



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
POTENCIA**

## **PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**“DISEÑO DE UN SENSOR PARA CAMPO ELÉCTRICO CON EL FIN DE  
IDENTIFICAR UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA”**

### **AUTORES:**

Guanoluisa Arciniega Walter David

Sailema Cholota Jorge Leonardo

### **TUTOR:**

Ing. MSc. Pesántez Palacios Gabriel Napoleón

Latacunga - Ecuador

Septiembre, 2020

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

“Nosotros **Guanoluisa Arciniega Walter David** y **Sailema Cholota Jorge Leonardo** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **Diseño de un sensor para campo eléctrico con el fin de identificar una descarga atmosférica**, siendo **Pesántez Palacios Gabriel Napoleón** tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.



.....  
**Guanoluisa Arciniega Walter David**

C.I. 050401308-7



.....  
**Sailema Cholota Jorge Leonardo**

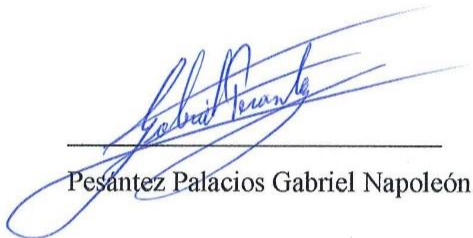
C.I. 180419851-1

## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“Diseño de un sensor para campo eléctrico con el fin de identificar una descarga atmosférica”, de Guanoluisa Arciniega Walter David y Sailema Cholota Jorge Leonardo, de la carrera Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.**

Latacunga, Septiembre, 2020

  
\_\_\_\_\_  
Pesántez Palacios Gabriel Napoleón

### APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: **Guanoluisa Arciniega Walter David** y **Sailema Cholota Jorge Leonardo** con el título de Proyecto de titulación: **DISEÑO DE UN SENSOR PARA CAMPO ELÉCTRICO CON EL FIN DE IDENTIFICAR UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 22 de septiembre de 2020

Para constancia firman:



**Lector 1 (Presidente)**  
**Nombre:** Proaño Maldonado Xavier Alfonso  
**CC:** 0502656424

**Lector 2**  
**Nombre:** González Palau Iliana Antonia  
**CC:** 1757070659

**Lector 3**  
**Nombre:** Guamán Cuenca Wilian Patricio  
**CC:** 0603578956

## AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

Mediante el presente propongo a consideración que los estudiantes de Décimo Ciclo **Guanoluisa Arciniega Walter David** con C.I.: **050401308-7** y **Sailema Cholota Jorge Leonardo** con C.I.: **180419851-1**, realizaron la propuesta tecnológica en la UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI EN LA DIRECCIÓN DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, con el tema **“DISEÑO DE UN SENSOR PARA CAMPO ELÉCTRICO CON EL FIN DE IDENTIFICAR UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA”**, trabajo que se implementó y se dejó en completo funcionamiento.

Es todo cuanto puedo certificar, pudiendo hacer uso del mismo dentro de las leyes de la República y Normas Internacionales.

Latacunga, 21 de septiembre de 2020

Atentamente

  
\_\_\_\_\_  
**PhD. Secundino Marrero Ramírez**  
C.I. 1757107907

**Director de la Carrera de Ingeniería Eléctrica**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por apoyarme en todo momento en el transcurso de mi carrera profesional guiándome en todo momento y ayudarme a seguir adelante, a mi familia por el apoyo incondicional, por brindarme toda su confianza y la oportunidad de formación académica.

Al tutor de la presente Propuesta Tecnológica, MSc. Gabriel Pesántez quien doto de su tiempo, sugerencias y el invaluable apoyo para la culminación del proyecto

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por darme los conocimientos y experiencia necesarios durante todos los años de aprendizaje, así como a la Carrera de Ingeniería Eléctrica, la cual es de vital importancia en la sociedad.

**Walter**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por las bendiciones y pruebas recibidas a lo largo de todo este tiempo.

A mis padres en especial y a mi familia por brindarme toda su confianza y apoyo incondicional.

A nuestro tutor Ing. Gabriel Pesántez quien doto de su tiempo, sugerencias y el invaluable apoyo para la culminación del proyecto

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, la Carrera de Ingeniería Eléctrica y sus docentes, quienes me brindaron los conocimientos para crecer día a día como profesional durante todos los años de aprendizaje.

**Leonardo**

## **DEDICATORIA**

*Este proyecto de investigación se dedica primeramente a Dios quien supo darme la fuerza necesaria para cumplir con uno de los objetivos más importantes de mi vida, el cual era culminar la carrera de Ingeniería Eléctrica.*

*A mis padres Raúl y Alicia, a mi hermano Omar y a mis mejores amigos, quienes han sido un soporte y apoyo fundamental en el transcurso de mi carrera profesional, los cuales me ayudaron a seguir adelante a través de las dificultades que se presentaron en el camino, logrando superarlas de la mejor manera.*

**Walter**



## **DEDICATORIA**

*Este proyecto de titulación se lo dedico a Dios quien me ha permitido vivir hasta este día, guiado a lo largo de mi vida y dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.*

*A mi familia por extenderme su mano en momentos difíciles y que gracias a ellos soy lo que soy. A mis padres Fanny y Marcelo quienes con su amor, paciencia, esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, han inculcado en mi valores y fe, y sobre todo me han brindado un excelente ejemplo de vida a seguir.*

*A mi pareja Alexandra Paola, quien me ha brindado su ayuda desinteresada, estuviste a mi lado en todo momento incluso cuando ni yo creía que iba a lograrlo, siempre con un mensaje esperanzador y motivador me decías que lo iba a lograr.*

**Leonardo**

## ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	i
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN .....	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....	iii
AVAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
DEDICATORIA .....	vii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
AVAL DE TRADUCCIÓN .....	xvi
1. INFORMACIÓN BÁSICA.....	1
2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA .....	2
2.1. Título de la propuesta tecnológica .....	2
2.2. Tipo de propuesta alcance.....	2
2.3. Área del conocimiento .....	2
2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica .....	2
2.5. Objeto de estudio y campo de acción .....	3
2.5.1. Objeto de estudio .....	3
2.5.2. Campo de acción.....	3
2.6. Situación problémica y problema .....	3
2.6.1. Situación problémica .....	3
2.6.2. Problema .....	3
2.7. Hipótesis .....	3
2.8. Objetivos .....	4
2.8.1. Objetivo general.....	4
2.8.2. Objetivos específicos .....	4
2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos.....	5
3. MARCO TEÓRICO .....	6
3.1. Formación de las descargas atmosféricas .....	7
3.1.1. Carga eléctrica en las nubes.....	7
3.2. Descarga atmosférica.....	7
3.2.1. Curva característica de una descarga atmosférica .....	7
3.2.2. Parámetros de las descargas atmosféricas .....	8
3.3. Tipos de descargas .....	8
3.4. Formación de una descarga.....	9
3.5. Formas de medir una descarga atmosférica .....	10
3.6. Nivel Isoceráunico .....	11
3.7. Campos Electromagnéticos.....	12
3.8. Franja de servidumbre .....	14
3.9. Ecuaciones de Maxwell .....	16
3.10. Variación del campo eléctrico durante una nube de tormenta.....	18
3.11. Onda electromagnética .....	19
3.11.1. Características de la onda electromagnética .....	20

3.11.2.	Parámetros de la onda electromagnética.....	20
3.12.	Detectores de descargas atmosféricas.....	21
3.13.	Variables detectadas durante descargas atmosféricas.....	22
3.14.	Sensor Capacitivo .....	22
3.14.1.	Principio de funcionamiento.....	23
3.15.	Procedimiento para la medición del campo eléctrico .....	23
3.16.	Medición de campo eléctrico .....	24
3.17.	Procedimiento para el cálculo del campo eléctrico en líneas de subtransmisión.....	27
3.18.	Modelo matemático de los sensores capacitivos .....	29
3.19.	Coefficiente de correlación lineal .....	38
3.19.1.	Recta de regresión lineal.....	39
3.20.	Coefficiente de determinación .....	40
4.	METODOLOGÍA .....	40
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
5.1.	Prototipos de capacitores .....	43
5.2.	Laboratorio de alta tensión .....	45
5.3.	Diseño del circuito electrónico .....	47
5.4.	Validación del sensor.....	49
5.5.	Método 1 – Ecuación de corrección .....	52
5.6.	Método 2 – Coeficiente de correlación lineal.....	58
5.7.	Selección del sensor más eficaz.....	68
5.8.	Rango de funcionamiento .....	69
6.	PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS .....	71
6.1.	Presupuesto .....	71
6.2.	Análisis de impactos .....	72
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	72
7.1.	Conclusiones.....	72
7.2.	Recomendaciones .....	73
8.	REFERENCIAS.....	74
	ANEXOS.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 3.1.</b> Curva característica de una descarga atmosférica.....	7
<b>Figura 3.2.</b> Tipos de descargas atmosféricas. ....	8
<b>Figura 3.3.</b> Configuración de antenas de medición directa, más usadas en el mundo. ..	11
<b>Figura 3.4.</b> Representación de incidencia mundial anual promedio de un rayo.....	11
<b>Figura 3.5.</b> Nivel isocerámico en Ecuador. ....	12
<b>Figura 3.6.</b> Líneas de campo eléctrico que corresponden a cargas idénticas y diferentes. ....	13
<b>Figura 3.7.</b> Campo magnético producido por la circulación de corriente en un conductor. ....	13
<b>Figura 3.8.</b> Ancho de las franjas de servidumbre. ....	15
<b>Figura 3.9.</b> Variación del campo eléctrico en buen tiempo.....	18
<b>Figura 3.10.</b> Variación del campo eléctrico al aproximarse una nube de tormenta. ....	19
<b>Figura 3.11.</b> Variación del campo eléctrico al aproximarse una nube de tormenta. ....	19
<b>Figura 3.12.</b> Onda plana propagándose a la velocidad de la luz en dirección a X. ....	20
<b>Figura 3.13.</b> Partes de la onda electromagnética. ....	20
<b>Figura 3.14.</b> Modelo de condensador simple.....	22
<b>Figura 3.15.</b> Forma de onda de oscilación de un sensor capacitivo. ....	23
<b>Figura 3.16.</b> Ejemplo para la medición del perfil lateral.....	25
<b>Figura 3.17.</b> Ejemplo para la medición del perfil longitudinal. ....	26
<b>Figura 3.18.</b> Parámetros geométricos de un sistema de conductores. ....	28
<b>Figura 3.19.</b> Capacitor de dos conductores. ....	31
<b>Figura 3.20.</b> Capacitor de placas paralelas. ....	33
<b>Figura 3.21.</b> Capacitor cilíndrico coaxial. ....	36
<b>Figura 3.22.</b> Recta de regresión lineal.....	39
<b>Figura 5.1.</b> Prototipos de sensores capacitivos.....	43
<b>Figura 5.2.</b> Prototipo A.....	44
<b>Figura 5.3.</b> Prototipo B. ....	44
<b>Figura 5.4.</b> Prototipo C.....	45
<b>Figura 5.5.</b> Transformador monofásico.....	45
<b>Figura 5.6.</b> Caja mando del transformador.....	46
<b>Figura 5.7.</b> Jaula de Faraday.....	46
<b>Figura 5.8.</b> Osciloscopio.....	46
<b>Figura 5.9.</b> Extech EMF450. ....	47
<b>Figura 5.10.</b> Señal de corriente alterna.....	48
<b>Figura 5.11.</b> Señal de corriente desplazada.....	49
<b>Figura 5.12.</b> Torre de transmisión 138 kV. ....	50
<b>Figura 5.13.</b> Perfil de campo eléctrico del sensor EMF 450. ....	51
<b>Figura 5.14.</b> Perfil de campo eléctrico entre prototipos A, B y C. ....	51
<b>Figura 5.15.</b> Comparación de prototipo cilindro con ecuación de corrección y sensor EMF 450.....	55
<b>Figura 5.16.</b> Comparación entre prototipo disco interno y externo con ecuación de corrección y sensor EMF 450.....	56

<b>Figura 5.17.</b> Comparación entre prototipo placas paralelas con ecuación de corrección y sensor EMF 450.....	57
<b>Figura 5.18.</b> Error promedio comparativo entre prototipos para el primer método. ....	58
<b>Figura 5.19.</b> Diagrama de dispersión prototipo cilindro.....	63
<b>Figura 5.20.</b> Diagrama de dispersión prototipo disco interno y externo. ....	63
<b>Figura 5.21.</b> Diagrama de dispersión prototipo placas paralelas.....	64
<b>Figura 5.22.</b> Perfil comparativo entre EMF 450 y prototipo cilindro. ....	65
<b>Figura 5.23.</b> Perfil comparativo entre EMF 450 y prototipo disco interno y externo. ...	66
<b>Figura 5.24.</b> Perfil comparativo entre EMF 450 y prototipo placas paralelas.....	67
<b>Figura 5.25.</b> Error promedio comparativo entre prototipos para el segundo método.....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados.....	5
<b>Tabla 3.1.</b> Diferencias y semejanzas entre el campo eléctrico y magnético.....	14
<b>Tabla 3.2.</b> Distancias de franja de servidumbre.....	14
<b>Tabla 3.3.</b> Niveles de referencia para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión, medidos en el límite de su franja de servidumbre. ....	16
<b>Tabla 3.4.</b> Versión de aplicación generalizada de las ecuaciones de Maxwell. ....	17
<b>Tabla 3.5.</b> Interpretación coeficiente de correlación. ....	38
<b>Tabla 4.1.</b> Operacionalización de la variable dependiente. ....	42
<b>Tabla 4.2.</b> Operacionalización de la variable independiente. ....	43
<b>Tabla 5.1.</b> Datos de perfil lateral obtenidos con el sensor EMF 450.....	50
<b>Tabla 5.2.</b> Mediciones adquiridas por los prototipos.....	52
<b>Tabla 5.3.</b> Ángulo calculado a diferentes distancias en el eje x. ....	54
<b>Tabla 5.4.</b> Factor de corrección K. ....	54
<b>Tabla 5.5.</b> Campo eléctrico en prototipo cilindro empleando ecuación de corrección. .	55
<b>Tabla 5.6.</b> Campo eléctrico en prototipo disco interno y externo empleando ecuación de corrección. ....	56
<b>Tabla 5.7.</b> Campo eléctrico en prototipo placas paralelas empleando ecuación de corrección. ....	57
<b>Tabla 5.8.</b> Error promedio para el método 1.....	58
<b>Tabla 5.9.</b> Matriz de resultados prototipo cilindro. ....	59
<b>Tabla 5.10.</b> Matriz de resultados prototipo disco interno y externo. ....	60
<b>Tabla 5.11.</b> Matriz de resultados prototipo placas paralelas.....	61
<b>Tabla 5.12.</b> Coeficiente de correlación lineal de los respectivos prototipos. ....	62
<b>Tabla 5.13.</b> Coeficiente de determinación de los respectivos prototipos. ....	62
<b>Tabla 5.14.</b> Cálculo de la pendiente de la recta y ordenada en el origen.....	62
<b>Tabla 5.15.</b> Ecuación de la recta de regresión lineal de los prototipos.....	64
<b>Tabla 5.16.</b> Porcentaje de error prototipo cilindro.....	65
<b>Tabla 5.17.</b> Porcentaje de error prototipo disco interno y externo. ....	66
<b>Tabla 5.18.</b> Porcentaje de error placas paralelas.....	67
<b>Tabla 5.19.</b> Error promedio para el método 2.....	68
<b>Tabla 5.20.</b> Comparación de los métodos en base al prototipo de placas paralelas. ....	69
<b>Tabla 5.21.</b> Voltajes receptados por los prototipos.....	70
<b>Tabla 5.22.</b> Nivel de saturación respecto a cada prototipo. ....	70
<b>Tabla 5.23.</b> Nivel de saturación en prototipos con el método 1. ....	71
<b>Tabla 6.1.</b> Costos directos del proyecto.....	71
<b>Tabla 6.2.</b> Costos indirectos del proyecto.....	72
<b>Tabla 6.3.</b> Gastos totales.....	72

## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

### FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**TÍTULO:** “DISEÑO DE UN SENSOR PARA CAMPO ELÉCTRICO CON EL FIN DE IDENTIFICAR UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA”.

**Autores:** Guanoluisa Arciniega Walter David  
Sailema Cholota Jorge Leonardo

### RESUMEN

El presente proyecto de titulación trata sobre la construcción de prototipos de sensores con el propósito de detectar campo eléctrico, para lo cual se elaboraron tres modelos de sensores capacitivos y un circuito electrónico que conjuntamente acoplados miden el nivel de campo eléctrico y detectan la perturbación de esta magnitud existente en el ambiente. Para validar los aparatos construidos se realizaron mediciones en una línea de transmisión en función de la normativa IEEE 644 “Estándar de Procedimientos para Medición de Campos Eléctricos y Magnéticos desde Líneas de Transmisión de Corriente Alterna” y los resultados obtenidos fueron contrastados en base a datos recabados con un sensor patrón. La metodología empleada se basa en el análisis de los datos adquiridos, en los que se aplicaron métodos de ajuste y de esta manera se pudo alcanzar una relación con un reducido índice de error entre los datos adquiridos y el sensor patrón, lo que permite detectar descargas atmosféricas, así como el nivel de campo eléctrico. Para finalizar se presenta el análisis económico, conclusiones y recomendaciones que muestran los principales aspectos del proyecto desarrollado.

**Palabras clave:** campo eléctrico, potenciales, descarga atmosférica, capacitores, nivel isoceraúnico.

## TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

### FACULTY OF APPLIED ENGINEERING SCIENCIE

**TOPIC:** “DESIGN OF A SENSOR FOR ELECTRIC FIELD IN ORDER TO IDENTIFY AN ATMOSPHERIC DISCHARGE”.

**Authors:** Guanoluisa Arciniega Walter David

Sailema Cholota Jorge Leonardo

### ABSTRACT

This project is about prototypes of sensors with the purpose of detecting an electric field, for which three models of capacitive sensors and an electronic circuit were developed, which together, measure the level of the electric field and detect the disturbance of this magnitude in the environment. To validate the devices built, measurements were made on a transmission line according to the IEEE 644 regulation “Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines” and the results obtained were contrasted based on data collected with a standard sensor. The methodology used is based on the analysis of the acquired data, in which adjustment methods were applied and in this way a relationship with a reduced error rate between the acquired data and the standard sensor could be reached, allowing the detection of discharges atmospheric as well as the level of the electric field. Finally, the economic analysis, conclusions and recommendations that show the main aspects of the developed project are presented.

**Keywords:** electric field, potentials, atmospheric discharge, capacitors, isoceraunic level.



**AVAL DE TRADUCCIÓN**

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en forma legal CERTIFICO que: La traducción del resumen de tesis al Idioma Inglés presentado por los señores Egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas: **Walter David Guanoluisa Arciniega, Jorge Leonardo Sailema Cholota**, cuyo título versa **“DISEÑO DE UN SENSOR PARA CAMPO ELÉCTRICO CON EL FIN DE IDENTIFICAR UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA”**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

En todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, 01 de Julio del 2020

Atentamente,

MSc. Marcelo Pacheco

**DOCENTE DEL CENTRO DE IDIOMAS**

**C.I.: 0502617350**

## **1. INFORMACIÓN BÁSICA**

### **PROPUESTO POR:**

#### **Estudiante 1**

Nombres y Apellidos: Walter David Guanoluisa Arciniega  
Lugar y Fecha de Nacimiento: Carchi, 07 de octubre de 1994  
Estado Civil: Soltero  
Numero C.I.: 050401308-7  
Dirección: Latacunga – Juan Montalvo  
Teléfono Celular: 0998307685  
Estudios Realizados:  
Primaria: Unidad Educativa “Isidro Ayora”  
Secundaria: Instituto Tecnológico “Ramón Barba Naranjo”

#### **Estudiante 2**

Nombres y Apellidos: Jorge Leonardo Sailema Cholota  
Lugar y Fecha de Nacimiento: Ambato, 04 de septiembre de 1994  
Estado Civil: Soltero  
Numero C.I.: 180419851-1  
Dirección: Ambato - Picaihua  
Teléfono Celular: 0958919303  
Estudios Realizados:  
Primaria: Unidad Educativa “Humberto Albornoz”  
Secundaria: Unidad Educativa “Atahualpa”

### **TEMA APROBADO:**

Diseño de un sensor para campo eléctrico con el fin de identificar una descarga atmosférica

### **CARRERA:**

Ingeniería Eléctrica

### **VINCULADO:**

Estudios de campos electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia: Caso Provincia de Cotopaxi

### **DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:**

Nombres y Apellidos: MSc. Ing. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios

Teléfono Celular: 0998596423  
Correo Electrónico: gabriel.pesantes3889@utc.edu.ec

**EQUIPO DE TRABAJO:**

Asesores técnico y metodológico

**LUGAR DE EJECUCIÓN:**

Cotopaxi, Latacunga, La Matriz

**TIEMPO DE DURACIÓN DEL PROYECTO:**

Seis meses

**FECHA DE ENTREGA:**

Septiembre del 2020

**LÍNEA Y SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN:**

**Línea de investigación**

Ingeniería, industria y construcción

**Sub líneas de investigación de la Carrera**

Ingeniería y profesiones afines

**2. DISEÑO INVESTIGATIVO DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**2.1. Título de la propuesta tecnológica**

Diseño de un sensor para campo eléctrico con el fin de identificar una descarga atmosférica.

**2.2. Tipo de propuesta alcance**

**Desarrollo:** Construcción de prototipos de capacitores para hallar el modelo de sensor más eficiente y de esta manera detectar de descargas atmosféricas.

**2.3. Área del conocimiento**

Ingeniería, industria y construcción.

**2.4. Sinopsis de la propuesta tecnológica**

El presente proyecto tiene como finalidad construir un sensor para campo eléctrico que permitirá censar las descargas atmosféricas y de medir el campo eléctrico que generan las mismas. Para la elaboración del proyecto se plantea construir prototipos de capacitores, de esta forma recopilar datos para definir el modelo más eficiente para lo cual es necesario

de un circuito electrónico, mediante pruebas de campo en líneas de transmisión. Esta propuesta esta direccionada en el estudio y análisis del campo eléctrico generado por descargas atmosféricas en un capacitor.

## **2.5. Objeto de estudio y campo de acción**

### **2.5.1. Objeto de estudio**

Construir un modelo de sensor para campo eléctrico, con el cual se podrá censar la cantidad de descargas que ocurren en un lugar y tiempo delimitado.

### **2.5.2. Campo de acción**

El campo eléctrico producido por un rayo en una zona determinada.

## **2.6. Situación problémica y problema**

### **2.6.1. Situación problémica**

Las descargas atmosféricas son un gran inconveniente tanto para la seguridad de los equipos eléctricos como de la población, por esto es de vital importancia definir el nivel isoceráunico de una determinada área geográfica, con el propósito de realizar los cálculos necesarios para el apantallamiento en edificaciones, líneas de transmisión y más equipos vulnerables.

La falta de un sensor de campo eléctrico en el laboratorio de alto voltaje en la Universidad Técnica de Cotopaxi, motivó el diseño de un prototipo de capacitor el cual permitirá identificar el campo eléctrico producido por un rayo y de esta manera podrá ser utilizado para conocer el nivel isoceráunico en un sector establecido.

### **2.6.2. Problema**

Al no contar con un mapa isoceráunico actualizado en Ecuador, se ha procedido a realizar la construcción de prototipos de capacitores con el fin de encontrar el modelo más adecuado para identificar el campo eléctrico que produce una descarga atmosférica.

## **2.7. Hipótesis**

Con la construcción de un sensor se puede detectar el nivel de campo eléctrico, que permitirá censar el número de descargas atmosféricas en un período de tiempo y sector determinado.

## **2.8. Objetivos**

### **2.8.1. Objetivo general**

Diseñar un sensor para campo eléctrico basado en prototipos construidos y el desarrollo de cálculos matemáticos, para identificar el nivel de campo eléctrico y censar descargas atmosféricas en una zona determinada.

### **2.8.2. Objetivos específicos**

- Investigar las generalidades y aspectos fundamentales que presentan las descargas atmosféricas, mediante la consulta en fuentes de información bibliográfica.
- Construir diferentes prototipos basados en modelos de capacitores y un circuito electrónico, para verificar mediante pruebas los niveles de campo eléctrico presentes cerca de líneas de transmisión.
- Analizar los resultados que se obtuvieron en las pruebas de campo con la ayuda de un sensor patrón para encontrar el prototipo más eficiente.

