, así se obtendrá los resultados de la medición en un análisis espectral.

Si la indicación principal indica "0000" no se encuentra ninguna señal.

- Pulsar la tecla punto , en el campo MODO OPERATIVO aparece la palabra **HOLD**, muestra el valor más alto. La pantalla simula detenerse y se puede leer el resultado de la medición.
- Para desactivar el modo HOLD pulsar por segunda vez la tecla punto.
- Pulsar la tecla menú, seleccione la opción **MrkCnt** para determinar el número de marcadores a utilizar, en este caso escoger solo 1 marcador ya que se va a trabajar a una sola frecuencia.
- Pulsar la tecla menú, seleccione la opción **MrkDis** para la visualización de los marcadores en la pantalla, escoja la opción **Freq** para ver la frecuencia del marcador seleccionado con cifras grandes.

2.6 ANCHO DE BANDA Y ATENUADOR INTERNO

El ancho de banda sirve para visualizar señales en diferentes frecuencias, obteniendo así un valor más exacto del campo eléctrico. Las unidades métricas del ancho de banda es Hz. El atenuador interno amortigua varios dB de la señal inyectada, es una opción para obtener valores de campo eléctrico. Tiene las siguientes opciones:

Auto: el atenuador se pone automáticamente (10 dB y 20 dB).

0 dB: no se pone ningún atenuador

10 dB, 20 dB, 30 dB y 40 dB: atenúa la entrada.

Nota: Tener en cuenta que los atenuadores de 0 dB, 30 dB y 40 dB siempre deben ser puestos manualmente.

Para saber si el atenuador escogido es el correcto hay que poner el atenuador máximo (40dB), se presenta un valor en la pantalla. Después se cambia al atenuador inferior (30dB), si el valor medido es más bajo que el anterior el amplificador está sobreexcitado y se debe usar el atenuador de (40dB) de nuevo. Si por el contrario el resultado obtenido se mantiene casi idéntico, el atenuador activo es el correcto.

En el ejemplo seleccionar el atenuador de 30dB.

2.7 CONECTOR USB

El mini conector USB B de 5 polos del SPECTRAN sirve para la conexión con el ordenador o el portátil. Permite leer los datos almacenados del SPECTRAN, actualizar o usar el software de análisis espectral del SPECTRAN para realizar un análisis de señales directamente en la PC, así como para controlar el SPECTRAN.



Para la conexión, se necesita un cable USB 2.0 apantallado de alta calidad con USB A, a mini USB B de 5 polos.

2.8 LOGGER, GRABACION / INICIAR EL ALMACENADOR DE DATOS

Para almacenar los datos medidos desde el dispositivo, se utiliza la función **Logger**, con esta se puede iniciar una grabación a largo plazo en el rango de frecuencias actualmente seleccionado, durante un plazo libremente seleccionable, se graba el marcador más alto con la frecuencia y el nivel correspondiente.

Cuando se graban y almacenan datos en el dispositivo, para poder leerlos se tiene una ayuda de un software llamado MCS, el cual permite visualizar los valores de campo magnético o eléctrico que se grabaron con la opción Logger del menú del SPECTRAN.

Para empezar a realizar una medición se tiene en cuenta el siguiente proceso:


- Pulsar la tecla Menú  y con ayuda de la flecha hacia abajo seleccionar la opción Logger. Presionar Enter  para confirmar.

Inmediatamente aparece la opción **Count**; que se refiere al número de almacenamientos que se desee para la medición, en este caso se pueden escoger de 4 a 6 almacenamientos, para luego hacer un promedio entre ellos y obtener un valor estimado del campo eléctrico. El número de almacenamientos depende del usuario, es decir, los que necesite utilizar.

- Con ayuda de las teclas numéricas, introduzca el número escogido, por


ejemplo 5. Presionar Enter  para confirmar.

Ahora se activa la opción **Time**; que es la longitud de las pausas entre los almacenamientos en segundos.

- Introduzca el valor del tiempo escogido, por ejemplo 15. Presionar Enter  para confirmar.

La siguiente opción que aparece es **FILEId**; se debe escoger un numero entero con el cual los datos almacenan. Actualmente para almacenar una sola medición solo funciona con el número 1000, pero si se desea almacenar más mediciones entonces se puede hacer con valores cercanos a dicho número.

- Por ejemplo, ingresar el número 1001 con ayuda de las teclas numéricas y

presionar la tecla Enter 

Después de la especificación de **FILEId**, el campo MEMORIA indica **RECORD**, el almacenador está listo ahora.

- Pulsar la tecla de Menú y la grabación se inicia.

Durante la grabación, el número de los almacenamientos restantes después de cada almacenamiento se indica brevemente en la pantalla. Así, se sabe cuánto tiempo la grabación durará todavía. Además, se oye un tono corto después de cada grabación (almacenamiento).

Cuando la grabación está terminada, la palabra **RECORD** desaparece del campo memoria. Ahora los datos pueden ser leídos mediante el software **MCS**.

- Inicie el programa **MCS**, para hacer la conexión con el dispositivo.
- Conecte la entrada USB entre el ordenador y el dispositivo.
- Hacer clic en el programa en la opción “Start Sweep”, que significa comenzar el barrido.

En esta opción el programa extrae y guarda los datos medidos por el dispositivo.

- Hacer clic en “**Spectran**” y luego clic en “**Filemanager**”, también se puede hacer con la combinación de teclas **Ctrl+F**.
- Después hacer clic en el directorio “**Special**” y luego en el fichero “**Logger data**”. Aquí se muestran los datos almacenados en forma de lista / tabla.
- Cuando los datos son almacenados con otro valor en la opción **FILEId**, por ejemplo, el número 1001, se almacenan en el directorio “**Personal**”.

Para guardar los datos medidos encontrados en el fichero “Logger data”:

- Hacer clic en “**Save to disk**”.

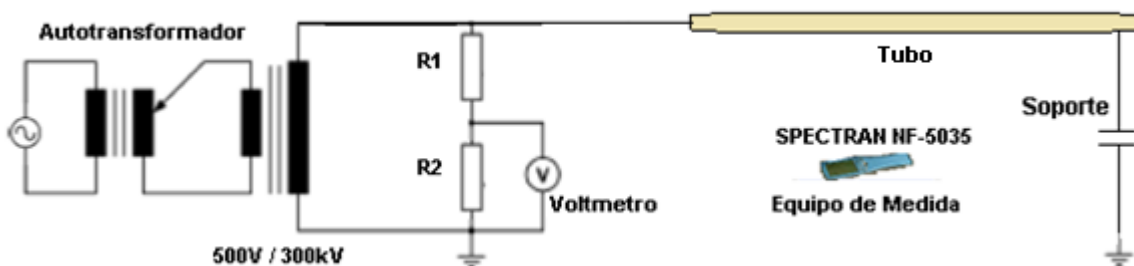
Los datos quedan guardados en la dirección que se desee, después pueden ser representados en una hoja de cálculo para así realizar el promedio de los almacenamientos y encontrar un valor rms de campo eléctrico. El software solo los guarda en formato texto.

También pueden ser copiados y guardados mediante la combinación de teclas **Ctrl+C** y **Ctrl+V** respectivamente, directamente desde el fichero “**Logger data**”, o el directorio “**Personal**”.

