

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA

“DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE INDUCIDA PARA DETECTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”.

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Naula Allaica Sandra Maribel

Tubón Laguna Edison Danilo

Tutor Académico:

Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio Ms.C

LATACUNGA - ECUADOR

2020



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **NAULA ALLAICA SANDRA MARIBEL** y **TUBÓN LAGUA EDISON DANILO** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE INDUCIDA PARA DETECTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**”, siendo el Ing. **GUAMÁN CUENCA WILIAN PATRICIO** el 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 nuestra exclusiva responsabilidad.

Naula Allaica Sandra Maribel

C.C. 0605056027

Tubón Laguna Edison Danilo

C.C. 1804622668



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

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

“DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE INDUCIDA PARA DETECTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”, de NAULA ALLAICA SANDRA MARIBEL y TUBÓN LAGUA EDISON DANILO, de la carrera de 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 Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Febrero 2020

El Tutor

.....
Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio MSc.

C.C. 0603578956

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 **NAULA ALLAICA SANDRA MARIBEL** y **TUBÓN LAGUA EDISON DANILO** con el título de Proyecto de titulación “**DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE INDUCIDA PARA DETECTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

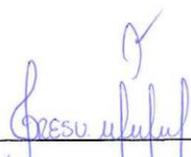
Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Febrero 2020

Para constancia firman:



Ing. Jimmy Toaza MSc.
(Presidente)
CC: 1717621062



Ing. Rommel Suárez MSc.
CC: 1804165353



Ing. Marco León MSc.
CC: 0502305402

AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

En calidad de director de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi certifico que mediante el proyecto de investigación: **“DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE INDUCIDA PARA DETECTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”** de los señores; **NAULA ALLAICA SANDRA MARIBEL** y **TUBÓN LAGUA EDISON DANILO**, realizan la entrega de un sensor de campo magnético, para el laboratorio de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, Febrero 2020


.....


Ph.D. Secundino Marrero Ramirez

C.C. 1757107907

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la oportunidad de la vida y las fuerzas necesarias para seguir adelante, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mis padres Francisco e Hilda, por ser los principales promotores de mis sueños y el pilar fundamental en mi vida, por motivarme a ser mejor cada día, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi que nos abrió las puertas para formarnos como profesionales de calidad y de valores.

Un agradecimiento al ing. Wilian Guamán, por habernos guiado en este proceso, y habernos exigido para ser mejores en cada momento.

De igual manera un agradecimiento a los ingenieros Edison Velasco, Carlos Quinatoa, Vicente Quispe y Paola Velasco quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos fueron un apoyo importante en el desarrollo de este trabajo.

A Marcelo Bonilla, te agradezco por tantas ayudas y tantos aportes no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también para mi vida.

Sandra Naula

AGRADECIMIENTO

Como no empezar agradeciendo a Dios, por permitirme ver un amanecer más y permitirme cumplir una de mis metas, con muchas dificultades, pero siempre con la bendición de él y la Virgen María, quienes me fortalecían y escuchaban mis oraciones en mis momentos de soledad.

A mis padres, Luis y Blanca, quienes me dieron la vida y me formaron como un hombre de sueños y valores, lo más importante a no rendirme ante cualquier situación.

A mi esposa, Silvia Jaya, quien me entiende y me ha apoyado en los momentos difíciles.

Además, agradecer a la Universidad Técnica de Cotopaxi quien me abrió las puertas para formarme como persona y profesional, agradezco a la calidad de docentes que conforma esta noble institución.

Por último, agradezco al tutor de tesis el Ing. Wilian Guaman, quien con su gran conocimiento, exigencia y consejos ha colaborado para culminar la tesis de mejor manera, además a los ingenieros: Edison Velasco, Jimmy Toaza, Vicente Quispe, Rommel Suarez y Marco León.

Edison Tubón

DEDICATORIA

A mis padres, Francisco e Hilda, por su amor, consejos, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo más grande de ser su hija, son los mejores padres.

A mis sobrinos Sebastián y Kalid quienes han sido un motor para esforzarme cada día.

A Marcelo Bonilla por ser la persona que estuvo apoyándome en cada decisión que tomara, esa persona que tuvo paciencia y entrega para conmigo, a esa persona le dedico y agradezco.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Sandra Naula

DEDICATORIA

El presente esfuerzo se los dedico a Dios, la virgen de Agua Santa de Baños, la Virgencita de las Lajas, mis padres, mi esposa, mis hermanos, quienes me ayudaron y me apoyaron de forma directa e indirecta y a todas las personas de buen corazón que desearon que cumpliera mis metas.

En especial quiero dedicarle, con todo mi corazón a mi querida hija Allison Tubón, quien con su tierna mirada me impulso a seguir en este sueño y no rendirme ante cualquier circunstancia o problema que se me presentaba.

Por último, quiero dedicar a mi tío, Marco Tubón, quien me impulsaba siempre a ser mejor y a no rendirme, estoy seguro que desde el cielo guía mi camino y me da sus bendiciones.

Edison Tubón

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2	INTRODUCCIÓN	2
2.1.	RESUMEN.....	2
2.2.	EL PROBLEMA:	7
2.2.1.	Planteamiento del problema:	7
2.2.2.	Formulación del problema	7
2.3.	BENEFICIARIOS:	7
2.4.	JUSTIFICACIÓN:.....	8
2.5.	OBJETIVOS	8
2.5.1.	Objetivo general	8
2.5.2.	Objetivos específicos	8
2.6.	SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	9
3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	11
3.1	ANTECEDENTES	11
3.2.	MARCO REFERENCIAL.....	13
3.2.1.	Campos Electromagnéticos.....	13
3.2.2.	Campo eléctrico.....	14
3.2.3.	Campo magnético	15
3.2.4.	Cálculos de campos electromagnéticos	16
3.2.5.	Descargas atmosféricas.....	18
3.2.6.	Detección de campos magnéticos.....	24
3.2.7.	Detector comercial BTD-300.....	26
3.2.8.	Campos magnéticos en Sistemas Eléctricos.	27
4	DESARROLLO DE LA PROPUESTA	31
4.1	HIPÓTESIS O FORMULACIÓN DE PREGUNTA CIENTÍFICA	31

4.2.	METODOLOGÍA.....	31
4.2.1.	Método experimental.....	31
4.2.2.	Método Analítico.....	31
4.2.3.	Método Sintético	31
4.2.4.	Investigación bibliográfica.....	32
4.2.5.	Investigación Correlacional	32
4.2.6.	Operacionalización de Variables.....	32
4.3.	ÁNALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	33
4.3.1.	Antena de lazo	33
4.3.2.	Selección de la forma de la antena	36
4.3.3.	Selección del tamaño de la antena.....	37
4.3.4.	Elección del conductor	38
4.3.5.	Cálculo del número de vueltas del alambre	38
4.3.6.	Cálculo de la inductancia de la antena de lazo.....	40
4.3.7.	Resistencia de la antena de Lazo	42
4.3.8.	Capacitancia experimental del lazo	44
4.3.9.	Circuito equivalente de la antena	44
4.3.10.	Selección del material para la estructura de la antena de lazo	44
4.3.11.	Selección de la antena.....	46
4.4.	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	47
4.4.1.	Simulación del circuito electrónico pasa banda	47
4.4.2.	Tratamiento de la Señal	48
4.4.3.	Comunicación	49
4.4.4.	Selección de Materiales	50
4.5.	Validación del prototipo	51
4.5.1.	Medición de campo magnético	51
4.5.2.	Registro del campo magnético en función de la posición de la antena	55

4.5.3. Cuento de variaciones de campo magnético	56
4.5.4. Pruebas en SEP.....	58
4.5.5. Análisis de Resultados	63
4.6. EVALUACIÓN TÉCNICO, SOCIAL, AMBIENTAL Y/O ECONÓMICO	64
4.6.1. Económica.....	64
4.6.2. Evaluación Técnica	65
4.6.3. Evaluación ambiental.....	66
4.6.4. Evaluación social.....	66
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
5.1. CONCLUSIONES.....	67
5.2. RECOMENDACIONES.....	67
5.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	68
5.4. REFERENCIAS	69
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Campo electromagnético [8].	13
Figura 3.2: a) Líneas de campo eléctrico entre dos cargas iguales y de signo opuesto; b) líneas de campo eléctrico en dos cargas iguales y del mismo signo [10].	14
Figura 3.3: Líneas de campo magnético de un imán en forma de barra [10].	15
Figura 3.4: Representación esquemática del mecanismo de polarización [13].	19
Figura 3.5: Tipos de descarga atmosféricas de acuerdo a sus diferentes características [1].	23
Figura 3.6: Detector de tormentas de actividad electrostática BTD300 [21].	27
Figura 4.1: El patrón de radiación de un pequeño lazo (izquierda), es muy similar a un dipolo (derecha) [5].	34
Figura 4.2: Una rebanada horizontal del diagrama de radiación en el plano XY se resalta en rojo (izquierda), diagrama de radiación de una antena dipolo (derecha) [5].	34
Figura 4.3: Incidencia del campo magnético por descarga norma la plano XY [5].	35
Figura 4.4: Antena de lazo: (a) cuadrada, (b) hexagonal, (c) octagonal y (d) circular [5].	36
Figura 4.5: Estructura del cableado del receptor [24].	41
Figura 4.6: Circuito equivalente de la antena.	44
Figura 4.7: Antena de lazo.	45
Figura 4.8: Filtro pasa banda.	48
Figura 4.9: Interfaz Arduino.	49
Figura 4.10. Interfaz LabView.	50
Figura 4.11: Transformador de Disrupción y la mochila de control.	53
Figura 4.12. Conteo de variaciones de campo magnético.	57
Figura 4.13: Toma de medidas en la Línea de Transmisión de 230 en mocha, ángulo 45 grados de la antena.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Ecuaciones de Maxwell [9].....	17
Tabla 3.2: 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 [22]..	28
Tabla 3.3: Rangos de inducción campo magnético Operación de diferentes subestaciones [25].	29
Tabla 3.4: Campo magnético estático generado por el rayo (A/m), en función de la intensidad del rayo, medido a distintas distancias del punto de impacto [26].	30
Tabla 4.1: Características de la variable independiente.	32
Tabla 4.2: Características de la variable independiente.	33
Tabla 4.3: Tabla de comparación de los parámetros de la antena de lazo.	46
Tabla 4.4. Tabla de comparación del prototipo con el patrón.	54
Tabla 4.5: Valores de campo magnético a 0°.	55
Tabla 4.6: Valores de campo magnético a 45°.	55
Tabla 4.7: Valores de campo magnético a 90°.	55
Tabla 4.8. Campo magnético a diferentes ángulos de posición de la antena.	56
Tabla 4.9: Registro de variaciones de campo magnético.	57
Tabla 4.10: Tabla de valores de campo magnético en la subestación Montalvo.	60
Tabla 4.11: Tabla de valores de campo magnético en la Línea de Transmisión.	62
Tabla 4.12: Presupuesto de equipos y materiales utilizados.	64
Tabla 4.13: Presupuesto de equipos y materiales utilizados.	65

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título:

Diseño de un sensor de campo magnético mediante el estudio de la corriente inducida para detectar descargas atmosféricas.

Fecha de inicio: 23 de Septiembre de 2019.

Fecha de entrega: 29 de Febrero de 2020.

Lugar de ejecución: Laboratorio de Ingeniería Eléctrica Universidad Técnica de Cotopaxi.

Carrera que Auspicia: Ingeniería Eléctrica

Proyecto de investigación vinculado: Estudios de campos electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia: Caso, provincia de Cotopaxi

Equipo de trabajo:

Tutor: MSc. Ing. Wilian Patricio Guamán Cuenca

Estudiantes: Naula Allaica Sandra Maribel

Tubón Laguna Edison Danilo

Área de conocimiento: Alto Voltaje.

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sublínea de la investigación de la carrera de Ingeniería Eléctrica: Explotación y diseño de sistemas eléctricos de potencia.

2 INTRODUCCIÓN

2.1. RESUMEN

En este proyecto desarrolla un prototipo de sensor de campo magnético para detectar descargas atmosféricas aplicando el principio de la corriente inducida. En primera instancia, se estudiaron modelos de detectores utilizados en investigaciones preliminares por diferentes autores vinculados al estudio de los fenómenos atmosféricos. Además, se estudiaron detectores de descargas atmosféricas comerciales con la finalidad de interpretar el principio de funcionamiento de estos y sus aplicaciones.

Los parámetros de diseño del detector que se obtuvieron de estudios previos fueron: la forma de la antena, su tamaño, el número de vueltas del bobinado y el material de construcción. Se definió entonces, utilizar una antena de lazo de forma cuadrada debido a que tiene mayor alcance de recepción a variaciones de campos magnéticos, en la cual se induce el flujo magnético producido por la fuente de CEM (Campos Electro Magnéticos), en el bobinado de la antena. Posteriormente la señal ingresa a un circuito en el cual las frecuencias inferiores a 10 kHz y superiores a 15 kHz se discriminan. El tratamiento de la señal se lo realiza con Arduino Mega, y además es el canal de comunicación con el interfaz de LabView en el cual se muestra de forma gráfica el comportamiento del campo magnético y el conteo de variaciones de campo respecto a una referencia (setpoint), este último se almacena en forma de datos con fecha, hora y el valor correspondiente de campo magnético.

Respecto a los aspectos constructivos de la carcasa del sensor y la cubierta de la antena, se consideró el uso de material no corrosivo como el polietileno, dado que tiene una excelente resistencia a la degradación causada por acciones de microorganismos. Además, cuenta con una microSD de 4 GB, con la capacidad de almacenar 10435 datos y baterías de LiPo con autonomía de 18 horas.

El prototipo se validó tomando como referencia el sensor patrón EMF450, para los registros de campo magnético en instalaciones de potencia como subestaciones y líneas de transmisión obteniendo errores inferiores a 2,20 %. En el caso del registro de variaciones de campo magnético, se validó en el laboratorio de Alto Voltaje, utilizando un transformador para ensayos de disrupción, suponiendo que el punto de disrupción emula el cambio en el campo magnético por efecto de una descarga atmosférica, registrando 7 de cada 10 descargas.

Finalmente, las aplicaciones del prototipo construido son, en primer lugar, evaluar el nivel isoceraúnico de una determinada zona del país, y, por otra parte, medir campos magnéticos en elementos de los sistemas eléctricos de potencia como subestaciones eléctricas, líneas de transmisión, cámaras de transformación y todo equipo o maquina eléctrica que genere campos magnéticos en el rango de medición del sensor (0 a 5 microteslas). Los beneficiarios de este proyecto son múltiples, desde el sector eléctrico, hasta los sectores agrícola y ganadero del país, si se continuase con el trabajo orientándolo a la actualización de los niveles isoceraúnicos en las zonas de influencia.

Palabras clave: Detector, Campo magnético, Descarga atmosférica, Sistema Eléctrico de Potencia, Medición.

ABSTRACT

THEME:

“DESIGNING OF MAGNETIC SENSOR THROUGH THE STUDY OF INDUCED CURRENT TO DETECT LIGHTNING.”

Authors:

Naula Allaica Sandra Maribel

Tubón Laguna Edison Danilo

In this project, it develops a prototype magnetic field sensor to detect lightning applying the principle of induced current. First, models of detectors used in preliminary investigations by different authors linked to the study of atmospheric phenomena were studied. Also, commercial atmospheric discharge detectors were studied to interpret the principle of operation of these and their applications.

The design parameters of the detector that were obtained from previous studies such as the shape of the antenna, its size, the number of winding turns and the construction material. It was define to use a square-shaped loop antenna because it has a higher reception range to variations of magnetic fields, in which the magnetic which is produced by the source of EF (Electromagnetic Fields) is induced, in the antenna winding. The signal then enters a circuit in which frequencies less than 10 kHz and higher than 15 kHz are discriminated against. The signal processing is done with Arduino Mega, and it is also the communication channel with the LabView interface in which the behavior of the magnetic field and the count of field variations against a reference (set-point) is graphically displayed. The latter is stored in the form of data with date, time and the corresponding magnetic field value.

Regarding the constructive aspects of the sensor housing and antenna cover, the use of non-corrosive material such as polyethylene was considered, as it has excellent resistance to degradation caused by actions of microorganisms. Also, it has a 4 GB microSD, with the ability to store 10435 data and LiPo batteries with 18- hour autonomy.

The prototype was validated using the EMF450 standard sensor for magnetic field registers in power installations such as substations and transmission lines obtaining errors of less than 2.20%. In the case of the recording of magnetic field variations, it was validated in the High

Voltage Laboratory, using a transformer for disruption tests, assuming that the disruption point emulates the change in the magnetic field by the effect of a discharge 7 out of 10 downloads.

Finally, the applications of the built prototype are: first, to assess the isoceraunic level of a particular area of the country. On the other hand, measuring magnetic fields in elements of electrical power systems such as electrical substations, transmission lines, transformation cameras and any electrical equipment or machinery that generates magnetic fields in the sensor measurement range (0 to 5 microteslas). There are many different beneficiaries in this project such as the electricity sector to the agricultural and livestock sectors of the country, if the work continues to guide it to the updating of isoceraunic levels in the areas of influence.

Keywords: Detector, Magnetic Field, Lightning, Electric Power System, Measurement.



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 la propuesta tecnológica al Idioma Inglés presentado por los señores egresados **NAULA ALLAICA SANDRA MARIBEL** con **CI:0605056027** y **TUBÓN LAGUA EDISON DANILO** con **CI: 1804622668** DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA FACULTAD CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS, cuyo título versa “**DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA CORRIENTE INDUCIDA PARA DETACTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es 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, 10 de febrero del 2020

Atentamente,



Mg. Nelson W. Guagchinga Ch.