## 2.9. Descripción de las actividades y tareas propuestas con los objetivos establecidos

**Tabla 2.1.** Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados.

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	RESULTADO	INSTRUMENTOS
<p><b>Objetivo 1:</b> Investigar las generalidades y aspectos fundamentales que presentan las descargas atmosféricas, mediante la consulta en fuentes de información bibliográfica.</p>	<p>1. Indagación de fuentes bibliográficas respecto al campo eléctrico de una descarga atmosférica.</p> <p>2. Análisis de la influencia del campo eléctrico en capacitores.</p>	<p>1. Conocer el campo eléctrico generado al producirse una descarga atmosférica.</p> <p>2. Entender las magnitudes que influyen en el campo eléctrico en distintos modelos de capacitores.</p>	<p>1. Referencias bibliográficas e internet</p>
<p><b>Objetivo 2:</b> Construir diferentes prototipos basados en modelos de capacitores y un circuito electrónico, para verificar mediante pruebas los niveles de campo eléctrico presentes cerca de líneas de transmisión.</p>	<p>1. Construcción de tres prototipos de capacitores.</p> <p>2. Diseño de un circuito electrónico que permita censar una descarga.</p> <p>3. Medición de campo eléctrico en líneas de transmisión.</p>	<p>1. Detectar los niveles de campo eléctrico con los prototipos de capacitores y el sensor diseñado.</p> <p>2. Obtención de datos en líneas de transmisión de 138 kV.</p>	<p>1. Recurso humano</p> <p>2. Osciloscopio</p> <p>3. Distanciómetro</p> <p>4. Sensor EMF 450</p>
<p><b>Objetivo 3:</b> Analizar los resultados que se obtuvieron en las pruebas de campo con la ayuda de un sensor patrón para encontrar el prototipo más eficiente.</p>	<p>1. Comparación de datos obtenidos del sensor diseñado con respecto al sensor patrón.</p> <p>2. Ejecución de pruebas que permitan verificar el conteo de descargas con el sensor.</p>	<p>1. Hallar el prototipo de capacitor más eficiente.</p> <p>2. Validar los resultados obtenidos.</p> <p>3. Censar una perturbación de campo eléctrico a partir de un setpoint.</p>	<p>1. Bibliografía adquirida</p> <p>2. Recurso humano</p>

### 3. MARCO TEÓRICO

En el transcurso del tiempo, en distintas estaciones del año y diferentes latitudes del planeta, se ha observado y en territorios investigado el comportamiento de eventos eléctricos de la atmósfera, con un interés específico en los fenómenos de descargas producidos por las perturbaciones entre la tierra y nubes más conocidas como rayos.

Como se menciona en [1], describe que el problema que existe en El Salvador es la escasez de estudios sobre las descargas atmosféricas que presenta niveles ceráunicos de máximo 133, a pesar de que este fenómeno sea cuantioso en dicho lugar y que los efectos que producen afectan a nivel personal como en la industria.

Las investigaciones sobre descargas atmosféricas han incitado la construcción de aparatos de medición y detección de rayos para poseer un mejor entendimiento de los mismos y así diseñar, partiendo de este conocimiento sistemas de protección contra estos fenómenos.

El desempeño de un sistema de localización de rayos mide principalmente dos parámetros: la eficiencia en la detección y el error en la localización de las descargas. Este estudio se enfoca en la metodología utilizada para evaluar el error en la localización de los rayos, cuando estos se impactan en terrenos planos y montañosos [2].

Los resultados que se obtienen al realizar pruebas de campo con prototipos de detección de rayos, indican que el ruido ambiental afecta a los valores registrados, por lo que se debe tomar en cuenta este aspecto al momento de establecer el valor de umbral de disparo en el detector, para eso se debe conocer que el ruido ambiental es variable durante lo largo del día, presentando periodos de actividad alta principalmente durante el día y actividad baja durante la noche [1].

En la actualidad no existen estudios realizados sobre descargas atmosféricas, para cubrir esta necesidad se necesita realizar un monitoreo constante de los fenómenos atmosféricos para así detectar los cambios climáticos, para que el futuro se pueda empezar a detectar los ciclos y los cambios de ciclos de los rayos en la zona monitoreada, al realizar este monitoreo es necesario llevar un registro histórico de las recargas, para sí poder establecer el comportamiento del fenómeno atmosférico.

Para el análisis de descargas atmosféricas que se presentan en el Ecuador, es necesario conocer las características físicas y eléctricas de las descargas entre nube y tierra. El estudio de las descargas es necesario debido a los problemas que origina en el sistema eléctrico de distribución y transmisión de energía, provocando pérdidas en los equipos eléctricos y electrónicos, como expresa [3].

### 3.1. Formación de las descargas atmosféricas

#### 3.1.1. Carga eléctrica en las nubes

La carga se forma en nubes de tormenta del tipo cumulonimbus las mismas que se caracterizan por estar formadas por columnas de aire caliente que ascienden por convección, cuando la atmósfera se hace inestable, debido a grandes gradientes de temperatura. La carga eléctrica se forma al separar las fuertes corrientes de aire, las partículas de agua y hielo, en partículas ionizadas.

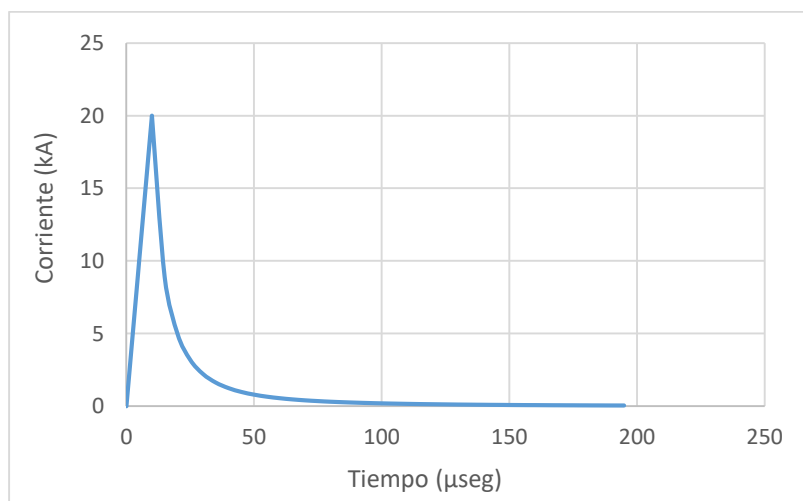
A medida que se empieza a incrementar la carga y el voltaje en las cercanías de las nubes cargadas, se empieza a rebasar el gradiente eléctrico. Se empieza a presentar ionización del aire y por lo tanto, se van formando caminos para la conducción de la carga hacia el punto de potencial cero que es la tierra [4].

### 3.2. Descarga atmosférica

La descarga atmosférica es la rotura del aislamiento entre dos superficies del medio ambiente cargadas eléctricamente con polaridades opuestas. Las descargas atmosféricas se presentan cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica en las capas de la atmósfera inmediatamente inferiores a la estratosfera [2].

#### 3.2.1. Curva característica de una descarga atmosférica

Como se ha mencionado anteriormente una descarga eléctrica, por lo general posee una magnitud de corriente eléctrica con valores de alrededor de 20 kA o más dependiendo de distintos factores, alcanzan su valor pico al transcurrir de 10 a 20 microsegundos. Posteriormente esta corriente empieza a descender hasta llegar al valor de cero en un tiempo transcurrido de 200 microsegundos [5]. Como se aprecia en la figura 3.1.



**Figura 3.1.** Curva característica de una descarga atmosférica.



### 3.2.2. Parámetros de las descargas atmosféricas

Los parámetros que poseen un nivel alto de influencia en las descargas atmosféricas se pueden observar a continuación:

- **Nivel isocerámico o cerámico:** Es el número de días al año en los que se observa por lo menos un relámpago o se escucha un trueno.
- **Polaridad del rayo:** Hace referencia al signo de las cargas transferidas, que comúnmente son electrones y se pueden dar casos en el que las cargas transferidas son positivas.
- **Impedancia:** Tanto la tierra como la nube pueden ser consideradas como las placas de un condensador, el cual se descarga por un canal con una impedancia considerada como inductiva.
- **Corriente de pico:** Establece el valor máximo de corriente del rayo o de la forma de onda, este parámetro es de gran importancia para el diseño de sistemas protección contra rayos.
- **Carga eléctrica del rayo:** La carga total transferida por una descarga atmosférica es aproximadamente de 300 Coulombs [6].

### 3.3. Tipos de descargas

La descarga atmosférica se origina cuando un gradiente eléctrico (en la nube o en la tierra), excede el aislamiento del aire, provocando un movimiento de cargas en dirección a tierra (o nube), esas cargas pueden ser positivas o negativas, dependiendo de la carga predominante en la nube, se define la polaridad de la descarga [3].

En general, las descargas eléctricas atmosféricas se producen mediante la formación de canales de conducción entre dos puntos, de acuerdo a la ubicación de estos puntos.

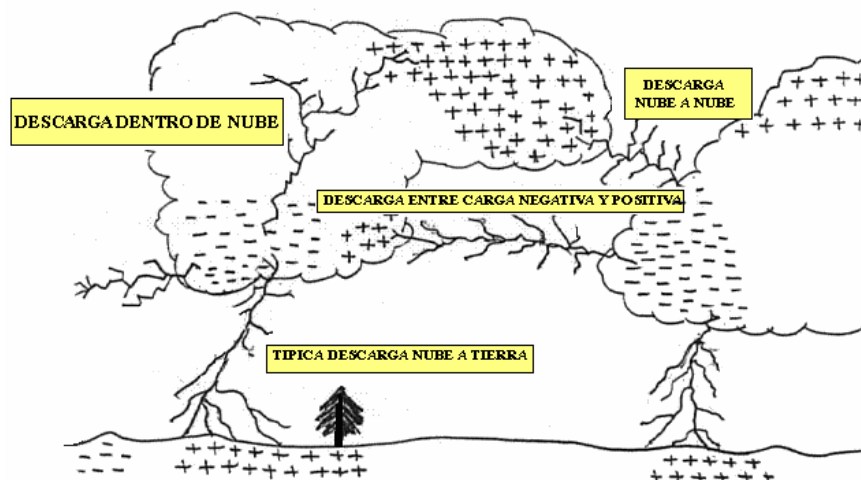


Figura 3.2. Tipos de descargas atmosféricas.

Fuente: [1].

Como se muestra en la figura 3.2, se tiene algunos tipos de descargas atmosféricas, a continuación se explica cada una de ellas:

### 3.3.1. Nube - tierra

Conforman la menor actividad eléctrica dentro de las tormentas, se considera que este tipo de descargas corresponden al 25% de la actividad eléctrica total en la tierra. Una descarga nube-tierra se desplaza en un tiempo aproximado de 200  $\mu$ s.

- **Descargas descendentes:** Suceden en las descargas que tienen su punto de origen en una nube, las descargas descendentes constituyen el 90% de la actividad eléctrica que ocurre en el planeta.
- **Descargas ascendentes:** Ocurren en las descargas que tienen su punto de origen sobre algún objeto que se encuentra en la superficie de la tierra.

### 3.3.2. Nube – nube

Conforman la actividad eléctrica provocada por rayos, las mismas que se generan en la región de formación de nubes que contiene la tormenta. Mientras ocurre una tormenta, las descargas nube-nube corresponden al 75% de la actividad eléctrica generada en la misma.

- **Intra-nube:** Sucede cuando los centros de carga implicados se ubican al interior de la misma nube de tormenta.
- **Nube-nube:** Ocurre cuando la descarga ocurre entre el centro de carga de dos nubes distintas.

## 3.4. Formación de una descarga

Las descargas atmosféricas son originadas principalmente por perturbaciones atmosféricas como: presión, viento y humedad, del mismo modo la acumulación de partículas solares cargadas pueden generar efectos alternos. Se debe tener en cuenta que la separación de cargas positivas y negativas en la nube ocurre naturalmente por los cristales de hielo.

### 3.4.1. Líder

Es la trayectoria que sigue una descarga eléctrica, el mismo que esta antecedido por la formación de un canal guía o línea ionizada debido a la existencia de iones en el aire.

La resistencia del aire en estado estable se comporta como aislante y cuando existe presencia de descarga, esta se comporta como conductor a fin de que se rompa la rigidez dieléctrica de la misma [7].

### **3.4.2. Rayo**

Es una descarga natural de electricidad estática acumulada en una nube de tormenta, que produce un pulso electromagnético en el momento que ocurre el rayo.

El rayo se genera cuando el gradiente de potencial eléctrico entre la base de la nube (carga negativa) y el crecimiento de la carga positiva en la superficie de la tierra [7].

### **3.4.3. Relámpago**

Es el aumento impetuoso de la presión producida por el calentamiento de la atmósfera asociado con la descarga atmosférica, es el origen del resplandor luminoso que se observa en una tormenta.

El relámpago es aquel resplandor luminoso en las nubes producido por una descarga eléctrica consistente de descargas eléctricas formadas en el interior de un condensador natural que se propagan a través de un dieléctrico como es el aire [7].

### **3.4.4. Trueno**

Se refiere a la onda de choque entre el aire que se encuentra en la nube con la tierra a una temperatura que supera los 28000 °C, inmediatamente al expandirse a gran velocidad y al combinarse con el aire frío que se encuentra en el ambiente su temperatura baja y se comprime, esta perturbación violenta origina ondas de choque que produce el ruido del trueno.

## **3.5. Formas de medir una descarga atmosférica**

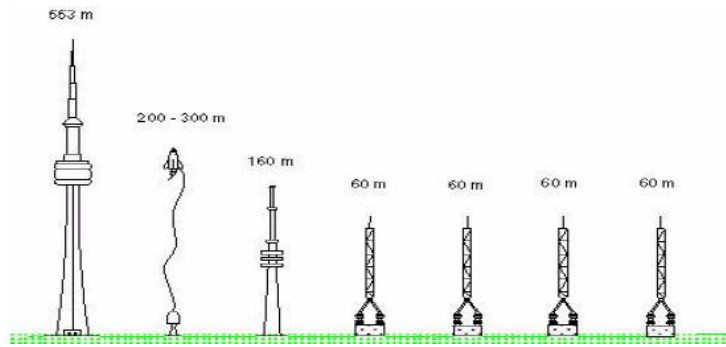
Existen dos formas de medir una descarga atmosférica, las cuales son:

- **Método directo**

La medición directa implica la captación del recorrido temporal de la descarga durante impactos directos y su transformación a cantidades equivalentes que permitan el registro de los parámetros de acción del rayo [1].

Las estaciones en las que se lleva a cabo la medición la directa tienen que soportar la magnitud nominal de los parámetros de las descargas atmosféricas, los que están ligados directamente a la ubicación, por lo cual, se consideran las condiciones, parámetros y variables de cada estación.

Comúnmente se instalan antenas de descarga (figura 3.3) ubicándolas en torres. Además, estos sistemas integran técnicas de fotografía y detección de campo.



**Figura 3.3.** Configuración de antenas de medición directa, más usadas en el mundo.

**Fuente:** [1].

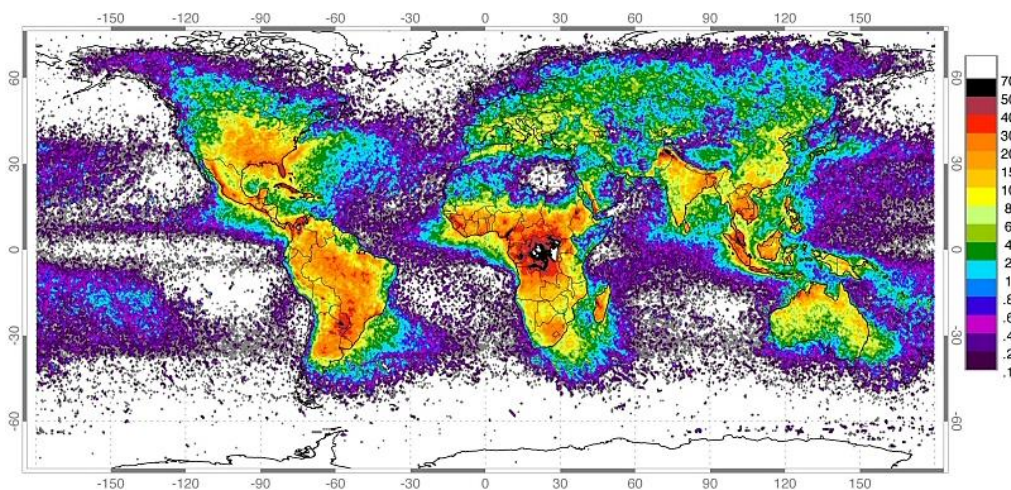
- **Método indirecto**

Los sistemas de medición indirecta se emplean en el análisis de la cantidad de descargas a tierra que son registradas en una zona y período de tiempo específicos, por medio de equipos que tienen como función censar la presencia de descargas a distancia, por medio de localización satelital o mediante sensores de campo electromagnético.

### 3.6. Nivel isoceráunico

En la mayor parte de las regiones del mundo se puede obtener información de la actividad de las descargas atmosféricas a través del nivel isoceráunico. Por lo tanto, este nivel se puede definir como el número de días al año en los cae al menos un rayo [7].

En mapas distribuidos por regiones se puede encontrar información específica acerca del nivel isoceráunico en diferentes ubicaciones. En la figura 3.4, se presenta el mapa isoceráunico mundial para tener una idea más clara sobre la incidencia de descargas atmosféricas a nivel global.



**Figura 3.4.** Representación de incidencia mundial anual promedio de un rayo.

**Fuente:** [8].

### 3.6.1. Nivel isoceráunico en el Ecuador

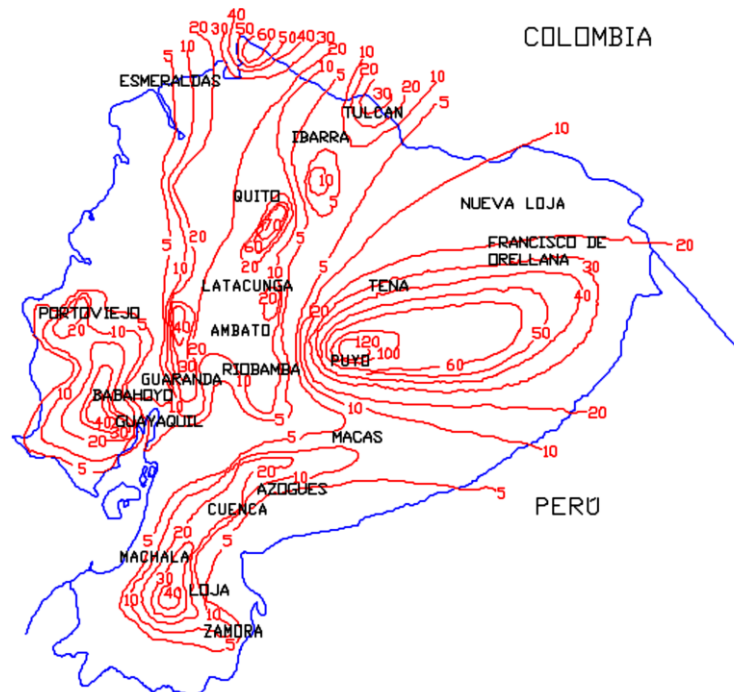


Figura 3.5. Nivel isoceráunico en Ecuador.

Fuente: [6].

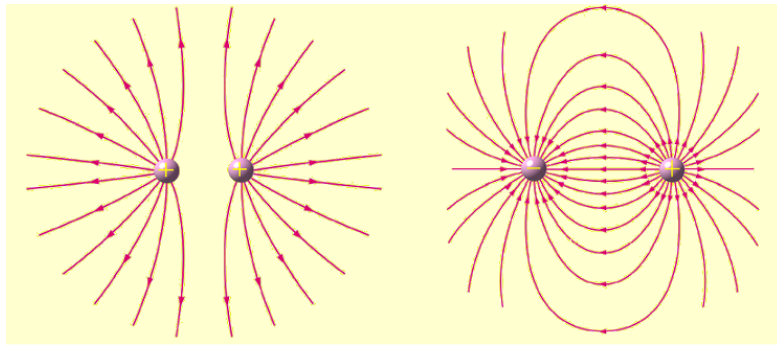
La figura 3.5, permite tener una idea más precisa de las áreas en donde existe mayor número de descargas anualmente, existiendo en la ciudad del Puyo provincia de Pastaza el mayor nivel isoceráunico a nivel regional, con una cantidad de entre 100 a 120 días en los que ocurre una tormenta en el año. Prosiguiendo con las provincias de mayor incidencia de descargas se tiene: Pichincha, Esmeraldas, Guayas y Loja, que igualmente presentan un nivel isoceráunico significativo dentro del país.

### 3.7. Campos electromagnéticos

La idea de campo electromagnético, como resultado de la acción conjunta de campos eléctricos y magnéticos. Dependiendo de su origen, pueden ser: campos electromagnéticos estáticos, campos electromagnéticos inductivos (transformadores, líneas de alta tensión), y campos electromagnéticos radiados [9].

#### 3.7.1. Campos eléctricos

Estos campos se generan ante la presencia de cargas eléctricas. En el momento en que un objeto se carga eléctricamente, da origen a fuerzas y movimientos en las cargas que se hallan a su alrededor, las mismas que pueden ser del mismo signo o de signo opuesto. La fuerza originada en el objeto es la tensión eléctrica, a continuación en la figura 3.6 se puede apreciar:



**Figura 3.6.** Líneas de campo eléctrico que corresponden a cargas idénticas y diferentes.

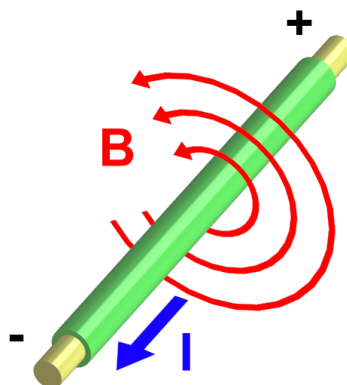
**Fuente:** [10].

Cabe recalcar, que los campos eléctricos se producen siempre y cuando exista una diferencia de potencial, sin ser necesario que circule una corriente eléctrica.

La intensidad de un campo eléctrico depende de la tensión o diferencia de voltaje, y de la distancia con respecto al dispositivo conductor. Así, el campo eléctrico es más intenso cuanto mayor sea la tensión, y cuanto mayor sea la proximidad al conductor que los genera, y disminuye en la medida que la distancia aumenta [10].

### 3.7.2. Campos magnéticos

Este tipo de campos se originan debido a la presencia de cargas eléctricas en movimiento, a diferencia de los campos eléctricos los magnéticos requieren una fluctuación de corriente eléctrica, como se puede observar en la figura 3.7:



**Figura 3.7.** Campo magnético producido por la circulación de corriente en un conductor.

**Fuente:** [10].

La intensidad del campo magnético aumenta en función de la intensidad de la corriente eléctrica y varía en función del consumo de energía, diferencia de los campos eléctricos que permanecen inalterados ante idénticas modificaciones. La intensidad de los campos magnéticos es mayor en las proximidades de la fuente, y disminuye a medida que aumenta la distancia [10].

**Tabla 3.1.** Diferencias y semejanzas entre el campo eléctrico y magnético.

	<b>Campos eléctricos</b>	<b>Campos magnéticos</b>
<b>Fuente</b>	Tensión eléctrica	Corriente eléctrica
<b>Origen</b>	Se producen en el momento en que se conecta un aparato a una fuente y no demanda flujo de corriente.	Se producen al momento de poner en marcha un equipo eléctrico y demanda flujo de corriente
<b>Unidad de medida</b>	Voltios por metro (V/m)	Amperios por metro (A/m)
<b>Intensidad de campo</b>	Disminuye debido al aumento de la distancia de la fuente	Disminuye a causa del aumento de la distancia de la fuente

**Fuente:** [10].

### 3.8. Franja de servidumbre

La franja de servidumbre es la superficie horizontal simétrica respecto al eje de la línea de alto voltaje, determinada con el objeto de evitar contactos accidentales con partes energizadas, garantizando la seguridad de las personas así como la confiabilidad de la línea.

Las distancias para franjas de servidumbre, en función del voltaje de la línea eléctrica, se muestran en la tabla 3.2 y se esquematizan en la figura 3.8.

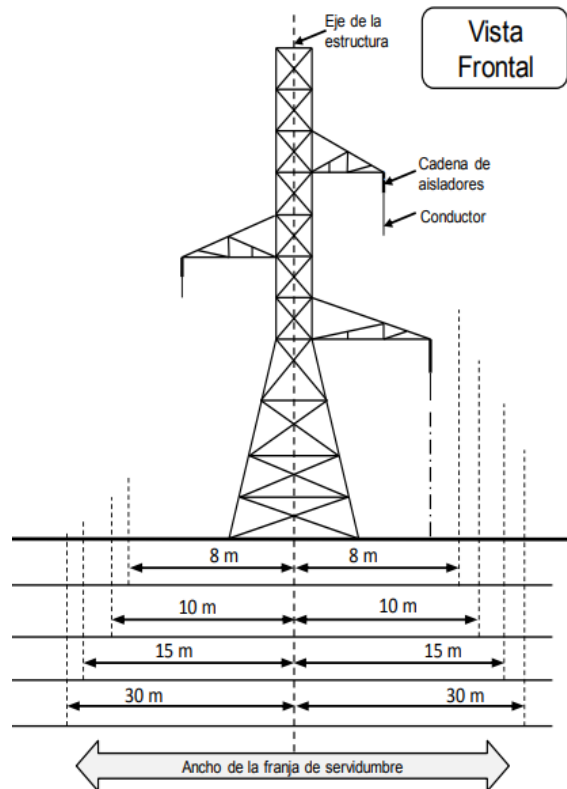
**Tabla 3.2.** Distancias de franja de servidumbre.