3. PRUEBAS PRELIMINARES

El montaje y bosquejo del modelo de la línea monofásica donde se realizarán las mediciones del campo eléctrico en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, se representa en el siguiente esquema:

Figura 13 Esquema de alimentación al modelo de línea dentro del Laboratorio de Alta Tensión, Universidad Industrial de Santander.



Fuente: RUJELES, J y CHACÓN, J. Manual de laboratorio de alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2013 [6].

Transformador elevador de corriente alterna tipo tanque, marca Foster con valores nominales de 500 V / 300 kV, 20 kVA de potencia, corriente primaria máxima 40 A y corriente máxima secundaria 67 mA, el transformador se utiliza para generar tensión de corriente alterna (CA) para las mediciones de campo eléctrico [12].

El devanado primario del transformador de alta tensión es alimentado con un autotransformador. La tensión aplicada se mide, a través de un divisor de tensión óhmico. El valor de resistencia R1 300 M Ω y el valor de la resistencia R2 350 k Ω , relación calibrada 1055/1. Osciloscopio tipo digital marca Fluke y amperímetro de hierro móvil, escala 0 – 48 A, conectado a través del transformador de corriente de relación nominal 8/1.

Los parámetros de la línea en la cual se realiza la medición con el dispositivo SPECTRAN NF-5035 se presentan:

Tabla 7 Conductor para realizar la medición del campo eléctrico con ayuda del dispositivo SPECTRAN NF-5035.

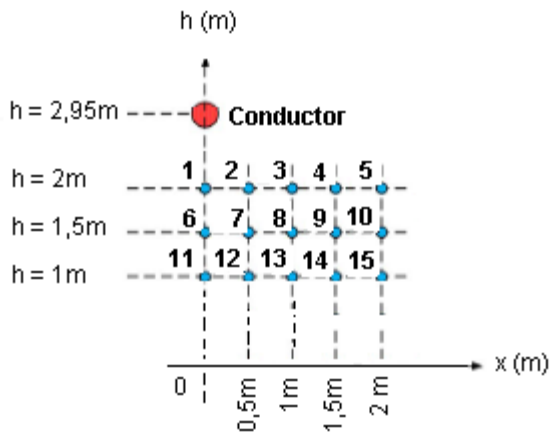
Conductor	Diámetro [cm]	Altura sobre el nivel del suelo [m]
Tubo	4,9	2,95

3.1 CÁLCULOS DEL CAMPO ELÉCTRICO A DIFERENTES NIVELES DE TENSIÓN Y DISTANCIAS AL CONDUCTOR.

En el capítulo 1, en el ítem 1.11. Muestra cómo se debe calcular el valor teórico del campo eléctrico donde posee dos componentes, una en el eje “x” y otra en el eje “y”, es decir, E_{kx} y E_{ky} .

En la figura 14, se muestra la configuración de las distancias al conductor, las cuales se les hará una medición en cada punto a cuatro diferentes niveles de tensión (10, 20, 30 y 40 kilo Volts) [15].

Figura 14 Puntos de ubicación del dispositivo de medición de campo eléctrico SPECTRAN NF-5035.

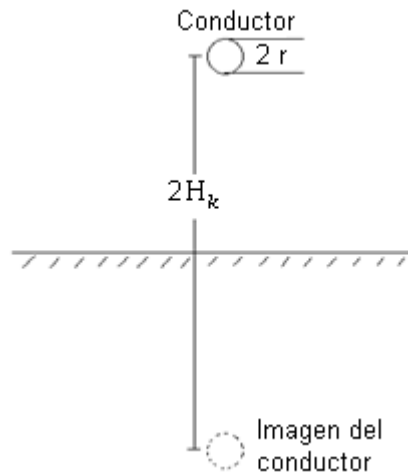


Fuente: Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012 [15].

Los puntos en donde se situará el dispositivo de medición están enumerados del 1 al 15. Para calcular el valor teórico del campo eléctrico en cada punto se necesita calcular la carga eléctrica generada en el conductor en los cuatro niveles de tensión.

Se busca ubicar un conductor a una altura H_k de radio r , se le suministra una determinada tensión para obtener valores de campo eléctrico. Esto se explica a fondo en el capítulo 1.11.

Figura 15 Posición del conductor eléctrico o modelo de línea monofásica una altura de 2,95 metros.



Fuente: BEGAMUDRE, R. D. *Extra high voltage A.C. transmission engineering*. New York: John Wiley, 1986 [16].

La fórmula del cálculo de la carga Q_k del conductor es la siguiente:

$$Q_k = \frac{2\pi\epsilon_0 V_k}{\ln\left[\frac{2H_k}{r}\right]}$$

3.1-1

Dónde:

V_k : es la tensión que está sometido el conductor.

H_k : es la altura en donde está situado el conductor respecto al suelo, $H_k = 2,95$ m

r : es el radio del conductor, $r = 2,45$ cm.

La altura H_k debe ser bastante grande respecto al radio del conductor r ($H_k \gg r$).

- **Ejemplo 1, cálculo de la carga Q_k del conductor.**

Para una tensión de 40 kV y con los valores de altura y radio del conductor, el valor de la carga sería:

$$H_k = 2,95 \text{ m}; r = 0,0025 \text{ m}$$

$$Q_k = \frac{40 \times 10^3 * 2 * 3,1416 * 8,85 \times 10^{-12}}{\ln \left[\frac{2 * 2,95}{0,0245} \right]}$$

3.1-2

$$Q_k = 4,06 \times 10^{-7} \text{ [C]}$$

3.1-3

$$Q_k = Q_k + jQ_k$$

3.1-4

Tabla 8 se muestra el valor aproximado de la magnitud de la carga Q_k del conductor a los cuatro diferentes niveles de tensión.

Tensión [kV]	Carga Q_k [nC]
40	406
30	304
20	203
10	101

Valores de la carga del conductor a diferentes niveles de tensión. Autor 2016.

- **Ejemplo 2, cálculo del campo eléctrico en el punto número 1 (ver figura 14), a 40 kV.**

Para calcular la magnitud del campo eléctrico se realiza de forma igual de un vector de dos dimensiones, recordando las ecuaciones 1.11-12, 1.11-13 y la ecuación 1.11-14 del ítem 1.11, se hallan los valores de campo eléctrico en cada uno de los puntos expuestos en la figura 14.

El punto número **1**, las coordenadas en los ejes (x, y) en metros es (0,2).

La altura H_k del conductor al suelo es 2,95m.

La distancia en el eje X al punto M es: $X_M = 0$.

La altura en el eje Y al punto M es: $H_M = 2$ metros.