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS

C.C. 050324641-6



2.2. EL PROBLEMA:

2.2.1. Planteamiento del problema:

Sudamérica y Sudáfrica poseen la mayor densidad de descargas atmosféricas captadas por el sistema Lightning Image Sensor “LIS” instrumento utilizado para detectar la distribución y la variabilidad de las descargas a nivel mundial. En Ecuador, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), registra información obtenida por el sensor óptico de la red satélites “LIS TRMM” entre 1998 y 2013, las lecturas permiten determinar que el país tiene una densidad promedio de 170.000 descargas a tierra [1], donde la provincia con el mayor nivel de isocerámico es Pastaza, específicamente la localidad del Puyo con aproximadamente 100 a 120 días al año en que se puede presentar una tormenta, mismos que han provocado problemas de interrupción en el servicio de energía eléctrica, pérdidas materiales e incluso humanas.

Las descargas atmosféricas, al encontrarse con las construcciones o personas causan grandes daños, en el caso de las personas resulta ser muy peligroso e incluso mortal dependiendo si esta es directa o indirecta. En el caso de las redes eléctricas, no necesitan entrar en contacto para provocar daños, pues la inducción de cargas en el sistema puede producirse luego de una descarga atmosférica cercana, la energía que se tenga de este fenómeno puede afectar a equipos que se encuentran aislados de tierra hasta 1,5 km a la redonda del punto de impacto [2].

Este proyecto plantea establecer un registro de la cantidad de descargas atmosféricas ocurridas en un lugar específico, mediante el diseño de un sensor para la detección del campo magnético.

2.2.2. Formulación del problema

Para el estudio de las interferencias y sobretensiones en los sistemas eléctricos, generadas por las descargas atmosféricas, nace la iniciativa de diseñar un sensor inductivo que permite receptor las variaciones de campo magnético.

2.3. BENEFICIARIOS:

Los beneficiarios de esta propuesta tecnológica son los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, como también el sector eléctrico, agricultores, ganaderos e industrias de la provincia de Cotopaxi.

2.4. JUSTIFICACIÓN:

El lunes 08 de octubre de 2018, la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) informaba sobre la desconexión de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, que en ese momento entregaba al sistema alrededor de 800 MW, debido a descargas atmosféricas que afectaron la operación de la línea de transmisión de 500 kV, que conecta a la central con el Sistema Nacional Interconectado (SNI). Las consecuencias, no solo fueron los cortes de energía eléctrica en algunas zonas del país, sino también las pérdidas económicas asociadas a los clientes conectados a la red y a la propia CELEC EP.

Las descargas atmosféricas son una de las principales causas de la salida del servicio eléctrico en el Ecuador, ya sea, que tenga un contacto directo o indirecto con la línea, en los informes emitidos por el CENACE mencionan que, entre los años 2015-2017 existieron 5 eventos que han dejado sin servicio eléctrico, y por ende daños materiales en estructuras y líneas, estos eventos son: Descarga atmosférica sobre los circuitos 1 y 2 de la línea de transmisión Molino – Pascuales, Descargas atmosféricas y lluvia en la zona de la subestación Vicentina, Descarga atmosférica que provocó la explosión de 4 aisladores line post en una estructura en común, entre las subestaciones Durán Norte y El Recreo de 69 kV del sistema de CNEL EP - Guayas Los Ríos, Descargas atmosféricas en la línea Guavio – Reforma y un disparo de los disyuntores asociados al circuito 2 de la línea de transmisión Santa Rosa - Totoras: Actuación de su protección de distancia por descarga atmosférica sobre el circuito [5].

Conociendo los daños que puede provocar una descarga atmosférica, se efectuará una aportación de carácter teórico y experimental al estudio del campo magnético que se presenta durante las descargas atmosféricas, evaluando la corriente inducida en el sensor y cuantificándola.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. Objetivo general

Desarrollar un sensor de campo magnético mediante el estudio de la corriente inducida para detectar descargas atmosféricas.

2.5.2. Objetivos específicos

- Recopilar información de investigaciones bibliográficas realizadas, para la detección del campo magnético aplicado a descargas atmosféricas.

- Diseñar y construir un prototipo para la detección de campos magnéticos.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo mediante pruebas de laboratorio utilizando parámetros referenciales.

2.6. SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

OBJETIVOS	ACTIVIDADES	RESULTADOS	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD
Recopilar información de investigaciones bibliográficas realizadas, para la detección del campo magnético aplicado a descargas atmosféricas.	Indagación investigaciones acerca de los procesos de descarga y el mecanismo de impacto de las descargas atmosféricas. Indagación sobre los efectos que producen las descargas atmosféricas en sistemas eléctricos. Indagación de los fundamentos físicos asociados al campo magnético.	Marco teórico	Indagación en fuentes bibliográficas actualizadas sobre las descargas atmosférica, tesis de grado, artículos científicos.
Diseñar y construir un prototipo para la detección de	Obtención de los parámetros de diseño del prototipo para la detección de campos magnéticos.	Prototipo físico del sensor de campo magnético.	Diseño del prototipo para detectar variaciones de campos magnéticos.

campos magnéticos.	Construcción del prototipo Diseño de un esquema para el prototipo con los parámetros obtenidos.		
Evaluar el funcionamiento del prototipo mediante pruebas de laboratorio utilizando parámetros referenciales.	Validación del prototipo Verificación en el laboratorio de registro y almacenamiento del número de variaciones que emulan descargas atmosféricas.	Tablas de valores en el capítulo V análisis y discusión de resultados.	Se realiza la toma de datos obtenidos por el sensor de campo magnético en el laboratorio.

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 ANTECEDENTES

Las descargas atmosféricas (conocidas como rayo), es uno de los fenómenos naturales más peligrosos capaces de causar daños de forma directa e indirecta a todo tipo de estructuras, afectando el desarrollo normal de la operación de los sistemas eléctricos de generación, transmisión, distribución e incluso causan daño a los seres humanos.

Fundamentalmente, la descarga atmosférica se presenta cuando se forman grandes concentraciones de carga eléctrica y pueden darse entre las propias nubes o con la tierra. Al interior de una nube de tormenta, las partículas más pesadas (base) poseen carga negativa y las más ligeras (parte superior) están cargadas positivamente.

Para el estudio de las descargas atmosféricas, en 1752, Benjamín Franklin realiza el famoso experimento, de la cometa volándola en medio de una tormenta, la cometa llevaba una punta metálica y sujeta con un hilo de seda, donde Franklin, confirma que la punta metálica se cargaba de electricidad, demostrando así que las nubes están cargadas de electricidad y los rayos son descargas eléctricas.

Los fenómenos electromagnéticos que establecieron las conexiones entre electricidad y magnetismo, fueron descubiertos el siglo XIX aproximadamente, debido a que, entre los años 1791-1867, Michael Faraday hace un descubrimiento sobre la inductancia electromagnética y campo magnético que influye sobre un haz de luz polarizada, conocida como efecto Faraday o efecto magneto-óptico, Michael Faraday llevo a cabo uno de los mayores avances en la teoría electromagnética cuando en 1831 descubrió experimentalmente que se inducía una corriente en una espira conductora cuando cambiaba el flujo magnético que atravesaba la espira.

Dentro de los experimentos más relevantes de Michael Faraday, se encuentra la jaula de Faraday que fue diseñada en 1836, dicha jaula es una caja metálica que protege de los campos eléctricos estáticos, principalmente es empleada para proteger contra descargas atmosféricas, ya que en su interior el campo eléctrico es nulo.

Posteriormente en 1873, Maxwell toma los estudios realizados por Faraday y demuestra matemáticamente sobre los principios de la existencia de ondas de campo eléctrico y magnético que se auto propagan y que viajan a la velocidad de la luz. Es decir que Maxwell modeló matemáticamente los experimentos de Faraday sobre electromagnetismo.

Años después de haber demostrado Maxwell matemáticamente los estudios de Faraday, aparece en 1886, el alemán Heinrich Hertz, quien se interesó en las ecuaciones de Maxwell y decidió demostrar de forma práctica como producir ondas electromagnéticas, Hertz pensó que para producir ondas electromagnéticas podría emplear un circuito oscilatorio, debido a que la corriente que en él se produce, provocaba campos magnéticos no estacionarios.

El efecto electromagnético de las descargas atmosféricas, afectan de forma directa o indirecta a todo equipo, maquina o red eléctrica, produciendo así gastos en las empresas eléctricas y molestias en los usuarios, sin duda, el elemento más propenso a sufrir daños por las descargas atmosféricas son las Líneas de Transmisión, debido a qué, si su impacto es directo sobre la línea de transmisión, está provoca perturbaciones electromagnéticas que circulan en dirección opuesta, tiene una forma de onda tipo ola, es decir, un voltaje pico al inicio y desciende hasta restablecer su voltaje normal de servicio.

Cuando aparecieron las primeras líneas de transmisión, las descargas atmosféricas causaron grandes problemas que representaban perjuicios al transporte de energía eléctrica; desde entonces comienzan proyectos de investigación de gran magnitud, ya sean para detectarlo o proteger contra las descargas. Con la construcción de las primeras líneas de transmisión a 220 kV, se empieza a considerar la importancia de realizar los mapas isoceráunicos, los mismos que se van perfeccionando las metodologías de recolección y procesamiento de datos, evitado las salidas de las líneas de transmisión y se va adquiriendo una buena comprensión del efecto de las descargas atmosféricas sobre las líneas [3].

El físico ruso Aleksandr Popov encontró el mejor sistema para radiar y captar las ondas, mediante una antena constituida por hilo metálico. Una vez se perfeccionó este aparato, se añadió al sistema receptor un hilo metálico extendido en sentido vertical, para que, al elevarse en la atmosfera, pudiese captar mejor las oscilaciones eléctricas. De este modo nació la primera antena, llamada así porque, para sostener el hilo metálico ideado por Popov, debía emplearse un soporte de aspecto parecido a los mástiles o antena de los buques [4].

En la década de 1 900 se desarrollaron varios experimentos buscando aplicar el concepto de direccionalidad de las antenas de lazo descubierta por Hertz, para localizar la posición del transmisor [5], para llevar el efecto de localización la empresa norteamericana LLP Inc, crea un sensor conocido como Direction Finding (DF) que consta de una antena de campo magnético de lazos ortogonales, una antena de campo eléctrico de placas y un microprocesador. En 1 980 la empresa norteamericana ARSI diseña un sensor Time of Arrival (TOA) con un sistema

Lightning Position and Tracking System (LPATS), que mide las diferencias de tiempo de arribo de una señal de descarga de retorno mediante tres o más sensores y localiza el sitio de impacto por medio de la intersección [6].

En el año 2 009, se desarrolló una antena de lazos, uno de los más populares por su versatilidad, su facilidad y bajo costo de construcción. Las pruebas se los realizó con dos tipos de diseño, un cuadrado y un circular, de un dipolo magnético cuyos ejes son perpendiculares, el modelo que se encontró de la antena y las pruebas realizadas a la misma proporciona la información aproximada del comportamiento oscilatorio para el diseño y construcción de un prototipo que no sea afectado por las condiciones dadas [7].

Recientemente, en el 2 018 se realiza una Implementación de un Sistema MDF-GIS de Detección, Localización y Monitoreo de Descargas Atmosféricas en Tiempo Real, donde construye un hardware para la detección de las descargas y su acondicionamiento para ser entregada a una tarjeta de adquisición de datos [5].

3.2. MARCO REFERENCIAL

3.2.1. Campos Electromagnéticos

Los campos eléctricos y magnéticos variables con el tiempo están acoplados, produciendo un campo electromagnético, como se muestra en la Fig. 3.1. En el electromagnetismo hay cuatro cantidades de campo vectoriales fundamentales: intensidad de campo eléctrico \mathbf{E} , densidad de flujo eléctrico o desplazamiento eléctrico \mathbf{D} , densidad de flujo magnético \mathbf{B} e intensidad de campo magnético \mathbf{H} . El objetivo principal del estudio del electromagnetismo es comprender la interacción entre cargas y corrientes a distancia, con base en el modelo electromagnético [8].

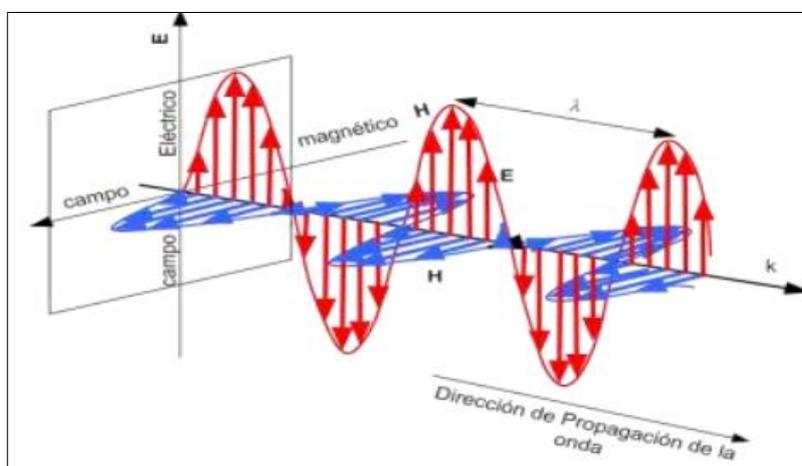


Figura 3.1: Campo electromagnético [8].

Por lo tanto, los campos vectoriales actúan de la siguiente manera en los campos electromagnéticos: la intensidad de campo eléctrico \mathbf{E} es el único vector necesario al analizar la electrostática en el espacio libre; el vector de desplazamiento eléctrico \mathbf{D} es útil en el estudio de campos eléctricos en medios materiales; la densidad de flujo magnético \mathbf{B} es el único vector necesario al analizar la magnetostática (los efectos de corrientes eléctricas estacionarias) en el espacio libre, y se relaciona con la fuerza magnética que actúa sobre una carga que se mueve con determinada velocidad; el vector de intensidad de campo magnético \mathbf{H} es útil en el estudio de campos magnéticos en medios materiales [8].

3.2.2. Campo eléctrico

El concepto de campo eléctrico fue introducido en la teoría electromagnética para describir las fuerzas existentes entre cargas eléctricas. El campo eléctrico en un punto del espacio producido por una o varias cargas eléctricas se define en términos de la fuerza que experimenta una unidad de carga estacionaria situada en dicho punto. El campo eléctrico \mathbf{E} se expresa en voltios por metro (V/m). Dado un conjunto de cargas eléctricas, si se coloca cerca una pequeña carga de prueba q inmóvil, esta carga experimentará una fuerza \mathbf{F} . Esta fuerza es proporcional a la carga y su cociente representa una propiedad local de ese punto del espacio, denominado campo eléctrico \mathbf{E} [9].

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (3.1)$$

Como cada carga está rodeada de un campo eléctrico, es razonable considerar que las cargas son las fuentes que producen estos campos. Si ambas cargas son de distinto signo o distinta polaridad la fuerza que se ejerce será atractiva, y si son del mismo signo o misma polaridad será repulsiva, como se muestra en la Fig. 3.2.

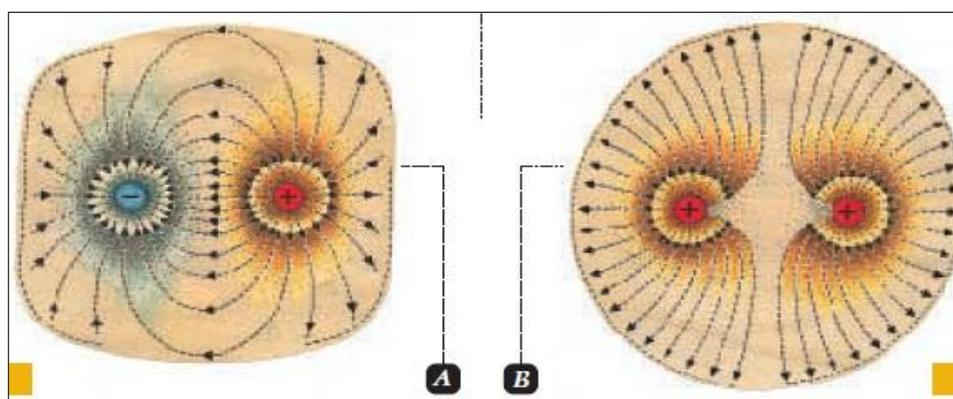


Figura 3.2: a) Líneas de campo eléctrico entre dos cargas iguales y de signo opuesto; b) líneas de campo eléctrico en dos cargas iguales y del mismo signo [10].

La intensidad de campo eléctrico creado por una carga es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo cual hace que disminuya rápidamente cuando la distancia a la carga aumenta. El valor del campo eléctrico es función de la tensión del sistema eléctrico; es decir, cuando mayor sea la tensión del dispositivo más intenso será el campo eléctrico que genere [9].

3.2.3. Campo magnético

El campo magnético es un concepto introducido en la teoría electromagnética para explicar las fuerzas que aparecen entre corrientes eléctricas. Los campos electromagnéticos son producidos por cargas en movimiento, es decir, por corrientes eléctricas; aunque también se pueden producir campos magnéticos con imanes permanentes, como se muestra en la Fig. 3.3 [9].

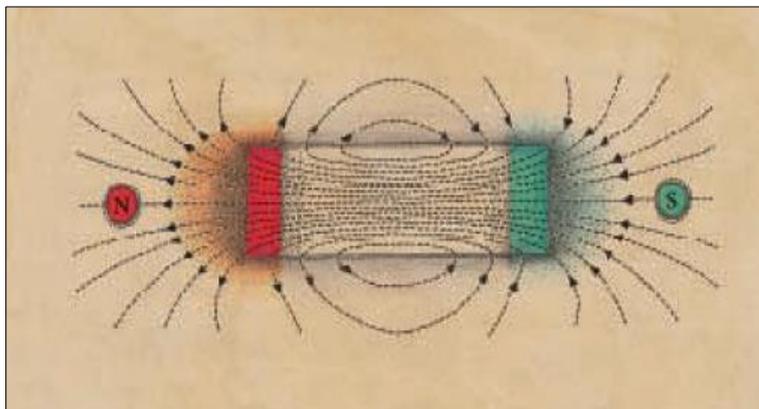


Figura 3.3: Líneas de campo magnético de un imán en forma de barra [10].