<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Ancho de la franja</b>
69	16 m
138	20 m
230	30 m
500	60 m

**Fuente:** [11].

Las distancias indicadas en la tabla 1 se aplican bajo las siguientes condiciones:

- Cuando en una misma estructura se instalen circuitos de diferente nivel de voltaje, el ancho de servidumbre mínimo debe ser el que le corresponde al circuito de mayor voltaje.



**Figura 3.8.** Ancho de las franjas de servidumbre.

**Fuente:** [11].

Dentro de la franja de servidumbre está prohibido el levantamiento de construcciones o edificaciones de cualquier tipo.

### **3.8.1. Norma de Radiaciones No Ionizantes de Campos Electromagnéticos.**

La presente normativa técnica ambiental establece las disposiciones que garantizan la salud y seguridad del público en general y trabajadores derivados de la exposición a radiaciones no ionizantes provenientes de sistemas eléctricos, tales como sistemas de generación, transformación, transporte, distribución y utilización de energía eléctrica con frecuencia de 60 Hz.

- **Requerimientos mínimos de seguridad para exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60Hz.**

Los niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos y magnéticos provenientes de líneas de transmisión de alta tensión, en el límite de la franja de servidumbre, están establecidos en la tabla 3.3.



**Tabla 3.3.** Niveles de referencia para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos de 60 Hz para líneas de alta tensión, medidos en el límite de su franja de servidumbre.

Nivel de tensión (kV)	Intensidad campo eléctrico (V/m)	Ancho de Franja de Servidumbre (m)
230	4167	30
138	4167	20
69	4167	16

Fuente: [12].

### 3.9. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell describen por completo los fenómenos electromagnéticos: el campo eléctrico, el campo magnético, su origen, comportamiento y relación entre ellos, estas fórmulas se pueden formular de forma integral o de forma diferencial y también se pueden expresar dependiendo de si la onda se propaga por el vacío o por un material.

Es claro que usando las ecuaciones propuestas por James Clerck Maxwell en el año de 1873 llamadas Ecuaciones de Maxwell, las leyes correspondientes a Gauss, Coulomb, Ampere, Faraday, entre otros, pueden ser resumidas desde otro punto de vista. A partir de las mismas se describen todos los fenómenos electromagnéticos [13].

- **Densidad de carga y campo eléctrico**

La ley de Coulomb para cargas estacionarias en el vacío corresponde a la primera ecuación de Maxwell, la misma describe el comportamiento de campo eléctrico debido a cargas en reposo. Usando el Teorema de divergencia conocido como Ley de Gauss, su forma integral equivalente es calculada tal como [13]:

$$Q = \oint_S D \cdot dS = \int_v \rho_v \cdot dv \quad (3.1)$$

- **Estructura del campo magnético**

La segunda ecuación de Maxwell indica que no es posible separar los polos magnéticos de un imán, en este sentido se ha demostrado que las líneas de campo no divergen de ningún punto ni convergen a ningún punto, es decir su divergencia es nula. Su forma integral es definida de la siguiente manera [13]:

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (3.2)$$

Similar a la forma integral de campo eléctrico, esta ecuación solo es válida si la integral está definida en una superficie cerrada, indicando que el flujo magnético a través de una superficie cerrada es siempre cero.

- **Variación de flujo magnético y campo magnético**

La tercera ecuación relaciona los campos eléctricos y magnéticos, para generar una tensión eléctrica, variando el flujo magnético que atraviesa una superficie dada. Su forma integral es representada tal como:

$$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot dS \quad (3.3)$$

La ecuación previa corresponde a la ley de Faraday de la inducción electromagnética, y su signo negativo se explica mediante la ley de Lenz para la conservación de energía.

- **La fuente de campo magnético**

Originalmente la ley de Ampere establece la relación entre un campo magnético y la corriente que lo origina. Sin embargo, Maxwell introdujo un término adicional que corresponde a la corriente de desplazamiento. En este sentido, la ley de Ampere-Maxwell indica que un campo eléctrico variable en el tiempo, implica la existencia de un campo magnético en el mismo lugar. Esta aportación permitió la predicción de la existencia de propagación de las ondas electromagnéticas, que más tarde fue confirmada por Hertz [13].

$$\oint_l H \cdot dl = \int_S \left( J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS \quad (3.4)$$

**Tabla 3.4.** Versión de aplicación generalizada de las ecuaciones de Maxwell.

Nombre	Forma Diferencial	Forma Integral
Ley de Gauss (Eléctrica)	$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\oint_S D \cdot dS = \int_v \rho_v dv$
Ley de Gauss (Magnética)	$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_S B \cdot dS = 0$
Ley de Faraday	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_L E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot dS$
Ley de Ampere	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_l H \cdot dl = \int_S \left( J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS$

**Fuente:** [14].

Donde:

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$H$ : campo magnético; ( $A/m$ ).

$D$ : densidad de campo de desplazamiento eléctrico; ( $C/m^2$ ).

$B$ : densidad de campo magnético; ( $T$ ), ( $Wb/m^2$ ).

$\rho$ : densidad de carga eléctrica; ( $C/m^3$ ).

$J$ : densidad de corriente; ( $A/m^2$ ).

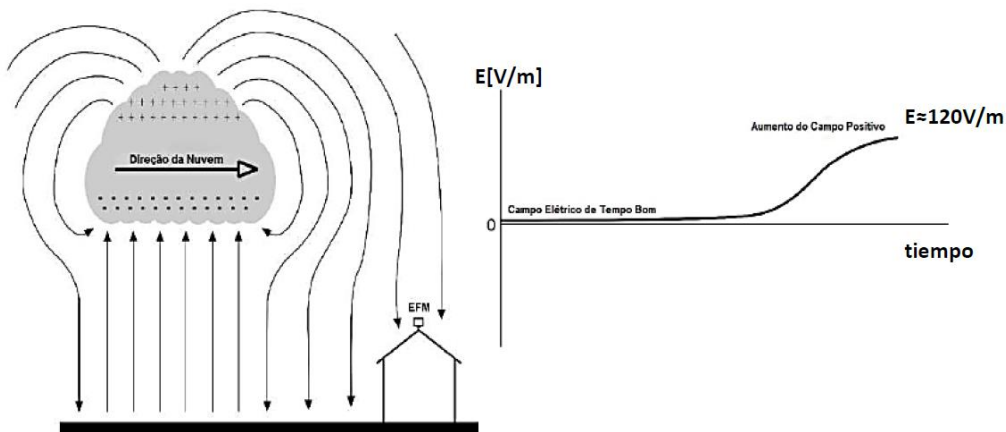
$dS$ : vector del elemento diferencial de superficie normal a la superficie  $S$ ; ( $m^2$ ).

$dv$ : elemento diferencial de volumen encerrado por la superficie  $S$ ; ( $m^3$ ).

$dl$ : vector del elemento de longitud del contorno que limita la superficie  $S$ ; ( $m$ ).

### 3.10. Variación del campo eléctrico durante una nube de tormenta

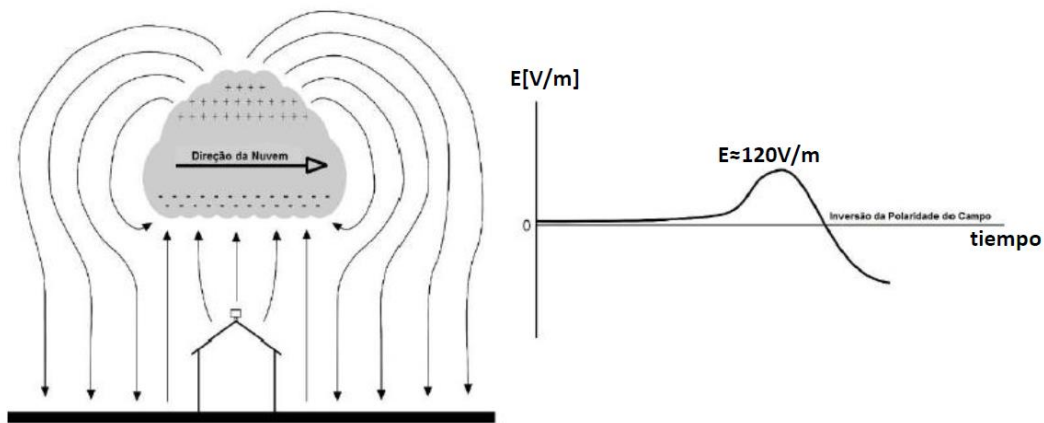
En buenas condiciones de tiempo, esto es momentos en los que no existan precipitaciones ni vientos, el campo eléctrico que se encuentra en la superficie terrestre con dirección positiva posee aproximadamente un valor de 120 V/m, como se muestra en la figura 3.9:



**Figura 3.9.** Variación del campo eléctrico en buen tiempo.

**Fuente:** [7].

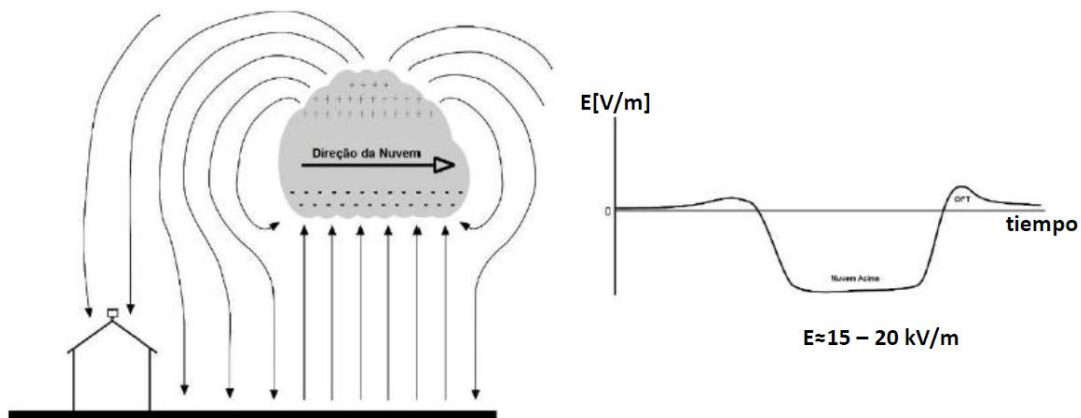
A medida que las condiciones climáticas varían y la nube de tormenta se aproxima el campo eléctrico aumenta, pero en este caso con sentido contrario, esto se debe a que las nubes de tormenta tienen centros de carga negativa los cuales inducen en la superficie terrestre cargas positivas como se observa en la figura 3.10 [7].



**Figura 3.10.** Variación del campo eléctrico al aproximarse una nube de tormenta.

**Fuente:** [7].

A continuación, se puede visualizar la variación en el campo eléctrico al instante de producirse la descarga, este campo puede variar aproximadamente entre 15 – 20 kV/m hasta que las cargas se neutralicen y el campo eléctrico nuevamente se vuelva a estabilizar, esto se muestra en la figura 3.11:



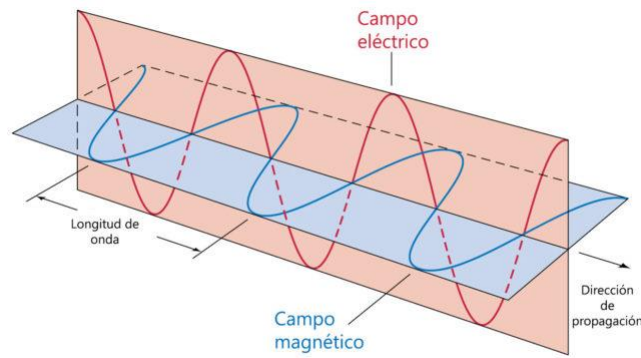
**Figura 3.11.** Variación del campo eléctrico al aproximarse una nube de tormenta.

**Fuente:** [7].

Cabe resaltar que mientras se produce la descarga atmosférica como ya se mencionó se generan corrientes muy grandes alrededor de 20 a 30 kA, las cuales generan campos electromagnéticos [7].

### 3.11. Onda electromagnética

Es la propagación de la radiación electromagnética por medio del espacio. Estas ondas pueden desplazarse por el aire y no necesitan un medio material para propagarse. La radiación electromagnética está compuesta de dos campos, el eléctrico y el magnético, y se desplaza en forma de onda con los dos campos perpendiculares y oscilantes entre sí. Esto se muestra en la figura 3.12 [15].



**Figura 3.12.** Onda plana propagándose a la velocidad de la luz en dirección a X.

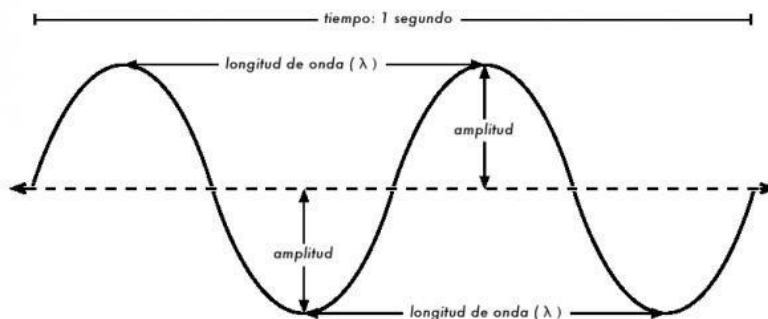
**Fuente:** [13].

### 3.11.1. Características de la onda electromagnética

- Las ondas electromagnéticas independientemente de cómo se formen son todas similares y sólo se diferencian en su longitud de onda y frecuencia.
- Todas las ondas electromagnéticas se propagan a igual velocidad, la cual es la velocidad de la luz, además intervienen las condiciones en las que se encuentren.
- Las ondas electromagnéticas incluso en el vacío transmiten energía. Lo que oscila a su paso son los campos eléctricos y magnéticos que se generan al propagarse, la oscilación puede ser captada y esa energía almacenada.

### 3.11.2. Parámetros de la onda electromagnética

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por un conjunto de parámetros que se observan en la figura 3.13, que incluyen la frecuencia ( $f$ ), la longitud de onda ( $\lambda$ ), el período, la amplitud, la velocidad de propagación ( $c$ ), la polarización eléctrica ( $P$ ), dirección del campo ( $E$ ) [9].



**Figura 3.13.** Partes de la onda electromagnética.

**Fuente:** [13].

- **Frecuencia ( $f$ ):** se define como el número de cambios completos por segundo del campo eléctrico magnético en un punto dado, y se expresa en hertzios (Hz).

- **Longitud de onda ( $\lambda$ ):** La longitud de onda es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos de la onda (máximos o mínimos).
- **Período:** Es el tiempo que tarda la onda en completar un ciclo.
- **Amplitud:** Es la medida de la magnitud de la máxima perturbación del medio producida por la onda.
- **Velocidad de propagación (c):** en el espacio es igual a la velocidad de la luz (300.000 Km/seg), pero la velocidad en los materiales depende de las propiedades eléctricas de éstos.

En una onda plana, el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético y la dirección de propagación es perpendicular a ambos campos, eléctrico y magnético [9].

### 3.12. Detectores de descargas atmosféricas

En los sistemas de detección los elementos fundamentales son los sensores de descargas, los mismos que permiten captar las variables electromagnéticas que se ven afectadas en el ambiente debido a la presencia, formación o movimiento de nubes de tormenta. Asimismo los sensores detectan la disipación de las descargas en base a los ciclos de vida que tienen las tormentas.

Los detectores de tormentas son importantes, para la toma de decisiones a la hora de colocar protecciones para proteger vidas y equipos de los efectos destructivos de una tormenta eléctrica. Este detector permite iniciar medidas preventivas antes de comienzo de la actividad tormentosa y se desactiva cuando este cesa [7].

Debido a la naturaleza de carácter destructiva del rayo es indispensable proteger equipos o aparatos que se encuentren expuestos a este fenómeno externo. Se debe tomar en consideración, que un sistema de protección de descargas atmosféricas nunca podrá impedir la formación de las mismas.

Los detectores de tormentas son equipos que proporcionan información en tiempo real de la actividad eléctrica atmosférica, con fines preventivos permitiendo tomar medidas activas con anterioridad a la caída de los rayos [1]. Los detectores de tormentas son especialmente aplicables para:

- La realización de trabajos en zonas abiertas o intemperie.
- La prevención de accidentes graves que involucren sustancias peligrosas.
- La prevención en determinados ambientes o actividades con especial peligro de descargas electrostáticas.

- Las operaciones en las que se deba garantizar la continuidad de los servicios básicos: telecomunicaciones, generación, transporte y distribución de energía, servicios sanitarios y servicios de emergencias.

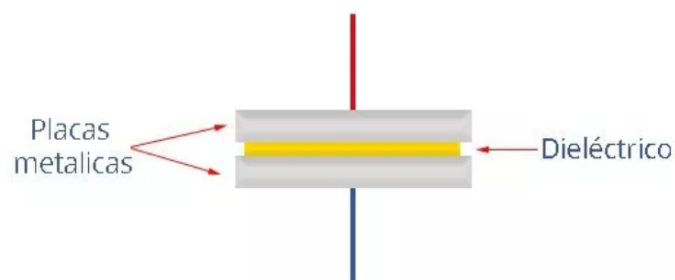
### 3.13. Variables detectadas durante descargas atmosféricas

El fenómeno de una descarga atmosférica tiene los siguientes cambios detectables, entre los que cabe destacar:

- **Campo eléctrico:** Al momento de una descarga suceden cambios en los centros de carga de la nube, por lo que existen alteraciones en el campo eléctrico ambiental. Estos cambios pueden apreciarse por medio de sensores de campo eléctrico, algunos de los cuales poseen un rango de detección de varios kilómetros.
- **Campo magnético:** En el momento de la descarga ocurre una transferencia de carga y por lo tanto los portadores de carga eléctrica se desplazan, debido a esto se encuentra una corriente equivalente por los canales de propagación los mismos que producen campos magnéticos variables.

### 3.14. Sensor Capacitivo

El condensador permite almacenar carga eléctrica y comúnmente está constituido por dos placas conductoras que están separadas a una distancia determinada por un dieléctrico. Los materiales dieléctricos pueden ser aire, mica, papel entre otros. Se ilustra en la figura 3.14 el modelo básico de un condensador.



**Figura 3.14.** Modelo de condensador simple.

**Fuente:** [8].

El efecto de capacitancia se utiliza en numerosos sensores, especialmente en sensores de contacto de dispositivos tales como teléfonos móviles, pantallas de ordenador y tablets. Para almacenar una cantidad significativa de carga, la dimensión de separación “ $d$ ” debe ser pequeña en comparación con el área de las placas [16].

### 3.14.1. Principio de funcionamiento

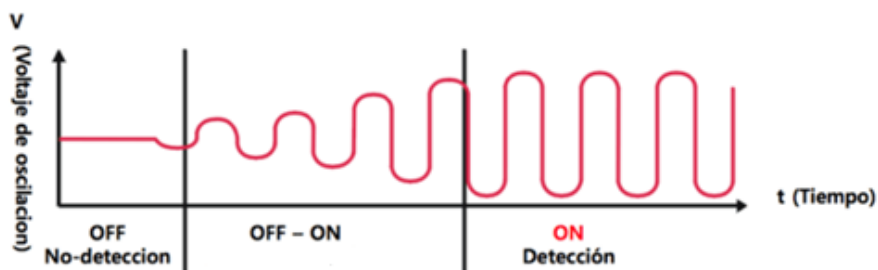
La función de un sensor capacitivo es indicar el cambio de estado, basado en la variación del campo eléctrico, la capacitancia es sensible a factores distintos del desplazamiento. Si las placas del condensador están rodeadas por aire, su permitividad también variará con la temperatura y la humedad, ya que el agua tiene una constante dieléctrica diferente a la del aire [17].

### 3.14.2. Características para su selección

- Alcance del elemento
- Tamaño físico del elemento
- Tipo de elemento con el cual será accionado el dispositivo
- Corriente de funcionamiento
- Voltaje de funcionamiento
- Frecuencia de funcionamiento
- Precisión del elemento

### 3.14.3. Forma de onda

El sensor capacitivo está compuesto por dos placas de metal, semejante a un capacitor. Al momento en que el capacitor está sometido a una diferencia de potencial da origen entre sus placas campo eléctrico y de esta manera se grafica una onda sinusoidal, se puede apreciar de mejor manera en la figura 3.15.



**Figura 3.15.** Forma de onda de oscilación de un sensor capacitivo.

**Fuente:** [8].

## 3.15. Procedimiento para la medición del campo eléctrico

Siguiendo los procedimientos establecidos en el estándar IEEE 644-1994 “Estándar de Procedimientos para Medición de Campos Eléctricos y Magnéticos desde Líneas de Transmisión de Corriente Alterna” impulsado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.



De esta manera se determina que los sistemas de distribución y transmisión de energía eléctrica deben cumplir con los requisitos técnicos mínimos, tal como:

- Para la medición de campos electromagnéticos (CEM) se deberán considerar aquellos lugares que se encuentran a lo largo del recorrido del alimentador de distribución o la línea de transmisión, o en los límites físicos de una subestación, y en que se encuentren viviendas o zonas pobladas [18].

Con respecto a la medición de CEM, se deben considerar los siguientes niveles de tensión:

- **Baja Tensión:** Instalaciones y equipos que operan a voltajes inferiores a 600 V.
- **Media Tensión:** Instalaciones y equipos que operan a voltajes entre 600 V y 40 kV.
- **Alta Tensión:** Nivel de voltaje superior a 40 kV que está asociado con la transmisión y subtransmisión de energía eléctrica.

### **3.16. Medición de campo eléctrico**

Algunas características del lugar de medición deben ser consideradas antes de realizar las mediciones, tales como:

- El plano debe estar libre de objetos que puedan producir interferencias, y en caso de que estos elementos no puedan ser desplazados, es necesario indicar su ubicación y dimensiones.
- En ambientes exteriores la intensidad de campo eléctrico debe medirse en lugares donde exista una menor perturbación, tales como vegetación, murallas, otras líneas, entre otros.
- Si se realizan mediciones con humedad mayor al 80%, debe considerarse una influencia sobre el valor medido.

#### **3.16.1. Medición de intensidad de campo eléctrico en las cercanías de las líneas aéreas**

- Es recomendable colocar el aparato de medición sobre un elemento aislante, con el objetivo que el suelo no influya sobre las mediciones.
- El campo eléctrico bajo un alimentador de distribución o una línea de transmisión debe ser medido a una altura de 1m sobre el nivel del suelo.
- Con el objetivo de evitar los efectos de inducción en objetos cercanos al nivel del suelo, es necesario que la sonda del medidor de intensidad de campo eléctrico esté orientada para medir su componente vertical.

- Con el fin de asegurar un error menor al 3% en todos los casos de medición, la distancia entre el medidor de intensidad de campo eléctrico y el operador deberá ser de por lo menos 2,5 – 3 m.
- Con el fin de proporcionar una mayor descripción de la intensidad de campo eléctrico en un punto de interés, se deberán medir los valores máximo y mínimo de intensidad de campo en esa posición, ambos en el plano del campo elíptico.
- En condiciones excelentes donde los alimentadores de distribución y líneas de transmisión son horizontales y la superficie del suelo es lisa, el plano de la elipse es perpendicular a la dirección de los conductores.

Adicionalmente, para determinar los valores máximo y mínimo de las componentes de campo con sus correspondientes direcciones, es necesario rotar el medidor alrededor del sitio de medición. Por otra parte, mientras el operador se mantenga inmóvil menor ruido será introducido.

- Si objetos no permanentes están en el lugar de medición, con el objetivo de medir los valores no perturbados de campo, es necesario considerar una distancia de por lo menos tres veces la altura del objeto, entre el medidor y aquellos objetos no permanentes [18].

### 3.16.2. Perfil lateral

El perfil lateral de la intensidad de campo eléctrico, en un punto de interés a lo largo de un tramo del alimentador de distribución, debe ser medido en intervalos seleccionados, en una dirección normal a la línea y a 1 m sobre el nivel del suelo. La figura 3.16 muestra lo anteriormente dicho.

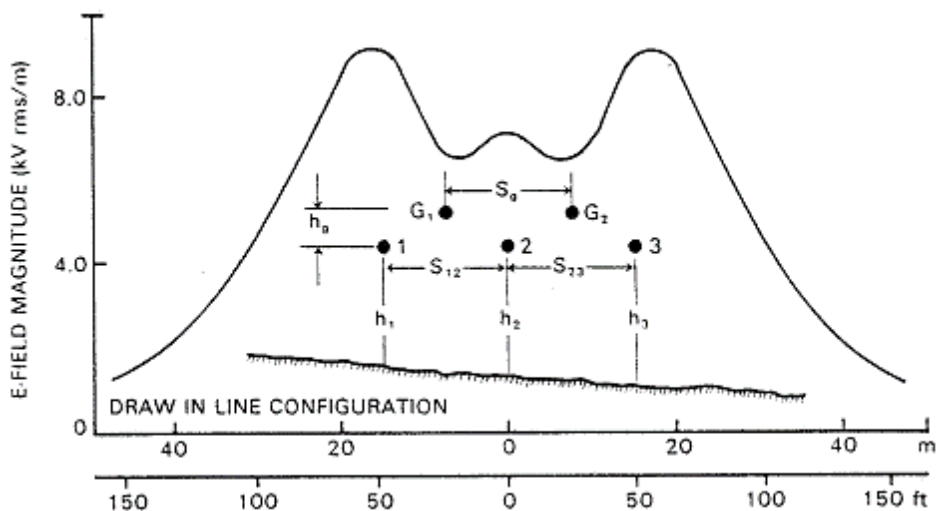


Figura 3.16. Ejemplo para la medición del perfil lateral.