La carga magnitud Q_k para el conductor a tensión de **40 kV**, como se muestra de la tabla 8.

$$Q_k = 4,06 \times 10^{-7} \text{ [C]}$$

3.1-5

Reemplazando todos los valores en la ecuación 1.11-10 de \mathbf{E}_{kx} se tiene:

$$\mathbf{E}_{kx} = \frac{(4,06 \times 10^{-7} + j4,06 \times 10^{-7})}{2 * 3,1416 * 8,85 \times 10^{-12}} \left[\frac{0}{(0)^2 + (2,95 - 2)^2} - \frac{0}{(0)^2 + (2,95 + 2)^2} \right]$$

3.1-6

$$\mathbf{E}_{kx} = 0$$

3.1-7

Remplazando todos los valores en la ecuación 1.11-11 de \mathbf{E}_{ky} se tiene:

$$\mathbf{E}_{ky} = \frac{(4,06 \times 10^{-7} + j4,06 \times 10^{-7})}{2 * 3,1416 * 8,85 \times 10^{-12}} \left[\frac{2 - 2,95}{(0)^2 + (2,95 - 2)^2} - \frac{2 + 2,95}{(0)^2 + (2,95 + 2)^2} \right]$$

3.1-8

$$\mathbf{E}_{ky} = -9,160 - j9,160 \text{ [kV/m]}$$

3.1-9

$$E_{rms} = \sqrt{(0)^2 + (0)^2 + (-9,160)^2 + (-9,160)^2}$$

3.1-10

$$E_{rms} = 12,95 \text{ [kV/m]}$$

3.1-11

En las tablas 9, 10 y 11, se resume el cálculo de los valores teóricos de campo eléctrico en todos los puntos, con los cuatro niveles de tensión.

Tabla 9 Valores aproximados del campo eléctrico a una altura de 2 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 diferentes niveles de tensión.

Puntos	Coordenadas (x y) [m]	Tensión [kV]	Campo eléctrico [kV/m]		
			$ E_{kx} $	$ E_{ky} $	$ E_{rms} $
1	(0 2)	40	0	12,95	12,95
		30	0	9,71	9,71
		20	0	6,47	6,47
		10	0	3,24	3,24
2	(0,5 2)	40	4,27	10,57	11,39
		30	3,20	7,92	8,55
		20	2,13	5,28	5,70
		10	1,07	2,64	2,85
3	(1 2)	40	5,02	7,15	8,74
		30	3,76	5,36	6,55
		20	2,51	3,58	4,37
		10	1,25	1,79	2,18
4	(1,5 2)	40	4,33	5,02	6,63
		30	3,25	3,76	4,97
		20	2,16	2,51	3,31
		10	1,08	1,25	1,66
5	(2 2)	40	3,48	3,79	5,15
		30	2,61	2,84	3,86
		20	1,74	1,89	2,57
		10	0,87	0,95	1,29

Tabla 10 Valores aproximados del campo eléctrico a una altura de 1,5 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 diferentes niveles de tensión.

Puntos	Coordenadas (x y) [m]	Tensión [kV]	Campo eléctrico [kV/m]		
			$ E_{kx} $	$ E_{ky} $	$ E_{rms} $
6	(0 1,5)	40	0	9,43	9,43
		30	0	7,07	7,07
		20	0	4,72	4,72
		10	0	2,36	2,36
7	(0,5 1,5)	40	1,94	8,65	8,86
		30	1,45	6,49	6,65
		20	0,97	4,32	4,43
		10	0,48	2,16	2,22
8	(1 1,5)	40	2,83	7,03	7,58
		30	2,12	5,27	5,68
		20	1,41	3,51	3,79
		10	0,71	1,76	1,89
9	(1,5 1,5)	40	2,85	5,52	6,21
		30	2,14	4,14	4,65
		20	1,43	2,76	3,11
		10	0,71	1,38	1,55
10	(2 1,5)	40	2,51	4,38	5,05
		30	1,89	3,28	3,79
		20	1,26	2,19	2,52
		10	0,63	1,09	1,26

Tabla 11 Valores aproximados del campo eléctrico a una altura de 1 metro y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 diferentes niveles de tensión.

Puntos	Coordenadas (x y) [m]	Tensión [kV]	Campo Eléctrico [kV/m]		
			$ E_{kx} $	$ E_{ky} $	$ E_{rms} $
11	(0 1)	40	0	7,90	7,90
		30	0	5,93	5,93
		20	0	3,95	3,95
		10	0	1,98	1,98
12	(0,5 1)	40	0,95	7,53	7,59
		30	0,71	5,65	5,69
		20	0,47	3,77	3,80
		10	0,24	1,88	1,90
13	(1 1)	40	1,53	6,64	6,82
		30	1,14	4,98	5,11
		20	0,76	3,32	3,41
		10	0,38	1,66	1,70
14	(1,5 1)	40	1,69	5,61	5,85
		30	1,27	4,20	4,39
		20	0,84	2,80	2,93
		10	0,42	1,40	1,46
15	(2 1)	40	1,59	4,66	4,92
		30	1,19	3,49	3,69
		20	0,80	2,33	2,46
		10	0,40	1,16	1,23

3.2 MONTAJE Y MECANISMO PARA SITUAR EL MEDIDOR DE CAMPO ELÉCTRICO SPECTRAN NF-5035

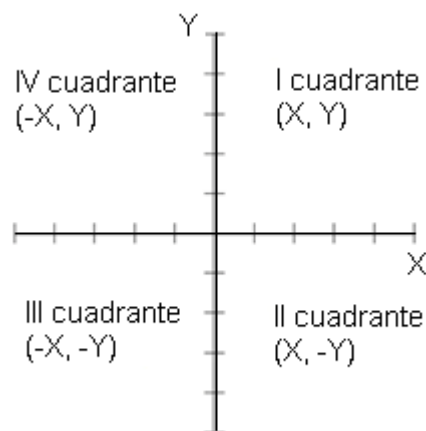
El montaje escogido para realizar la medición del campo eléctrico con ayuda del medidor SPECTRAN NF-5035, se basa en situar el medidor a diferentes alturas, debajo del conductor y haciendo un desplazamiento a la izquierda y derecha del

mismo. Se escoge un plano a trabajar, en tres dimensiones, el cual se hace la medición solo en el plano (X, Y).

En la figura 16, está representado el plano (X, Y) ($Z = 0$) con sus cuadrantes. Se utiliza el primer y cuarto cuadrante ya que la medición se hace sobre el nivel del suelo.

El eje Z no es utilizado porque queda en la misma dirección del conductor, además el medidor solo hace mediciones en una dimensión y es en el eje Y.

Figura 16 Plano cartesiano con sus ejes y cuadrantes.