El campo magnético H en un punto dado del espacio se define como la fuerza que ejerce sobre un elemento de corriente situado en dicho punto, y se expresa en amperios por metro (A/m). Así pues, el campo eléctrico existe siempre que haya cargas eléctricas, mientras que solo hay campo magnético cuando esas cargas están en movimiento, es decir, cuando hay un flujo de corriente eléctrica. La intensidad de campo magnético debido a una corriente I que recorre un solo conductor rectilíneo sobre un punto situado a una distancia d , se expresa como:

$$H = \frac{I}{2\pi d} \quad (3.2)$$

El campo magnético, al igual que el campo eléctrico, disminuye rápidamente cuando aumenta la distancia respecto de la fuente que lo genera. Es más habitual representar el campo magnético mediante la inducción magnética o densidad de flujo magnético B . este término se relaciona con H mediante la permeabilidad magnética μ , que viene dada por [9]:

$$B = \mu H \quad (3.3)$$

Donde:

B: Campo magnético (T o Wb/m²)

μ : Permeabilidad relativa. ($\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$; μ_0 ; depende del medio)

H: Densidad del campo magnético (A/m)

Se define, fem inducida en el circuito con un contorno C:

$$v = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (\text{V}) \quad (3.4)$$

Donde:

v: Voltaje inducido (V)

y el flujo magnético (Φ), que atraviesa la superficie S (Wb):

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (\text{Wb}) \quad (3.5)$$

El signo de Φ puede ser positivo o negativo según como se escoja la superficie normal en $d\mathbf{s}$.

La unidad del flujo magnético es el weber (Wb). El campo magnético viene dado por la integral que se aplica a la superficie que limita un volumen arbitrario

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) también se conoce como la expresión de la ley de la conservación del flujo magnético, pues establece que el flujo magnético total de salida a través de cualquier superficie cerrada es cero. La ecuación (3.5) se convierte en:

$$v = \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{V}) \quad (3.7)$$

En (3.7) establece que el voltaje inducido en un circuito cerrado estacionario es igual a la razón negativa de incremento de flujo magnético ligada al circuito. Este es un enunciado de la Ley de Faraday de la inducción electromagnética. El signo negativo en la ecuación afirma que el voltaje inducido hará que fluya una corriente en el circuito cerrado con dirección tal que se oponga al cambio del flujo magnético ligado. Esta afirmación es conocida como la Ley de Lenz. El Voltaje inducido en un circuito estacionario ocasionado por un campo magnético variable con el tiempo es una fuerza electromotriz estática [11].

3.2.4. Cálculos de campos electromagnéticos

Un campo magnético variable induce un campo eléctrico o viceversa. En condiciones variables con el tiempo es necesario construir un modelo electromagnético donde los vectores de campo eléctrico \mathbf{E} estén correctamente relacionados con los vectores de campo magnético \mathbf{B} y \mathbf{H} .

Las ecuaciones que rigen la electrostática y la magnetostática son formas espaciales de las ecuaciones Maxwell cuando todas las cantidades son independientes del tiempo. Se puede combinar las ecuaciones de Maxwell para generar ecuaciones de onda que predicen la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan con la velocidad de la luz [11].

La relación cuantitativa entre la fuerza electromotriz inducida y la razón de cambio del flujo ligado, basada en observaciones experimentales, se conoce como ley de Faraday. Es una ley experimental y puede considerarse como un postulado [11].

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) representa una relación de funciones de punto; es decir, se aplica a todos los puntos en el espacio ya sea esté el espacio libre o un medio material. La intensidad de campo eléctrico en una región de densidad de flujo magnético variable con el tiempo es por consiguiente no conservativa y no puede expresarse como el gradiente negativo de un potencial escalar. Si se toma la integral de la superficie en ambos lados de la ecuación (3.8) sobre una superficie abierta y aplicamos el teorema de Stokes, se obtiene:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9) es válido para cualquier superficie \mathbf{S} limitada por el contorno \mathbf{C} . Exista o no un circuito físico alrededor de \mathbf{C} . Por su puesto, en un campo sin variación temporal, $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$.

La relación de los campos eléctricos y magnéticos con las fuentes de carga y corriente que los crean viene determinada por unas relaciones conocidas como las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones describen todos los fenómenos electromagnéticos [9].

Tabla 3.1: Ecuaciones de Maxwell [9].

Forma diferencial	Forma integral	Importancia
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt}$	Ley de Faraday
$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \int_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$	Ley circuital de Amperé
$\nabla \times \mathbf{D} = \rho_v$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q$	Ley de Gauss
$\nabla \times \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$	No hay carga magnética aislada

3.2.5. Descargas atmosféricas

- **Formación de una descarga atmosférica**

La tierra puede ser considerada como un gigantesco condensador, cuyas placas estarían por la superficie del suelo y por la capa ionizada de Heaviside (capa de gas ionizado que existe entre los 90 y 150 km de altura). Esta capa tiene una altitud promedio de aproximadamente 100 km, sobre su superficie se encuentra una capa de aire a la que se le denomina como el electrodo positivo. Cuando las corrientes de aire entre la tierra y esta capa de aire producen una ionización alta, puesto que “La conductividad de la atmósfera se debe a que existen iones se desplazan en el campo produciendo la corriente” y consecuentemente se establece una descarga de iones, es decir, el átomo pierde o gana electrones, y si su valor es elevado puede generarse una descarga eléctrica [12].

El inicio de la descarga atmosférica (desglose preliminar) tiene lugar en regiones nubosas con suficiente campo eléctrico fuerte. Una descarga apenas visible se mueve paso a paso hacia la tierra. Cuando el líder se acerca al suelo, un líder ascendente se libera de objetos elevados cerca del suelo y cierra el canal de la descarga, esto inicia el golpe de retorno, que transporta la carga entre el suelo y la nube en corrientes de varios kA.

Cuando llueve sobre la superficie terrestre, se produce evaporación natural, llevando hacia arriba gotas de agua, es decir, H_2O . Mientras tanto, a una altura de 2,5 a 3 kilómetros donde la temperatura es de 15 a 20 grados centígrados bajo cero, se producen partículas de hielo que caen por gravedad y que chocan con las gotas de agua que suben por la evaporación. Estas fricciones y colisiones producen separación de cargas eléctricas, y se genera un campo eléctrico, es decir, fuerzas que se ejercen entre cargas, hasta que llega el momento en que se dan transferencias de cargas, conocidas como descargas atmosféricas [13].

Varias teorías se han formulado al respecto de la formación de las descargas atmosféricas, el mecanismo inductivo de una descarga fue de hecho, una de las primeras teorías que hacía referencia a la electrificación de tormentas eléctricas. En 1913 y ha sido modificado por varios autores desde entonces. La Fig. 3.4, muestra una representación esquemática de su modelo donde muestra la polarización de carga que se produce en la partícula más grande en el campo eléctrico externo. Durante una colisión de rebote, una partícula más pequeña elimina parte de la carga positiva de la mitad inferior de la partícula más grande y es barrida por las corrientes de aire, la partícula más grande cae con una carga negativa neta.

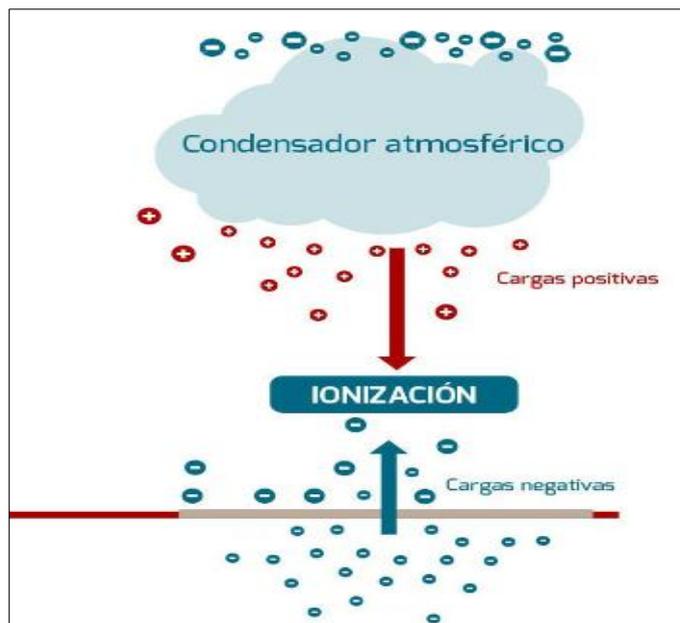


Figura 3.4: Representación esquemática del mecanismo de polarización [13].

Una gota de agua cayendo a través de la región del campo eléctrico vertical de una nube tormentosa tiene cargas polarizadas en su parte superior e inferior. En un campo eléctrico dirigido hacia abajo, es decir, con la carga positiva por encima de la negativa en la nube, la parte inferior de la caída llevará una carga positiva. Las gotas más pequeñas que rebotan en la mitad inferior de la gota eliminarán parte de esta carga positiva que se arrastrará hasta la parte superior de la nube para aumentar el centro de carga positiva superior, dejando la caída con una carga neta negativa que se transportará a la base de la nube para mejorar la carga negativa inferior. Esto proporciona un mecanismo de retroalimentación positiva que mejorará el campo eléctrico.

Mejía [2], explica sobre el proceso de descarga y el mecanismo de impacto de una descarga atmosférica, el precursor por etapas es un canal ionizado que contiene un excedente de cargas cuya polaridad depende de su origen en la base de la nube, existiendo una fuerte concentración de cargas en la punta o cabeza del precursor. Cuando el precursor se acerca al suelo, el campo eléctrico crece rápidamente hasta alcanzar valores superiores a los 400 kV/m (3 a 4 kV/cm).

En ese momento, y concretamente para un precursor negativo, las predescargas ascendentes positivas, se desarrollan rápidamente en dirección del precursor. Una de las descargas, la más cercana o la que se desarrolla más rápido, entra en contacto con el precursor, dando lugar a la formación de un canal continuo ionizado entre el suelo y la nube, camino por el cual la descarga principal (contra descarga) se abrirá paso.

Puede haber dos predescargas ascendentes que alcancen el precursor (caso de descarga ramificada). Se considera en qué condiciones se desarrolla la predescarga ascendente, el avance del líder ascendente en cada estructura será más rápido y más eficiente cuanto menos sea la resistencia (a tierra) del elemento, objeto o estructura que la sostiene. El campo eléctrico es la zona bajo del precursor que desciende. Este campo y su valor crecen rápidamente, esta función de la carga eléctrica de la punta del precursor y la distancia de esta apunta al suelo. Se asume además que la primera contra descargada corresponde a la neutralización de las cargas del precursor, de manera que existirá una relación entre la cantidad de carga y el valor máximo de la corriente que provocará la descarga atmosférica. Registros estadísticos asignan un valor de 200 kA (máx.) /C [2].

- **Efectos de la inducción de las descargas atmosféricas**

La de resistencia óhmica, todo circuito eléctrico tiene autoinducción y capacidad, por lo que al descargar un rayo en la proximidad de un conductor o producirse una descarga entre nubes que se hallen sobre él, se modifica el estado eléctrico del conductor, induciéndose, tensiones de carácter oscilante, las cuales provocan la producción de considerables sobretensiones [14].

Por otra parte, las descargas atmosféricas presentan muchas veces, numerosas ramificaciones y estas descargas laterales actúan induciendo también sobretensiones. Además, hay que tener en cuenta que la corriente de descarga produce líneas de fuerza que, según la dirección de la descarga con relación al conductor, inducen en éste tensiones de magnitud variable. Las instalaciones eléctricas que están equipadas con aparatos electrónicos sensibles a las perturbaciones electromagnéticas pueden verse expuestas a peligros derivados de las variaciones de sobretensión conducidas e inducidas [14].

Las descargas atmosféricas tienen una duración muy corta y una amplitud que puede ser varias veces la tensión máxima nominal de una línea de transmisión. La corriente de una descarga atmosférica además de una inducción importante y los efectos de sobretensión, produce los mismos efectos que cualquier corriente de baja frecuencia en un conductor [15]:

- ✓ Efectos térmicos: fusión en los puntos de impacto de la descarga y efecto Joule, debido a la circulación de la corriente.
- ✓ Efectos electrodinámicos: cuando las corrientes de las descargas circulan en conductores paralelos, provocan fuerzas de atracción o repulsión entre los cables, lo que produce roturas o deformaciones mecánicas en los conductores.

- ✓ Sobretensiones conducidas tras un impacto en las líneas telefónicas o en líneas aéreas eléctricas.
- ✓ Sobretensiones inducidas por el efecto de radiación electromagnética del canal del rayo que actúa como antena en varios kilómetros y lo cruza una corriente de impulso considerable.
- ✓ El aumento del potencial de tierra por la circulación de la corriente de la descarga por la tierra. Esto explica las caídas de las descargas indirectas por tensión de paso y los efectos de los equipos.

El efecto de las sobretensiones que se pueden producir en una línea de transmisión originadas por una descarga atmosférica es tan elevado frente al valor de la tensión nominal de una línea, tanto que el nivel de aislamiento de los componentes como la selección y coordinación de protecciones se realiza teniendo en cuenta el efecto de las sobretensiones atmosféricas. Una descarga atmosférica puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea afectada o pueda provocar una avería en algún otro equipo [15]. La presencia de una sobretensión de origen atmosférico en las líneas aéreas puede ser debida a uno de los mecanismos siguientes:

- ✓ La descarga cae sobre un cable de tierra o un poste, en ambos casos una parte de la corriente de la descarga termina propagándose a tierra donde originara sucesivas reflexiones que pueden dar lugar a una tensión superior a la rigidez dieléctrica del aislamiento entre poste y alguno de los conductores de fase.
- ✓ La descarga cae sobre un conductor de fase debido a un apantallamiento insuficiente del cable de tierra o a la inexistencia de este; se produce una falla si la onda de tensión supera la rigidez dieléctrica del aislamiento.
- ✓ La descarga cae en las cercanías de una línea aérea, pudiendo inducir en estas tensiones superiores al nivel de aislamiento.

- **Frecuencia de las descargas atmosféricas**

El número de descargas atmosféricas que se producen en una región determinada es de interés tanto para los ingenieros de potencia como para los ingenieros de protección contra descargas. Históricamente, la actividad de la descarga se midió en términos del número de días de truenos para cada región, también denominado nivel isocerámico como se muestra en el ANEXO I. También se han realizado algunos intentos para evaluar el número de descargas que se producen en la atmósfera mediante la medición del ruido de radio con un satélite con sonido

ionosférico. Recientemente, se han realizado avances para relacionar la actividad de la descarga global con la resonancia de Shumann (este fenómeno sucede porque el espacio entre la superficie terrestre y la ionosfera) [14].

Las resonancias de Shumann son causadas por la excitación inducida por rayos de la guía de ondas ionosférica de la Tierra. Las frecuencias de resonancia están ubicadas a 8 Hz, 16 Hz, 32 Hz, etc. Varias estimaciones que utilizan estas diferentes técnicas indican que en un momento dado hay alrededor de 1 000-2 000 tormentas eléctricas activas en todo el mundo. Una nube de tormenta aislada puede producir descargas a una velocidad de unos pocos destellos en un minuto, pero las tormentas severas pueden producir descargas a una velocidad de varias decenas de destellos por minuto, el número máximo registrado es de aproximadamente 85 destellos por minuto. En cualquier momento, las tormentas eléctricas activas en todo el mundo producen relámpagos a una velocidad de aproximadamente 20–120 s. Las actividades de las descargas sobre los océanos es aproximadamente un factor de 3 veces más pequeño que sobre la tierra [16].

El inicio de la descarga atmosférica (desglose preliminar) tiene lugar en regiones nubosas con suficiente campo eléctrico fuerte. Una descarga apenas visible se mueve paso a paso hacia la tierra. Cuando el líder se acerca al suelo, un líder ascendente se libera de objetos elevados cerca del suelo y cierra el canal de la descarga, esto inicia el golpe de retorno, que transporta la carga entre el suelo y la nube en corrientes de varios kA.

Los sensores de detección de las descargas atmosféricas reciben los componentes eléctricos y magnéticos del campo de radiación en ciertos rangos de frecuencia, se emplean bandas de baja frecuencia (LF, 30 kHz - 300 kHz) y de muy alta frecuencia (VHF, 30 MHz - 300 MHz), evitando así las bandas de comunicación y transmisión de radio. La frecuencia de detección utilizada determina el rango de detección y la precisión, también el tamaño de la antena y la sensibilidad a los diversos efectos de propagación, que dependen de la frecuencia de detección [17].

- **Clasificación de las descargas atmosféricas**

La clasificación de las descargas atmosféricas, por las características que presentan los picos de alta intensidad es decir magnitud máxima de corriente, y tiempo corto de la presencia de las mismas en la Fig. 3.5, de la siguiente forma [1]:

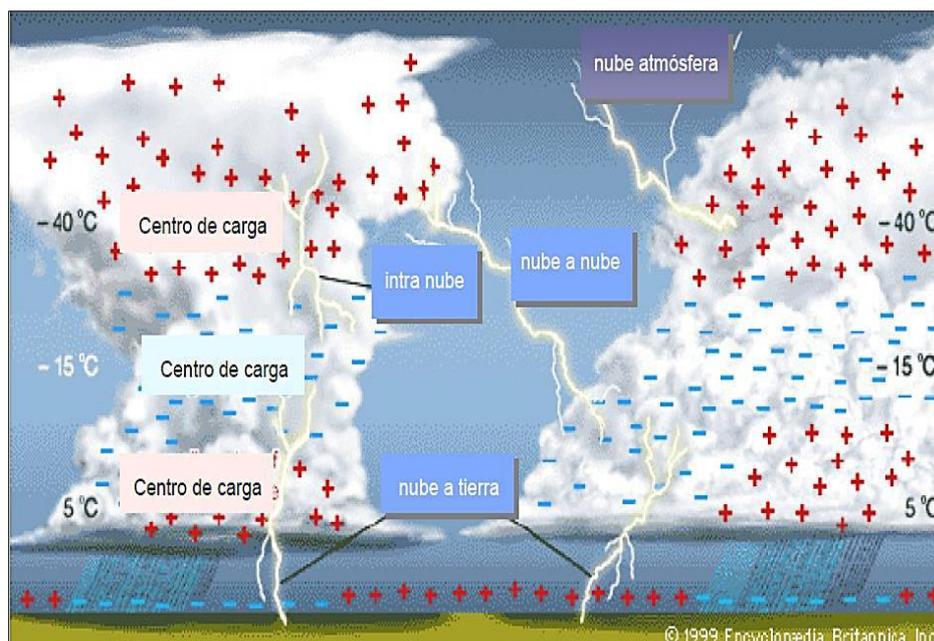


Figura 3.5: Tipos de descarga atmosféricas de acuerdo a sus diferentes características [1].