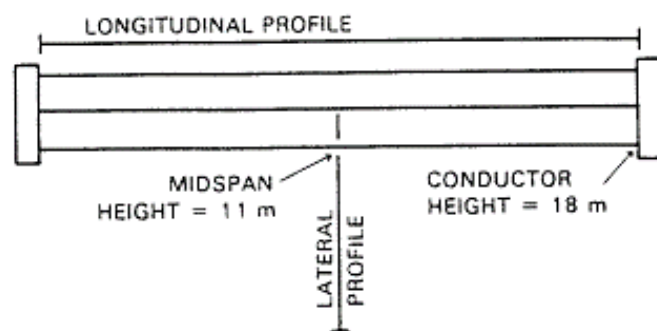
Fuente: [19].

Las mediciones deben empezar desde el centro de la línea en el área de interés y deberán realizarse a una distancia lateral no menor de 30 m del conductor. Igualmente deberán efectuarse por lo menos cinco mediciones espaciadas debajo de los conductores.

Adicionalmente, una medición del perfil completo puede ser iniciada en la región de interés más allá de la ubicación del último conductor y avanzar progresivamente hasta el lado opuesto de la franja de servidumbre de la línea aérea. Por otra parte, algunas mediciones finales deben ser realizadas considerando algunos puntos intermedios, esto con el fin de obtener indicaciones de cambios en la altura de la línea, de la carga o tensión eléctrica ocurridos durante la ejecución de la medición.

### 3.16.3. Perfil longitudinal

El perfil longitudinal de la intensidad de campo debe medirse en la parte media del vano, donde se obtiene la máxima lectura de intensidad de campo durante la medición en el perfil lateral, o en otros puntos de interés, esto se muestra en la figura 3.17. Las mediciones deben ser realizadas en paralelo con la línea aérea y a 1 metro sobre el nivel del suelo. Estas mediciones longitudinales deben realizarse al menos en cinco incrementos consecutivos separados de igual manera, desde un punto en la mitad del tramo de la línea aérea bajo estudio y avanzando para ambas direcciones, para una distancia total equivalente a un tramo de la línea [18].



**Figura 3.17.** Ejemplo para la medición del perfil longitudinal.

**Fuente:** [13].

Es muy importante hacer énfasis en que este análisis del nivel de ruido debe considerar el comportamiento del mismo durante lo largo del día ya que este es variable, así como también observar el comportamiento de este durante días sin lluvias así como días con lluvias debido a que el nivel de ruido tiene comportamiento diferente para ambos casos por lo general el techo de ruido se eleva durante una tormenta incluso si solo esta nublado y disminuye al término de la misma [1].

### 3.17. Procedimiento para el cálculo del campo eléctrico en líneas de subtransmisión

Usando líneas de carga con una adecuada disposición, como un problema en dos o tres dimensiones respectivamente, los alimentadores de distribución y las estructuras de las subestaciones pueden ser modelados. El campo eléctrico bajo una alimentador de distribución o en las barras de una subestación puede ser calculado usando la teoría de imágenes reflejadas, utilizando algunas idealizaciones tales como la suposición de conductores circulares de longitud infinita, paralelos entre si y paralelos a la superficie del terreno, esto les da la característica de buenos conductores en baja frecuencia.

En este sentido, el campo eléctrico entre dos esferas es simétrico respecto al plano de simetría de las cargas, donde una mitad del campo espacial es imagen especular de la otra mitad, de igual manera un conductor cualquiera y un plano conductor infinito se puede resolver como dos conductores uno imagen del otro, suponiendo que el plano es un espejo [18].

Por otra parte, para determinar la relación entre la tensión y las cargas que llevan  $N$  conductores lineales en un sistema de potencia, se utiliza la siguiente relación matricial:

$$[V]_{Nx1} = [P]_{NxN} \cdot [q]_{Nx1} \quad (3.5)$$

$$[q] = [C] \cdot [V] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (3.6)$$

Donde:

$[q]$ : vectores columna de cargas; ( $C$ ).

$[V]$ : potenciales de los conductores; ( $V$ ).

$[P]$ : matriz cuadrada de los coeficientes de potencial propios y mutuos; ( $F/m$ ).

La matriz  $C$  cuadrada no debe confundirse con las capacitancias de los conductores, esta incluye coeficientes de capacidad y se obtiene invirtiendo la matriz  $P$ , de coeficientes de potencial, que se calcula tal como:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \ln\left(\frac{2h_i}{R_i}\right) \quad (3.7)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} * \ln\left(\frac{D'_{ij}}{D_{ij}}\right) \quad (3.8)$$

Donde:

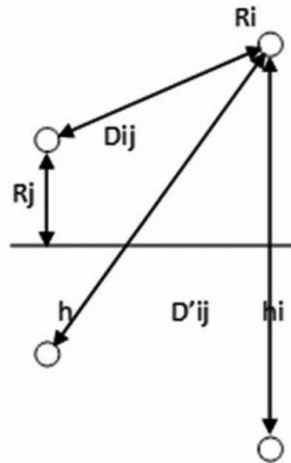
$R_i$ : radio del conductor  $i$ ; ( $m$ ).

$h_i$ : altura del conductor  $i$  sobre el suelo; ( $m$ ).

$D_{ij}$ : distancia entre conductores  $i - j$ ; ( $m$ ).

$D'_{ij}$ : distancia entre conductores  $i$  con la imagen del conductor  $j$ ; ( $m$ ).

La figura 3.18 muestra los parámetros geométricos para un sistema de conductores aéreos.



**Figura 3.18.** Parámetros geométricos de un sistema de conductores.

**Fuente:** [18].

En caso de conductores en haz, el cálculo se realiza aplicando un modelo con un conductor equivalente, con radio:

$$R_{eq} = A \cdot \sqrt[n]{\frac{nR}{A}} \quad (3.9)$$

Donde:

$R$ : radio del conductor; (m).

$A$ : radio geométrico del haz; (m).

$n$ : número de conductores en haz; (adimensional).

Este corresponde a un conductor único ficticio que presenta la misma capacitancia que el haz con todos los conductores vecinos. Para el cálculo del campo eléctrico se utiliza la distancia efectiva entre el conductor que lleva la carga  $q_i$  por unidad de longitud o su imagen, y el punto donde el campo eléctrico se calcula.

Finalmente superponiendo las contribuciones de carga de las componentes  $E_x$  y  $E_y$  se tiene el campo total:

$$E_x = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{x - d_i}{(x - d_i)^2 + (y - h_i)^2} - \frac{x - d_i}{(x - d_i)^2 + (y + h_i)^2} \right] \quad (3.10)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{y - h_i}{(x - d_i)^2 + (y - h_i)^2} - \frac{y + h_i}{(x - d_i)^2 + (y + h_i)^2} \right] \quad (3.11)$$

Donde:

$E_x$ : campo eléctrico en el eje  $x$ ; ( $V/m$ ).

$E_y$ : campo eléctrico en el eje  $y$ ; ( $V/m$ ).

$q_i$ : carga eléctrica en el conductor  $i$ ; ( $C$ ).

$\epsilon_0$ : permitividad eléctrica en el vacío; ( $F/m$ ).

$x$ : posición en la que está ubicado el conductor  $i$  con respecto al eje  $x$ ; ( $m$ ).

$d_i$ : punto de medición inicial lateral; ( $m$ ).

$y$ : altura a la que se realizó la medición; ( $m$ ).

$h_i$ : altura del conductor; ( $m$ ).

$N$ : número total de conductores del sistema; (adimensional).

### 3.18. Ecuaciones matemáticas para los prototipos establecidos

#### 3.18.1. Ecuaciones de Poisson y de Laplace

Las ecuaciones de Poisson y de Laplace se deducen fácilmente de la ley de Gauss en el caso de un medio material lineal:

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot \epsilon E = \rho_v \quad (3.12)$$

Donde:

$D$ : densidad de flujo eléctrico; ( $C/m^2$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$\rho_v$ : densidad de carga volumétrica; ( $C/m^3$ ).

Además,

$$E = -\nabla \cdot V \quad (3.13)$$

Donde:

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

#### 3.18.2. Ecuación de Poisson

La sustitución de (3.13) en (3.12) da como resultado la ecuación (3.14) en el caso de un medio no homogéneo:

$$\nabla \cdot (-\epsilon \nabla \cdot V) = \rho_v \quad (3.14)$$

Donde:

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$\rho_v$ : densidad de carga volumétrica; ( $C/m^3$ ).

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

En el caso de un medio homogéneo, la ecuación (3.14) se convierte en la ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

### 3.18.3. Ecuación de Laplace

Un caso especial de la ecuación anterior sucede cuando  $\rho_v = 0$ , es decir en una región sin carga. La ecuación (3.15) se transforma entonces en la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.16)$$

Donde:

$\nabla^2$ : laplaciano de un campo escalar; (adimensional).

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

El laplaciano de un campo escalar  $V$ , el cual se escribe  $\nabla^2 V$ , es la divergencia del gradiente de  $V$ .

La eliminación de  $\varepsilon$  del miembro izquierdo de la ecuación (3.14) para obtener la ecuación (3.15) implica que  $\varepsilon$  es constante en toda la región asociada con la definición de  $V$ ; no obstante,  $\varepsilon$  es constante en una región homogénea, por lo que la ecuación (3.15) no puede derivarse de la ecuación (3.14). Esta última es la ecuación de Poisson para un medio no homogéneo y se transforma en la ecuación de Laplace para un medio no homogéneo cuando  $\rho_v = 0$  [14].

La ecuación de Laplace es de vital importancia en la resolución de problemas electrostáticos, que implican un conjunto de conductores mantenidos en diferentes potenciales, como es el caso los capacitores.

### 3.18.4. Capacitancia eléctrica

En general, un capacitor consta de dos o más conductores portadores de cargas iguales pero de signo opuesto. Esto implica que todas las líneas de flujo que salen de un conductor deben terminar necesariamente en la superficie del otro. Las placas del capacitor como también se llama a los conductores, pueden estar separadas por el vacío o por un dieléctrico.

Considérese el capacitor de dos conductores que aparece en la figura 3.19. Los conductores se mantienen en una diferencia de potencial  $V$  dada por:

$$V = V_1 - V_2 = -\int_2^1 E \cdot dl \quad (3.17)$$

Donde:

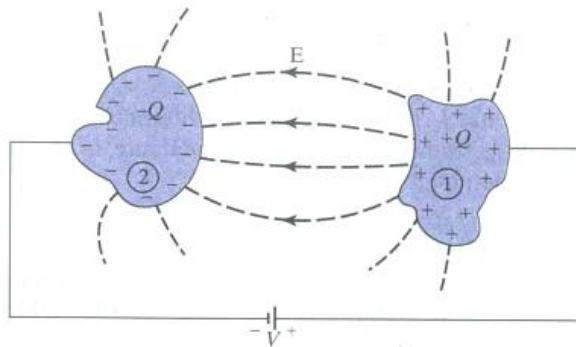
$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

$V_1$ : diferencia de potencial en el punto 1; ( $V$ ).

$V_2$ : diferencia de potencial en el punto 2; ( $V$ ).

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

Donde  $E$  es el campo eléctrico que existe entre los conductores y se presupone que el conductor 1 porta carga positiva.



**Figura 3.19.** Capacitor de dos conductores.

**Fuente:** [14].

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (3.18)$$

Donde:

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$\epsilon_0$ : permitividad eléctrica en el vacío; ( $F/m$ ).

$r$ : radio respecto al origen; ( $m$ ).

La capacitancia  $C$  del capacitor es la razón de la magnitud de la carga en una de las placas sobre la diferencia de potencial entre ellas, es decir:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon \oint E \cdot dS}{\int E \cdot dl} \quad (3.19)$$

Donde:

$C$ : capacitancia eléctrica; ( $F$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).



La supresión del signo negativo que procede de  $V = -\int E \cdot dl$  se debe a que lo que interesa es el valor absoluto de  $V$ . La capacitancia  $C$  es una propiedad física del capacitor y se mide en faradios (F).

Mediante la ecuación (3.19) puede obtenerse  $C$  de cualquier capacitor de dos conductores con uno de estos métodos:

- Se presupone  $Q$  y se calcula  $V$  en términos de  $Q$ , utilizando la ley de Gauss.
- Se presupone  $V$  y se calcula  $Q$  en términos de  $V$ , empleando la ecuación de Laplace.

Se usará para nuestro cálculo el primer método, el mismo que comprende los siguientes pasos:

- Se elige el sistema de coordenadas apropiado.
- Se asume que las dos placas conductoras portan cargas  $+Q$  y  $-Q$ .
- Se determina  $E$  con base en la ley de Coulomb o de Gauss y se halla  $V$  a partir de  $V = -\int E \cdot dl$ . El signo negativo puede ignorarse en este caso, ya que lo que se considerará es el valor absoluto de  $V$ .
- Para finalizar, se resuelve  $C$  a partir de  $C = Q/V$ .

Por consiguiente se aplicará este eficiente método matemático para determinar la capacitancia en algunas importantes configuraciones de dos conductores [14].

#### **a. Capacitor placas paralelas**

Considérese el capacitor que aparece en la figura 3.20. Se supondrá que cada placa posee un área  $S$  y que están separadas por una distancia  $d$ . Asimismo que las placas 1 y 2 portan respectivamente cargas  $+Q$  y  $-Q$  distribuidas de manera uniforme, de tal manera que:

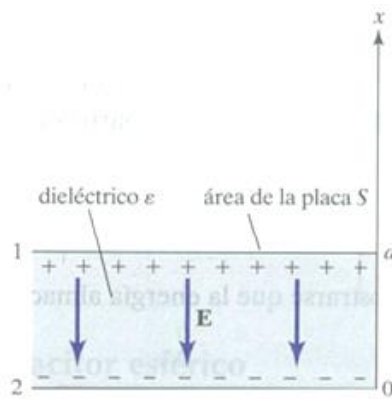
$$\rho_s = \frac{Q}{S} \quad (3.20)$$

Donde:

$\rho_s$ : densidad de carga superficial; ( $C/m^2$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$S$ : superficie; ( $m^2$ ).



**Figura 3.20.** Capacitor de placas paralelas.

**Fuente:** [14].

En un capacitor ideal de placas paralelas, la distancia  $d$  que separa a éstas es muy pequeña en comparación con sus dimensiones. Suponiendo éste caso ideal, es posible ignorar el efecto de borde en los extremos de las placas y considerar uniforme el campo entre ellas. Si el espacio entre las placas está ocupado por un dieléctrico homogéneo con permitividad  $\epsilon$  y se ignora el efecto de borde del flujo en los extremos de las placas, con base a la ecuación 3.21 [14].

$$D = -\rho_S \quad (3.21)$$

Donde:

$D$ : densidad de flujo eléctrico; ( $C/m^2$ ).

$\rho_S$ : densidad de carga superficial; ( $C/m^2$ ).

Esto es igual,

$$E = -\frac{\rho_S}{\epsilon} \quad (3.22)$$

$$E = -\frac{Q}{\epsilon \cdot S} \quad (3.23)$$

Donde:

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$\rho_S$ : densidad de carga superficial; ( $C/m^2$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$S$ : superficie; ( $m^2$ ).

De tal manera,

$$V = - \int_2^1 E \cdot dl = - \int_0^d \left[ - \frac{Q}{\epsilon \cdot S} \right] \cdot dx = \frac{Q \cdot d}{\epsilon \cdot S} \quad (3.24)$$

Donde:

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$S$ : superficie; ( $m^2$ ).

$d$ : distancia entre placas; (m).

Por lo tanto, se obtendrá la capacitancia de un capacitor de placas paralelas de la siguiente forma:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \quad (3.25)$$

Donde:

$C$ : capacitancia eléctrica; ( $F$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$S$ : superficie; ( $m^2$ ).

$d$ : distancia entre placas; (m).

Por medio de las ecuaciones obtenidas podemos definir de mejor manera la ecuación de campo eléctrico, partiendo de las ecuaciones (3.25), y despejando la carga  $Q$ .

$$Q = \frac{\epsilon \cdot S \cdot V}{d} \quad (3.26)$$

Reemplazando la ecuación (3.26) en (3.23) se tiene,

$$E = - \frac{\frac{\epsilon \cdot S \cdot V}{d}}{\epsilon \cdot S}$$

$$E = \frac{V}{d} \quad (3.27)$$

### **b. Capacitor coaxial**

Éste en esencia es un capacitor cilíndrico coaxial o cable coaxial. Considerando la longitud  $L$  de dos conductores coaxiales de radio interno  $a$  y radio externo  $b$  ( $b > a$ ),

como se muestra en la figura 3.21. Teniendo en cuenta que el espacio entre los conductores está ocupado por un dieléctrico homogéneo con permitividad  $\epsilon$ . Suponiendo también que los conductores 1 y 2 portan respectivamente  $+Q$  y  $-Q$  distribuidas de manera uniforme. La aplicación de la ley de Gauss a una superficie gaussiana cilíndrica arbitraria de radio  $r = (a < \rho < b)$  [14].

$$Q = \epsilon \oint E \cdot dS = \epsilon \cdot E \cdot 2\pi r L \quad (3.28)$$

Donde:

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$r$ : radio del cilindro; ( $m$ ).

$L$ : altura del cilindro; ( $m$ ).

El campo eléctrico sería,

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon r L} \quad (3.29)$$

Donde:

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$r$ : radio del cilindro; ( $m$ ).

$L$ : altura del cilindro; ( $m$ ).

Ignorando el efecto de borde del flujo en los extremos de los cilindros y reemplazando el radio del cilindro  $r$  por  $\rho$ ,

$$V = - \int_2^1 E \cdot dl = - \int_b^a \left[ \frac{Q}{2\pi\epsilon\rho L} \right] \cdot d\rho \quad (3.30)$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon L} \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (3.31)$$

Donde:

$V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

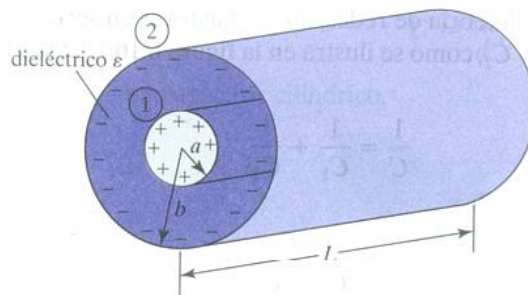
- $\rho$ : radio del cilindro; ( $m$ ).
- $L$ : altura del cilindro; ( $m$ ).
- $a$ : radio interno del capacitor cilíndrico; ( $m$ ).
- $b$ : radio externo del capacitor cilíndrico; ( $m$ ).

De esta manera, la capacitancia de un cilindro coaxial está dada por:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln \frac{b}{a}} \quad (3.32)$$

Donde:

- $C$ : capacitancia eléctrica; ( $F$ ).
- $Q$ : carga eléctrica; ( $C$ ).
- $V$ : diferencia de potencial; ( $V$ ).
- $\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).
- $L$ : altura del cilindro; ( $m$ ).
- $b$ : radio externo del capacitor cilíndrico; ( $m$ ).
- $a$ : radio interno del capacitor cilíndrico; ( $m$ ).



**Figura 3.21.** Capacitor cilíndrico coaxial.

**Fuente:** [14].

Por medio de las ecuaciones obtenidas podemos definir de mejor manera la ecuación de campo eléctrico, partiendo de las ecuaciones (3.32) (3.29), y despejando la carga  $Q$  de (3.32):

$$Q = \frac{2\pi\epsilon L \cdot V}{\ln \frac{b}{a}} \quad (3.33)$$

Reemplazando la ecuación (3.33) en (3.29) se tiene,

$$E = \frac{\frac{2\pi\epsilon L \cdot V}{\ln \frac{b}{a}}}{2\pi\epsilon r L}$$

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{b}{a}} \quad (3.34)$$

### 3.18.5. Energía almacenada en capacitores

El capacitor almacena energía en el campo eléctrico que aparece entre las placas cuando las mismas están sometidas a una diferencia de potencial [14].

$$W_E = \frac{1}{2} \int D \cdot E \, dv = \frac{1}{2} \int \epsilon_o \cdot E^2 \, dv \quad (3.35)$$

Donde:

$W_E$ : energía almacenada de un capacitor; (J).

$D$ : densidad de flujo eléctrico; ( $C/m^2$ ).

$E$ : campo eléctrico; ( $V/m$ ).

$\epsilon_o$ : permitividad eléctrica en el vacío; ( $F/m$ ).

Partiendo de la ecuación (3.35) mediante un breve proceso se puede hallar la cantidad de energía almacenada en un capacitor, la misma que está dada por:

$$W_E = \frac{1}{2} \int \epsilon \frac{Q^2}{\epsilon^2 \cdot S^2} \, dv = \frac{\epsilon Q^2 S d}{2 \epsilon^2 S^2} = \frac{Q^2}{2} \left( \frac{d}{\epsilon \cdot S} \right) \quad (3.36)$$

Donde:

$Q$ : carga eléctrica; (C).

$\epsilon$ : permitividad eléctrica; ( $F/m$ ).

$S$ : superficie; ( $m^2$ ).

$d$ : distancia entre las placas de un capacitor; (m).

Reemplazando la ecuación (3.36) en (3.35), se obtiene como resultado:

$$W_E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C} \quad (3.37)$$

Donde:

$W_E$ : energía almacenada de un capacitor; (J).

$C$ : capacitancia eléctrica; (F).

$V$ : diferencia de potencial; (V).

$Q$ : carga eléctrica; (C).

### 3.19. Coeficiente de correlación lineal

La finalidad de la correlación es examinar la dirección y la fuerza de la asociación entre dos variables cuantitativas. Así se conocerá la intensidad de la relación entre ellas y en caso de aumentar el valor de una variable, aumenta o disminuye el valor de la otra variable. Con la nube de puntos se puede apreciar si existe o no una tendencia entre las dos variables, y para cuantificar el grado de asociación entre dos variables cuantitativas se debe calcular un coeficiente de correlación.

El coeficiente de correlación de Pearson representado por la ecuación 3.38 para variables cuantitativas, es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente [20].

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3.38)$$

Donde:

$r$ : coeficiente de correlación lineal; (*adimensional*).

$x$ : variable de un conjunto de datos  $x$ ; ( $V/m$ ).

$\bar{x}$ : media aritmética del conjunto de datos de  $x$ ; ( $V/m$ ).

$y$ : variable de un conjunto de datos  $y$ ; ( $V/m$ ).

$\bar{y}$ : media aritmética del conjunto de datos de  $y$ ; ( $V/m$ ).

Una vez calculado el valor del coeficiente de correlación, se determina si este valor obtenido muestra que las variables X e Y están relacionadas ciertamente o tan solo presentan dicha relación por casualidad. Un coeficiente de correlación se dice que es significativo si se puede afirmar, con una cierta probabilidad, que es diferente de cero [20].

**Tabla 3.5.** Interpretación coeficiente de correlación.

<b>Coeficiente</b>	<b>Interpretación</b>
$r = 1$	Correlación perfecta
$0,80 < r < 1$	Muy alta
$0,60 < r < 0,80$	Alta
$0,40 < r < 0,60$	Moderada
$0,20 < r < 0,40$	Baja
$0 < r < 0,20$	Muy baja
$r = 0$	Nula

**Fuente:** [20].

### 3.19.1. Recta de regresión lineal

Se llama así a la recta que atraviesa la nube de puntos y que mejor se ajusta a ellos, tal como se observa en la figura 3.22. En el caso que se mida la distancia vertical de cada punto, la recta buscada será aquella para la cual la suma de estas distancias fuera mínima. Se trata de una técnica estadística que analiza la relación entre dos variables cuantitativas, tratando de verificar si dicha relación es lineal, la ecuación 3.39 muestra la recta de regresión lineal.

$$y = a \cdot x + b \quad (3.39)$$

Donde:

$y$ : variable  $y$ ; ( $V/m$ ).

$a$ : pendiente de la recta lineal; (*adimensional*).

$x$ : variable  $x$ ; ( $V/m$ ).

$b$ : ordenada en el origen; (*adimensional*).

La pendiente es  $a$  y la altura a la que la recta corta el eje vertical es  $b$ , conociendo esta ecuación se podrá llegar a estimar valores de  $y$  desconocidos a partir de valores de  $x$  conocidos [20].

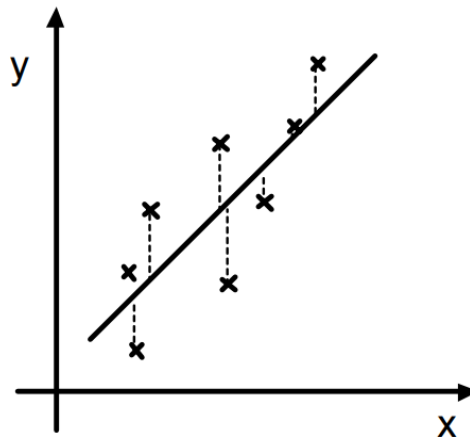


Figura 3.22. Recta de regresión lineal.

Fuente: [20].

La pendiente de la recta se observa en la ecuación 3.40:

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.40)$$

Donde:

$a$ : pendiente de la recta; (*adimensional*).