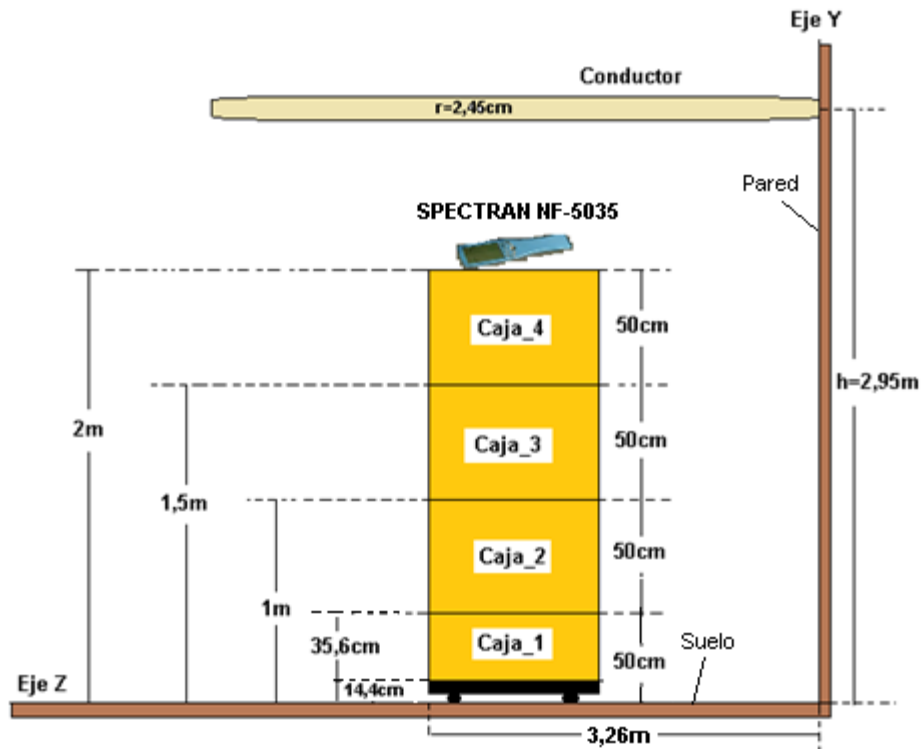


Fuente: GOOGLE. Plano Cartesiano [en línea] disponible en: <https://www.google.com.co/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=plano%20cartesiano%20xy>

Para situar el dispositivo se utiliza un mecanismo, el cual está constituido por elementos que no producen tanta interferencia con el equipo. Estos elementos son materiales no conductores (cajas de cartón, madera etc.)

En la figura 17, muestra el mecanismo que se utiliza para situar el medidor de campo eléctrico.

Figura 17 Montaje y mecanismo para situar el dispositivo SPECTRAN NF-5035.



Las cajas son ubicadas encima de un carro de madera con roda chinas, haciendo dar con él la distancia requerida.

3.3 DIMENSIONES DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN Y SUS EQUIPOS

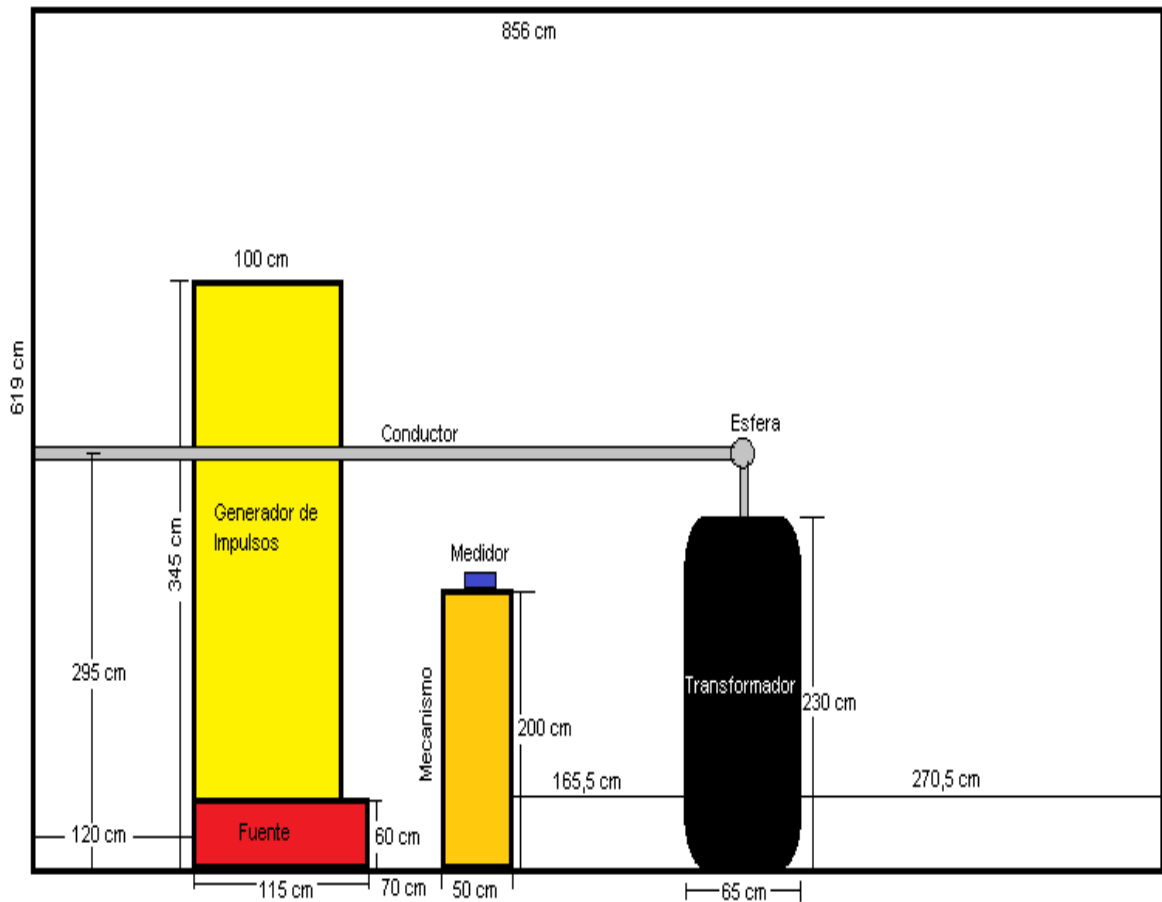
En esta sección se encuentran las dimensiones de los equipos que hay dentro del laboratorio de Alta Tensión y sus dimensiones, con el fin de dar a conocer las consecuencias de tener estos equipos en el mismo sitio en donde se hace la medición del campo eléctrico. También, para confirmar que el campo eléctrico se perturba si existen objetos dentro del sitio de medición, en este caso el laboratorio.

En el capítulo 5, del estándar IEEE 644-1994 R 2008, expresa que para poder hacer mediciones de intensidad del campo eléctrico, representando el campo no perturbado en un lugar determinado, el área donde se ejecuta la medición del campo eléctrico debe estar en lo posible despejada de otras líneas de alta tensión, torres, árboles, vallas, u otras irregularidades. Respecto a lo anterior, se espera que el campo eléctrico sea perturbado debido a todos los equipos que están localizados dentro del laboratorio de alta tensión [17].

Los equipos conductores más cercanos a la línea modelo dentro del laboratorio de alta tensión, son el Generador de Impulsos y el transformador con el cual se está alimentando el conductor especificado en la tabla 7.