- ✓ **Descarga atmosférica frío:** Dura alrededor de 10 ms, tiene una intensidad que varía entre 10 a 220kA, es el más frecuente en la atmósfera. A este rayo se atribuye el estallamiento de los árboles, ya que provoca su violento secado. Es por ello que se le conoce como el destructor de maderas y mampostería; además, es el causante de las sobretensiones y sobre corrientes en los sistemas eléctricos.
- ✓ **Descarga atmosférica caliente:** Tienen la característica de poseer una intensidad cercana a los 100A, con una duración entre 100 y 200 veces más que el anterior, son los que producen la combustión de los materiales. Las descargas atmosféricas tienen una gran variabilidad es por ello que se las puede catalogar en diferentes tipos, en la [18], se explica la clasificación de las descargas atmosféricas en base a sus diferentes características como, por ejemplo: la intensidad, ocurrencia, manifestaciones, etc. A continuación, se presenta dicha clasificación:
- ✓ **Descarga atmosférica nube a tierra:** Es uno de los más comunes y conocidos ya que constituye una gran amenaza para las personas y estructuras pues su impacto es directo hacia la tierra desde la nube denominada cumulonimbos (nubes de gran desarrollo vertical, internamente formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatorio).
- ✓ **Descarga atmosférica tierra a nube:** Es iniciado por un trazo inicial ascendente se forma cuando iones cargados negativamente, se elevan desde el suelo y se encuentran

con iones cargados positivamente en una nube cumulonimbos, luego el rayo vuelve a tierra como trazo.

- ✓ **Descarga atmosférica nube a nube:** Este tipo de rayos suelen generarse bien entre dos nubes separadas al cual se lo conoce como rayo inter-nube o cuando se produce entre zonas de diferente potencial eléctrico, dentro de la misma nube, se denomina rayo intra-nube, este es el tipo de descarga que ocurre con mayor frecuencia.

3.2.6. Detección de campos magnéticos

- **Detección asociada a descargas atmosféricas.**

Debido a que las descargas atmosféricas generan señales electromagnéticas fuertes, pero de corta duración, las mismas que viajan a largas distancias y no se ven afectadas por obstáculos como la naturaleza o las construcciones, es posible utilizar técnicas de radio-localización para detectar su punto de impacto [12].

La descarga atmosférica en su proceso de descarga emite ondas electromagnéticas de corta duración conocida como pulso electromagnético, ubicadas en el espectro de radio frecuencia, su recepción puede lograrse fácilmente empleando técnicas de detección, pues no se debe olvidar que las ondas de radio frecuencia tiene la ventaja de recorrer grandes distancias, presentando una gran variedad de emisiones de RF en diferentes frecuencias, pues mientras el desglose preliminar y los líderes escalonados generan radiación muy fuerte en VHF (Frecuencia muy elevada), así como las ramificaciones de retorno generan radiación VHF y HF de emisiones continuas con duración de pocos milisegundos [5].

- **Efecto por Interferencia electromagnética**

Las interferencias electromagnéticas son señales de tipo electromagnético naturales o generadas por el hombre, que perturban no intencionalmente el normal funcionamiento de un sistema eléctrico o electrónico, afectando a las magnitudes eléctricas o magnéticas (tensión, corriente o campo electromagnético) de sus circuitos, aunque no lleguen a apreciarse sus efectos externamente. Cuando las interferencias perturban el funcionamiento de cualquier equipo electrónico, incapacitando para realizar la misión para la que fue diseñado, con riesgo para la seguridad de instalaciones y personas en caso de fallos [19].

Un campo electromagnético se caracteriza por su frecuencia o longitud de la onda y su intensidad, así como por la polarización (variación con el tiempo de la dirección de la intensidad de campo en un punto determinado del espacio) y la modulación empleada. Tanto la intensidad

del campo eléctrico (E) como del campo magnético (B) son magnitudes vectoriales, función de la posición y del instante, que se relacionan con las fuerzas electrostáticas y electromagnéticas.

- **Efecto por Radiaciones electromagnéticas**

La frecuencia describe el número de oscilaciones o ciclos que se producen en un segundo, mientras que la longitud de la onda hace referencia a la distancia entre una onda y la siguiente. Mientras mayor es la frecuencia, más corta es la longitud de onda [20].

Considerando a las ondas electromagnéticas como una serie de ondas uniformes que se desplazan a una velocidad muy alta (velocidad de la luz), la frecuencia simplemente describe el número de oscilaciones o ciclos que se pueden producir en un segundo, mientras que la longitud de onda hace referencia a la distancia entre una onda y la siguiente. Estas dos características están directamente relacionadas entre sí: cuanto mayor es la frecuencia. Más corta es la longitud de onda. Una característica de las ondas electromagnéticas es que son transportadas por partículas llamadas cuantos de luz. Esta tiene la característica de que los cuantos de luz de onda con frecuencia más alta (longitudes de onda más cortas) transportan más energía que los de las ondas de menor frecuencia (longitudes de onda más largas).

El espectro electromagnético representa las diferentes formas de energía radiante, donde la radiación es una forma de energía liberada que puede ser de diversos orígenes, representando el desplazamiento rápido de partículas originado por causas diversas. Las radiaciones se dividen en dos grupos: radiación ionizante y radiación no ionizante.

- **Efecto por Radiación no ionizante**

Los iones no intervienen, por lo tanto, las radiaciones están compuestas únicamente por cuantos de luz sin energía suficiente para romper los enlaces moleculares. Estas radiaciones no pueden producir ionización en un sistema biológico. Sin embargo, se ha comprobado que pueden producir otros efectos biológicos, como calentamiento, alteración de las reacciones químicas o inducción de corrientes eléctricas en los tejidos y las células, entre otros [20]. Las frecuencias típicas de fuentes de radiación no ionizante (RNI) generadas por el hombre son:

- Fuentes de campos estáticos (0 Hz), dentro de los mismos se pueden mencionar como ejemplo: Trenes de levitación magnética, sistemas de resonancia magnética para diagnóstico médico o sistemas electrolíticos de aplicación industrial-experimental.
- Campos de frecuencias extremadamente bajas e intermedias (ELF: $0 \text{ Hz} < f \leq 300 \text{ Hz}$; IF: $300 \text{ Hz} < f \leq 10 \text{ MHz}$, respectivamente): Sistemas relacionados con la generación,

transmisión y uso de la energía eléctrica (50 o 60 Hz), cocinas y hornos de inducción (300 kHz - 3 MHz) entre otros.

- Radiofrecuencias y microondas (RF/MW: $10 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$) son: Radio FM (30 – 300 MHz), teléfonos móviles y las antenas de sus estaciones base, antenas emisoras para radio y televisión, hornos de microondas, monitores de vídeo, equipos de diatermia (0.3-3 GHz), radares y sistemas de comunicación por microondas (3 - 30 GHz).

3.2.7. Detector comercial BTD-300

El detector de tormenta BTD-300 es adecuado para su uso en aplicaciones en las que tormentas eléctricas hasta 60 km (37 millas) alrededor de un lugar, serán identificadas de forma fiable. El sensor proporciona una advertencia en tiempo real de la gama de rayos y (opcionalmente) la dirección en el área local. Un aspecto único del detector es su capacidad para advertir del potencial de la sobrecarga de la tormenta antes del primer relámpago.

El detector de tormenta BTD-300 detecta los cambios rápidos en el campo eléctrico atmosférico producidos por relámpagos para detectar y extenderse a todas las formas de actividad de rayos. Las tres antenas están diseñadas exclusivamente para separar las señales de rayos del ruido y funcionar a frecuencias muy por debajo de todas las formas de transmisión de radio. Además, la lluvia, el granizo o la nieve que cae sobre el detector son analizadas para las señales de niebla generales que están fuertemente electrificadas, produciéndose la emisión de una advertencia para el potencial de tormentas eléctricas aéreas antes de que se produzca el primer rayo. Las antenas pequeñas en los aisladores se utilizan para proporcionar una alerta de fuertes campos eléctricos, que también son un indicador de la sobrecarga de actividad tormentosa en desarrollo.

Para los sitios que no cumplan estos criterios, el detector utiliza los cinco primeros relámpagos que detecte para personalizar automáticamente el algoritmo de detección para el lugar y alerta al usuario de que el rango de calibración puede ser requerido. Esta calibración de un tiempo del intervalo de rayo es sencilla y se puede hacer por el usuario o con la ayuda de Biral.

El detector requiere muy poco mantenimiento. El mantenimiento de rutina se puede realizar fácilmente por una persona en cuestión de unos pocos minutos. El estado del sensor y el rendimiento se pueden supervisar de forma remota mediante el sistema de auto-test y de seguimiento integrados. El rango de la frecuencia de funcionamiento es de 30 kHz a 3 MHz, el entorno de funcionamiento es diseñado para una temperatura de $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+55 \text{ }^\circ\text{C}$, la humedad

relativa es de 5% a 100% de condensación, con una velocidad de viento de hasta 44 m/s [21]. En el ANEXO XIX se puede observar las características del sensor comercial Biral.

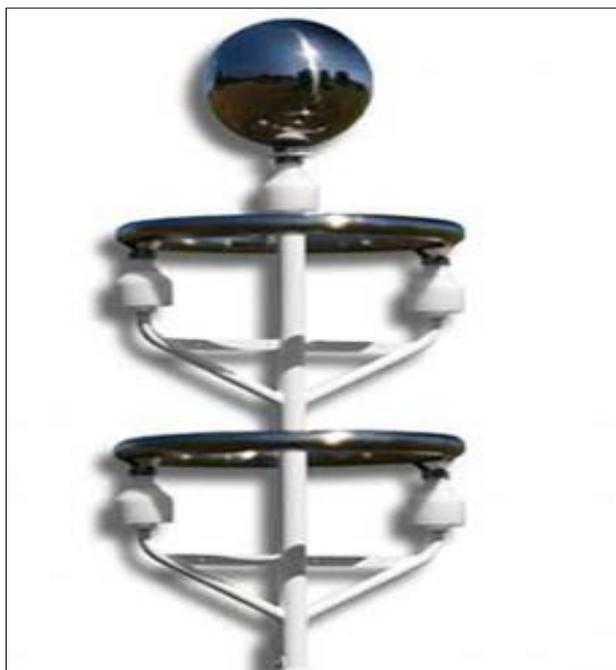


Figura 3.6: Detector de tormentas de actividad electrostática BTD300 [21].

3.2.8. Campos magnéticos en Sistemas Eléctricos.

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) consta de los subsistemas de generación, transmisión, distribución, y utilización de energía eléctrica. Toda carga eléctrica genera un campo eléctrico y toda carga eléctrica en movimiento genera un campo magnético. En este sentido, los alimentadores de distribución y cada uno de los elementos del SEP son una fuente de constante emisión electromagnética. Estos oscilan entre 50 Hz o 60 Hz y están en la parte final baja del espectro electromagnético y se refieren como los campos de extrema baja frecuencia. De esta manera, las líneas eléctricas generan un campo eléctrico cuando los cables conductores son sometidos a una determinada tensión, y un campo magnético cuando fluye una corriente eléctrica [20].

- **Medición de campos magnéticos en líneas de transmisión**

El campo magnético existe en la vecindad de una subestación o línea de transmisión es generado por la corriente que circula por los conductores. Este campo se manifiesta también por fuerzas sobre cuerpos magnéticos o sobre otros conductores por los que circula corriente.

Los niveles de referencia para exposición a magnéticos provenientes de líneas de transmisión de alta tensión en el límite de franja de servidumbre, serán los señalados en la Tabla

3.2. Las mediciones se ejecutan siguiendo los procedimientos establecidos en el estándar ANSI/IEEE 644-1994, según lo indicado en la Norma Técnica Ambiental.

Estos elementos generan tanto campo eléctrico como magnético de frecuencia industrial, cuya intensidad dependerá de diversos factores geométricos y de su diseño, así como de la tensión de funcionamiento, potencia transportada, disposición de los elementos, número de conductores, distancia entre conductores, etc.

Tabla 3.2: 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 [22].

Nivel de Tensión (kV)	Campo Magnético (uT)	Ancho de franja de servidumbre.
230	83	30
138	83	20
69	83	16

Para la medición de campo magnético, existen menos errores debido a la perturbación, comparado con el campo eléctrico. El equipo de prueba se puede sujetar con un mango dieléctrico corto, sin que afecte los valores medidos. Los efectos de proximidad de dieléctricos y malos conductores, no magnéticos, se consideran como despreciables. De manera general, el procedimiento para medición de campos magnéticos en las cercanías de las líneas de transmisión es el siguiente:

- ✓ El campo magnético bajo una línea de transmisión deberá medirse a una altura de 1 metro sobre el nivel del suelo. Si se realizan mediciones a otras alturas, estas deberán ser explícitamente indicadas.
- ✓ Para medir los campos no perturbados, es decir en ausencia de persona y objetos con materiales magnéticos o conductores, estos deberán estar alejados del punto de medición a una distancia de tres veces la dimensión del objeto más grande.
- ✓ Para obtener mediciones precisas en un ambiente perturbado, la distancia entre el equipo de prueba y los objetos magnéticos permanentes deberá ser por lo menos 1m.
- ✓ Para obtener una descripción completa de los campos magnéticos en un punto de interés, deberán medirse los campos máximos y mínimos con sus orientaciones en el plano del campo elíptico [23].

- **Medición de campos magnéticos en subestaciones eléctricas**

Las subestaciones eléctricas constituyen los nodos de la red de transporte, y su función consiste en distribuir la energía por cada línea en función de la generación y consumo de cada zona y transformarla a tensiones inferiores para alimentar a la red de media tensión, que es la que suministra a centros urbanos y grandes industrias [24].

Para obtener el valor de intensidad de campo eléctrico y magnético en subestaciones debe realizarse la medición de la componente vertical y el valor rms de la resultante de campo eléctrico y magnético en cada punto, seleccionando al menos dos perfiles perpendiculares entre sí, que cubran la totalidad de la subestación, con una separación medida de 1 o 2 metros, tratando de involucrar aquellos puntos más bajos de conexión y por donde se tenga mayor circulación de corriente.

Por ser la subestación un lugar donde se encuentran una gran cantidad de equipos eléctricos, la variación espacial del campo magnético es una de las características más importantes a determinar. Para conocer su variación en el espacio se emplea el método del mapeo, que consiste en realizar un recorrido a lo largo y ancho del sitio, identificando las zonas con iguales valores de campo [23].

Tabla 3.3: Rangos de inducción campo magnético Operación de diferentes subestaciones [25].

Nivel de Tensión (kV)	Campo Magnético (uT)
69	18
110	30
220	43
500	110

- **Medición de campo magnético generado por una descarga atmosférica**

En la Tabla 3.4, resume los efectos de campo de las descargas atmosférica, cuantificando la intensidad de campo magnético estático a distintas distancias del punto de caída de la descarga. Según [19], la duración media de una descarga se considera que es de aproximadamente 30 us. Además, para una la longitud de la descarga de 3 km, la energía media total por descarga es de aproximadamente 3×10^8 J. Así, la potencia media por descarga es de unos 10^{13} W. Cada descarga consta de 4 descargas por término medio separados unos 40 ms. Considerando la

energía y las 100 descargas/segundo que caen, la energía eléctrica global total disipada en un año es de próximamente 10^9 kWh [26].

Tabla 3.4: Campo magnético estático generado por el rayo (A/m), en función de la intensidad del rayo, medido a distintas distancias del punto de impacto [26].

Pico de intensidad del rayo (kA)	Campo magnético generado por el rayo (A/m)		
kA	TESLA (10 metros)	TESLA (100 metros)	TESLA (10000 metros)
10	3,24E-06	3,20E-08	3,84E-10
20	6,44E-06	6,40E-08	7,64E-13
30	9,64E-06	9,60E-08	1,164E-12
70	2,24E-05	2,24E-07	2,64E-12
100	3,24E-05	3,24E-07	3,84E-12
140	4,44E-05	4,44E-07	5,44E-12
200	6,40E-05	6,40E-07	7,6E-12

4 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1 HIPÓTESIS O FORMULACIÓN DE PREGUNTA CIENTÍFICA

Al diseñar y desarrollar un sensor de campo magnético se podrá detectar variaciones de campos magnéticos que emularán una descarga atmosférica y serán registradas.

4.2. METODOLOGÍA

4.2.1. Método experimental

El método experimental se entiende la aplicación de un conjunto de manipulaciones, procedimientos y operaciones de control, de tal forma que proporcionan información no ambigua sobre el fenómeno que se trata de estudiar [27]. Dicho método permite diseñar el sensor de tal forma que se realiza una comparación con una antena ya diseñada, eligiendo así los parámetros de construcción del sensor.

Por otra parte, para validar el funcionamiento del sensor de campo magnético se realizó pruebas de laboratorio con un transformador para ensayos de disrupción, que tiene la capacidad de 5kVA/ 50 kV – AC/DC, este transformador es la fuente de generación de campos electromagnéticos para que, el prototipo detecte las variaciones de campo magnético emitidas por el transformador a distintos niveles de voltaje.