$n$ : número total de datos; (*adimensional*).



$x$ : variable de un conjunto de datos  $x$ ; ( $V/m$ ).

$y$ : variable de un conjunto de datos  $y$ ; ( $V/m$ ).

La ordenada en el origen se aprecia en la ecuación 3.41:

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (3.41)$$

Donde:

$b$ : ordenada en el origen; (*adimensional*).

$n$ : número total de datos; (*adimensional*).

$y$ : variable de un conjunto de datos  $y$ ; ( $V/m$ ).

$x$ : variable de un conjunto de datos  $x$ ; ( $V/m$ ).

### 3.20. Coeficiente de determinación

El coeficiente de correlación elevado al cuadrado es el coeficiente de determinación, que mide la cantidad de variación en una variable que es compartida por otra. Este coeficiente que se observa en la ecuación 3.41, nos indica el grado de ajuste de la recta de regresión a los valores de la muestra, y se define como el porcentaje de la variabilidad total de la variable dependiente  $Y$  que es explicada por la recta de regresión.

$$R = r^2$$

Donde:

$r$ : coeficiente de correlación lineal; (*adimensional*).

Las propiedades de este coeficiente son:

- Es una cantidad adimensional que sólo puede tomar valores entre 0 y 1.
- Cuando un ajuste es bueno mayor será la fuerza de asociación entre ambas variables y  $R^2$  será cercano a uno.
- Cuando un ajuste es malo no existe asociación entre  $X$  e  $Y$ , por lo que  $R^2$  será cercano a cero [21].

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Métodos de investigación

Se aplicó los siguientes métodos investigativos: deductivo, inductivo y analítico y sintético.

- **Método inductivo – deductivo**

El método inductivo, el diseño de un sensor para campo eléctrico que permita identificar las cargas atmosféricas, permite identificar la necesidad de fijar barreras de peligro para las personas que trabajen cerca de sitios con altas cargas eléctricas.

El método deductivo. - las cargas de energía atmosférica resultan peligrosas cuando se encuentra una persona expuesta a grandes cargas eléctricas, el diseñar un sensor que permita identificar la proximidad del peligro permite tener un mayor grado de seguridad tanto para las personas que laboraran y los dueños de las diferentes empresas que se beneficien de utilizar el sensor.

- **Método analítico y sintético**

Este método permite obtener información de fuentes respaldadas por estudios científicos en base a investigaciones previas de diversos autores, en esta investigación se utiliza la investigación bibliográfica-documental, exploratoria, descriptiva, propositiva.

## **4.2. Tipos de Investigación**

- **Investigación Bibliográfica-documental**

Este tipo de investigación se da a través de libros, tesis, trabajos de grado, artículos científicos, investigaciones, artículos de revistas y fuentes certificadas, que en su momento realizaron investigaciones concernientes a lo que se refiere al campo eléctrico y descargas atmosféricas.

- **Investigación Exploratoria**

En la investigación se puede identificar que los accidentes por cargas atmosféricas que alteran el campo eléctrico pueden resultar mortales o incurrir en grandes costos médicos. El diseño de un sensor para alertar a las personas del peligro al cual se exponen es fundamental, debido al gran riesgo al que se exponen las personas que trabajan en sitios que una descarga atmosférica puede exponerlos a sufrir un accidente.

- **Investigación Descriptiva**

Permite identificar las principales características del problema mediante la descripción, técnicas, aplicaciones prácticas de las cuales parte un análisis, descripción, e interpretación de los resultados obtenidos en términos claros y precisos. Esta investigación permitirá aportar con nuevos conocimientos en cuanto a temáticas relacionadas con las descargas atmosféricas y campo eléctrico. La base de esta investigación es la investigación bibliográfica documental de la calefacción central y energías renovables.

- **Investigación Propositiva**

Es propositiva debido a que busca contribuir con la seguridad de las personas que estén expuestas a sufrir daños por descargas atmosféricas relacionadas con un campo eléctrico, además permiten contribuir con alternativas de seguridad que tengan un menor costo y que no afecten la integridad de las personas.

### 4.3. Instrumentos de Investigación

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se utiliza referencias bibliográficas como libros, artículos, folletos, etc., que permitan el entendimiento amplio del tema para así posteriormente diseñar e implementar el sensor de descargas.

- **Observación**

Por medio de la observación se verificará el proceso utilizado, pruebas realizadas y se recopilarán sus ventajas y desventajas para ser evaluadas posteriormente en el desarrollo.

- **Experimentación**

Ejecución de pruebas con los modelos propuestos para la obtención de resultados, que ayudarán a la consecución de los objetivos planteados.

### 4.4. Operacionalización de las Variables

- **Variable Dependiente:** Diseño de un sensor para campo eléctrico.

**Tabla 4.1.** Operacionalización de la variable dependiente.

<b>Conceptualización</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidades</b>	<b>Técnicas e Instrumentos</b>
Equipo constituido por elementos electrónicos que pueden detectar y censar descargas atmosféricas así como su campo eléctrico.	Comportamiento del campo eléctrico cuando se produce una descarga.	Voltaje.  Campo eléctrico.	Voltios [V]  Voltios/metro [V/m]	Visita de campo y observación.  Recolección de información.

- **Variable Independiente:** Descarga atmosférica.

**Tabla 4.2.** Operacionalización de la variable independiente.

<b>Conceptualización</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidades</b>	<b>Técnicas e Instrumentos</b>
La descarga atmosférica conocida como rayo, es la igualación violenta de cargas de un campo eléctrico que se ha creado entre una nube y la tierra o entre nubes. Los rayos que nos interesan por su efecto, son los de nube a tierra.	Curva característica de una descarga.  Nivel de corriente que se produce cuando existe la descarga.	Tiempo de duración de la descarga.  Corriente que circula durante la descarga.	Microsegundos [ $\mu s$ ]  Amperios [A]	Trabajo investigativo.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Prototipos de capacitores

Se elaboraron tres distintos modelos de capacitores, los prototipos construidos se pueden observar en la figura 5.1, estos prototipos acoplados con un circuito electrónico permiten medir el campo eléctrico.



**Figura 5.1.** Prototipos de sensores capacitivos.

Para la construcción de los sensores se requirió de un material que posea adecuadas capacidades conductivas, por lo cual el material que se seleccionó para la fabricación fue

el aluminio, el mismo que posee una resistividad de  $0,0278(\Omega/\text{mm}^2)$  y conductividad eléctrica de  $0,3767(\text{S}/\text{m})$ , el cual representa el 63,8% de la del cobre.

- **Prototipo A**

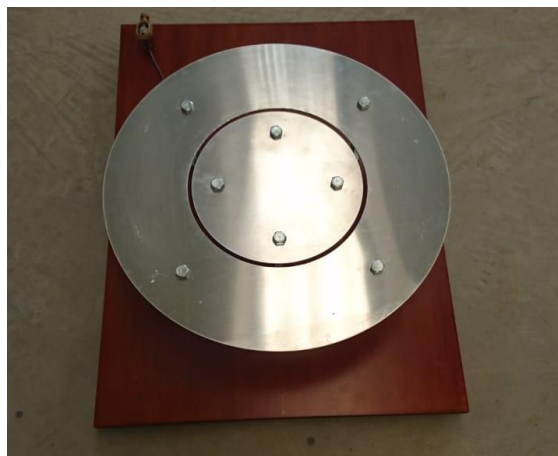
El primer modelo de sensor está constituido por dos cilindros de 20 cm de altura, uno de 6 cm y el segundo de 7 cm de diámetro. El primero se encuentra dentro del cilindro de mayor sección separados a 5mm de distancia, esto se observa en la figura 5.2.



**Figura 5.2.** Prototipo A.

- **Prototipo B**

El segundo modelo del sensor consta de dos discos, el primero con un diámetro de 40 cm y el segundo con un diámetro de 20 cm. Estos discos se encuentran a la misma altura separados horizontalmente a una distancia de 5 mm, como se aprecia en la figura 5.3.



**Figura 5.3.** Prototipo B.

- **Prototipo C**

El tercer modelo consiste en dos discos idénticos con un diámetro de 20 cm cada uno, los mismos que se encuentran a distinta altura con respecto a un mismo eje, separados 5 mm uno de otro, como se muestra en la figura 5.4.



**Figura 5.4.** Prototipo C.

## **5.2. Laboratorio de alta tensión**

El laboratorio de alta tensión está ubicado en el campus la Matriz de la Universidad Técnica de Cotopaxi, en el mismo se encuentran los equipos que se utilizaron para realizar las pruebas iniciales de la investigación.

En el laboratorio existen equipos eléctricos, los cuales permiten llevar a cabo distintas pruebas. A continuación se describen los equipos empleados para la realización del proyecto:

- **Transformador**

Se empleó un transformador monofásico como el que se observa en la figura 5.5, con una relación de transformación de 220 V/50 kV y una capacidad de 5 kVA. Este equipo se utilizó para simular una descarga atmosférica en un escenario controlado.



**Figura 5.5.** Transformador monofásico.

- **Caja mando del transformador**

La caja de mando se utilizó para controlar el nivel de voltaje y registrar la cantidad de corriente producida por la descarga disruptiva generada por el transformador, como se observa en la figura 5.6.



Figura 5.6. Caja mando del transformador.

- **Jaula de Faraday**

El transformador se encuentra dentro de una jaula que sirve para la protección de personas y equipos, teniendo como principal objetivo direccionar las descargas elevadas de voltaje hacia tierra, tal como se observa en la figura 5.7.



Figura 5.7. Jaula de Faraday.

- **Osciloscopio**

Este equipo se utilizó para comprobar el funcionamiento de los sensores construidos y de la misma manera visualizar la forma de onda captada por cada uno de los prototipos.

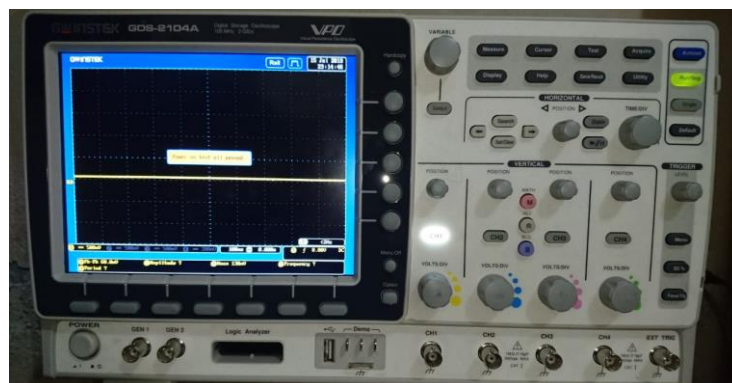
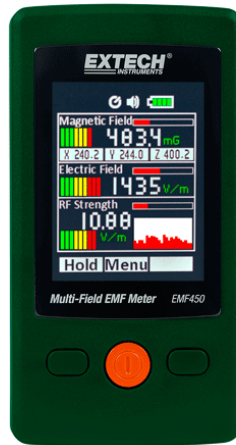


Figura 5.8. Osciloscopio.

- **Extech EMF450: Medidor EMF de campo múltiple**

El EMF450 es un medidor EMF como el que se muestra en la figura 5.9, tres en uno que mide y muestra simultáneamente la intensidad de campo magnético, campo eléctrico y radiofrecuencia. Diseño ergonómico de bolsillo con un menú fácil de navegar. Mediciones de fuerza de campo magnético, campo eléctrico y radiofrecuencia.



**Figura 5.9.** Extech EMF450.

### 5.3. Diseño del circuito electrónico

Para cumplir con el propósito del tema se requiere diseñar un circuito electrónico el cual permita receptar la señal de campo eléctrico existente en el ambiente, la señal a captar deberá contener únicamente valores positivos puesto que Arduino trabaja solamente con valores de ese tipo, además este valor de campo eléctrico se visualizará mediante una pantalla LCD, asimismo el circuito constará de un setpoint que permita realizar un conteo en la misma pantalla y esta información se almacenará dentro de una tarjeta microSD, para todo esto se requiere de distintos módulos acoplados a la plataforma.

El circuito electrónico como se mencionó fue diseñado mediante la plataforma Arduino, en la misma se utilizaron dos protocolos de comunicación como SPI e I2C, cada uno de ellos con sus ventajas y desventajas.

Además el Arduino cuenta con un circuito de protección integrado, el mismo que internamente está compuesto por un diodo Zener que permite un máximo voltaje de entrada de 5 voltios, aislando a los elementos electrónicos que conforman el Arduino de voltajes mayores que traten de ingresar [22].

- **Variable detectada**

Mediante cálculos matemáticos se obtuvo las ecuaciones 3.27 y 3.34, las mismas que se requieren para encontrar el campo eléctrico, esta magnitud se visualizará a través del Arduino, por lo que el voltaje será la variable a detectar.



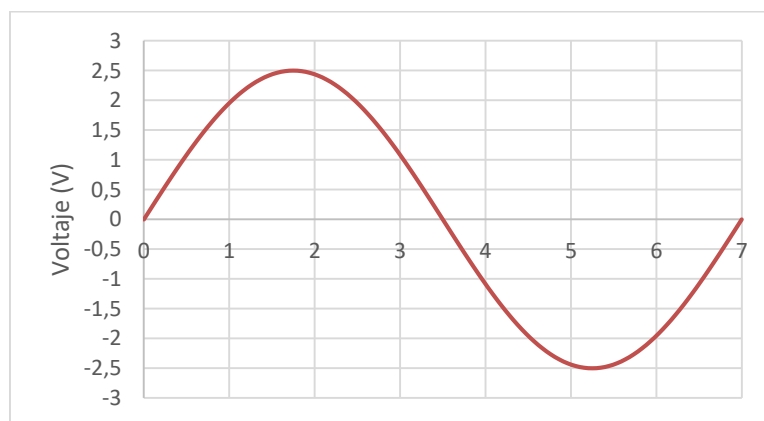
- **Componentes de circuito**

Los componentes utilizados para la construcción del circuito fueron seleccionados en base a su funcionamiento, estos elementos son los siguientes:

- 3 Condensadores (10  $\mu$ F)
- Potenciómetro de precisión (500 k $\Omega$ )
- Potenciómetro (10 k $\Omega$ )
- Resistencia (3,3 k $\Omega$ )
- Resistencia (10 k $\Omega$ )
- Módulo microSD
- Módulo RTC DS3231
- Display LCD 16x2 I2C
- MicroSD 4GB
- Botón de reset externo
- Botón de encendido/apagado
- Cable micro usb/usb
- Conector micro usb hembra
- 2 Plugs banana hembra
- Power bank (5 V)

- **Tratamiento de la señal**

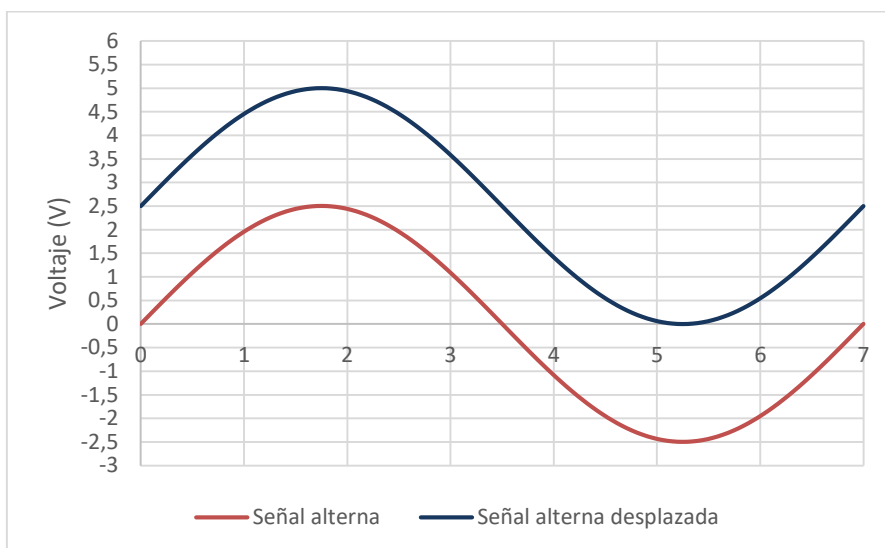
Se tiene una señal analógica de corriente alterna dispersa en el ambiente la cual posee parte positiva y negativa, esta señal será receptada por cada uno de los prototipos de capacitores, como se puede observar en la figura 5.10.



**Figura 5.10.** Señal de corriente alterna.

En la plataforma Arduino solo se puede trabajar con cantidades positivas, por esta razón se optó por desplazar los valores negativos de la onda sinusoidal, tal como se observa en la figura 5.11., para desplazar esta señal se empleó un potenciómetro de precisión el

mismo que permite sumar un voltaje de 2,5 V a la señal de entrada, conservando la amplitud de voltaje.



**Figura 5.11.** Señal de corriente desplazada.

Se colocó dos condensadores en la entrada del circuito en donde se ubican las salidas de los prototipos, los mismos que no permiten que el capacitor se cargue y se descargue.

- **Contador de descargas**

Para realizar el conteo de descargas se utilizó la variable booleana flag en el software Arduino, la misma cuenta con un potenciómetro que sirve para definir un setpoint, éste permite realizar el conteo de descargas una vez que el valor de campo eléctrico sobrepase el valor del setpoint, esta programación se aprecia en el anexo 5, además el conteo de descargas es almacenado en la tarjeta microSD mediante un blog de notas que se puede apreciar en el anexo 6.

#### **5.4. Validación del sensor**

Para validar el sensor se realizaron las mediciones del perfil lateral en base a la norma IEEE 644 “Estándar de Procedimientos para Medición de Campos Eléctricos y Magnéticos desde Líneas de Transmisión de Corriente Alterna”, las mismas se efectuaron en una línea de transmisión de 138 kV.

- **Línea de transmisión 138 kV**

La ubicación en donde se realizaron las mediciones se encuentra en el cantón Latacunga, parroquia Ignacio Flores, sector el Niagara, por esta localización se halla una línea de transmisión de 138 kV con un vano de 252 metros la cual se observa en la figura 5.12, la línea está constituida por el conductor ACSR 477 MCM [23].



**Figura 5.12.** Torre de transmisión 138 kV.

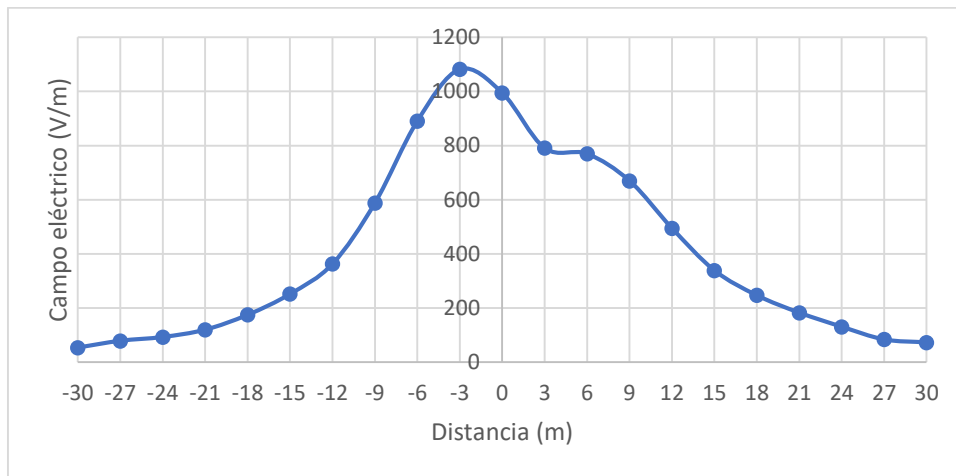
- **Medición de campo eléctrico con el instrumento EMF Meter 450**

Para las mediciones de perfil lateral se tomaron diez puntos de medición en cada lado de la línea a una separación de tres metros entre cada punto, con respecto al punto con mayor nivel de campo eléctrico ubicado en el centro del vano, los datos conseguidos se muestran en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1.** Datos de perfil lateral obtenidos con el sensor EMF 450.

<b>Distancias (m)</b>	<b>Sensor EMF 450 (V/m)</b>
-30	54
-27	79
-24	93
-21	120
-18	175
-15	252
-12	363
-9	588
-6	891
-3	1082
0	995
3	791
6	770
9	670
12	495
15	339
18	247
21	183
24	131
27	84
30	73

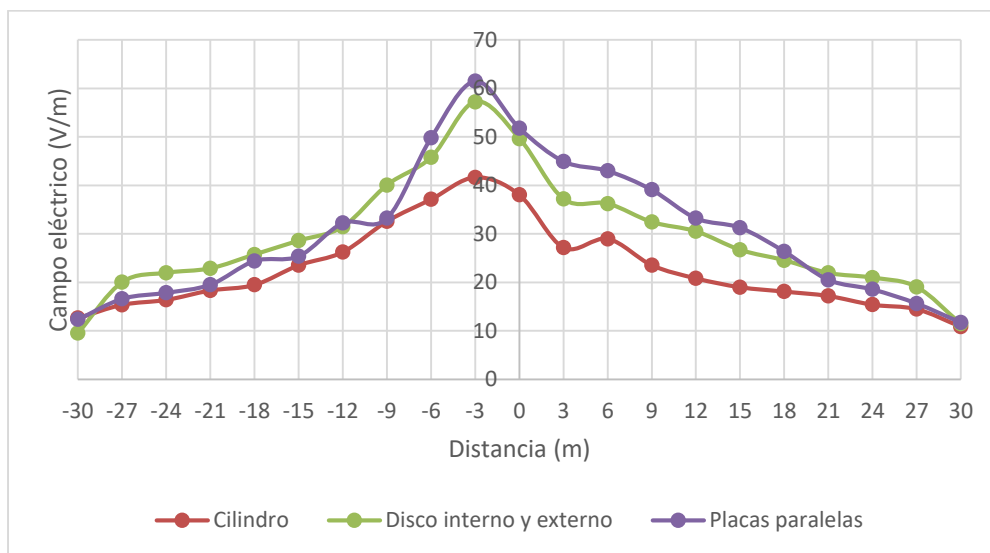
Mediante los datos de la tabla 5.1, en comparación con la tabla 3.3. referente a la Comisión Internacional de Protección de Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), se puede apreciar que existe una gran diferencia en el campo eléctrico hallado en el límite de la franja de servidumbre, ya que a una distancia de 9 metros con el sensor EMF 450 se obtuvo 670 y 588 V/m, y en la tabla 3.3 se halló 4167 V/m a una distancia similar de 10 metros, con lo cual se llega a concluir que no existe un riesgo potencial por las emisiones de campo eléctrico que genera esta línea de transmisión. En la figura 5.13 se presenta el campo eléctrico receptado por el sensor EMF 450 en la línea de 138 kV.



**Figura 5.13.** Perfil de campo eléctrico del sensor EMF 450.

- **Mediciones del perfil lateral con los prototipos**

Estas mediciones se llevaron a cabo empleando un procedimiento similar al utilizado con el sensor EMF Meter 450 para la adquisición de datos de campo eléctrico, como se muestra en la figura 5.14.



**Figura 5.14.** Perfil de campo eléctrico entre prototipos A, B y C.

Se observa en la tabla 5.2, que en la línea de transmisión el punto con mayor nivel de campo eléctrico se da a -3 metros del punto centro del perfil lateral, esto se debe a la geografía del terreno, así como el horario en que se realizaron las mediciones.

**Tabla 5.2.** Mediciones adquiridas por los prototipos.

<b>Distancias (m)</b>	<b>Cilindro (V/m)</b>	<b>Disco interno y externo (V/m)</b>	<b>Placas paralelas (V/m)</b>
-30	12,63	9,54	12,36
-27	15,39	20,04	16,62
-24	16,40	21,99	17,87
-21	18,35	22,90	19,55
-18	19,50	25,76	24,44
-15	23,55	28,62	25,42
-12	26,27	31,48	32,26
-9	32,61	40,07	33,24
-6	37,14	45,79	49,85
-3	41,67	57,24	61,51
0	38,05	49,66	51,81
3	27,18	37,21	44,97
6	28,99	36,25	43,01
9	23,55	32,44	39,10
12	20,84	30,53	33,24
15	19,02	26,71	31,28
18	18,12	24,57	26,39
21	17,21	21,94	20,53
24	15,40	20,99	18,57
27	14,49	19,05	15,65
30	10,87	11,45	11,73

Con los datos que se obtuvieron en las mediciones tanto con el sensor patrón como con los prototipos, se estableció que existe un elevado rango error, por lo que se procedió a emplear dos métodos de ajuste, los cuales permitirán conocer el grado de asociación entre las variables y reducir el rango de error.

### **5.5. Método 1 – Ecuación de corrección**

Para este método se requiere de una ecuación que permita alcanzar una equivalencia entre los valores obtenidos por cada uno de los prototipos hacia los valores del sensor EMF 450, para lo cual se tomaron en cuenta ciertas consideraciones como la altura promedio en la que se encuentran las líneas de transmisión, distancia en que se realizan las mediciones, campo eléctrico medido con los prototipos, un factor de corrección y un ángulo de recepción de campo eléctrico.