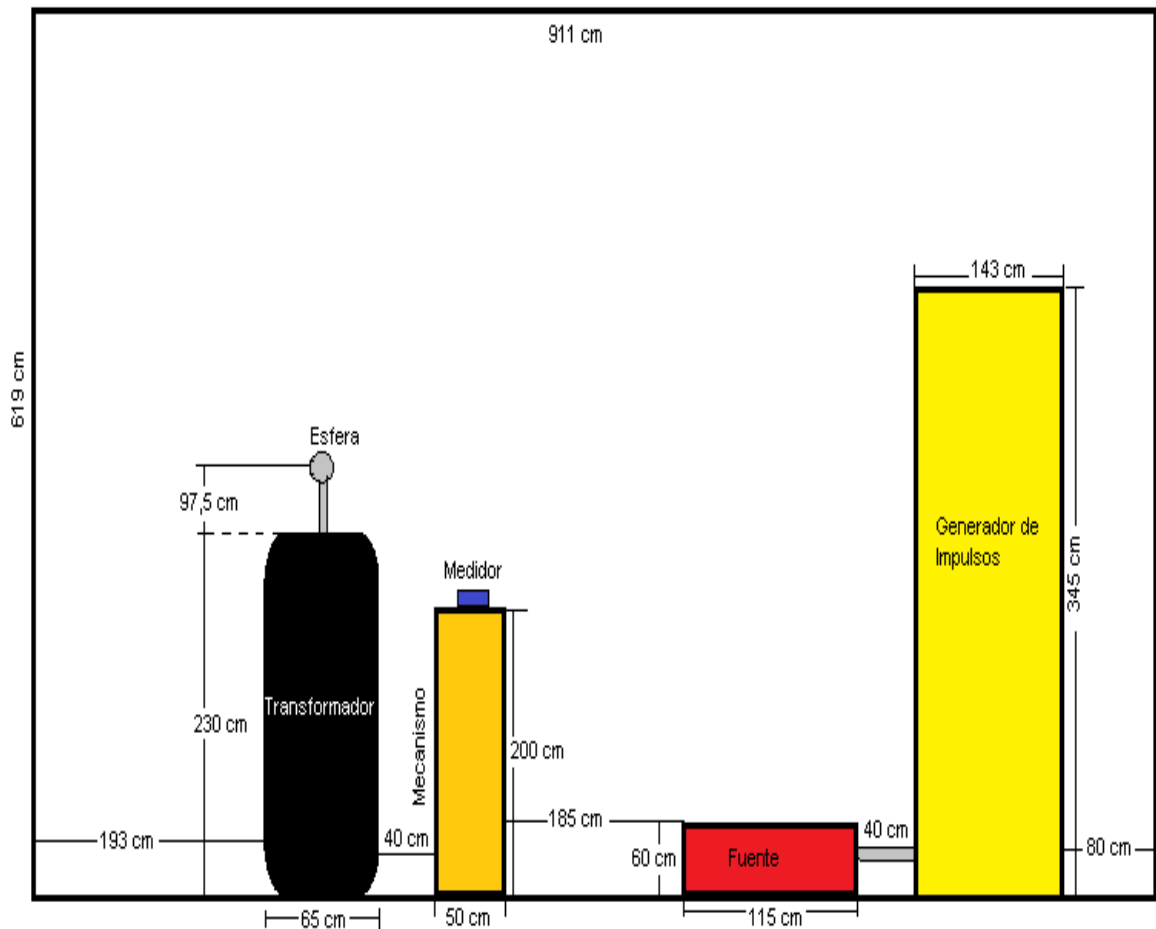
En la figura 18, se muestra esquemáticamente la vista frontal del laboratorio de Alta Tensión y los equipos dentro de él.

Figura 18 Vista frontal de los equipos dentro del laboratorio de Alta Tensión, estimando las coordenadas (0,2 m) del medidor.



En la figura 19, se muestra esquemáticamente la vista lateral derecha del laboratorio de Alta Tensión y los equipos dentro de el.

Figura 19 Vista lateral derecha de los equipos dentro del laboratorio de Alta Tensión, estimando las coordenadas (1,2) metros del medidor.



En la figura 20, se muestra esquemáticamente la vista planta del laboratorio de Alta Tensión y los equipos dentro de él.

4. EJECUCIÓN DE LA MEDICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO

La medición del campo eléctrico se realiza con ayuda del montaje, el mecanismo expuesto en el ítem 3.2, la guía y el medidor. Se debe ubicar el medidor a sus diferentes coordenadas y aplicar los niveles de tensión escogidos para dicha prueba. La medición se inicia ubicando el medidor en el orden de escogencia de los puntos mostrados en la figura 14.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las tablas 12, 14 y 16, se resume la medición de los valores máximos de campo eléctrico en todos los puntos con los 4 niveles de tensión.

Tabla 12 Valores medidos de campo eléctrico a una altura de 2 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 diferentes niveles de tensión.

Puntos	Coordenadas (x y) [m]	Tensión [kV]	Campo Eléctrico [V/m]
			E
1	(0 2)	40	1260
		30	1186
		20	942
		10	472,3
2	(0,5 2)	40	1518
		30	1326
		20	1286
		10	1036
3	(1 2)	40	1335
		30	1326
		20	1293

Puntos	Coordenadas (x y) [m]	Tensión [kV]	Campo Eléctrico [V/m]
			E
1	(0 2)	40	1260
		30	1186
		20	942
		10	472,3
		10	1014
4	(1,5 2)	40	1775
		30	1316
		20	1263
		10	946
5	(2 2)	40	1704
		30	1588
		20	1327
		10	706

La tabla 13 muestra las condiciones ambientales en las que se hicieron las mediciones del campo eléctrico.

Tabla 13 Condiciones ambientales dentro del laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander.

Humedad relativa	Presión	Temperatura Promedio
60,9 %	678,4 mm Hg	26,1 °C

Tabla 14 Valores medidos del campo eléctrico a una altura de 1,5 metros y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 diferentes niveles de tensión.

Puntos	Coordenadas (x y) [m]	Tensión [kV]	Campo Eléctrico [V/m]
6	(0 1,5)		E
		40	1617
		30	1105
		20	590,5
7	(0,5 1,5)	10	350,1
		40	1740
		30	1543
		20	1295
8	(1 1,5)	10	743,1
		40	1758
		30	1613
		20	1412
9	(1,5 1,5)	10	872
		40	1745
		30	1666
		20	1282
10	(2 1,5)	10	709,1
		40	1683
		30	1536
		20	1234
		10	608,4

La tabla 15 muestra las condiciones ambientales en las que se hicieron las mediciones del campo eléctrico.

Tabla 15 Condiciones ambientales dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.

Humedad relativa	Presión	Temperatura Promedio
63,7%	676,2 mm Hg	26,7 °C

Tabla 16 Valores medidos del campo eléctrico a una altura de 1 metro y desplazamiento a la derecha del eje x, a los 4 diferentes niveles de tensión.

Puntos	Coordenadas (x y) [m]	Tensión [kV]	Campo Eléctrico [V/m]
11	(0 1)		E
		40	1382
		30	1254
		20	914
		10	449,8
12	(0,5 1)	40	1642
		30	1542
		20	1367
		10	632,5
13	(1 1)	40	1740
		30	1572
		20	1300
		10	738,1
14	(1,5 1)	40	1729
		30	1625
		20	1287
		10	746,8
15	(2 1)	40	1682
		30	1541
		20	1128
		10	663,3

Las tablas 13, 15 son datos adquiridos por los instrumentos de medición de temperatura, humedad relativa y presión en días diferentes, lo cual se hace necesario incluirlas.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se debe tener en cuenta diferentes elementos en el proceso de la medición, por ejemplo: el lugar de la medición, la temperatura, la interferencia por los objetos que están alrededor del conductor, etc.

A continuación, se hace una comparación entre los valores teóricos estimados del campo eléctrico, respecto de los valores medidos. En la figura 21 se muestra el perfil teórico del campo eléctrico a una altura de 1 metro respecto al suelo. En la figura 22 se representa el comportamiento experimental del campo eléctrico a la misma altura, medidos con el dispositivo SPECTRAN NF-5035.

Figura 21 Perfil teórico del campo eléctrico, en los 4 niveles de tensión a una altura respecto al suelo de 1 metro.