4.2.2. Método Analítico

Este método “consiste en la extracción de las partes de un todo, con el objeto de estudiarlas y examinarlas por separado, consiste en descomponer el todo en sus partes, con el único fin de observar la naturaleza y los efectos del fenómeno. Sin duda, este método puede explicar y comprender mejor el fenómeno de estudio, además de establecer nuevas teorías [28].

El método analítico ayuda a la extracción de información referente a las descargas atmosféricas y el campo magnético que estos generan para ser analizadas, una vez comprendido el fenómeno se procede a la implementación de un equipo que detecte campo magnético, posteriormente permita registrar la cantidad de descargas atmosféricas.

4.2.3. Método Sintético

Su principal objetivo es lograr una síntesis de lo investigado; por lo tanto, posee un carácter progresivo, intenta formular una teoría para unificar los diversos elementos del fenómeno estudiado; a su vez, el método sintético es un proceso de razonamiento que reconstruye un todo, considerando lo realizado en el método analítico. Sin duda, este método permite comprender la esencia y la naturaleza del fenómeno estudiado [28].

Este método es de vital importancia para sintetizar lo obtenido en el método analítico para realizar la construcción de la antena de lazo, el circuito electrónico del acople de la antena, el filtro de pasa banda y el registro del número de descargas atmosféricas ocurridas en un determinado lugar.

4.2.4. Investigación bibliográfica

Es aquella que consiste en la revisión de material bibliográfico existente con respecto al tema a estudiar. Se le considera un paso esencial porque incluye un conjunto de fases que abarcan la observación, la indagación, la interpretación, la reflexión y el análisis para obtener bases necesarias para el desarrollo de cualquier estudio [29].

Fue tomada en cuenta para la búsqueda de información relevante de las descargas atmosféricas y los parámetros del campo magnético en los diferentes libros, proyectos y trabajos ya realizados, la información encontrada es una base para el desarrollo y aplicación para construir el sensor.

4.2.5. Investigación Correlacional

Es aquel tipo de estudio que persigue medir el grado de relación existente entre dos o más conceptos o variables [29]. Es importante para la relación que existe entre las variables que son campo magnético y la corriente inducida, la misma que llevan a dar una solución al problema planteado, sin las variables no se puede realizar la investigación.

4.2.6. Operacionalización de Variables

Variable independiente: Campo magnético

Tabla 4.1: Características de la variable independiente.

Concepto	Características de la variable	Unidades	Instrumentos
Campo magnético: Es un campo de fuerza creado como consecuencia del movimiento de cargas eléctricas.	Intensidad de campo magnético Campo Magnético	A/m μT	Sensor

Variable dependiente: Corriente Inducida

Tabla 4.2: Características de la variable independiente.

Concepto	Características de la variable	Unidades	Instrumentos
Corriente inducida: Se da bajo el principio de la inducción electromagnética, donde un campo magnético alterno induce corriente sobre un material conductor.	Voltaje	V	Sensor
	Resistencia	Ohmios	
	Corriente Inducida	A	

4.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para construir el prototipo, es necesario partir de un diseño de sensor que permite medir campo magnético y en función de ello puede detectar variaciones respecto a un valor de referencia. En primera instancia, se determinaron los parámetros de diseño del sensor, partiendo de trabajos realizadas previamente por investigadores del campo de estudio de descargas atmosféricas. A continuación, se describen las variables que intervienen en el diseño.

4.3.1. Antena de lazo

Basado en las investigaciones de Aleksandr Popov [4], quien desarrollo la primera antena constituida por un hilo metálico que captaba oscilaciones eléctricas, de manera que pudiera percibir las ondas electromagnéticas, hasta realizar la primera antena de comunicación sin hilos, se puede definir a las antenas como dispositivos diseñados para recibir o emitir ondas electromagnéticas.

Una antena de lazo básicamente está constituida por una o más espiras conductoras formando un cuadrado, hexágono, octágono o círculo, con dimensiones físicas que pueden variar desde las pequeñas de 30 o 40 cm de diámetro, hasta las mayores de varios metros, según la frecuencia y el rendimiento esperado. De manera general, puede ser clasificada como eléctricamente pequeña o eléctricamente grande. La primera es aquella cuyo perímetro de la antena es menor a una décima parte de la longitud de onda de la señal ($P < \lambda/10$). Eléctricamente grande son aquellas cuyo perímetro de la antena es aproximadamente del tamaño de la longitud de onda ($P \sim \lambda$). La antena de lazo presenta una gran direccionalidad y su patrón de radiación es similar al de una antena dipolo, como se observa en las Fig. 4.1 y Fig. 4.2.

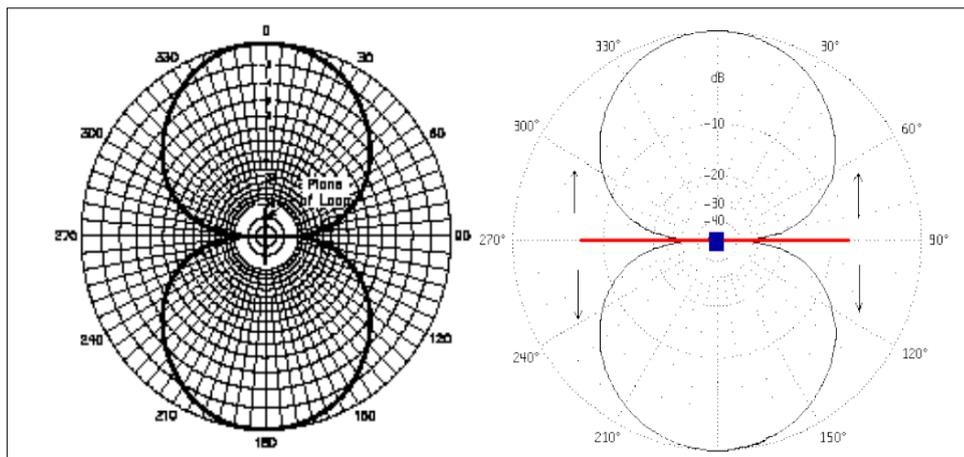


Figura 4.1: El patrón de radiación de un pequeño lazo (izquierda), es muy similar a un dipolo (derecha) [5].

Las antenas de lazo son de amplia versatilidad y de bajo costo de construcción. La ley de Faraday establece que el voltaje en los extremos abiertos de una antena de lazo es igual a la razón de cambio del flujo magnético a través de esta [5].

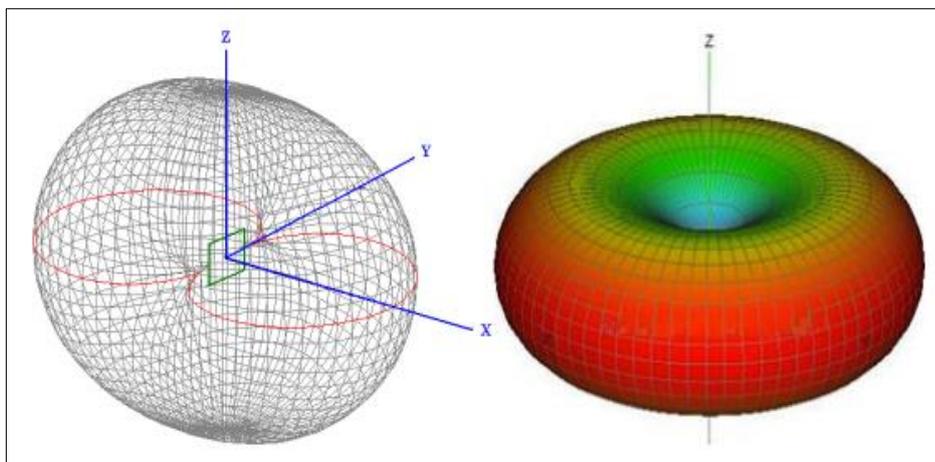


Figura 4.2: Una rebanada horizontal del diagrama de radiación en el plano XY se resalta en rojo (izquierda), diagrama de radiación de una antena dipolo (derecha) [5].

Las características de una antena de lazo se describen a continuación.

- ✓ Resistencia de Lazo: Cuando la frecuencia es lo suficientemente baja para que el radio del conductor sea pequeño comparado con el coeficiente profundidad de penetración, la distribución de corriente se puede considerar uniforme.
- ✓ Capacitancia de Lazo: La reactancia asociada a la capacitancia parásita del lazo único es despreciable comparada con la reactancia inductiva a bajas frecuencia.

- ✓ Puesto que se asume una distribución uniforme de las corrientes sobre la longitud del lazo, no existe carga neta en ningún sitio a lo largo del lazo en la operación en estado estable.
- ✓ Inductancia de Lazo: Depende principalmente de sus características geométricas, el número de vueltas o espiras de alambre que constituyen el devanado y del material del núcleo sobre el cual se realiza el embobinado de la misma.
- ✓ Su altísima ganancia la hace una excelente antena en presencia de señales intensas en las cercanías tanto en frecuencia como en geografía. Especialmente interesante para emplear como receptoras.
- ✓ Permite recepción de ondas magnéticas.
- ✓ Debido a su forma cerrada, tiene una atenuación notable en la recepción comparada con otras antenas, es esta atenuación quien muchas veces permite sacar las señales más débiles del fondo de la nada.
- ✓ Puede ser construido para cualquier banda, limitando solo el espacio disponible para colocarla. La forma del lazo puede ser distorsionada o inclinada considerablemente sin afectar demasiado el desempeño de la antena.
- ✓ Es más, o menos portable y de fácil instalación.

- **Principio de funcionamiento**

La antena de lazo se usa comúnmente en su modo receptor cuando una onda incide al plano de la antena, entonces genera un voltaje de circuito abierto en las terminales de la antena, el cual depende del área de la antena y de la magnitud de la densidad del flujo magnético, normal al plano.

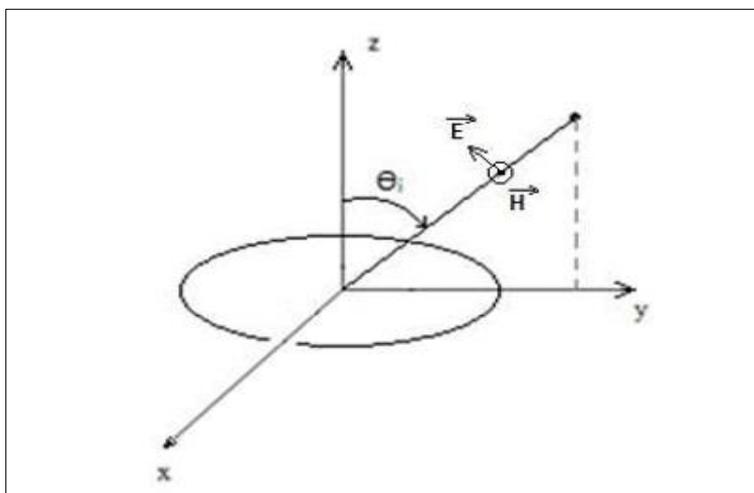


Figura 4.3: Incidencia del campo magnético por descarga normal al plano XY [5].

La inductancia de la espira habitualmente está sintonizada por un condensador variable. La antena se acopla a la línea de transmisión por medio de un eslabón o un acoplamiento capacitivo. Aunque puede parecer que la antena se encuentra en un cortocircuito entre las dos terminales, en realidad lo que ocurre es que la corriente al encontrarse con un conductor resonante empieza a irradiar, dando funcionamiento a la antena. Cuando el lazo se ubica en posición vertical, la irradiación ocurre con mayor direccionalidad en un plano perpendicular al del alambre.

4.3.2. Selección de la forma de la antena

Se diseña una antena cuadrada debido a que el conductor no es rígido y da mayor factibilidad del diseño a diferencia de la circular y siendo una de las geometrías más populares. Para el diseño del sensor se utiliza una antena tipo lazo, caracterizada por tener mayor efectividad al campo magnético que al campo eléctrico, dado que se traba en bandas de media VLF y que el ruido en el campo eléctrico es mucho mayor en las bajas frecuencias, la antena lazo resulta más apropiada. Además, la antena de lazo puede tomar múltiples formas como: circular, eclipse, cuadrado, rectangular, triangulo, etc [5].

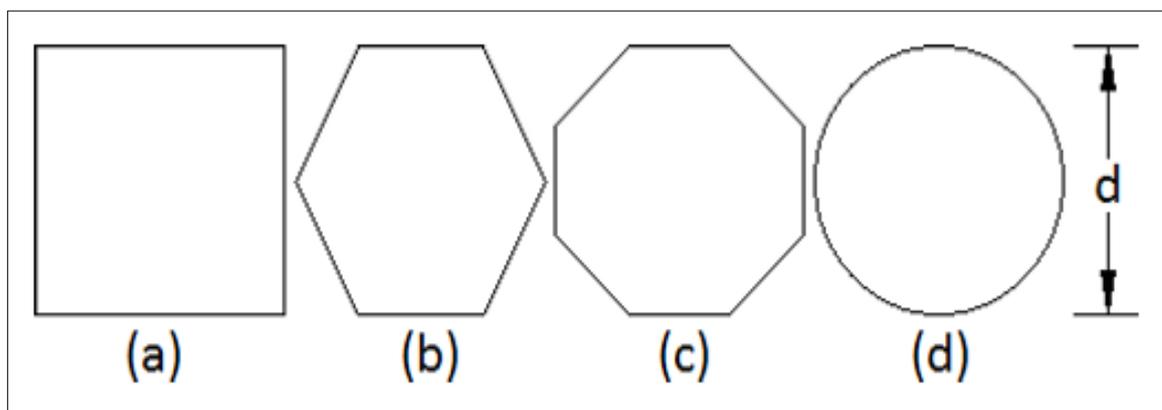


Figura 4.4: Antena de lazo: (a) cuadrada, (b) hexagonal, (c) octagonal y (d) circular [5].

Para el cálculo del área de la antena en m^2 , se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_a = Kd^2 \quad (4.1)$$

$$A_a = Kd^2 = d^2 \quad \text{donde } K = 1$$

$$A_a = Kd^2 = 0,8660d^2 \quad \text{donde } K = \frac{3 \tan(30)}{2}$$

$$A_a = Kd^2 = 0,8284d^2 \quad \text{donde } K = \frac{2+2\sqrt{2}}{3+2\sqrt{2}}$$

$$A_a = Kd^2 = 0,7854d^2 \text{ donde } K = \frac{\pi}{4}$$

La apertura efectiva o área efectiva, es un parámetro empleado en las antenas en recepción para la antena de lazo se calcula de la siguiente manera:

$$A_e = A_a N \quad (4.2)$$

Donde:

A_e : Área efectiva, m^2 .

A_a : Área de la antena, m^2 .

N: Número de vueltas.

Para la selección de la forma de la antena de lazo se realiza cálculos con la ecuación (4.1), con una misma altura de $d=25$ cm y el mismo número de vueltas que son 14 vueltas calculadas:

$$(a) A_a = d^2 = (1)(0.25m)^2 = 0,0625 m^2$$

$$(b) A_a = 0,8660d^2 = 0.8660(0.25m)^2 = 0,054125 m^2$$

$$(c) A_a = 0,8284d^2 = 0.8284(0.25m)^2 = 0,051775 m^2$$

$$(d) A_a = 0,7854d^2 = 0.7854(0.25m)^2 = 0,04908 m^2$$

A continuación, se calcula la sección efectiva de las antenas, utilizando la ecuación (4.2):

$$(a) A_e = A_a N = (14)(0,0625 m^2) = 0,875 m^2$$

$$(b) A_e = A_a N = (14)(0,054125 m^2) = 0,7577 m^2$$

$$(c) A_e = A_a N = (14)(0,051775 m^2) = 0,7248 m^2$$

$$(d) A_e = A_a N = (14)(0,04908 m^2) = 0,6872 m^2$$

La antena de lazo con forma cuadrada es la que alcanza una mayor área y por ello alcanza la mayor apertura efectiva con $0,875 m^2$, la apertura efectiva representa la porción del frente de onda que físicamente capta la antena y envía toda su potencia hacia la carga.

4.3.3. Selección del tamaño de la antena

El investigador Colombiano Oscar Puerta [7], en su trabajo desarrollado el diseño de antena de lazos para medición de campo magnético producido por descargas atmosféricas, construye una antena cuadrada con una dimensión de 28 cm cada lado, para posteriormente desarrollar una segunda antena con una dimensión de 30 cm dando como resultado una antena eléctricamente pequeña, la antena de lazo trabaja en rangos de frecuencia de 100 kHz-4 MHz, con el fin de que

la hora de integrar la señal sean filtradas las oscilaciones indeseadas y no interfieran con las oscilaciones propias de la señal medida.

En [30], realizan un proyecto de investigación con el tema diseño e implementación de antena de cuadro para radio onda media en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, para lo cual desarrollan una antena cuadrado de 60 cm de dimensión, permite mediciones en puntos más cercanos a las fuente de radiaciones, lo que es muy útil para la evaluación de exposiciones de tipo ocupacional, fueron realizadas un total de 141 mediciones, para frecuencias de 540 kHz y 700 kHz. Finalmente, en la Universidad Nacional de Colombia, [5] realiza una antena cuadrada de 50 cm de dimensión para la detección, localización y monitoreo de descargas atmosféricas, el nivel de la detección no es tan sensible, solo detecta descargas de media o corta proximidad, se empleó de nuevo sistema transmisor para una señal de 10 kHz.

En base a los diseños desarrollados en investigaciones anteriores, se plantea construir una antena de lazo cuadrada de 25 cm de lado, para un rango de operación de 10 kHz a 15 kHz, las antenas de estas dimensiones tienen mayor sensibilidad al componente de onda electromagnética, las ondas atraviesan la antena perpendicularmente al plano de la espira se anularán las unas con las otras, mientras que aquellas que la atraviesan paralelamente al plano de la espira causaran una corriente máxima.

4.3.4. Elección del conductor

Para el diseño de la antena se utiliza alambre de cobre # 23 AWG barnizado, el alambre de cobre puede doblarse infinitamente, enroscarse ajustadamente y jalarse con fuerza sin estirarse ni romperse.