La ecuación 5.1 se determinó de la siguiente manera, el campo eléctrico ajustado ( $CE_{aj.}$ ) es directamente proporcional al  $\text{sen } \theta$  debido a la influencia del ángulo en la recepción de campo eléctrico por cada prototipo, mientras que la distancia entre el punto de origen y el de medición ( $H$ ) es inversamente proporcional puesto que a mayor distancia el campo eléctrico obtenido es menor.

$$CE_{aj.} = \frac{K \cdot CE_{med} \cdot \text{sen } \theta}{H}$$

$$CE_{aj.} = \frac{K \cdot CE_{med} \cdot \text{sen } \theta}{\sqrt{h_{pro}^2 + d^2}} \quad (5.1)$$

Donde:

$CE_{aj.}$ : campo eléctrico ajustado; ( $V/m$ ).

$K$ : factor de corrección; (*adimensional*).

$CE_{med}$ : campo eléctrico medido con los prototipos; ( $V/m$ ).

$\theta$ : ángulo en el que reciben campo eléctrico los prototipos; (*radianes*).

$h_{pro}$ : altura promedio de los conductores en el eje  $y$ ; ( $m$ ).

$d$ : distancia en el eje  $x$ ; ( $m$ ).

$H$ : hipotenusa entre las distancias del eje  $x$  y la altura promedio; ( $m$ ).

Para calcular el ángulo que se necesita en la ecuación de corrección se considera las distancias en base a la ubicación de cada prototipo para la recepción de campo eléctrico en cada punto de medición en el eje  $x$ , como se muestra en el anexo 1, por lo que se planteó la ecuación 5.2, empleando la función inversa de la tangente, estos valores se reflejan en la tabla 5.3.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{h_{pro}}{d} \right) \quad (5.2)$$

Donde:

$\theta$ : ángulo en el que reciben campo eléctrico los prototipos; (*grados*).

$h_{pro}$ : altura promedio de los conductores en el eje  $y$ ; ( $m$ ).

$d$ : distancia en el eje  $x$ ; ( $m$ ).

**Tabla 5.3.** Ángulo calculado a diferentes distancias en el eje x.

Distancias (m)	Ángulo (grados)
-30	28,369
-27	30,964
-24	34,019
-21	37,648
-18	41,987
-15	47,203
-12	53,471
-9	60,945
-6	69,677
-3	79,509
0	90,000
3	79,509
6	69,677
9	60,945
12	53,471
15	47,203
18	41,987
21	37,648
24	34,019
27	30,964
30	28,369

El campo eléctrico ajustado que se desea obtener debe ser idéntico al del sensor EMF 450 con el fin de obtener el menor error posible, por lo que se procedió a calcular un factor de corrección a partir de la ecuación 5.1 para cada prototipo considerando las mediciones adquiridas por los mismos, esto se observa en la tabla 5.4.

$$K = \frac{CE_{aj.} * \sqrt{h_{pro}^2 + d^2}}{CE_{med.} \cdot \text{sen } \theta}$$

**Tabla 5.4.** Factor de corrección K.

Prototipos	Factor de Corrección (K)
Cilindro	419,963
Disco interno y externo	331,207
Placas paralelas	325,893

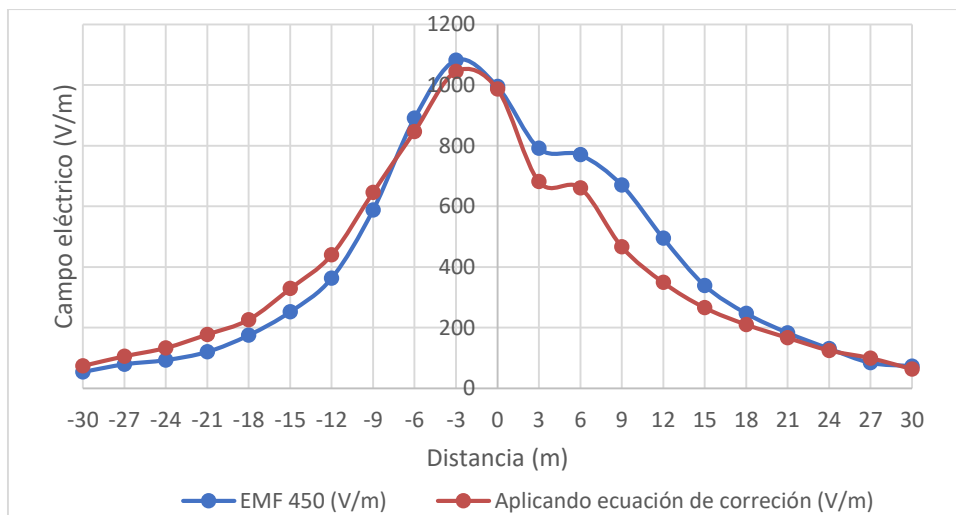
- **Proceso empleado para el cálculo del campo eléctrico ajustado**

Mediante los resultados del factor de corrección hallados, reemplazándolos en la ecuación 5.1 se obtiene el campo eléctrico ajustado en cada prototipo y así hallar el margen de error en cada punto medición, estos valores se encuentran en las tablas 5.5, 5.6 y 5.7.

**a) Prototipo cilindro**

**Tabla 5.5.** Campo eléctrico en prototipo cilindro empleando ecuación de corrección.

Distancias (m)	Sensor EMF 450 (V/m)	Cilindro (V/m)	Campo eléctrico ajustado (V/m)	Error (%)
-30	54	12,63	73,920	36,89%
-27	79	15,39	105,608	33,68%
-24	93	16,40	133,076	43,09%
-21	120	18,35	177,474	47,90%
-18	175	19,50	226,223	29,27%
-15	252	23,55	328,697	30,44%
-12	363	26,27	439,734	21,14%
-9	588	32,61	645,991	9,86%
-6	891	37,14	846,664	4,98%
-3	1082	41,67	1044,422	3,47%
0	995	38,05	986,395	0,86%
3	791	27,18	681,243	13,88%
6	770	28,99	660,872	14,17%
9	670	23,55	466,516	30,37%
12	495	20,84	348,841	29,53%
15	339	19,02	265,470	21,69%
18	247	18,12	210,214	14,89%
21	183	17,21	166,449	9,04%
24	131	15,40	124,961	4,61%
27	84	14,49	99,433	18,37%
30	73	10,87	63,619	12,85%



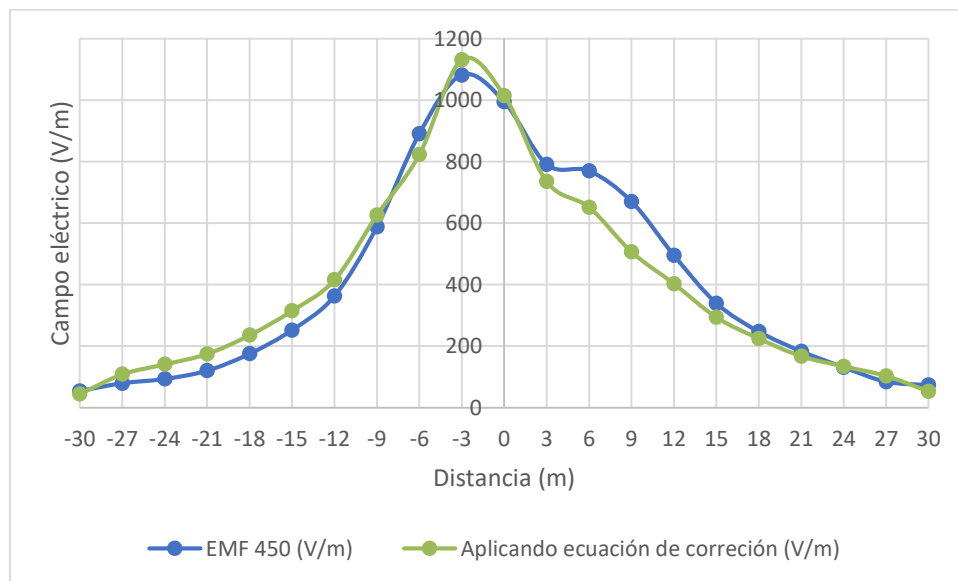
**Figura 5.15.** Comparación de prototipo cilindro con ecuación de corrección y sensor EMF 450.



**b) Prototipo disco interno y externo**

**Tabla 5.6.** Campo eléctrico en prototipo disco interno y externo empleando ecuación de corrección.

Distancias (m)	Sensor EMF 450 (V/m)	Disco interno y externo (V/m)	Campo eléctrico ajustado (V/m)	Error (%)
-30	54	9,54	44,034	18,45%
-27	79	20,04	108,454	37,28%
-24	93	21,99	140,724	51,32%
-21	120	22,90	174,672	45,56%
-18	175	25,76	235,688	34,68%
-15	252	28,62	315,038	25,02%
-12	363	31,48	415,578	14,48%
-9	588	40,07	626,013	6,46%
-6	891	45,79	823,243	7,60%
-3	1082	57,24	1131,463	4,57%
0	995	49,66	1015,293	2,04%
3	791	37,21	735,530	7,01%
6	770	36,25	651,727	15,36%
9	670	32,44	506,809	24,36%
12	495	30,53	403,037	18,58%
15	339	26,71	294,014	13,27%
18	247	24,57	224,800	8,99%
21	183	21,94	167,349	8,55%
24	131	20,99	134,324	2,54%
27	84	19,05	103,096	22,73%
30	73	11,45	52,851	27,60%

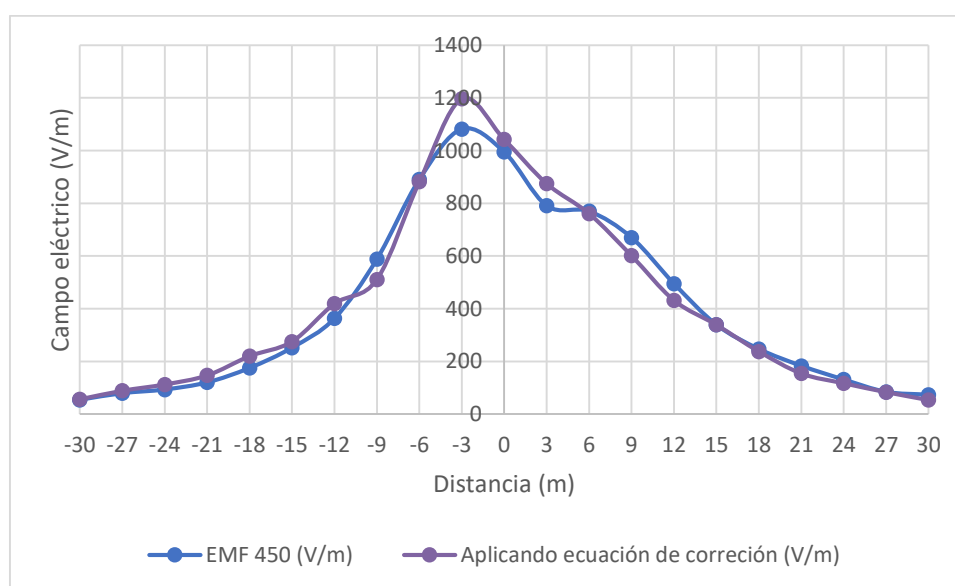


**Figura 5.16.** Comparación entre prototipo disco interno y externo con ecuación de corrección y sensor EMF 450.

### c) Prototipo placas paralelas

**Tabla 5.7.** Campo eléctrico en prototipo placas paralelas empleando ecuación de corrección.

Distancias (m)	Sensor EMF 450 (V/m)	Placas paralelas (V/m)	Campo eléctrico ajustado (V/m)	Error (%)
-30	54	12,36	56,136	3,95%
-27	79	16,62	88,502	12,03%
-24	93	17,87	112,523	20,99%
-21	120	19,55	146,727	22,27%
-18	175	24,44	220,023	25,73%
-15	252	25,42	275,325	9,26%
-12	363	32,26	419,043	15,44%
-9	588	33,24	510,976	13,10%
-6	891	49,85	881,858	1,03%
-3	1082	61,51	1196,362	10,57%
0	995	51,81	1042,255	4,75%
3	791	44,97	874,661	10,58%
6	770	43,01	760,857	1,19%
9	670	39,10	601,058	10,29%
12	495	33,24	431,773	12,77%
15	339	31,28	338,794	0,06%
18	247	26,39	237,578	3,81%
21	183	20,53	154,082	15,80%
24	131	18,57	116,931	10,74%
27	84	15,65	83,337	0,79%
30	73	11,73	53,274	27,02%



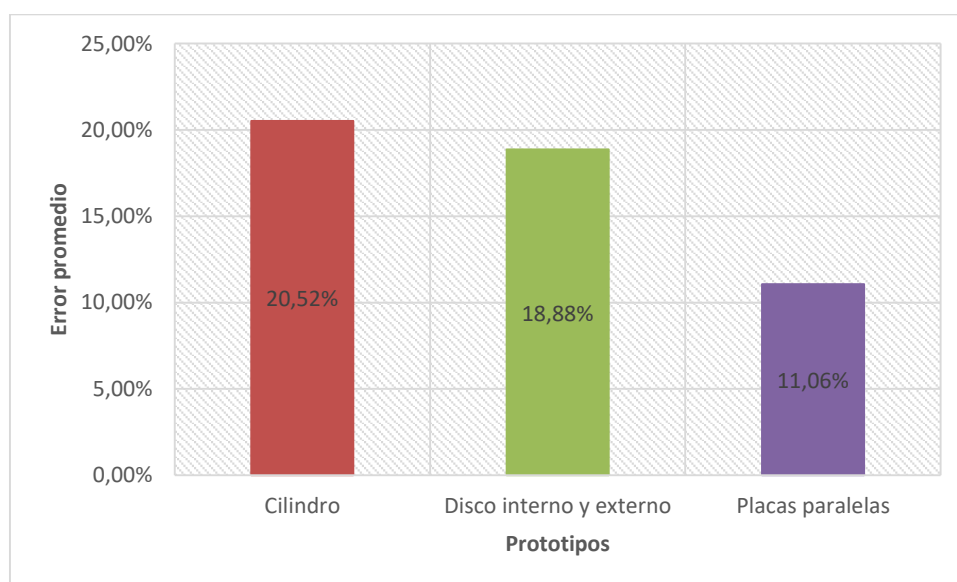
**Figura 5.17.** Comparación entre prototipo placas paralelas con ecuación de corrección y sensor EMF 450.

Mediante las figuras 5.15, 5.16, 5.17, se observa que el campo eléctrico ajustado en todos los puntos de medición en cada uno de los prototipos, se encuentran ubicados uniformemente con respecto a los datos del sensor patrón.

**Tabla 5.8.** Error promedio para el método 1.

Prototipos	Error promedio (%)
Cilindro	20,52%
Disco interno y externo	18,88%
Placas paralelas	11,06%

Luego de observar las curvas de campo eléctrico en los prototipos A, B, C, se encontró el error promedio en cada uno de ellos como se aprecia en tabla 5.8, de esta manera se determina que el prototipo más eficiente para este primer método es el sensor de placas paralelas, en el que se presenta menor porcentaje de error.



**Figura 5.18.** Error promedio comparativo entre prototipos para el primer método.

## 5.6. Método 2 – Coeficiente de correlación lineal

En el segundo método se optó por utilizar el coeficiente de correlación lineal de Pearson, para lo cual se requiere los datos de campo eléctrico obtenidos en las mediciones con cada uno de los sensores así como del sensor EMF 450.

- **Cálculo matemático para cada prototipo**

Para encontrar el coeficiente de correlación lineal se requiere hallar la covarianza de los datos adquiridos mediante los prototipos (*variable y*) y sensor EMF 450 (*variable x*), y la desviación estándar de cada variable.

a) Prototipo cilindro

Tabla 5.9. Matriz de resultados prototipo cilindro.

Sensor EMF 450(V/m)	Cilindro (V/m)	Covarianza	Desviación estándar de x	Desviación estándar de y
$x$	$y$	$\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	$\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2}$	$\sqrt{\Sigma(y - \bar{y})^2}$
54	12,63	3529,007	122200,184	101,914
79	15,39	2380,809	105346,612	53,806
93	16,40	1964,438	96454,612	40,009
120	18,35	1240,693	80412,755	19,143
175	19,50	737,197	52244,898	10,402
252	23,55	-125,010	22973,898	0,680
363	26,27	-143,816	1646,041	12,565
588	32,61	1823,033	34013,898	97,709
891	37,14	7026,167	237586,612	207,785
1082	41,67	12852,668	460265,327	358,904
995	38,05	9063,502	349787,755	234,848
791	27,18	1725,902	150100,898	19,845
770	28,99	2295,588	134269,898	39,247
670	23,55	219,740	70984,184	0,680
495	20,84	-172,365	8359,184	3,554
339	19,02	239,253	4169,469	13,729
247	18,12	721,049	24514,612	21,208
183	17,21	1216,504	48651,755	30,418
131	15,40	1996,651	74295,184	53,659
84	14,49	2631,747	102125,898	67,819
73	10,87	3919,003	109277,469	140,547
<b>TOTAL</b>	<b>8475</b>	<b>477,23</b>	<b>55141,757</b>	<b>2289681,143</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>403,571</b>	<b>22,725</b>		

**b) Prototipo disco interno y externo**

**Tabla 5.10.** Matriz de resultados prototipo disco interno y externo.

<b>Sensor EMF 450(V/m)</b>	<b>Disco interno y externo (V/m)</b>	<b>Covarianza</b>	<b>Desviación estándar de x</b>	<b>Desviación estándar de y</b>
<b>x</b>	<b>y</b>	<b><math>\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})</math></b>	<b><math>\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2}</math></b>	<b><math>\sqrt{\Sigma(y - \bar{y})^2}</math></b>
54	9,54	7142,244	122200,184	388,447
79	20,04	3223,458	105346,612	84,807
93	21,99	2478,804	96454,612	52,694
120	22,90	2005,255	80412,755	40,310
175	25,76	962,612	52244,898	12,173
252	28,62	204,838	22973,898	0,396
363	31,48	-61,205	1646,041	4,977
588	40,07	1862,465	34013,898	117,093
891	45,79	7710,424	237586,612	273,603
1082	57,24	18499,778	460265,327	783,493
995	49,66	11644,384	349787,755	416,607
791	37,21	2804,429	150100,898	63,377
770	36,25	2300,648	134269,898	49,013
670	32,44	657,698	70984,184	10,182
495	30,53	51,069	8359,184	1,641
339	26,71	210,595	4169,469	6,447
247	24,57	845,709	24514,612	21,893
183	21,94	1771,504	48651,755	53,422
131	20,99	2448,081	74295,184	68,212
84	19,05	3490,177	102125,898	104,021
73	11,45	6122,655	109277,469	316,806
<b>TOTAL</b>	<b>8475</b>	<b>614,23</b>	<b>2289681,143</b>	<b>2869,614</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>403,571</b>	<b>29,249</b>		

c) Prototipo placas paralelas

Tabla 5.11. Matriz de resultados prototipo placas paralelas.

Sensor EMF 450(V/m)	Placas paralelas (V/m)	Covarianza	Desviación estándar de x	Desviación estándar de y	
$x$	$y$	$\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	$\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2}$	$\sqrt{\Sigma(y - \bar{y})^2}$	
54	12,36	6156,452	122200,184	310,162	
79	16,62	4333,492	105346,612	178,261	
93	17,87	3758,358	96454,612	146,445	
120	19,55	2955,219	80412,755	108,606	
175	24,44	1264,327	52244,898	30,597	
252	25,42	689,867	22973,898	20,716	
363	32,26	-92,851	1646,041	5,238	
588	33,24	602,818	34013,898	10,684	
891	49,85	9689,384	237586,612	395,158	
1082	61,51	21396,668	460265,327	994,681	
995	51,81	12915,955	349787,755	476,923	
791	44,97	5810,875	150100,898	224,957	
770	43,01	4777,705	134269,898	170,004	
670	39,10	2432,112	70984,184	83,331	
495	33,24	298,841	8359,184	10,684	
339	31,28	-84,496	4169,469	1,712	
247	26,39	560,749	24514,612	12,827	
183	20,53	2082,509	48651,755	89,141	
131	18,57	3107,704	74295,184	129,993	
84	15,65	4576,719	102125,898	205,103	
73	11,73	6030,095	109277,469	332,750	
<b>TOTAL</b>	<b>8475</b>	<b>629,4</b>	<b>93262,503</b>	<b>2289681,143</b>	<b>3937,970</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>403,571</b>	<b>29,971</b>			

Los valores calculados en las tablas 5.9, 5.10, 5.11, permiten hallar el coeficiente de correlación reemplazando estos datos en la ecuación 3.38.

**Tabla 5.12.** Coeficiente de correlación lineal de los respectivos prototipos.

<b>Prototipos</b>	<b>Coeficiente de correlación (r)</b>
Cilindro	0,93
Disco interno y externo	0,94
Placas paralelas	0,98

Con los datos que se observan en las tablas 5.12 y 5.13 se llega a la conclusión que la correlación que existe entre cada uno de los prototipos y el sensor patrón es muy alta, siendo el prototipo de placas de paralelas el cual obtuvo un mayor porcentaje de relación, debido a la fuerte asociación entre las variables dependiente e independiente expresado de la misma manera por el coeficiente de determinación.

**Tabla 5.13.** Coeficiente de determinación de los respectivos prototipos.

<b>Prototipos</b>	<b>Coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>)</b>
Cilindro	0,87
Disco interno y externo	0,89
Placas paralelas	0,96

- **Recta de regresión lineal**

La recta de regresión lineal fue establecida en base a la pendiente ( $a$ ) y la altura a la que la recta corta el eje vertical ( $b$ ), conforme a las ecuaciones 3.40 y 3.41 se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 5.14, lo que permitirá alcanzar una relación funcional de tipo lineal.

**Tabla 5.14.** Cálculo de la pendiente de la recta y ordenada en el origen.

<b>Prototipos</b>	<b>Pendiente de la recta</b>	<b>Ordenada en el origen</b>
Cilindro	36,07641	416,273671
Disco interno y externo	26,61529	374,900536
Placas paralelas	23,68289	306,238478

El proceso matemático desarrollado previamente permitirá hallar la línea de tendencia presente en el diagrama de dispersión de cada uno de los respectivos prototipos, la misma que posibilitará la obtención de las ecuaciones lineales.

En los diagramas de dispersión mostrados en las figuras 5.19, 5.20, 5.21, se observa que mientras los puntos se encuentren más cercanos a la línea de tendencia, existe un mayor nivel de correlación entre las variables representadas en cada una de las gráficas.

### a) Prototipo cilindro

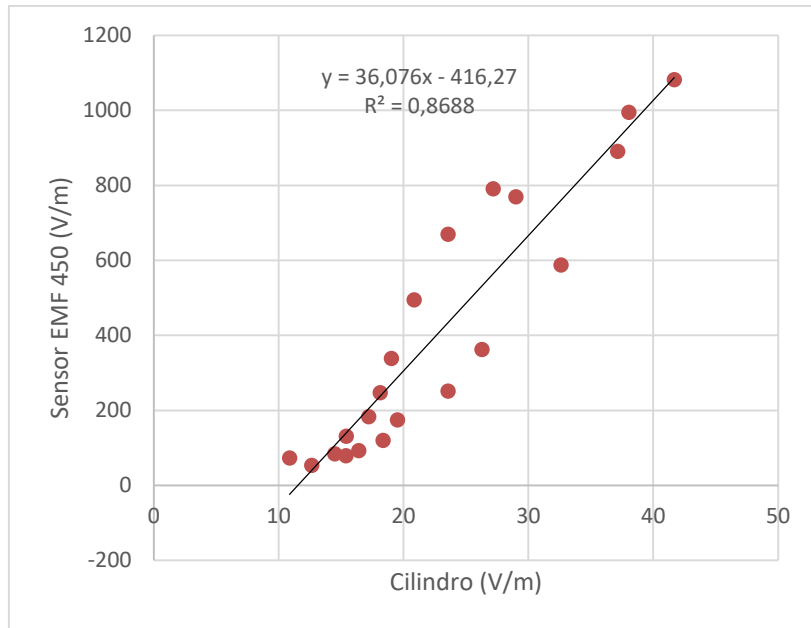


Figura 5.19. Diagrama de dispersión prototipo cilindro.