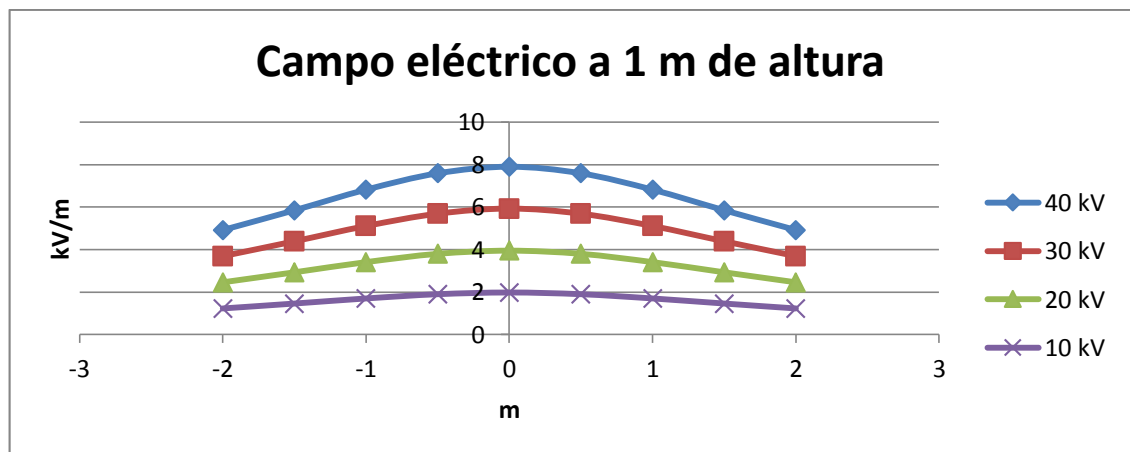
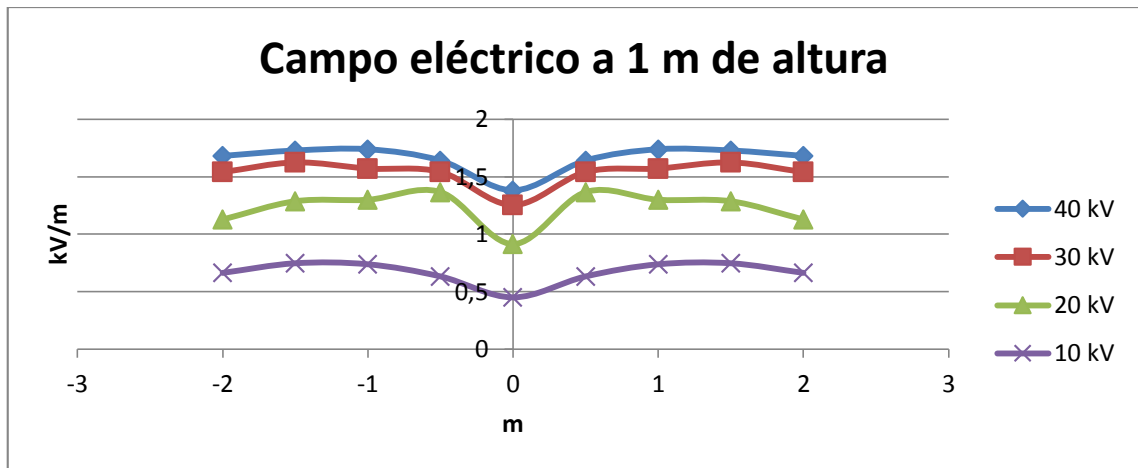


Figura 22 Comportamiento experimental del campo eléctrico, en los 4 niveles de tensión a una altura de 1 metro respecto al suelo.



Como se observa en las dos figuras se evidencian diferencias apreciables. Debido a que el campo eléctrico es perturbado por los equipos dentro del laboratorio y el mecanismo de medición. Por ejemplo, para el caso de 40 kV, teóricamente se tiene un campo de 7,9 kV/m a 0 m en el eje x, en tanto que experimentalmente el valor es de 1,382 kV/m, valores claramente diferentes. Sin embargo, a 1 metro de altura en los dos casos, tanto teórico como experimentalmente se observa una tendencia al decrecimiento en la intensidad del campo eléctrico. En suma, este comportamiento es similar a los diferentes valores de tensión aplicados.

En la figura 23 y 24 se expresa el perfil teórico y el comportamiento experimental del campo eléctrico, a una altura de 1,5 metros respecto al suelo.

Figura 23 Perfil teórico del campo eléctrico, en los 4 niveles de tensión a una altura respecto al suelo de 1,5 metros.

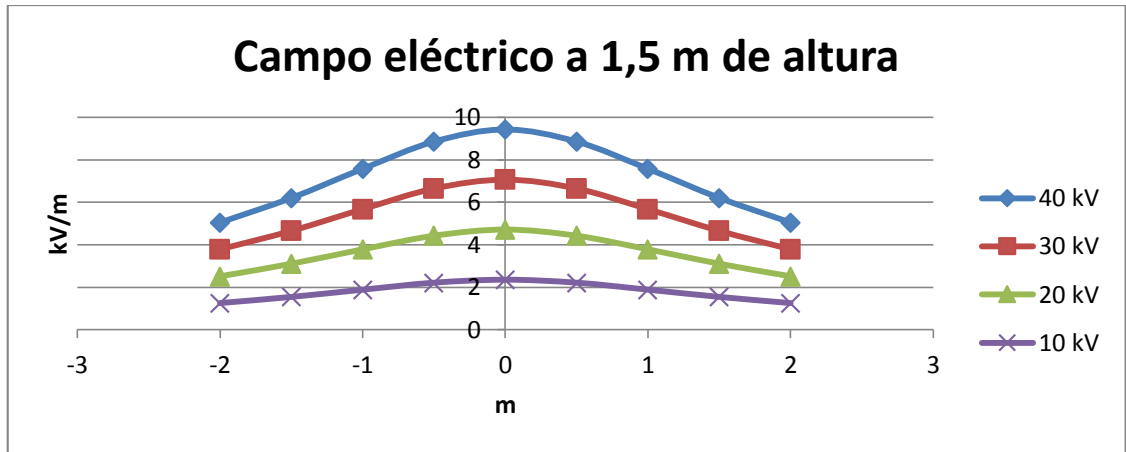
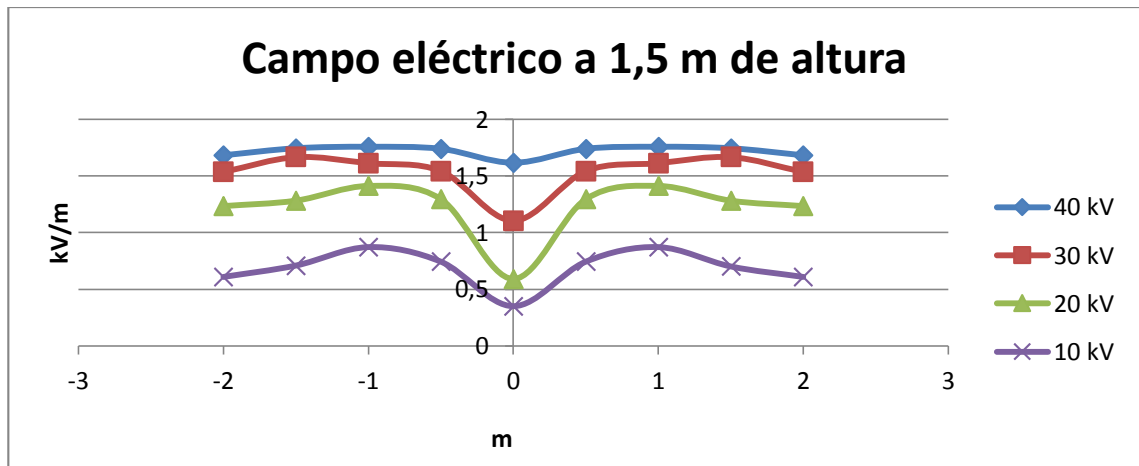


Figura 24 Comportamiento experimental del campo eléctrico, en los 4 niveles de tensión a una altura de 1,5 metros respecto al suelo.