La sección del conductor influye de gran manera en la percepción del campo magnético, a mayor sección mayor resistividad al flujo de electrones generados al campo magnético, y a menor sección es muy propenso a captar todas las señales de un rango cercano a la antena [31].

4.3.5. Cálculo del número de vueltas del alambre

Una antena de lazo es un circuito LC sintonizado para una frecuencia en particular. Cuando la impedancia inductiva es igual a la impedancia capacitiva, la antena entra en resonancia. La frecuencia de resonancia es expresada en la siguiente formula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.3)$$

f_0 : Frecuencia de resonancia en Hz.

L: Inductancia de la antena en Henrios.

C: Capacitancia de la antena en Faradios (1nF).

Una antena de lazo consiste de un enrollado o bobina inductiva, el cual es soportado sobre un cuadro, y un capacitor variable con el cual se logra sintonización a diferentes frecuencias. La antena se debe diseñar para una banda de 12 kHz que es la frecuencia de resonancia. Así se toma el valor de del condensador de 500 pF, existente en el mercado comercial.

Varios estudios han evidenciado que cuando se simulan descargas atmosféricas mediante ensayos de laboratorio la confiabilidad de los resultados no siempre es la deseada pues frecuentemente presentan una gran diferencia con las medidas obtenidas del fenómeno real, lo que fortalece la idea de estudiar las presentes en la naturaleza.

Las descargas emiten señales electromagnéticas en un rango de 1 Hz hasta 300 MHz aproximadamente, con una fuerte presencia de armónicos entre 5 y 15 kHz, en esta franja del espectro se diseña el sensor de campo magnético, ya que la atenuación tierra-ionosfera es baja es por esto que se asume el rayo como una emisora que irradia en la banda de 10 kHz a partir de esta premisa se diseña el sensor receptor [5].

Retomando a la fórmula de resonancia se puede obtener un valor fijo de inductancia correspondiente a la bobina, despejando la inductancia de la ecuación (4.1), para obtener el valor de la inductancia:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C} \quad (\text{H})$$

$$L = \frac{1}{(2\pi * 12000)^2 (500 * 10^{-12})}$$

$$L = 0,3518 \text{ H}$$

Una vez que se obtiene la ecuación de la inductancia, para el cálculo del número de vueltas del alambre:

$$L = N^2 \frac{2\mu_0 \mu_r w}{\pi} \left[\ln \left(\frac{w}{a} \right) - 0.774 \right]$$

Donde:

L: Inductancia calculada de la antena.

N: Número de vueltas del alambre.

w: Largo de cada lado del cuadrado (cm).

a: Radio del alambre (cm) usado para construir la antena.

μ_r : Permeabilidad relativa del medio (la permeabilidad del aire, para propósitos prácticos, es 1 en el sistema CGS).

μ_0 : Constante física de permeabilidad en el vacío ($4\pi * 10^{-7}$) H/m.

De la fórmula planteada se procede a despejar la variable N, para el cálculo del número de vueltas:

$$N = \sqrt{\frac{L}{\frac{2\mu_0\mu_r w}{\pi} \left[\ln\left(\frac{w}{a}\right) - 0.774 \right]}} \quad (4.4)$$

Donde:

L: Inductancia calculada.

w: 25 cm

a: 0.05 cm

μ_r : 1

μ_0 : ($4\pi * 10^{-7}$) H/m.

Una vez ingresado todos los valores nos da un resultado del total de vueltas del alambre:

N = 14 Vueltas.

El respectivo proceso de cálculo se lo realiza en el lenguaje de programación Matlab, aplicando ecuaciones anteriores expuestas en el ANEXO VI.

4.3.6. Cálculo de la inductancia de la antena de lazo

En los estudios realizados anteriormente de receptores de señales como antenas de lazo, un receptor puede ser representado como un circuito con impedancia, capacitancia e inductancia de lazo los mismos que sirven para el diseño y la precisión de la antena.

La antena de lazo cuadrado trabaja considerando que cada uno de sus lados es un pequeño dipolo lineal de corriente constante. Principalmente la antena constará por cables envueltos en una estructura donde los factores de diseño pueden ver en la siguiente Fig. 4.5.

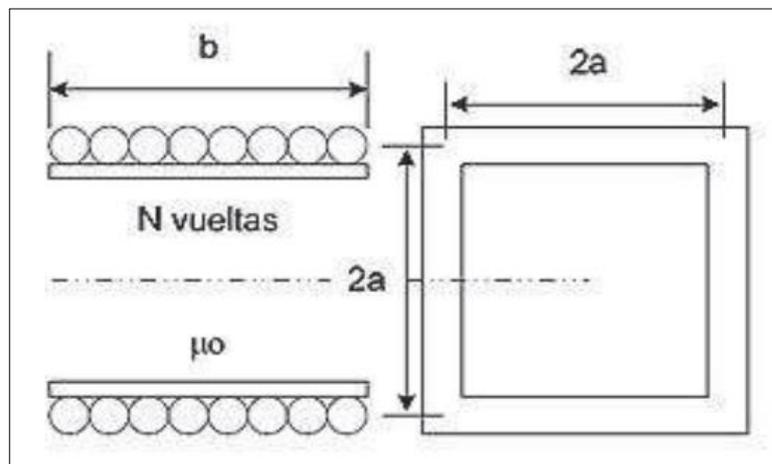


Figura 4.5: Estructura del cableado del receptor [24].

La propiedad que tienen las bobinas al ser inducidas por un campo viene dada por:

$$L = \mu_0 N^2 a \left(\frac{4}{\pi} \right) \left[\ln \left(1 + \frac{\pi a}{b} \right) + \frac{1}{3,64 + \frac{2b}{a} + 0,51 \left(\frac{b}{a} \right)^2} \right] \quad (4.5)$$

Donde:

L: Inductancia de resonancia (μF)

N: Número de vuelta = 10

a: Medio lado del lazo de la antena (m) = 0,125 m

b: Longitud del devanado ($N \cdot \text{diámetro del cable}$ (m))

$$b = 14 * 0,00057 \text{ m}$$

$$b = 0,00798 \text{ m}$$

Reemplazando se tiene:

$$L = (4\pi * 10^{-7})(14)^2 a \left(\frac{4}{\pi} \right) \left[\ln \left(1 + \frac{\pi * 0,125 \text{ m}}{0,00798 \text{ m}} \right) + \frac{1}{3,64 + \frac{2(0,00798 \text{ m})}{0,125 \text{ m}} + 0,51 \left(\frac{0,00798 \text{ m}}{0,125 \text{ m}} \right)^2} \right]$$

$$L = 1,64 \text{ mH}$$

4.3.7. Resistencia de la antena de Lazo

- **Resistencia de radiación**

Al inducirse energía por el conductor por la influencia del campo magnético y eléctrico se genera una corriente constante donde se generan pérdidas por la estructura física de la antena y longitud de onda de las señales que inducen el campo.

$$R_{\text{rad}} = 31,171 * N^2 * \left(\frac{S^2}{\lambda^2}\right) \quad (4.6)$$

Donde:

R_{rad} : Resistencia de radiación (Ω)

S : Área de la antena (m^2)

$$S = 0.25 \text{ m} * 0.25 \text{ m} = 0.0625 \text{ m}^2$$

λ : Longitud de onda (m)

En primer lugar, se procede a calcular la longitud de onda aplicando la siguiente ecuación aplicadas a antenas en general:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.7)$$

Donde C es la velocidad de la luz cuyo valor es $3 * 10^{10}$ cm, y f es la frecuencia en Hz. Se sustituye los valores en la ecuación (4.7):

$$\lambda = \frac{3 * 10^{10} \text{ cm}}{15000 \text{ Hz}} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 20 \ 000 \text{ m}$$

Se procede a reemplazar en la ecuación de la resistencia de radiación:

$$R_{\text{rad}} = 31,171 * N^2 * \left(\frac{S^2}{\lambda^2}\right) \quad (4.8)$$

$$R_{\text{rad}} = 31,171 * N^2 * \left(\frac{(0.0625 \text{ m}^2)^2}{(20 \ 000 \text{ m})^2}\right)$$

$$R_{\text{rad}} = 5,9663 * 10^{-8} \ \Omega$$

- **Resistencia DC del conductor**

El conductor en si produce una resistencia al flujo de la corriente DC y en estas pérdidas solo influyen las características del tipo de conductor:

$$R_{DC} = L * \left(\frac{\rho}{\pi r^2} \right) \quad (4.9)$$

L: Longitud del devanado (m): $2(a) * 4 * N$

$$L = (0,25 \text{ m})(4)(12)$$

$$L = 14 \text{ m}$$

ρ : Resistividad del conductor (cobre): $\rho = 16,78 * 10^{-9}(\Omega\text{m})$

r: Radio del conductor (m): $r = 0,000287 \text{ m}$

$$R_{DC} = 14 \text{ m} * \left(\frac{16,78 * 10^{-9}(\Omega\text{m})}{\pi(0,000287 \text{ m})^2} \right)$$

$$R_{DC} = 0,9078 \Omega$$

- **Resistencia AC del conductor**

Se debe considerar también las pérdidas debidas a la parte AC del conductor, se debe indicar que por lo general este valor se desprecia, pero en el diseño de las antenas se considera para tener mayor precisión en los cálculos:

$$R_{AC} = \left(\frac{L}{2\pi r} \right) \sqrt{\pi * \mu_0 * f * \rho} \quad (4.10)$$

Donde:

L: Longitud del devanado (m)

$$L = 2(a) * 4 * N$$

$$L = (0,25 \text{ m})(4)(12) = 14 \text{ m}$$

ρ : Resistividad del conductor (cobre): $\rho = 16,78 * 10^{-9}(\Omega\text{m})$

r: Radio del conductor (m): $r = 0,00057 \text{ m}$

f: Frecuencia en Hz

$$R_{AC} = \left(\frac{14 \text{ m}}{2\pi(0,00057 \text{ m})} \right) \sqrt{\pi(4\pi * 10^{-7})(15000\text{Hz})(16,78 * 10^{-9}(\Omega\text{m}))}$$

$$R_{AC} = 0,2447 \Omega$$

- **Resistencia total de la Antena de Lazo**

Para la obtención de este parámetro se suman todas las resistencias presentadas en el sensor para encontrar la impedancia total que servirá para comprobar el circuito equivalente.

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{rad}} + R_{\text{DC}} + R_{\text{AC}} \quad (4.11)$$

$$R_{\text{Total}} = 5,9663 * 10^{-8} \Omega + 0,9078 \Omega + 0,2447 \Omega$$

$$R_{\text{Total}} = 1,1525 \Omega$$

4.3.8. Capacitancia experimental del lazo

Para el cálculo de la capacitancia experimental se utiliza los valores calculados....

$$C_{\text{exp}} = \left(\frac{L_{\text{Lazo}}}{R_{\text{Total}}^2 + \omega^2 + L_{\text{Lazo}}^2} \right) \quad (4.12)$$

$$C_{\text{exp}} = \left(\frac{L_{\text{Lazo}}}{R_{\text{Total}}^2 + \omega^2 + L_{\text{Lazo}}^2} \right)$$

$$C_{\text{exp}} = 1,174007 * 10^{-9} \text{ F}$$

4.3.9. Circuito equivalente de la antena

Se colocan los valores obtenidos de la inductancia, capacitancia y la resistencia en el circuito siguiente:

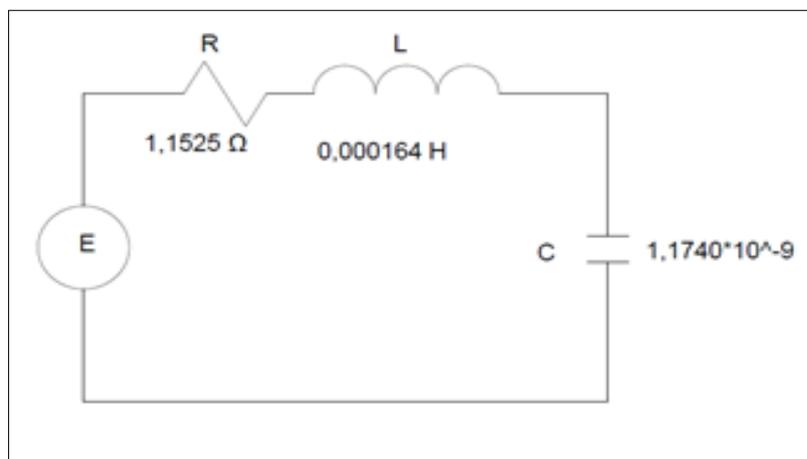


Figura 4.6: Circuito equivalente de la antena.

4.3.10. Selección del material para la estructura de la antena de lazo

Para el diseño se utiliza canaleta de polietileno que proporciona a la antena una mayor protección en contra de interferencias electromagnéticas, el uso del mismo es para evitar utilizar materiales conductores y mucho menos ferromagnéticos, en los cuales el aumento del campo magnético les origina una variación del flujo diferente de la variación original una disminución

igual de campo magnético, conserva la imanación cuando se suprime el campo, aparece una gran inducción magnética al aplicarse un campo magnético [32].

Debido a la composición de policloruro de vinilo en la canaleta es, uno de los polímeros más usados debido a sus propiedades inherentes. Es resistente a la abrasión y al impacto, ligero, impermeable, química y biológicamente inerte, duradero y resistente al fuego, no arde salvo en caso de estar en presencia de llama continua.

El PVC es un material termoplástico (Los termoplásticos son un tipo de material plástico o deformable, que al calentar pasan a un estado viscoso o fluido; y pasan a un estado vítreo, frágil al enfriar suficientemente). Esta propiedad les permite que bajo la acción del calor se reblandezca, y que puede así moldear fácilmente; y al enfriarse recupera la consistencia inicial y conserva la forma que se pretendía obtener.

El PVC es inmune a casi todos los tipos de corrosión experimentados en sistemas de tuberías subterráneas. Como el PVC no es conductor, los efectos galvánicos y electroquímicos no existen. Tiene una excelente resistencia a la degradación y/o deterioro causado por acción de microorganismos (hongos y bacterias) o macroorganismo (termitas).



Figura 4.7: Antena de lazo.

Cuando son sometidos a permanentemente a la radiación ultravioleta del sol, las canaletas PVC pueden sufrir daños superficiales, por lo que se recomienda emplear compuestos especiales para este fin o protegerlos con recubrimientos adecuados [33].

Las propiedades del PVC lo hacen atóxico, no migratorio, o sea que no reacciona con los elementos y compuestos residentes en los sueños, ni materiales de construcción, logrando además que el material transportado, por ningún motivo, contamine el entorno.

4.3.11. Selección de la antena

En la Tabla 4.3, en el caso 1 y 2, son de trabajos realizados por investigadores [7] y [30] para frecuencias de diferente valor, el caso 3 son los parámetros de la antena lazo construido.

Tabla 4.3: Tabla de comparación de los parámetros de la antena de lazo.

CARACTERÍSTICAS	CASO 1	CASO 2	CASO 3
Inductancia de Lazo (μH)	3,647	10,50	1,64
Resistencia de radiación (Ω)	1,51n Ω	31,9191 n Ω	0,5966 n Ω
Resistencia DC del conductor (Ω)	0,04785	0,1025	0,9078
Resistencia AC del conductor (Ω)	0,3670	0,7864	0,2447
Resistencia total del lazo (Ω)	0,41448	0,889	1,1525
Capacitancia (pF)	47,28	93,466	1,17
Frecuencia (Hz)	12,12 MHz	4 MHz	12 kHz
Tamaño	30 cm	60 cm	25 cm

La tabla propuesta anteriormente selecciona el diseño de la antena de lazo para una frecuencia de 12 kHz, en caso de la inductancia propia de la antena es tanto mayor en cuanto más delgado sea el alambre, mayor sea el tamaño de la antena y mayor número de vueltas tenga el mismo en caso en los dos casos de comparación son de mayor tamaño y de diferentes números de vueltas del conductor, en el caso tres se tiene menor frecuencia de funcionamiento y menor tamaño.

La resistencia de radiación la antena de lazo en el caso 3 es mayor debido a que el rango de operación de frecuencia es menor que los otros dos casos, cuando se procede al cálculo de la longitud de onda, dan como un valor de 20 km, en este parámetro la frecuencia juega un papel importante para el cálculo del valor de resistencia de radiación.

La resistencia DC del conductor en el caos tres tiene un valor demasiado alto a diferencia de los otros casos, porque el caso número de vueltas y por diámetro del conductor utilizado. La resistencia total de la antena de lazo es la sumatoria de la resistencia de radiación más la resistencia DC del conductor y la resistencia AC del conductor, sumando todos da un valor mucho mayor en el caso 3 en comparación al caso 1 y 2, debido a que la resistencia de DC del conductor y mayor a otros casos.

La capacitancia en el caso 3 es demasiado inferior a los otros casos, es por la resistencia total del lazo, la capacitancia es calculada en función de la inductancia del lazo sobre la resistencia total.

4.4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

Para construir el prototipo, es necesario realizar el tratamiento de la señal captada por la antena de lazo que permita procesar el valor de las variaciones del flujo magnético para dar como resultado el valor del campo magnético.

4.4.1. Simulación del circuito electrónico pasa banda

El filtro pasa banda que está constituido por un LM358 cumple con la función de reaccionar en banda de frecuencia que se comprende entre 10 kHz y 15 kHz. Es un circuito electrónico que, para este diseño no permite el paso de señales cuyas frecuencias. Se ingresa valores de las frecuencias comprendidas f_1 y f_2 , para calcular la relación de frecuencia:

$$f_0 = \sqrt{f_1 * f_2} \quad (4.13)$$

Se calcula el factor de calidad (Factor Q), es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva que almacena y la energía que disipa durante un ciclo completo de la señal. Mientras el factor de Q será mayor indica una tasa baja de pérdida de energía en relación a la energía almacenada, la ecuación (4.14) muestra como calcular el factor Q .

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (4.14)$$

La resistencia y capacitancias son calculas de igual manera utilizando las fórmulas siguientes:

C_1 y R_3 forman la retroalimentación y la maximización cerca de $f_0(Q)$.