### b) Prototipo disco interno y externo

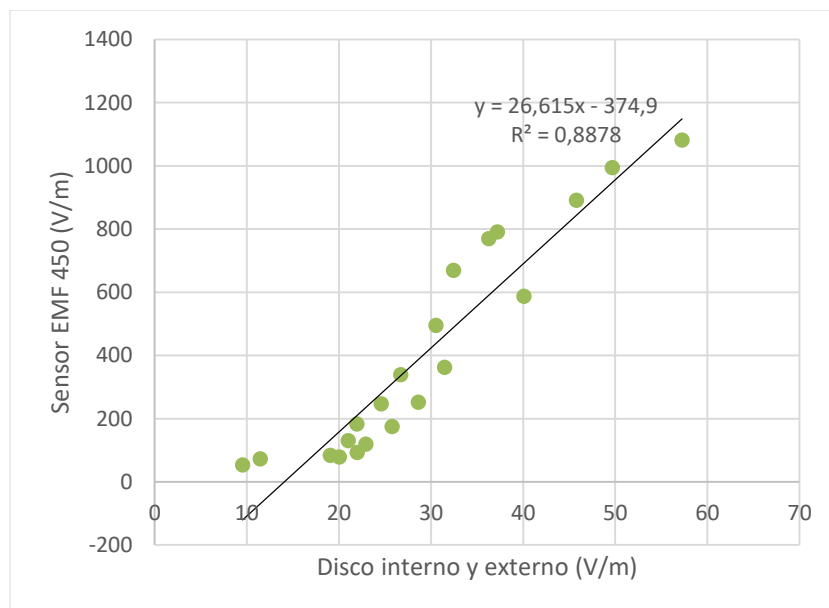
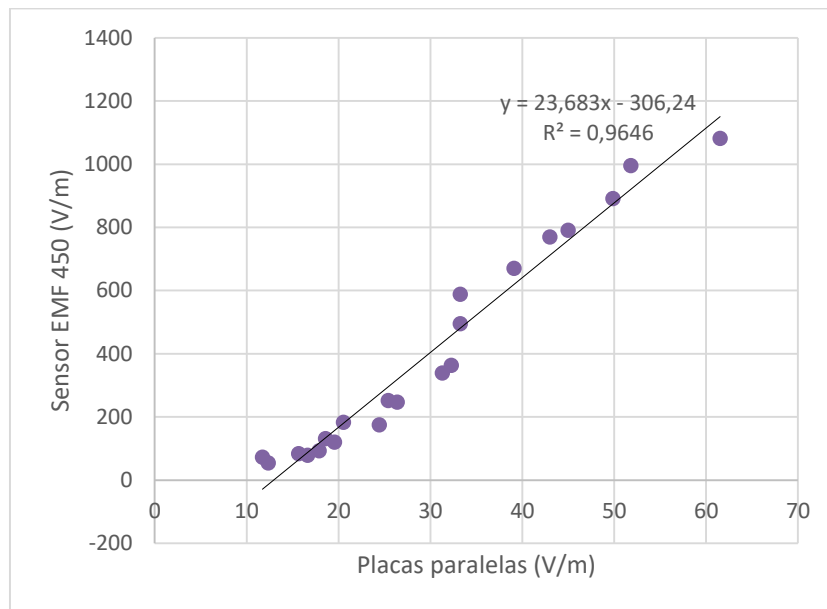


Figura 5.20. Diagrama de dispersión prototipo disco interno y externo.



**c) Prototipo placas paralelas**



**Figura 5.21.** Diagrama de dispersión prototipo placas paralelas.

Mediante la ecuación 3.39 se halló la fórmula de la recta de regresión lineal de cada prototipo, la cual permite reducir el margen de error de campo eléctrico entre el sensor patrón y los prototipos construidos, estas ecuaciones se pueden apreciar en la tabla 5.15 mostrada a continuación.

**Tabla 5.15.** Ecuación de la recta de regresión lineal de los prototipos.

Prototipos	Ecuación de la recta de regresión lineal
Cilindro	$y = 36,076 x - 416,274$
Disco interno y externo	$y = 26,615 x - 374,901$
Placas paralelas	$y = 23,683 x - 306,238$

- **Ecuación de regresión lineal aplicada a prototipos**

Aplicando la ecuación de la recta de regresión lineal obtenida con anterioridad, se alcanzó valores de campo eléctrico en los prototipos más cercanos en comparación con el sensor patrón, los mismos que permitieron lograr un perfil lateral más exacto, estos pueden ser apreciados en las tablas 5.16, 5.17, 5.18.

a) Prototipo cilindro

Tabla 5.16. Porcentaje de error prototipo cilindro.

Distancias (m)	Sensor EMF 450 (V/m)	Cilindro (V/m)	Ecuación de ajuste (V/m)	Error (%)
-30	54	12,63	39,37	27,10%
-27	79	15,39	138,94	43,14%
-24	93	16,40	175,37	46,97%
-21	120	18,35	245,72	51,16%
-18	175	19,50	287,21	39,07%
-15	252	23,55	433,32	41,84%
-12	363	26,27	531,44	31,70%
-9	588	32,61	760,16	22,65%
-6	891	37,14	923,59	3,53%
-3	1082	41,67	1087,01	0,46%
0	995	38,05	956,42	3,88%
3	791	27,18	564,27	28,66%
6	770	28,99	629,57	18,24%
9	670	23,55	433,32	35,33%
12	495	20,84	335,55	32,21%
15	339	19,02	269,89	20,39%
18	247	18,12	237,42	3,88%
21	183	17,21	204,59	10,55%
24	131	15,40	139,30	5,96%
27	84	14,49	106,47	21,10%
30	73	10,87	24,13	66,95%

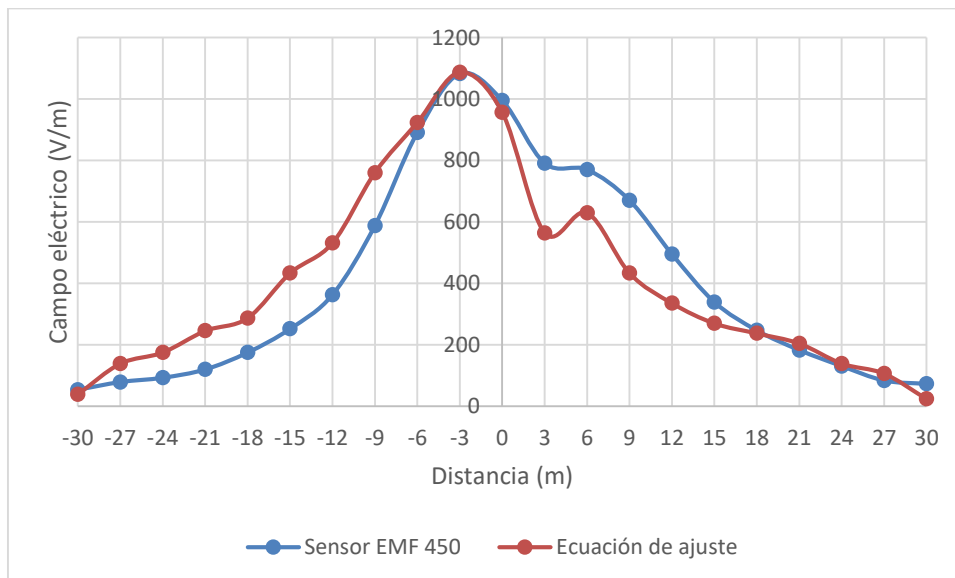
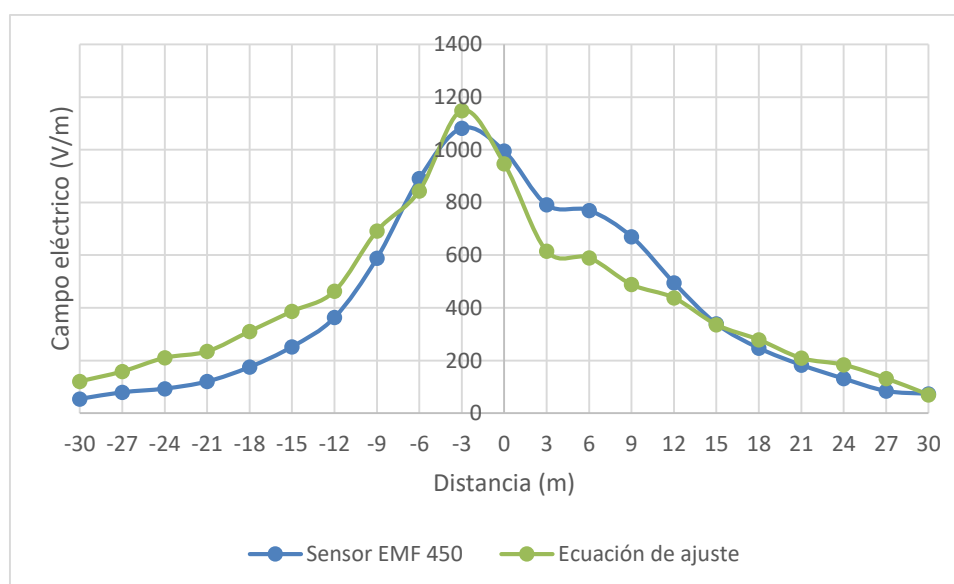


Figura 5.22. Perfil comparativo entre EMF 450 y prototipo cilindro.

## b) Disco interno y externo

**Tabla 5.17.** Porcentaje de error prototipo disco interno y externo.

Distancias (m)	Sensor EMF 450 (V/m)	Disco interno y externo (V/m)	Ecuación de ajuste (V/m)	Error (%)
-30	54	9,54	120,99	55,37%
-27	79	20,04	158,46	50,15%
-24	93	21,99	210,36	55,79%
-21	120	22,90	234,58	48,85%
-18	175	25,76	310,70	43,68%
-15	252	28,62	386,82	34,85%
-12	363	31,48	462,94	21,59%
-9	588	40,07	691,56	14,98%
-6	891	45,79	843,80	5,30%
-3	1082	57,24	1148,54	5,79%
0	995	49,66	946,80	4,84%
3	791	37,21	615,44	22,19%
6	770	36,25	589,89	23,39%
9	670	32,44	488,49	27,09%
12	495	30,53	437,65	11,58%
15	339	26,71	335,99	0,89%
18	247	24,57	279,03	11,48%
21	183	21,94	209,03	12,45%
24	131	20,99	183,75	28,71%
27	84	19,05	132,11	36,42%
30	73	11,45	70,16	3,89%



**Figura 5.23.** Perfil comparativo entre EMF 450 y prototipo disco interno y externo.

c) Placas paralelas

Tabla 5.18. Porcentaje de error placas paralelas.

Distancias (m)	Sensor EMF 450 (V/m)	Placas paralelas (V/m)	Ecuación de ajuste (V/m)	Error (%)
-30	54	12,36	13,52	74,97%
-27	79	16,62	87,37	9,58%
-24	93	17,87	116,98	20,50%
-21	120	19,55	156,76	23,45%
-18	175	24,44	272,57	35,80%
-15	252	25,42	295,78	14,80%
-12	363	32,26	457,78	20,70%
-9	588	33,24	480,98	18,20%
-6	891	49,85	874,36	1,87%
-3	1082	61,51	1150,50	5,95%
0	995	51,81	920,78	7,46%
3	791	44,97	758,79	4,07%
6	770	43,01	712,37	7,48%
9	670	39,10	619,77	7,50%
12	495	33,24	480,98	2,83%
15	339	31,28	434,57	21,99%
18	247	26,39	318,76	22,51%
21	183	20,53	179,97	1,65%
24	131	18,57	133,56	1,91%
27	84	15,65	64,40	23,33%
30	73	11,73	28,44	61,05%

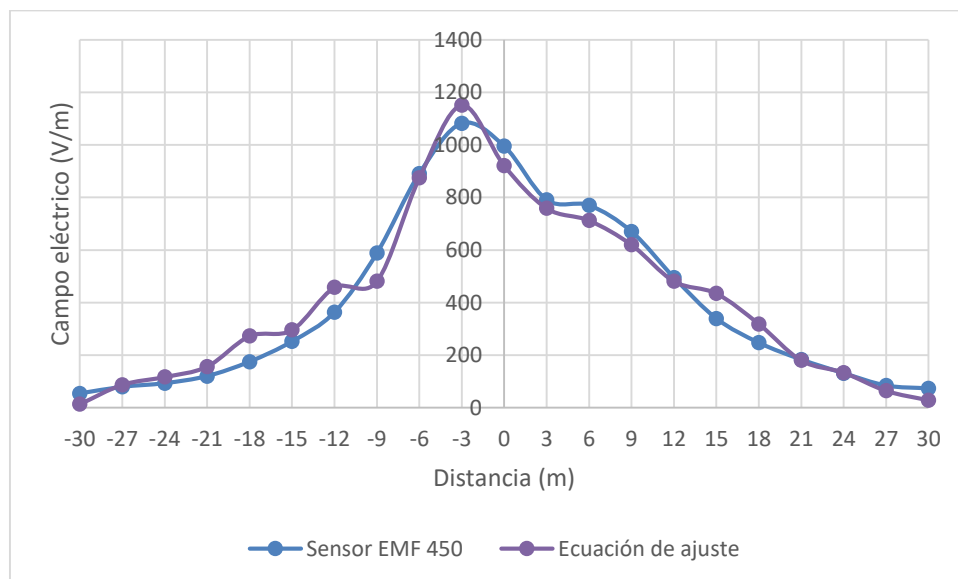


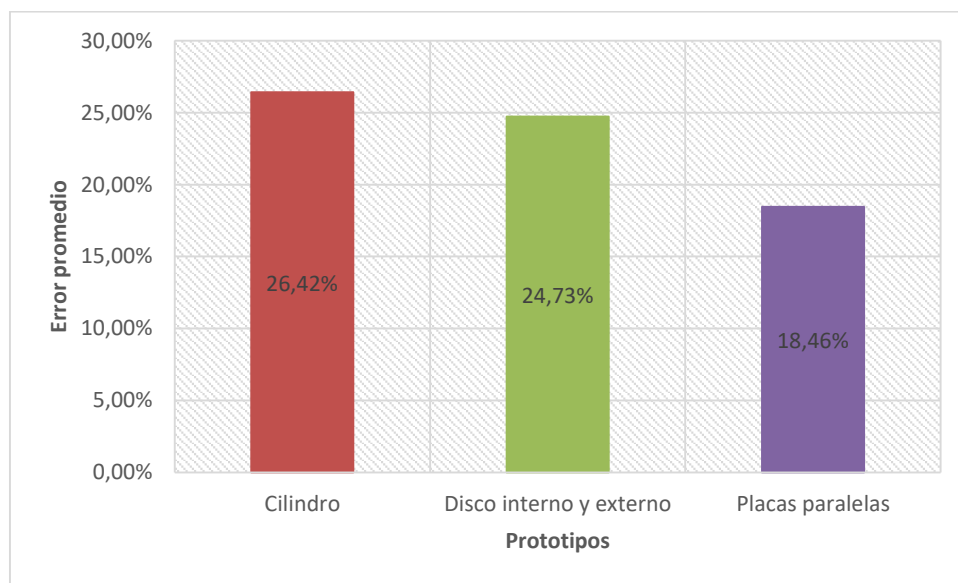
Figura 5.24. Perfil comparativo entre EMF 450 y prototipo placas paralelas.

Las curvas generadas por los prototipos aplicando la ecuación de ajuste que se aprecian en las figuras 5.22, 5.23, 5.24, las mismas que proyectan un perfil de campo eléctrico para cada prototipo que siguen de manera cercana la forma de la curva obtenida por el sensor EMF 450.

**Tabla 5.19.** Error promedio para el método 2.

Prototipos	Error promedio (%)
Cilindro	26,42%
Disco interno y externo	24,73%
Placas paralelas	18,46%

Después de analizar las curvas de campo eléctrico en los prototipos A, B, C, se halló un error promedio en cada uno de ellos como mostrado en tabla 5.19, por lo que se determina que en el segundo método el prototipo de placas paralelas es el que presenta menor porcentaje de error, por lo tanto, este será el sensor más eficiente.



**Figura 5.25.** Error promedio comparativo entre prototipos para el segundo método.

### 5.7. Selección del sensor más eficaz

Mediante las pruebas desarrolladas en la línea 138 kV y en base a los resultados obtenidos, se llega a la conclusión que el prototipo de sensor más eficiente resulta ser el de placas paralelas, debido a que posee el menor margen de error en comparación con el sensor patrón EMF 450. De la misma manera se determina que el primer método posee una mayor recepción de campo eléctrico puesto que en el mismo se toma en cuenta distintas consideraciones en base a los puntos de medición, esto se aprecia en la tabla 5.20.

**Tabla 5.20.** Comparación de los métodos en base al prototipo de placas paralelas.

Distancias (m)	Sensor EMF 450 (V/m)	Método 1 (V/m)	Error (%)	Método 2 (V/m)	Error (%)
-30	54	56,14	3,95%	13,52	74,97%
-27	79	88,50	12,03%	87,37	9,58%
-24	93	112,52	20,99%	116,98	20,50%
-21	120	146,73	22,27%	156,76	23,45%
-18	175	220,02	25,73%	272,57	35,80%
-15	252	275,32	9,26%	295,78	14,80%
-12	363	419,04	15,44%	457,78	20,70%
-9	588	510,98	13,10%	480,98	18,20%
-6	891	881,86	1,03%	874,36	1,87%
-3	1082	1196,36	10,57%	1150,50	5,95%
0	995	1042,26	4,75%	920,78	7,46%
3	791	874,66	10,58%	758,79	4,07%
6	770	760,86	1,19%	712,37	7,48%
9	670	601,06	10,29%	619,77	7,50%
12	495	431,77	12,77%	480,98	2,83%
15	339	338,79	0,06%	434,57	21,99%
18	247	237,58	3,81%	318,76	22,51%
21	183	154,08	15,80%	179,97	1,65%
24	131	116,93	10,74%	133,56	1,91%
27	84	83,34	0,79%	64,40	23,33%
30	73	53,27	27,02%	28,44	61,05%
			11,06%	PROMEDIO	18,46%

De esta forma se cumplió la hipótesis propuesta, que consiste en diseñar y construir un sensor acoplado a un prototipo de capacitor, con la finalidad de detectar el nivel de campo eléctrico y así censar descargas a partir de un rango de campo eléctrico definido.

### 5.8. Rango de funcionamiento

La distancia de actuación del sensor se fijó en base a cálculos matemáticos empleando la ley de Gauss de campo eléctrico para una carga puntual, teniendo en cuenta que al producirse una descarga atmosférica se genera un nivel de campo eléctrico de 20000 V/m en el punto de origen. Mediante la ecuación 3.1 e integrando la misma se obtuvo la carga.

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

$$Q = D \cdot 4\pi r^2$$

$$Q = E \cdot 4\pi \epsilon_0 r^2$$

$$Q = 5,560 * 10^{-7} \text{ Coulombs}$$

Posteriormente se calculó el voltaje a diferentes distancias en base a la carga obtenida, mediante la ecuación 3.18:

**Tabla 5.21.** Voltajes receptados por los prototipos.

Distancias (m)	Voltaje (V)
0	20000
500	10
1000	5
1500	3,3
2000	2,5
2500	2
3000	1,7

En la tabla 5.21, se muestran los niveles de voltaje que produce una descarga atmosférica a diferentes distancias con respecto al punto donde ocurre la misma. Además se debe tener en cuenta que el valor máximo de operación del sensor es 5 voltios.

### 5.9. Nivel de saturación

Cuando se da una descarga atmosférica y a partir de 1000 metros a la redonda del punto donde se origina la descarga el sensor la detecta y mide su campo eléctrico, mientras que para distancias inferiores a 1000 metros el sensor construido se satura al alcanzar su valor máximo de operación, por lo que registra la descarga más no mide su magnitud de campo eléctrico.

De la misma manera existen niveles de saturación para cada prototipo debido al campo eléctrico inducido, por un lado se tiene rangos de saturación definidos en base a las ecuaciones para la obtención de campo eléctrico en los prototipos, teniendo en cuenta el máximo nivel de voltaje a detectar, estos valores se observan en la tabla 5.22.

**Tabla 5.22.** Nivel de saturación respecto a cada prototipo.

Prototipo	Nivel de Saturación (V/m)
Cilindro	926,737
Disco interno y externo	975,996
Placas paralelas	1000

En la tabla 5.23, se muestran los niveles de saturación alcanzados por medio del primer método el cual es el más eficiente en comparación con el segundo método, para este método de ecuación de corrección se emplea el nivel de saturación respecto a cada

prototipo, el mismo que es reemplazado en la ecuación de ajuste o de corrección perteneciente al primer método.

**Tabla 5.23.** Nivel de saturación en prototipos con el método 1.

<b>Prototipo</b>	<b>Método 1 (V/m)</b>
Cilindro	23227,854
Disco interno y externo	19292,510
Placas paralelas	19449,871

Con respecto a los valores presentados, se determina que existe un rango de variación entre cada uno de los prototipos debido a la eficiencia de recepción de campo eléctrico, por lo que su nivel de saturación será distinto, así también se reconoce que el prototipo con mayor grado de saturación es el cilindro.

## **6. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS DE IMPACTOS**

### **6.1. Presupuesto**

De acuerdo a las actividades planificadas al inicio del proyecto, conforme se cumplen cada uno de los objetivos planteados en el tiempo establecido, se llegó a la culminación del mismo con un costo total de \$1564,00, como se muestran en las siguientes tablas:

- **Costos directos**

Dentro de estos costos se encuentran todos los materiales que se requirieron para la construcción de prototipos y circuito electrónico que se necesita para las mediciones en campo, estas cantidades se muestran en la tabla 6.1:

**Tabla 6.1.** Costos directos del proyecto.

<b>RUBRO</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>VALOR (\$)</b>
Plancha de aluminio	1	500,00
Construcción prototipos	3	500,00
Modificación prototipos	1	250,00
Placa Arduino	1	12,00
LCD - IDC	1	7,50
Componentes electrónicos	10	30,00
Plancha MDF	1	7,50
Construcción bases para sensores	3	12,00
Cable	30	15,00
<b><i>SUBTOTAL</i></b>		<b><i>1334,00</i></b>



- **Costos indirectos**

En los costos indirectos se encuentran todos los gastos adicionales que se tuvieron a lo largo de la culminación del proyecto como actividades y servicios, estos valores se aprecian en la tabla 6.2:

**Tabla 6.2.** Costos indirectos del proyecto.

<b>RUBRO</b>	<b>VALOR (\$)</b>
Transporte	50,00
Servicios solicitados a terceros	100,00
Materiales	30,00
Mano de obra	50,00
<b><i>SUBTOTAL</i></b>	<b><i>230,00</i></b>

- **Costo total**

En la tabla 6.3, se presentan los gastos totales del proyecto:

**Tabla 6.3.** Gastos totales.

<b>RUBRO</b>	<b>VALOR (\$)</b>
SUBTOTAL COSTOS DIRECTOS	1334,00
SUBTOTAL COSTOS INDIRECTOS	230,00
<b><i>TOTAL</i></b>	<b><i>1564,00</i></b>

## **6.2. Análisis de impactos**

Debido a estudios existentes sobre el tema de sensores y antenas capacitivas se logró el desarrollo del prototipo de sensor para campo eléctrico que permite detectar una descarga atmosférica, que servirá para la disminución de posibles desastres que pueden causar estos fenómenos como son los sobrevoltajes en redes y equipos eléctricos, y de la misma manera para la protección de edificaciones y personas en general.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **7.1. Conclusiones**

- Mediante la investigación bibliográfica durante el proyecto, se identificó que una descarga atmosférica tiene una duración total alrededor de 200  $\mu$ seg, en este lapso de tiempo se presenta un frente de onda con una corriente de 20 kA y el campo eléctrico generado se encuentra alrededor de 20 kV/m.

- La configuración del sensor considerando el ruido ambiental que es variable en el transcurso del día, permite una mayor eficiencia al realizar las mediciones y el adecuado funcionamiento del setpoint para la detección de descargas.
- En base a las mediciones efectuadas y a lo publicado por la Comisión Internacional de Protección de Radiaciones No Ionizantes, se pudo constatar que los datos obtenidos no sobrepasan los niveles de referencia a exposición de campos eléctricos en el límite de la franja de servidumbre.
- Luego de realizar las pruebas mediante la normativa IEEE 644 “Estándar de Procedimientos para Medición de Campos Eléctricos y Magnéticos desde Líneas de Transmisión de Corriente Alterna”, y de aplicar las ecuaciones de corrección, se pudo observar que los datos obtenidos de campo eléctrico dieron como resultado que el prototipo más eficiente es el de placas paralelas, puesto que en una línea de 138 kV el porcentaje promedio de error fue menor en comparación con los otros prototipos.

## **7.2. Recomendaciones**

- Las mediciones de campo eléctrico deberán realizarse a distancias establecidas en base al rango de entrada de voltaje del circuito electrónico, puesto que si la señal de entrada es demasiada elevada podría ocasionar daños y mal funcionamiento del circuito.
- Se debe seguir de forma textual el manual de operación del sensor EMF 450, esto servirá para obtener medidas precisas de campo eléctrico y así conseguir datos más reales que permitan validar el sensor diseñado.
- Se debe realizar todas las mediciones de campo a una misma altura con respecto al suelo, esto debido a que la distancia afecta directamente al campo eléctrico medido, presente en el sensor patrón y en el sensor diseñado.
- Para la calibración del setpoint en el sensor deberá tomarse en cuenta el ruido ambiental que producen diferentes fuentes, debido a que esta calibración se realiza en campo y de esta manera evitar falsos registros.
- Tomando en cuenta los prototipos a base de aluminio que se utilizaron en el desarrollo de este proyecto, para futuras investigaciones se recomienda construir

un sensor capacitivo de placas paralelas empleando un material con mejores capacidades conductivas.

- Cuando se presenta un campo eléctrico que genera un nivel de voltaje que supera los cinco voltios en el sensor este se satura, por lo tanto el voltaje de entrada no debe sobrepasar este límite establecido.
- Para la detección y medición más precisa de una descarga atmosférica se recomienda triangular esta señal, para lo cual se requieren de tres sensores similares al construido en este proyecto.