Al respecto, se podría decir que la altura de 1,5 metros, el campo eléctrico experimental sigue dando diferencias apreciables respecto al campo eléctrico teórico. Esto por las mismas razones ya expuestas en el análisis anterior, con la diferencia de que el comportamiento del campo eléctrico, en las tensiones de 40 kV y 30 kV no hay tanta distorsión comparadas con el comportamiento en las tensiones de 20 kV y 10 kV. Comparando lo anterior con el perfil teórico expuesto en la figura 23, los valores de campo eléctrico medidos con cada una de las

tensiones suministradas no son iguales, por tal razón no cumple con lo expuesto en el capítulo 1.3 que a mayor distancia menor intensidad de campo eléctrico. Se observa que aumenta el valor rms de campo eléctrico cuando se incrementa el nivel de tensión.

Los valores rms de campo eléctrico en los puntos lejanos, no son menores a los puntos cercanos al conductor, debido a las interferencias ocasionadas por los equipos y objetos dentro del laboratorio. En la figura 25 y 26 se expone el perfil teórico del campo eléctrico y el comportamiento experimental, a una altura de 2 metros respecto al suelo.

Figura 25 Perfil teórico del campo eléctrico, en los 4 niveles de tensión a una altura respecto al suelo de 2 metros.

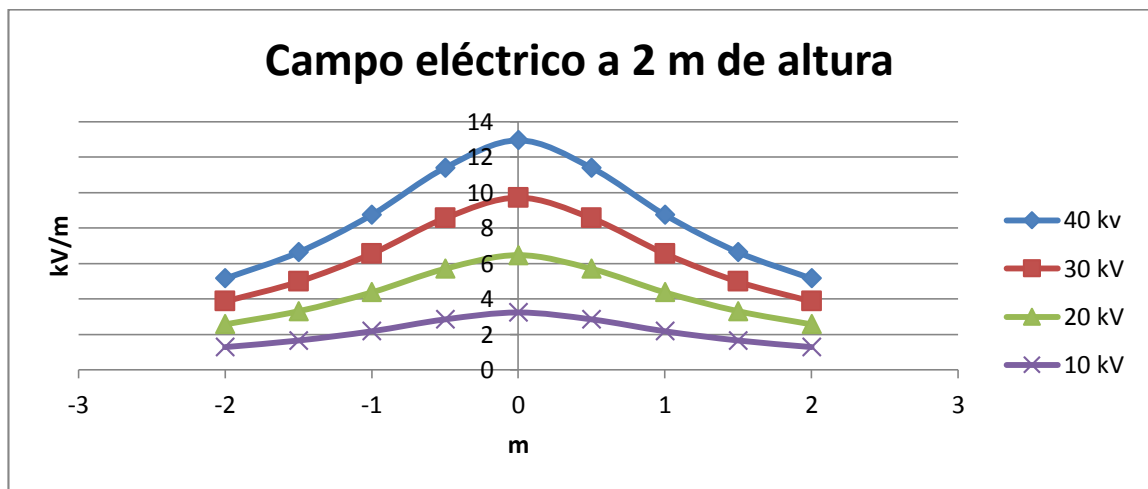
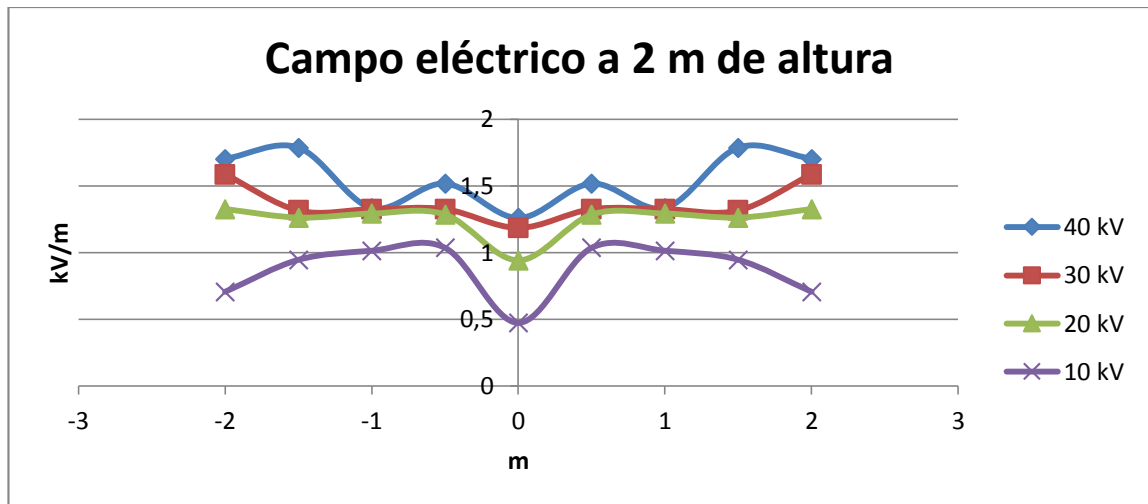


Figura 26 Comportamiento experimental del campo eléctrico, en los 4 niveles de tensión a una altura de 2 metros respecto al suelo.



En las alturas analizadas, se puede observar que los campos eléctricos exactamente debajo del conductor, tienen un valor menor que los campos eléctricos lejanos a él. Esto en lo teórico no es posible según las ecuaciones 1.11-10 y 1.11-11 del ítem 1.11.

Debido a que la distancia X_M es directamente proporcional al campo E_{kx} y E_{ky} . Razón por la cual este valor tendría que dar más alto que los valores lejanos a él, como se ilustra en la figura 25. Por ejemplo: para el caso de 40 kV, el valor del campo eléctrico teórico a 0 metros en el eje x, es de 12,94 kV/m, en tanto que experimentalmente el valor es de 1,26 kV/m. Véase que el comportamiento experimental del campo eléctrico a 40 kV de la figura 26, es muy distinto a los de los demás. Tanto en tensiones como en alturas, se analiza que es porque el medidor está más cercano al conductor y como el campo eléctrico esta perturbado, hace que el medidor obtenga valores aleatorios, sin saber si el valor medido es el correspondiente a esta altura.

En conclusión, todas las figuras del comportamiento experimental del campo eléctrico, se observa que el valor del campo eléctrico no supera los 2 kV/m. Esto supone que el dispositivo SPECTRAN NF-5035, midió valores de campo eléctrico ya perturbados.