C_1 y R_1 estos son encargados de proporcionar la respuesta al pasa baja.

C_2 y R_3 proporcionan la respuesta al pasa alta.

R_2 eleva la R_{ent} y ofrece una ganancia controlable de banda de paso.

Para ajustar Q variando la razón de R_3/R_1 manteniendo constate el producto $R_1 * R_3$.

Se ajusta la ganancia con R_2 .

Donde A = Ganancia, $C_1 = pF$, $C_2 = pF$ se elige.

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_0 A C_1} \quad \Omega \quad (4.15)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi f_0 Q C_1} \quad \Omega \quad (4.16)$$

$$R_3 = R_4 = \left(\frac{Q^2}{Q^2 + A} + 1 \right) = \frac{Q}{2\pi f_0 C_1} \quad \Omega \quad (4.17)$$

Los respectivos cálculos de los valores obtenidos para los elementos electrónicos del filtro pasa banda se encuentran en el ANEXO VII, valores utilizados disponibles en el mercado: $C_2=1$ nF; $C_1=25$ nF; $R_1=220$ Ω ; $R_2=100$ k Ω y $R_3=R_4=20$ k Ω .

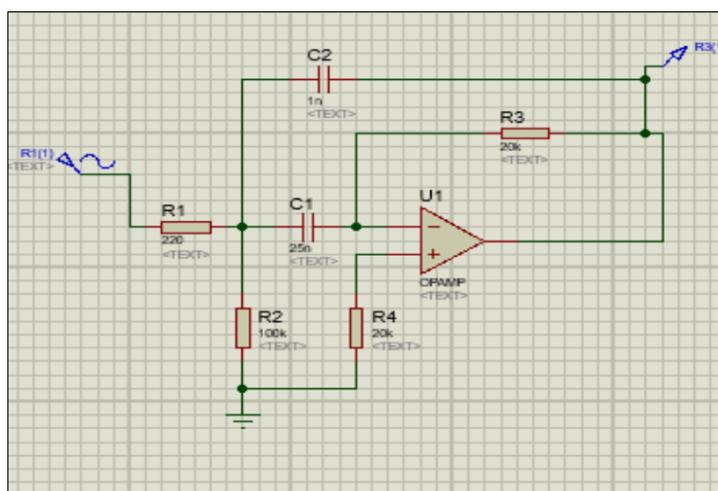


Figura 4.8: Filtro pasa banda.

4.4.2. Tratamiento de la Señal

La señal detectada por la antena es flujo magnético que se induce en la antena, dichos campos deben tener un valor pico, mediante la ecuación de Faraday se procesa para obtener el valor del voltaje, seguido determinar la onda del campo magnético, el valor del campo magnético obtenido lo procesa Arduino, enviándola a la interfaz de LabView en donde se procesa mediante ecuaciones para la obtención de los valores de corriente e intensidad de campo magnético.

- **Circuito acoplamiento de antena**

El circuito electrónico se divide en tres partes, la primera es un acoplamiento para la antena en donde recibe la información, la modulación en amplitud funciona mediante la variación de la amplitud de la señal transmitida en relación con la información enviada, en la que varía el valor del flujo magnético que se índice en la antena de lazo. Para esto se utiliza una resistencia en la entrada de la señal de antena de 50 Ω , el mismo que ingresa a las pines 2 y 3 de un integrador de AD620 para ser amplificado el voltaje diferencial entre el ingreso de antena, esto es conectado a la 1 del integrador un potenciómetro de 50 k Ω , ya misma que se retroalimenta a la

al pin 8 del integrador conectado mediante una resistencia de $100\ \Omega$, los pines 7 y 4 están alimentados con un voltaje de 12 V, el pin 6 se conecta al filtro pasa banda.

Luego, está un circuito compuesto con un LM353, debido a que la antena de lazo mide la derivada de la densidad del flujo magnético con respecto al tiempo, para obtener una señal proporcional a la densidad del flujo es necesario una etapa de integración dando como resultado el valor del voltaje inducido. La compensación externa para el voltaje de entrada se realiza mediante la resistencia de $100\ k\Omega$ y $10k\Omega$.

4.4.3. Comunicación

- **Interfaz Arduino**

Arduino es un software de código abierto (libre) de fácil programación, al ejecutar el programa Arduino se crea un nuevo proyecto de nombre Sketch y dispone de comandos como: verificar, subir, nuevo, abrir y salvar [34]. El interfaz es encargado de recibir las variaciones del flujo magnético inducido en la bobina, para luego procesar en voltaje inducido, y dar el valor de campo magnético, además es encargado de enviar la información a la interfaz de LabView para poder observar la variación del registro y el conteo, procesa la información de registrar la información mi micro SD para posteriormente ser retirada y obtener los valores almacenados.

Además, en su programación interna es aquel que registra los valores recibidos la comunicación entre la interfaz de LabView, se determina un setPoint (valor de referencia), de manera que, los valores que sobre pasen la referencia, son registrados como descarga detectada o el valor máximo de variación de campo magnético. Arduino, en su entrada puede percibir hasta 5 V, se toma la referencia de 1 voltio equivalente a 1 microtesla. A continuación, se muestra una captura de pantalla de la interfaz con la programación asociada a este proyecto:



```
Codigo Arduino 1.8.9
Archivo Editor Programa Herramientas Ayuda

Codigo
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

unsigned long timeold=0;
// Constructor de la librería de LCD 16x2

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); //
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(13,OUTPUT);
  digitalWrite(13,LOW);
  Serial.begin(9600); // velocidad de comunicacion serial nativo
```

Figura 4.9: Interfaz Arduino.

- **Interfaz LabVIEW**

LabVIEW es un lenguaje G (es representado mediante diagramas, mas no en texto) y, a la vez un entorno de programación gráfica en el que se pueden crear aplicaciones de una forma rápida y sencilla. Por este motivo los programas creados en LabVIEW se guardarán en ficheros llamados VI (Virtual Instrument). De una forma similar, también se da nombre a sus dos ventanas principales: un instrumento real tendrá un Panel Frontal donde estarán sus botones, pantallas, etc. y una circuitería interna. Estas partes reciben el nombre de Panel Frontal y Diagrama de Bloques respectivamente [35]. Se muestra la pantalla frontal en la Fig. 4.10.

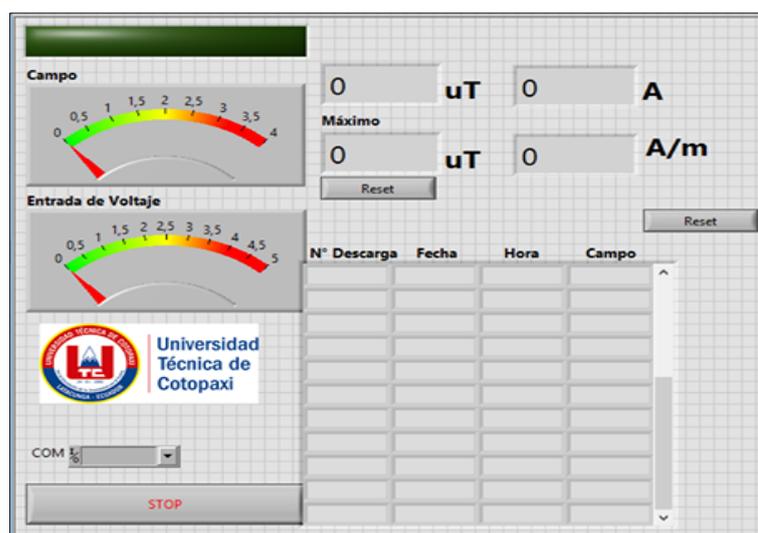


Figura 4.10. Interfaz LabView.

En LabView se procesa la información enviada por el Arduino para dar valores de campo magnético, corriente inducida e intensidad de corriente, además de contar con un registrador del número de las variaciones del campo magnético o descargas atmosféricas, valor del campo magnético, hora y fecha. Se puede observar en el ANEXO X. La comunicación del Arduino y LabView es elemental, LabView es quien envía la orden del rango en el cual será considerada como descarga atmosférica (setPoint).

4.4.4. Selección de Materiales

En la selección de materiales para el diseño de la antena de lazo, se ha explicado en el capítulo 4.2., para el tratamiento de la señal se utiliza elementos electrónicos. A continuación, se presenta el listado de los materiales utilizados en el desarrollo del prototipo:

- Arduino Uno
- Amplificador de instrumentación AD620

- Amplificador operacional Dual LM353
- Circuito integrado LM358
- Potenciómetros lineales
- Pantalla LCD
- Microprocesador
- Baterías LiPo
- Una canaleta de PVC

4.5. Validación del prototipo

4.5.1. Medición de campo magnético

El elemento que genera el campo magnético es una bobina de tesla que se encuentra ubicada dentro de una Jaula de Faraday, bobina de tesla cuenta con un variador de potencia de 0 a 50 kV, para emular la descarga se introduce el voltaje, a la bobina esta conectado un AWG # 10, el mismo que genera la descarga.

Las mediciones de campo magnético se lo realizan con el sensor de campo magnético construido y con el sensor disponible en la Universidad Técnica de Cotopaxi, para posteriormente realizar una comparación y detallar el margen de error del prototipo, el sensor utilizado es de especificaciones EMF 450 EXTECH INSTRUMENTS para frecuencias de 50/60 Hz, las unidades en microteslas y miliGauss, para la comparación se utiliza las unidades de microteslas.

- **Campo magnético dentro de la Jaula de Faraday**

Se calcula matemáticamente el valor del campo magnético generado por el transformador de disrupción dentro de la Jaula de Faraday sin arco eléctrico. Tenemos como dato la corriente máxima de 0.5 mA en el variador de voltaje del transformador.

Para demostrar el valor del campo magnético máximo que puede generarse en la Jaula de Faraday se realiza el análisis de la siguiente ecuación (3.7):

$$v = \frac{d\phi}{dt}$$

$$v = \frac{N_i d}{R dt}$$

Se realiza el cálculo de la reluctancia magnética (resistencia que la Jaula de Faraday posee al paso de un flujo magnético cuando es influenciado por un campo magnético).

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (A * \text{Vueltas/Weber})$$

Para calcular el área de la Jaula se tiene las siguientes medidas

Lado (l)=6.20m,

Altura (h)=2.50m

Base (b)=4.60m.

Área de la Jaula de Faraday

$$A = 2(l * b + l * h + b * h)$$

$$A = 2((6.20 * 4.60) + (6.20 * 2.50) + (4.60 * 2.50))$$

$$A = 111.04 \text{ m}^2$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$\mu = \left(4\pi * 10^{-7} \text{ T} * \frac{\text{m}}{\text{A}}\right) (1)$$

$$\mu = 4\pi * 10^{-7} \text{ T} * \frac{\text{m}}{\text{A}}$$

$$R = \frac{6.20 \text{ m}}{(4\pi * 10^{-7})(111.04 \text{ m}^2)}$$

$$R = 44455.20 \text{ A} * \text{vueltas/Weber}$$

El equipo que genera la descarga tiene una potencia 3 kVA y el voltaje de 5 kV

Se tiene una corriente de $I = 0,06\text{A}$

$$\Phi_{\max} = \frac{Ni}{R} j\omega$$

$$j\omega = 2\pi f$$

$$\Phi_{\max} = \frac{Ni}{R} 2\pi f$$

$$\phi_{\max} = \frac{(50 \text{ vueltas})(0.06 \text{ A})}{44455.20 \text{ A} * \frac{\text{vueltas}}{\text{Weber}}} 2\pi(60 \text{ Hz})$$

$$\phi_{\max} = 0,00254 \text{ Weber}$$

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad \text{T}$$

$$B = \frac{0,00254 \text{ Weber}}{111.04 \text{ m}^2}$$

$$B = 0,228 * 10^{-4} \text{ T}$$

$$B = 22,8 \text{ uT}$$

El campo magnético generado dentro la Jaula de Faraday sin producir una descarga esta entre el rango 22,8 uT como máximo. Por lo general el campo magnético (B) no es constante en su magnitud ni en su dirección sobre la superficie.

- **Mediciones realizadas**

Para las pruebas del funcionamiento del prototipo, se realizó en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad, utilizando el transformador para ensayos de disrupción que tiene una capacidad de 5 kVA con un voltaje regulable de 0 a 50 kV, el cual se encuentra dentro de la Jaula de Faraday que encierra el flujo magnético producido por el transformador. El voltaje aplicado en el transformador es controlado mediante un tablero de control que incluye voltímetros analógicos para visualizar los valores aplicados al transformador, como se muestra en la Fig. 4.11.



Figura 4.11: Transformador de Disrupción y la mochila de control.

En la Tabla 4.4, se muestra una comparación de los valores de campos magnéticos tomados con el sensor patrón y el prototipo, en la primera columna se observa las diferentes distancias desde el transformador de disrupción con relación al instrumento de medida, para realiza una comparación de datos medidos entre el sensor EMF450 y el prototipo se los realiza a diferentes niveles de voltaje, determinando el margen de error en los valores obtenidos.

Tabla 4.4. Tabla de comparación del prototipo con el patrón.

Distancia (m)	Voltaje (kV)	Patrón de medición	Valores medidos del prototipo	Error de medición (%)
1	10	0,07 μ T	0,10 μ T	3
1	15	0,15 μ T	0,17 μ T	1,2
1	20	0,17 μ T	0,19 μ T	1,1
1	30	0,30 μ T	0,25 μ T	1,7
2	30	0,17 μ T	0,10 μ T	4,1
3.40	10	0,10 μ T	0,12 μ T	1,7
3.40	20	0,15 μ T	0,18 μ T	1,7

- **Valores de Corriente inducida e intensidad de campo magnético**

Los valores obtenidos del campo magnético en laboratorio utilizando el transformador de disrupción, no son muy altos, se conoce que una corriente eléctrica que circula por un conductor genera a su alrededor un campo magnético cuya magnitud depende de la intensidad de la corriente eléctrica. La corriente y la intensidad del campo magnético son calculadas mediante las ecuaciones descritas a continuación, para ello se toma en cuenta la longitud del solenoide y la permeabilidad del vacío en el caso de transformadores con material ferromagnético.

l: Longitud del solenoide = 1,2 cm = 0,012m

$$\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$B = 22,870 \text{ uT} = 0.000002287 \text{ T}$$

$$I = \frac{Bl}{\mu_0 N} \text{ A}$$

$$I = \frac{(0.000002287 \text{ T})(0.012 \text{ m})}{\left(4 * \pi * 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}\right)} (14)$$

$$I = 0,015 \text{ A}$$

$$H = \frac{Ni}{l} \quad \text{A/m}$$

$$H = \frac{(14)(0.015 \text{ A})}{0.012\text{m}} = 17,5 \text{ A/m}$$

4.5.2. Registro del campo magnético en función de la posición de la antena

Para el registro del campo magnético se realiza ensayos a diferentes ángulos, con la finalidad de determinar el ángulo con mayor incidencia del flujo magnético. Se realizaron pruebas de laboratorio con el sensor patrón y el prototipo en un ángulo de 0° como se muestra en el ANEXO XVII, cuando se encienden y no existe ningún elemento que genere CEM, el sensor patrón marca 0,23 microteslas en cuanto que el prototipo mide 0,01 microteslas, posteriormente se aplica un voltaje en el transformador de disrupción de 20 kV generando campo magnético y obteniendo los resultados como se muestra en la siguiente

Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Valores de campo magnético a 0°.

Ángulo	Patrón (μT)	Prototipo (μT)
0°	2,76	1,93
0°	2,78	1,88
0°	2,70	1,67

Para un ángulo de 45 grados, el sensor patrón se mantiene en una posición específica de cero grados y marca 0,62 μT, en cuanto que el prototipo da un valor 0,18 μT para la posición de 45°.

Tabla 4.6: Valores de campo magnético a 45°.

Ángulo	Patrón (μT)	Prototipo (μT)
45°	2,86	2,37
45°	2,87	2,17
45°	2,87	2,50

Para una posición del prototipo en un ángulo de 90° al momento de encender registra un valor de 0,02 μT y el sensor patrón se mantiene en cero grados marcando 0,38 μT, una vez que se genera un campo magnético los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Valores de campo magnético a 90°.

Ángulo	Patrón (μT)	Prototipo (μT)
90°	2,86	2,47

90°	2,86	2,28
90°	2,85	2,08

Cada uno de los ejemplos presentados con diferentes ángulos, tienden a variar el campo magnético debido al nivel de voltaje que se le aplica en el transformador y la posición de la antena a diferentes ángulos, en siguiente Tabla 4.8 se muestra un resumen de los valores obtenidos a diferentes ángulos:

Tabla 4.8. Campo magnético a diferentes ángulos de posición de la antena.

Ángulo	Patrón (μT)	Prototipo (μT)
0°	2,76	1,88
45°	2,86	2,50
90°	2,86	2,47

De acuerdo a los valores reflejados en la tabla anterior demuestra, que la antena en un ángulo de 45° grados es en donde tiene mayor recepción, los valores obtenidos en los equipos se puede observar en el ANEXO XVII.

4.5.3. Conteo de variaciones de campo magnético

Las descargas atmosféricas generan señales electromagnéticas fuertes, pero de corta duración, complejas de generar en laboratorio. Si bien la IEC 60071-1 establece que los ensayos a equipos para impulso tipo rayo deberán ser de relación 1,2 / 50 μs , los equipos necesarios para generar tales señales no se disponen en el laboratorio de alta tensión. Por ello, en este trabajo se propone utilizar el transformador para ensayos de disrupción y suponer que cada disrupción representa el cambio brusco en el campo magnético de la zona generado por una descarga atmosférica. Es así que frente a variaciones de campo con respecto a una referencia se registrará el número de descargas emuladas. Al momento desarrollar el conteo de las variaciones de campo magnético la antena se encuentra en una posición de 90° referente a la bobina, se toma cada segundo, con un setpoint de 1,28 μT para ser registrada por el sensor. El punto de referencia se utiliza para determinar el rango en el cual serán considerados como descargas, las mismas que son emuladas en el laboratorio, la simulación de las descargas depende del voltaje.