## 8. REFERENCIAS

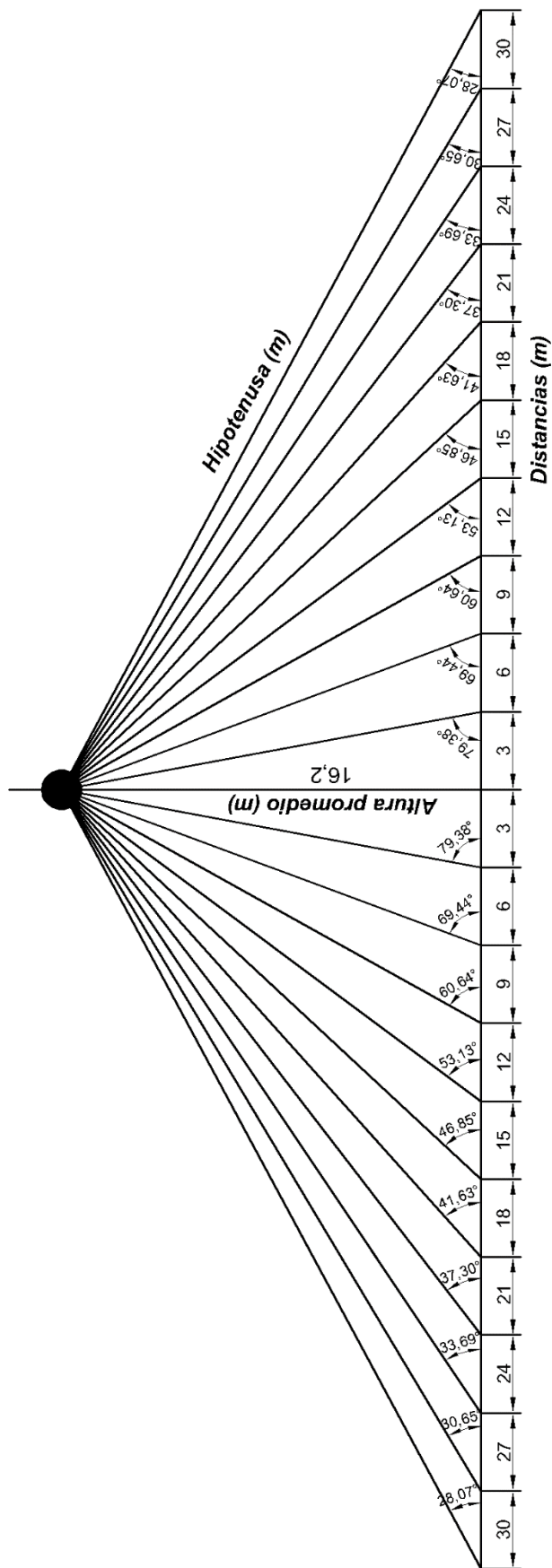
- [1] L. Fajardo y P. Rivera, «Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto de descargas atmosféricas», Tesis, Universidad de EL Salvador, San Salvador, El Salvador, 2015.
- [2] L. Sierra y G. Escobar, «Investigaciones sobre descargas eléctricas atmosféricas en Colombia», Tesis, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia, 2014.
- [3] Á. Villa, «Localización de Tormentas Eléctricas Usando Redes de Sensores Puntuales de Campo Electrostático», Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2015.
- [4] G. Pesántez, «Desarrollo de una antena capacitiva y aplicación a la detección de campos eléctricos ambientales y descargas», Tesis, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2013.
- [5] S. Ramirez, *Redes de Distribución de Energía*, Tercera. Colombia: Centro de Publicaciones Universidad de Colombia Sede Manizales, 2004.
- [6] Á. Albarrasín, «Protección a los Aerogeneradores contra Descargas Atmosféricas en Parques Eólicos, Aplicación Parque Eólico Villonaco», Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2016.
- [7] K. Verdugo, «Contribución para la Implementación de una Red de Detección de Rayos en Ecuador», Tesis M.S., Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal, 2017.
- [8] J. Velásquez, «Estudio de Radiación por Campos Electromagnéticos dentro del Área de Derecho de Vía de las Líneas de Transmisión Eléctrica en el Departamento de Guatemala», Tesis de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2005.
- [9] G. Tubón, «Estudio estadístico comparativo sobre emisiones no ionizantes emitidas por radio bases de telefonía celular y estaciones transmisoras de radio y televisión en

- la ciudad de Riobamba», Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2010.
- [10] I. Quinto, «Mitigación de los efectos sobre la salud de campos electromagnéticos producidos por redes eléctricas», Tesis, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2014.
- [11] ARCONEL, «Franjas de servidumbre en líneas del servicio de energía eléctrica y distancias de seguridad entre las redes eléctricas y edificaciones». 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/07/018-18-Proyecto-de-Regulacion-Franjas-de-Servidumbre-en-lineas-del-servicio-de-energia-electrica-y-distancias-de-seguridad-entre-las-redes-electricas-y-edificaciones.pdf>.
- [12] T. CELEC EP, «Auditoría Ambiental de Cumplimiento Línea de Transmisión Eléctrica Quevedo – San Gregorio (Portoviejo) 230kV, y Subestación Eléctrica San Gregorio 230/138kV». 2015, [En línea]. Disponible en: [https://www.celec.gob.ec/transelectric/images/stories/baners\\_home/AA/cap4\\_It\\_quevedo\\_portoviejo.pdf](https://www.celec.gob.ec/transelectric/images/stories/baners_home/AA/cap4_It_quevedo_portoviejo.pdf).
- [13] D. Cheng, *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*, Primera. México: Pearson Educación, 1998.
- [14] M. Sadiku, *Elementos de electromagnetismo*, Tercera. México: Rodriguez S.A., 2003.
- [15] D. Glover y M. Sarma, *Sistemas de Potencia Analisis y Diseño*, Tercera. México: International Thomson Editores, 2004.
- [16] «Capacitive sensors versus inductive sensors», *Zettlex*. <https://www.zettlex.com/es/articles/sensores-de-posicion-capacitivos-y-inductivos/> (accedido jun. 08, 2019).
- [17] C. Lopez, «Electricidad: Sensor Capacitivo», *Electricidad*, ago. 28, 2011. <http://lopez-211.blogspot.com/2011/08/sensor-inductivo.html> (accedido may 15, 2019).
- [18] J. Morales y P. Gavela, *Determinación de Campos Electromagnéticos en Sistemas Eléctricos*, Primera. Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala, 2015.
- [19] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, «IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines», *IEEE*, p. 25, dic. 1995.

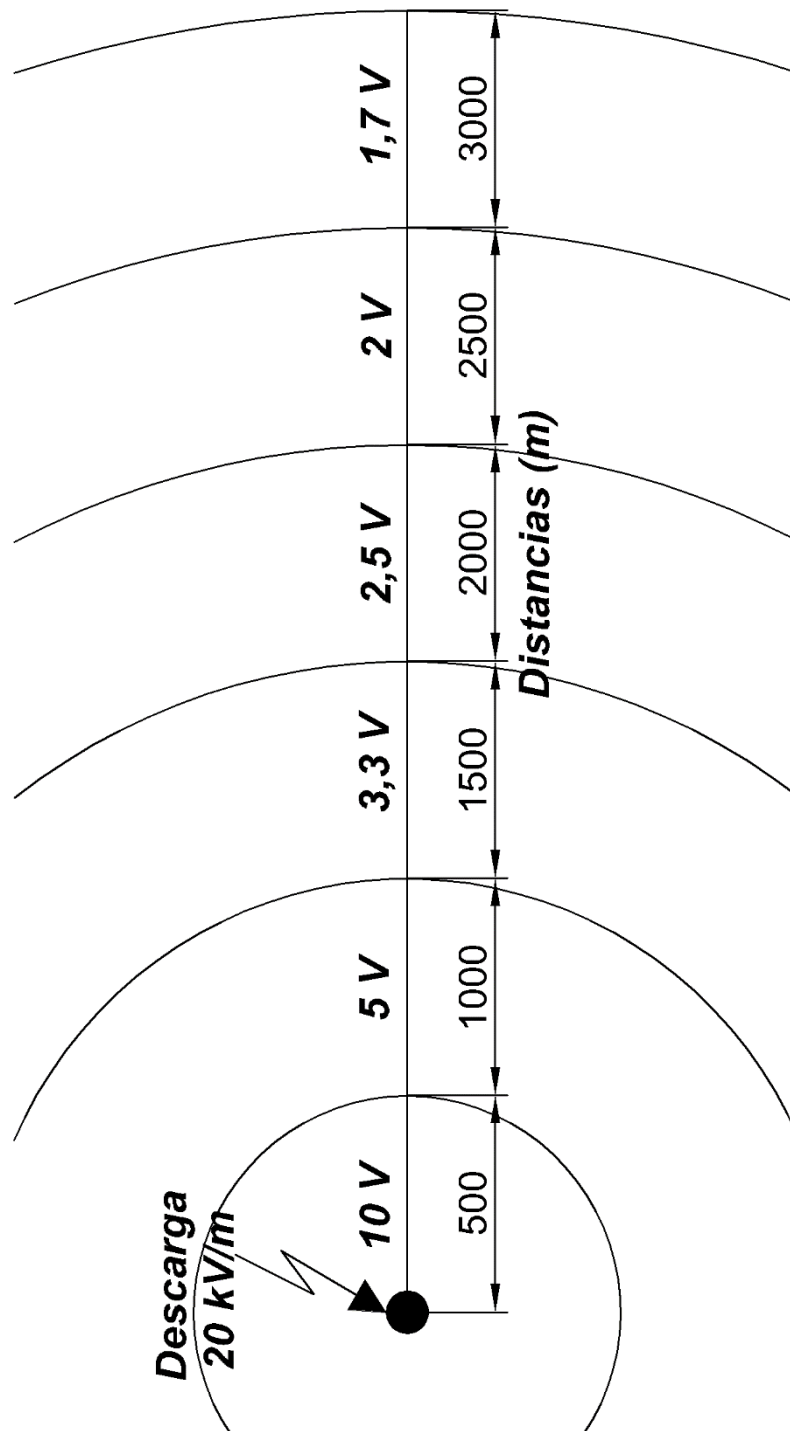
- [20] S. Pita y S. Pértega, «Relación entre variables cuantitativas». Complejo Hospitalario Juan Canalejo, 1997, [En línea]. Disponible en: [http://www.fisterra.com/mbe/investiga/var\\_cuantitativas/var\\_cuantitativas2.pdf](http://www.fisterra.com/mbe/investiga/var_cuantitativas/var_cuantitativas2.pdf).
- [21] P. Vinuesa, «Correlación: teoría y práctica». CCG-UNAM, 2016, [En línea]. Disponible en: [https://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema8\\_correlacion.pdf](https://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema8_correlacion.pdf).
- [22] A. Beltrán y M. Félix, *IV Jornada de Investigación y Postgrado: Libro de Actas*, Primera. España: Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L., 2018.
- [23] W. Gallo y L. Guamangallo, «Análisis de Cargabilidad del Sistema de Subtransmisión a nivel de 69 KV considerando la incorporación masiva de las cocinas de inducción para la demanda proyectada al año 2020, en la zona centro de la Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi S.A. en el periodo 2015», Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi, Ecuador, 2015.

# ANEXOS

**Anexo I.** Ángulo de ubicación de cada prototipo para recepción de campo eléctrico.

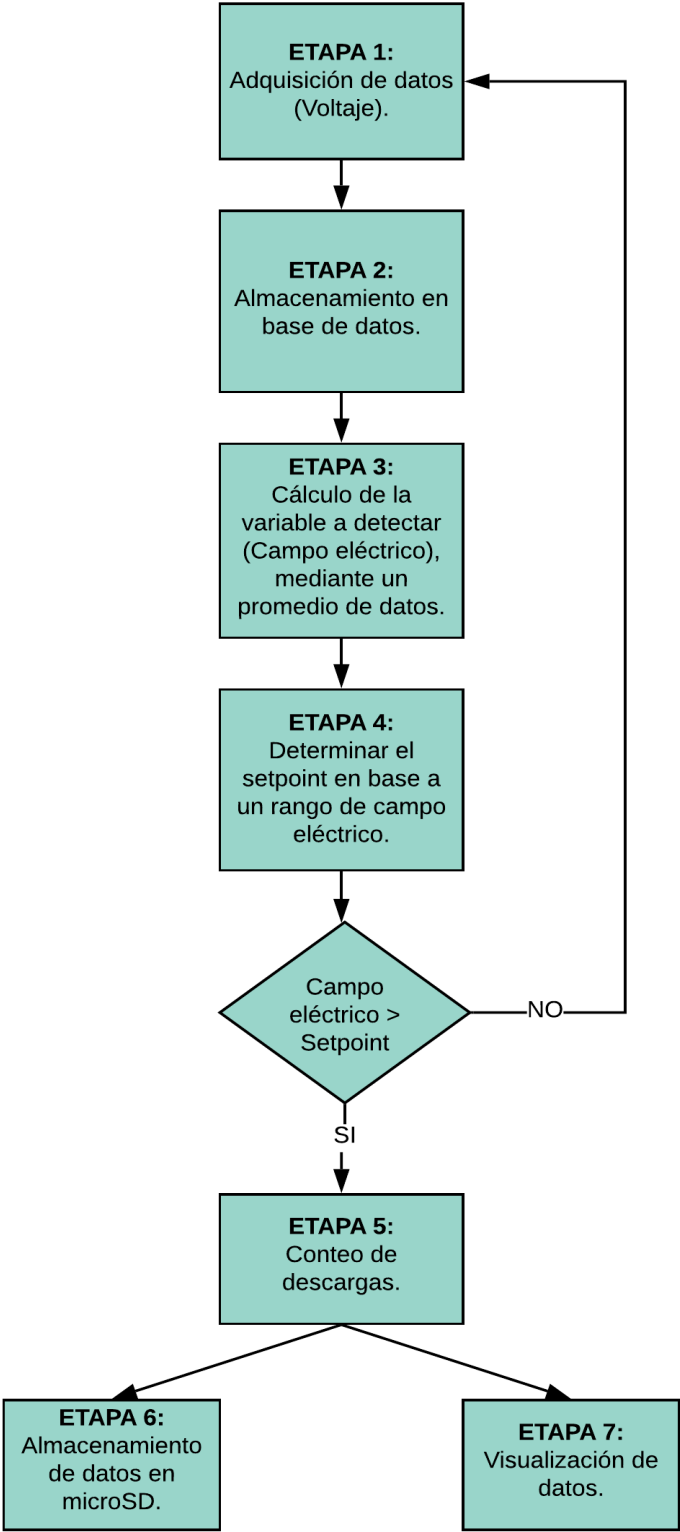


**Anexo II.** Distancia de detección de voltaje en los prototipos con respecto al punto de origen.



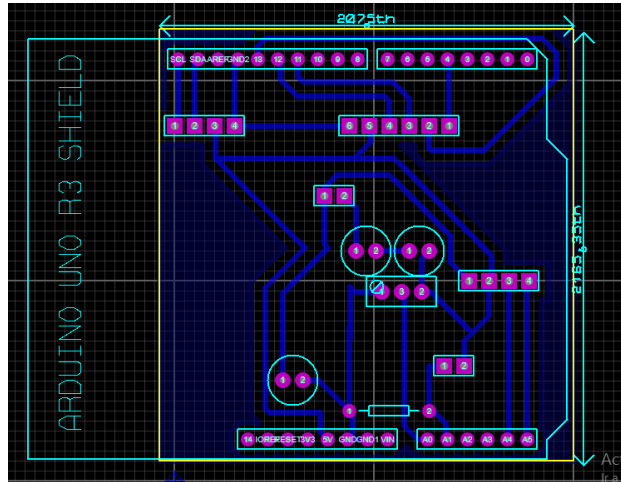


**Anexo III.** Diagrama de bloques.

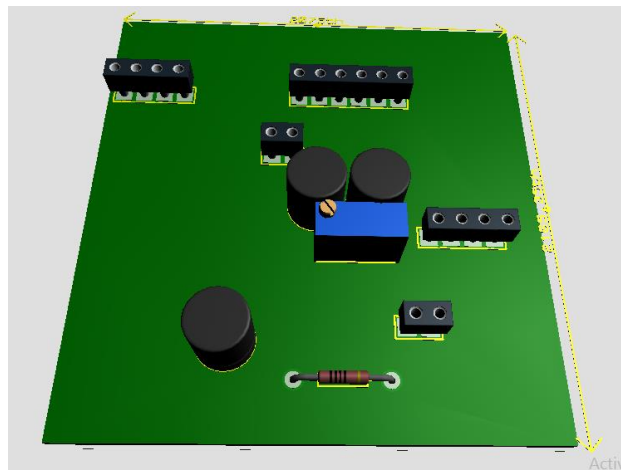


#### Anexo IV. Diseño constructivo de la placa.

Para el diseño de la placa en la que se ubicarán los correspondientes elementos electrónicos, se empleó el programa Proteus el cual permitió una esquematización previa en la que se ubicará cada componente, mostrada en la siguiente figura.



Las pistas representadas en la placa serán conectadas por medio de los pines analógicos y pines digitales, además los protocolos de comunicación I2C y SPI que emplearán para el respectivo funcionamiento de los módulos microSD, módulo RTC, etc. La modelación 3D de la placa del circuito electrónico se presenta a continuación, con los respectivos componentes mencionados en la sección 5.4.



## **Anexo V.** Programación realizada en Arduino.

**BLOQUE 1:** Librerías utilizadas para el correcto funcionamiento del programa.

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
```

**BLOQUE 2:** Declaración de variables.

```
RTC_DS3231 rtc;
File myFile;
float entrada=0;
float maxi=0;
float mini=10;
float amp=0;
float acum_cv=0 , prom=0;
unsigned long cont=0, cont_desc=0;
bool flag_reset=0 , flag_desc=0;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);
```

**BLOQUE 3:** Inicialización del programa que configura el puerto serial a 9600.

```
Serial.begin(9600);
```

**BLOQUE 4:** Condición para inicializar el RTC.

```
if (!rtc.begin()) {
Serial.println(F("No se conecto RTC"));
while (1);
}
if (rtc.lostPower()) {
rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
rtc.adjust(DateTime(2020, 2, 1, 13, 24, 0));
}
```

**BLOQUE 5:** Condición para inicializar la tarjeta microSD.

```
if (!SD.begin(4)) {  
  Serial.println(F("Error al iniciar"));  
  return;  
}  
if(!SD.exists("Datos.txt")) {  
  myFile = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE);  
  myFile.println("Datos Registrados");  
  myFile.println("Fecha:          Muestra: Campo_Electrico: Setpoint: Descarga:");  
  myFile.close();  
}
```

**BLOQUE 6:** Inicialización de la LCD.

```
lcd.init();  
lcd.backlight();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print(" UNIVERSIDAD");  
delay(2000);  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print(" TECNICA");  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(" DE COTOPAXI");  
delay(2000);  
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print(" SENSOR DE CAMPO");  
lcd.setCursor(0, 1);  
lcd.print(" ELECTRICO");  
delay(4000);  
lcd.clear();
```

**BLOQUE 7:** La función DateTime permite la obtención de la fecha del RTC, para almacenar este dato en la tarjeta microSD.

```
void myFecha(DateTime date) {  
myFile.print(date.year(), DEC);  
myFile.print('/');  
myFile.print(date.month(), DEC);  
myFile.print('/');  
myFile.print(date.day(), DEC);  
myFile.print("-");  
myFile.print(date.hour(), DEC);  
myFile.print(':');  
myFile.print(date.minute(), DEC);  
myFile.print(':');  
myFile.print(date.second(), DEC);  
myFile.print(' ');  
}
```

**BLOQUE 8:** Visualización de la fecha del RTC en el monitor serie de Arduino.

```
void myFecha_print(DateTime date) {  
Serial.print(date.year(), DEC);  
Serial.print('/');  
Serial.print(date.month(), DEC);  
Serial.print('/');  
Serial.print(date.day(), DEC);  
Serial.print("-");  
Serial.print(date.hour(), DEC);  
Serial.print(':');  
Serial.print(date.minute(), DEC);  
Serial.print(':');  
Serial.print(date.second(), DEC);  
Serial.print(' ');  
}
```

**BLOQUE 9:** Comienzo del lazo principal y el contador de iteraciones del programa.

```
void loop() {  
cont++;
```

**BLOQUE 10:** Obtención de valores máximos y mínimos para hallar la amplitud.

```
entrada =analogRead(0)*5.0/1023;  
if(entrada>=maxi)  
maxi=entrada;  
if(entrada<=mini)  
mini=entrada;  
amp=(maxi-mini);
```

**BLOQUE 11:** Lectura del setpoint que está situado en el pin analógico 2.

```
int sp = analogRead(2)*(500.0/33.0);
```

**BLOQUE 12:** Cálculo de campo eléctrico multiplicado por el factor de ajuste y acumulación de valores de campo eléctrico.

```
float ce = (amp/(0.105*log (10.5/10)));  
if(ce<0)  
ce=0;  
acum_cv=acum_cv+ce;
```

**BLOQUE 13:** Apertura del archivo Datos.txt en el cual se guarda la fecha, hora, contador de iteraciones, campo eléctrico, setpoint y contador de descargas.

```
myFile = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE);//abrimos el archivo  
if (myFile) {  
Serial.print("Escribiendo SD: ");  
DateTime now = rtc.now();  
myFecha(now);  
myFile.print(" ");  
myFile.print(cont);  
myFile.print(" ");  
myFile.print(ce);  
myFile.print(" ");
```

```

myFile.print(sp);
myFile.print("  ");
myFile.println(cont_desc);
myFile.close();
Serial.print("Hora = ");
myFecha_print(now);
Serial.print("Muestra = ");
Serial.print(cont);
Serial.print(", Entrada=");
Serial.print(entrada);
Serial.print(", Maximo=");
Serial.println(maxi);
}
else {
Serial.println("Error al abrir el archivo");
}

```

**BLOQUE 14:** Condición para acumular datos de campo eléctrico y encontrar su respectivo promedio, en este caso se utilizó 30 datos, e inicialización de máximos y mínimos.

```

if(cont%30==0){
prom=acum_cv/30.0;
acum_cv=0;
maxi=0;
mini=10;

```

**BLOQUE 15:** Variables que se muestran en la LCD como son el setpoint, el promedio campo eléctrico y el conteo de descargas.

```

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Sp:");
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print(sp);
lcd.setCursor(0, 0);

```

```
lcd.print("C_E:");  
lcd.setCursor(4, 0);  
lcd.print(prom);  
lcd.setCursor(9, 1);  
lcd.print("Cont:");  
lcd.setCursor(14, 1);  
lcd.print(cont_desc);
```

**BLOQUE 15:** Funcionamiento del pulsador reset mediante la variable flag\_reset.

```
if(analogRead(1)>512 &&flag_reset==0) {  
flag_reset=1;  
cont=0;  
maxi=0;  
mini=10;  
cont_desc=0;  
}  
if(analogRead(1)<200 )  
flag_reset=0;  
delay(2);
```

**BLOQUE 16:** Condición para el adecuado funcionamiento del setpoint en base al campo eléctrico medido y la variable flag\_desc.

```
if(ce>sp && flag_desc==0) {  
flag_desc=1;  
cont_desc++;  
}  
if(ce<sp)  
flag_desc=0;  
}
```



## Anexo VI. Datos almacenados en microSD.

DATOS: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Datos Registrados

Fecha:	Muestra:	Campo_Electrico:	Setpoint:	Descarga:
2020/7/8-16:6:54	1	0.00	14	0
2020/7/8-16:6:54	2	14.49	14	0
2020/7/8-16:6:54	3	16.31	14	1
2020/7/8-16:6:54	4	16.31	14	2
2020/7/8-16:6:54	5	16.31	14	3
2020/7/8-16:6:54	6	16.31	14	4
2020/7/8-16:6:54	7	16.31	14	5
2020/7/8-16:6:54	8	16.31	14	6
2020/7/8-16:6:55	9	16.31	14	7
2020/7/8-16:6:55	10	16.31	14	8
2020/7/8-16:6:55	11	16.31	14	9
2020/7/8-16:6:55	12	16.31	14	10
2020/7/8-16:6:55	13	16.31	14	11
2020/7/8-16:6:55	14	16.31	14	12
2020/7/8-16:6:55	15	16.31	14	13
2020/7/8-16:6:55	16	16.31	14	14
2020/7/8-16:6:55	17	16.31	14	15
2020/7/8-16:6:55	18	16.31	14	16
2020/7/8-16:6:55	19	16.31	14	17
2020/7/8-16:6:55	20	17.21	14	18
2020/7/8-16:6:56	21	17.21	14	19
2020/7/8-16:6:56	22	17.21	14	20
2020/7/8-16:6:56	23	17.21	0	21
2020/7/8-16:6:56	24	17.21	14	22
2020/7/8-16:6:56	25	17.21	14	23
2020/7/8-16:6:56	26	17.21	14	24
2020/7/8-16:6:56	27	17.21	14	25
2020/7/8-16:6:56	28	17.21	14	26
2020/7/8-16:6:56	29	17.21	14	27
2020/7/8-16:6:56	30	17.21	0	28
2020/7/8-16:6:56	31	17.21	14	29
2020/7/8-16:6:56	32	17.21	14	30
2020/7/8-16:6:57	33	17.21	0	31

Lm 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

## Anexo VII. Sensor para campo eléctrico construido.