6. CONCLUSIONES

- Al realizar las mediciones del campo eléctrico en un modelo de línea monofásica se encuentran valores que comparados con los estimados teóricamente presentan diferencias apreciables al realizar cambios del nivel de tensión y también cuando varía la posición del medidor.
- Se presenta una guía para el uso del medidor, con el fin de facilitar la práctica de medir los campos eléctricos, en las cercanías de un modelo de línea monofásica dentro del laboratorio de Alta tensión.
- Se hicieron los cálculos pertinentes para encontrar unos valores estimados del campo eléctrico de un conductor, ubicado a: 2,95 metros de altura y con un diámetro de 4,95 cm.
- Las diferencias entre lo medido y lo estimado teóricamente, se debe posiblemente a las condiciones del entorno del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander. Donde se encuentra situada la línea modelo a energizar, para adquirir dichos valores de campo eléctrico perturbado.

7. RECOMENDACIONES

- Ajustar el método teórico a simulaciones que involucren cuerpos que perturben el campo eléctrico.
- Adecuar el mecanismo utilizado para situar el medidor de campo eléctrico, con el fin de disminuir las interferencias hechas por el mismo.
- Reemplazar el dispositivo de medición por otra referencia más amplia en valores de campo eléctrico y frecuencias, por ejemplo, el SPECTRAN NF-5030S. Hay medidores específicos para la medición en líneas de transmisión, ver normas IEEE.
- Utilizar estándares IEEE correspondientes a medición de campo eléctrico, por ejemplo, IEEE 644- 1994 (R 2008), IEEE 1308-1994 (R 2010) y IEEE 1460-1990 (R 2008).
- Interactuar con otras universidades que realicen procesos de medición del campo eléctrico, con el fin de profundizar la investigación.
- Ampliar las distancias entre el mecanismo, el dispositivo de medición y los equipos situados dentro del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECCION. ICNIRP GUIDELINES. Published in: Health physics 99(6): 818-836; 2010.
- [2] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Actualización (agosto, 2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Bogotá: El ministerio, 2013.
- [3] Johnk. TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA. Publicado por NORIEGA LIMUSA.
- [4] WILLIAM H. HAYT, Jr. JOHN A. BUCK. Teoría Electromagnética. 3 ed. Granjas Esmeralda México, D.F, 2007.
- [5] UNIVERSIDAD DE SEVILLA, enero del 2008. MÉTODO DE LAS IMÁGENES. Disponible en: <http://laplace.us.es/campos/teoria/grupo2/imagenes.pdf> International
- [6] Manual del instrumento de medida SPECTRAN NF-5035 Disponible en: [http://medea.spf.pt/files/SPECTRAN-NF EN.pdf](http://medea.spf.pt/files/SPECTRAN-NF_EN.pdf)
- [7] RADIANSА CONSULTING, Disponible en: <http://www.radiansa.com/contaminacion-electromagnetica/campos-electromagneticos/medidores-cem.htm>
- [8] Medidor de campo electromagnético ME 3030B Disponible en: <http://www.radiansa.com/contaminacion-electromagnetica/campos-electromagneticos/medidores-cem.htm>

[9] Medidor de campo electromagnético NFA 1000 Disponible en: <http://www.radiansa.com/contaminacion-electromagnetica/campos-electromagneticos/medidores-cem.htm>

[10] Medidor de campo electromagnético SPECTRAN NF Disponible en: <http://www.aaronia.es/productos/analizadores-de-espectro/>

[11] Trabajo de grado título: CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN CRÍTICA DE SUS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN TENIENDO COMO REFERENCIA LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA, 2011.

[12] RUJELES, J y CHACÓN, J. Manual de laboratorio de alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2013.

[13] CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS PRODUCIDOS POR SISTEMAS DE TRANSMISION. Documento preparado por Working Group 36-01 (Interference and Fields). Conferencia internacional sobre grandes sistemas eléctricos de Alta Tensión. HAUSSMANN, Paris.

[14] EPRI AC Transmission line reference book - 200 kV and above. 3 ed. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1011974.

[15] Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, September 17-20, 2012. Kocatepe C., Arikan O, Kumru C. F, Erduman A, Umurkan N. High Voltage Laboratory, Department of Electrical Engineering Yildiz Technical University 34220, Esenler / TURKEY.

[16] BEGAMUDRE, R. D. Extra high voltage A.C. transmission engineering. New York: John Wiley, 1986.

[17] IEEE Std. 644-1994 (R 2008). IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines.

BIBLIOGRAFÍA

AARONIA Medidor de campo electromagnético SPECTRAN NF [en línea]
Disponible en: <http://www.aaronia.es/productos/analizadores-de-espectro/>

BEGAMUDRE, R. D. Extra high voltage A.C. transmission engineering. New York: John Wiley, 1986.

CAMPOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS PRODUCIDOS POR SISTEMAS DE TRANSMISION. Documento preparado por Working Group 36-01 (Interference and Fields). Conferencia internacional sobre grandes sistemas eléctricos de Alta Tensión. HAUSSMANN, Paris.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Actualización (agosto, 2013). Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIÉ). Bogotá: El ministerio, 2013.

CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION, SHANGHAI, China, September 17-20, 2012. Kocatepe C., Arikan O, Kumru C. F, Erduman A, Umurkan N. High Voltage Laboratory, Department of Electrical Engineering Yildiz Technical University 34220, Esenler / TURKEY.

EPRI AC Transmission line reference book - 200 kV and above. 3 ed. EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1011974.

IEEE Std. 644-1994 . IEEE Standard Procedures for Measurements of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines. 2008

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECCION. ICNIRP GUIDELINES. Published in: Health physics 99(6): 818-836; 2010.

JOHNK. Teoría electromagnética. Publicado por NORIEGA LIMUSA.

MEDEA Manual del instrumento de medida SPECTRAN NF-5035 [en línea]
Disponible en: http://medea.spf.pt/files/SPECTRAN-NF_EN.pdf

RADIANSА CONSULTING, [en línea] Disponible en:
<http://www.radiansa.com/contaminacion-electromagnetica/campos-electromagneticos/medidores-cem.htm>

RADIANSА Medidor de campo electromagnético ME 3030B [en línea] Disponible en:
<http://www.radiansa.com/contaminacion-electromagnetica/campos-electromagneticos/medidores-cem.htm>

RADIANSА Medidor de campo electromagnético NFA 1000 [en línea] Disponible en:
<http://www.radiansa.com/contaminacion-electromagnetica/campos-electromagneticos/medidores-cem.htm>

RUJELES, J y CHACÓN, J. Manual de laboratorio de alta tensión. 2 ed. Bucaramanga: Ediciones UIS, 2013.

Trabajo de grado título: CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN CRÍTICA DE SUS VALORES LÍMITES DE EXPOSICIÓN TENIENDO COMO REFERENCIA LA NORMATIVIDAD COLOMBIANA, 2011.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA, enero del 2008. MÉTODO DE LAS IMÁGENES. [en línea] Disponible en:
<http://laplace.us.es/campos/teoria/grupo2/imagenes.pdf>International

WILLIAM H. HAYT, Jr. JOHN A. BUCK. Teoría Electromagnética. 3 ed. Granjas Esmeralda México, D.F, 2007.