En la Fig. 4.12, se muestra un caso de las 5 pruebas que se realizó, en cual se puede observar en la primera columna es el número de las descargas registradas, en la segunda columna esta la fecha en la que se registró, la tercera columna a la hora que se desarrolló la variación y por último el valor del campo magnético.

N° Descarga	Fecha	Hora	Campo
1	6/2/2020	14:38	0,803000
2	6/2/2020	14:38	0,797000
3	6/2/2020	14:39	0,800000
4	6/2/2020	14:39	0,794000
5	6/2/2020	14:40	0,797000
6	6/2/2020	14:40	0,797000
7	6/2/2020	14:41	0,795000
8	6/2/2020	14:42	0,798000
9	6/2/2020	14:43	0,797000
10	6/2/2020	14:43	0,797000

Figura 4.12. Conteo de variaciones de campo magnético.

El proceso de emulación de descargas atmosféricas en el laboratorio, se realizó 5 bloques de pruebas con distinto número de descargas, tomando en cuenta que en 5 bloques existe un total de 72 descargas emuladas, las cuales 64 fueron registradas por el prototipo, en cada registro se realizó el margen de error el cual se puede observar en la Tabla 4.9.

En el conteo de las variaciones de campo magnético, detecta el valor pico generado, al momento de emular en laboratorio una descarga, el campo magnético tiende a aumentar, las descargas tienden a tener un valor de corriente en kA, en las pruebas realizadas en laboratorio se registra el pico del campo magnético la hora, fecha y el valor con el cual se generó.

Tabla 4.9: Registro de variaciones de campo magnético.

Número	Variaciones realizadas	Variaciones registradas	Error (%)
1	10	7	3
2	15	10	3,3
3	8	5	3,7
4	10	6	4
5	16	10	3,7
Total	72	64	3,54

En la anterior tabla se tiene un total de 72 descargas emuladas en el transformador de disrupción y el prototipo registra un total de 64, cada valor registrado es almacenado con el valor del campo magnético, fecha y hora. En el ANEXO XIV, se puede observar con detalle el registro del

conteo de las descargas generadas, en los laboratorios de alto voltaje, y los valores extraídos de la microSD en el ANEXO XV.

4.5.4. Pruebas en SEP

Los elementos de un sistema eléctrico de potencia, se generan campos magnéticos por los niveles de voltaje que transportar o transforman, los valores medidos se pueden observar en el ANEXO XVIII.

- **Medición en líneas de Subestación**

Las pruebas de medición de campo magnético se las realiza en la Subestación Montalvo, parroquia Montalvo de la provincia de Tungurahua, subestación de reducción de 69/13.8 kV de capacidad de 10/12.5 MVA, con un transformador de marca WEG, perteneciente a la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A. Para realizar el registro de los valores obtenidos se realizar con el formato de obtención de datos de la IEEE. Se puede de igual manera observar en el ANEXO XVI en la versión original.

A. Voltaje de la Subestación kV/ corriente

Nominal	69/13.8 kV -418.37/522.96 A
Actual	39837/7967 V

B. Conductores de línea y cables de sobrecalentamiento.

Tipo	.....
Diámetro (cm)	.....
Longitud (m)	.....
Relación de los conductores por fase	.....
Configuración de la línea	.....

C. Condiciones atmosféricas

Temperatura (°C)	28 °C
Humedad Relativa	64 %
Presión atmosférica (Pascal)	74600 pascal
Velocidad del viento (m/s)	116 m/s
Lluvia	NO

D. Torres

Metal	SI
Madera	.....
Otros	.....

Boceto con dimensiones	.....
E. Armónicos	
Contenido, porcentaje	.....
Naturaleza de la fuente (por ejemplo carga industrial)	.....
Distancia de la fuente (m)	.....
F. Número de Mediciones	3
G. Instrumento	
1. Tipo medidor	
Fabricante	EXTECH Instruments
Modelo	Modell EMF450
2. Sonda y circuito de acondicionamiento de señal	
Descripción	Con opciones de tono programables
Dimensiones	115 x 60 x 21mm
Circuito equivalente	.....
Frecuencia	50/60Hz
Características direccionales	
El EM450 está equipado con tres sensores aéreos individuales para medir los CEM.	
Indicación de sobrecarga (OL) se aplica a los tres ejes (X, Y y Z).	
Efecto corona	.....
Efectos de:	
Campo eléctrico	50V/m a 2000V/m
Campo magnético	2/20/200μT
Temperatura	5°C~40°C
Humedad	90 %
Características obtenidas	
Mediciones multicampo: Campo magnético, campo eléctrico e intensidad de radiofrecuencia (RF)	

El sensor patrón es del fabricante EXTECH instruments, el modelo es EMF450, su rango de medición es de 0 a 200 microteslas, a frecuencias de 50 y 60 hZ, uno de datos importantes del sensor es que si se mueve el sensor rápidamente se mostrarán condiciones actuales del campo., este efecto lo causan las cargas electrostáticas. Tiene una escala de frecuencia de 50 MHz a 3.5 GHz.

Una característica que se toma en cuenta en una subestación es la temperatura de las bobinas, el valor registrado es de 42° C, la temperatura del aceite es de 44 °C. Las mediciones realizadas con el prototipo y el patrón no se realizaron ninguna normativa de medición de campos magnéticos, los valores más altos son registrados a una distancia 0,80 metros de las bobinas del transformador y los valores menores fueron registrados a una distancia de 1,50 metros con respecto a los bobinados con una altura promedio entre 1,20 a 1,50 metros desde suelo al equipo de medición, el transformador es el corazón de una subestación, el mismo que genera mayor campo magnético. En la Tabla 4.10 se muestra los valores que recopilamos:

Tabla 4.10: Tabla de valores de campo magnético en la subestación Montalvo.

Prototipo	Patrón
1,74 μ T	2,49 μ T
1,45 μ T	2,17 μ T
2,87 μ T	2,32 μ T
2,79 μ T	3,22 μ T
3,56 μ T	5,52 μ T
3,18 μ T	3,53 μ T
1,89 μ T	1,36 μ T

Medición en la línea de Transmisión

Recopilación de los valores medidos para la línea de transmisión se lo realiza en la línea de 220 kV Totoras-Riobamba con una longitud a 42,9 km, la medición se lo realiza en el cantón Mocha. Al igual que en las líneas transmisión los campos magnéticos generados por las subestaciones eléctricas sobrepasan el nivel de valor que puede detectar el sensor. De ahí que, en ciertos valores el sensor ha llegado a la saturación. A continuación, los datos asociados a la fuente de CEM.

A. Voltaje de la línea kV/ Corriente

Nominal	220 kV
Actual	237.5 kV

B. Conductores de línea y cables de sobrecalentamiento.

Tipo	ACSR Bluejay 1113
Diámetro (cm)	3,2 cm

Longitud (m)	42900 m
Relación de los conductores por fase	.....
Configuración de la línea	.....
C. Condiciones atmosféricas	
Temperatura (°C)	20 °C
Humedad Relativa	70 %
Presión atmosférica (Pascal)	75600 pascal
Velocidad del viento (m/s)	120 m/s
Lluvia	NO
D. Torres	
Metal	SI
Madera	.....
Otros	.....
Boceto con dimensiones	.....
E. Armónicos	
Contenido, porcentaje	.....
Naturaleza de la fuente (por ejemplo carga industrial)	.....
Distancia de la fuente (m)	.....
F. Número de Mediciones	3
G. Instrumento	
3. Tipo medidor	
Fabricante	EXTECH instruments
Modelo	Modell EMF450
4. Sonda y circuito de acondicionamiento de señal	
Descripción	.....
Dimensiones	.....
Circuito equivalente	.....
Frecuencia	60 Hz
Características direccionales	.....
Efecto corona	.....
Efectos de	
Campo eléctrico y magnético	X
Temperatura	.....
Humedad	.....

Características obtenidas

.....

Las mediciones tomadas son en 45 y 0 grados con respecto a la línea de transmisión debido a que la línea es aérea y se encuentra en una posición horizontal, en una línea el campo magnético es constante debido a la corriente y el voltaje se transporta en ella, se realizó debajo de la línea, y los valores menores tomados son a una distancia de 5 metros.

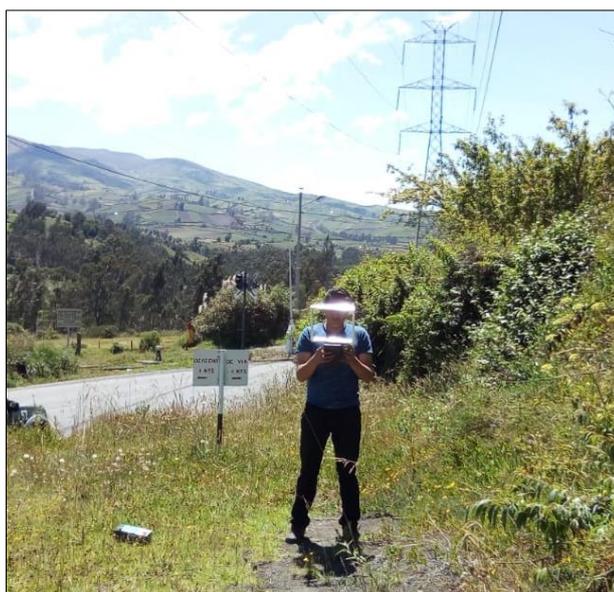


Figura 4.13: Toma de medidas en la Línea de Transmisión de 230 en mocha, ángulo 45 grados de la antena.

En la Tabla 4.11, e muestra las mediciones de campo magnético de la línea de transmisión Totoras-Riobamba. Los valores obtenidos del campo magnético en la línea no varían porque el voltaje y la corriente de la línea son aparentemente constante, el campo magnético puede variar por la temperatura.

Tabla 4.11: Tabla de valores de campo magnético en la Línea de Transmisión.

Prototipo	Patrón
1,50 μT	2,05 μT
3,37 μT	2,30 μT
3,51 μT	2,87 μT
3,54 μT	2,75 μT
3,55 μT	2,75 μT
3,56 μT	2,87 μT

4.5.5. Análisis de Resultados

Los resultados obtenidos en laboratorio utilizando como fuente generadora de CEM el transformador para ensayos de disrupción, indican que, el error promedio obtenido durante las mediciones del sensor respecto al patrón EMF 450 EXTECH es de 1,1 %. Mientras que, el error máximo 4,1 %.

Por otra parte, los valores obtenidos en la subestación Montalvo de la Empresa Eléctrica Ambato S.A. son superiores a los del laboratorio, debido fundamentalmente a que se trabaja con valores de corriente elevados en el lado de baja tensión 522,96 A en la subestación. Si se considera que, el sensor patrón y el prototipo se encuentran a 80 cm del transformador, los resultados del sensor patrón fueron de 3,22 μT y en el prototipo 2,79 μT , como se muestra en la tabla Tabla 4.10. La posición de la antena fue colocada en 45° , con respecto a las bobinas del transformador. Respecto al registro de valores en la línea de transmisión en Mocha el sensor patrón registro valores entre 2.75 a 2.87 μT , mientras que en el prototipo registraba entre 3.54 a 3.75 μT , como se muestra en la Tabla 4.11. Para ello la antena se encuentra ubicada debajo de las líneas de transmisión en una posición de 45° y 0° .

En lo que respecta al conteo de las descargas atmosféricas, los ensayos realizados en laboratorio permiten determinar que, dado un valor de referencia (1.28 uT), el sensor registra el número de veces que el campo magnético excede dicho valor. Esto aplicado a descargas reales requeriría que el sensor se coloque en una posición tal que, permita identificar el número de veces en que el campo magnético excedió los valores de referencia, suponiendo que el campo magnético que genera una descarga atmosférica en promedio de 1 a 5 uT.

Se conoce que una descarga atmosférica es un fenómeno natural de una capacidad increíble en corriente, el sensor puede detectar descargas que tiene una corriente de 10 kA a 10 metros con un valor de 3.24 microteslas según investigaciones realizadas, por su protección y por la capacidad que tiene, el valor mencionado se lo puede observar en la Tabla 3.4.

En el caso de que la variación del campo magnético supere el valor de 5 microteslas, el amplificador de instrumentación AD620 protege al circuito electrónico, el sensor registra el máximo de su capacidad y se mantendrá el valor máximo, en caso de que la descarga atmosférica fuera directa en el sensor sufriría daños en toda su construcción.

4.6. EVALUACIÓN TÉCNICO, SOCIAL, AMBIENTAL Y/O ECONÓMICO

4.6.1. Económica

La inversión para el diseño del sensor de campo magnético, se ha dividido en dos componentes que son: gastos directos e indirectos, el mismo que se encuentran detallados en las Tabla 4.12 y Tabla 4.13 sus valores correspondientes.

Gastos Directos.

Estos gastos directos se relacionan con la compra de los elementos y equipos usados en el diseño del sensor de campo magnético, en la Tabla 4.12 se detalla los equipos.

Tabla 4.12: Presupuesto de equipos y materiales utilizados.

Detalle	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Arduino Mega	1	\$ 25,00	\$ 25,00
AD620	1	\$ 9,00	\$ 9,00
Lm353	1	\$ 2,50	\$ 2,50
Porta integrados de 8 pines	3	\$ 0,60	\$ 1,80
Lm358	1	\$ 0,80	\$ 0,80
Resistencias	8	\$ 0,10	\$ 0,80
Potenciómetros lineales	2	\$ 0,75	\$ 1,50
Estaño (metros)	1	\$ 0,50	\$ 0,50
Borneras	5	\$ 0,50	\$ 2,50
Capacitores	4	\$ 0,40	\$ 1,60
Alambre de cobre galvanizado (metros)	40	\$ 0,26	\$ 10,40
Modulo micro SD para arduino	1	\$ 4,00	\$ 4,00
Módulo RTC real time clocks	2	\$ 4,00	\$ 8,00
Cargador básico balanceador Lipo Turnigy 12V	2	\$ 35,00	\$ 70,00
Baterías Lipo Turnigy 7.4 V-1000 mAh	2	\$ 40,00	\$ 80,00
Placa	1	\$ 5,00	\$ 5,00
Caja	1	\$ 12,00	\$ 12,00
Pantalla LCD	1	\$ 24,00	\$ 24,00
Adaptador de antena	1	\$ 0,60	\$ 0,60
Acrílico	1	\$ 60,00	\$ 60,00
TOTAL			\$ 320,00

Gastos Indirectos

Estos gastos van a influir en el proyecto de una manera indirecta, pero que son necesarios para la elaboración del sensor de campo magnético, la misma que se detalla en la siguiente Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Presupuesto de equipos y materiales utilizados.

Detalle	Cantidad	V. Unitario	V. Total
Alimentación	20	\$ 2,50	\$ 75,00
Alojamiento	1	\$ 80,00	\$ 80,00
Transporte	60	\$ 3,00	\$ 180,00
Varios	2	\$ 45,00	\$ 90,00
TOTAL			\$ 425,00

$$GD + GI = \$ (320,00 + 425,00)$$

$$10 \% \text{ de imprevistos} = \$ 745,00 * 10\% = \$ 74,50$$

$$GT = GD + GI + 10 \% \text{ de imprevistos}$$

$$GT = \$ 320,00 + \$ 425,00 + \$ 74,50 = \$ \mathbf{819,50}$$

4.6.2. Evaluación Técnica

Este proyecto constituye la construcción de un sensor de campo magnético para detectar descargas atmosféricas, el equipo está creado para detectar, cuantificar y visualizar los valores del campo magnético y la corriente inducida durante la descarga, aunque las pruebas se han realizado en laboratorio tomando un valor de referencia respecto al que el sensor registra el número de variaciones por encima de la referencia. Además, este sensor permite el almacenamiento del número total de descargas y la posterior extracción de los datos en una computadora.

Este equipo contribuirá al desarrollo práctico a los estudiantes en la materia de Alto Voltaje, Diseño de Alto Voltaje y relacionadas, facilitando la detección del campo magnético y la corriente inducida en laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi, aparatos electrónicos, subestaciones eléctricas, líneas de alta tensión e incluso descargas atmosféricas. Para ello se han desarrollado guías de práctica y manual de usuario de los ANEXOS XX y XXI.

4.6.3. Evaluación ambiental

El sensor diseñado no presenta ningún componente dañino para el medio ambiente, ya que está diseñado para captar variaciones de campo magnético y su tamaño es pequeño a diferencia de las antenas de telecomunicaciones que son grandes estructuras perturbadoras, su estructura es completamente amigable con el medio debido a que está fabricado por una pequeña cantidad acrílico de vidrio. Además, tiene una permeabilidad ante lluvias y polvos. Se debe tener en cuenta que el sensor cuenta con baterías LiPo que deben ser bien tratadas debido a que su vida útil suele medir por ciclos de carga, es decir que las baterías soportan más de 300 ciclos de carga, pero si no se tiene un adecuado cuidado puede llegar solo 50 ciclos de carga.

4.6.4. Evaluación social

Se diseña el sensor para el aporte a la sociedad y a la comunidad universitaria para la detección de campos magnéticos y para el registro de descargas atmosféricas, resultados que con el transcurso del tiempo pueden ser utilizados para la actualización del mapa isocerámico del Ecuador.

En el país la ganadería una actividad agroindustrial relevante y que genera gran cantidad de recursos, la mayoría de fincas y haciendas están alejadas de la ciudad. Precisamente, una de las preocupaciones de los ganaderos son las descargas atmosféricas, la muerte de animales en fincas y haciendas es un problema, dado que, en la mayoría de fincas se encierra a los animales para el pastoreo mediante cercas y no se dispone de información respecto al peligro al que están expuestos los animales. La descarga busca el metal, una cerca de púas o cerca eléctrica que está construida de alambres metálicos que son muy buenos conductores, cuando son impactadas de forma directa por la descarga los alambres transportan una sobretensión a través de toda la cerca que puede ser de varios kilómetros gracias a la cerca, los alambres una vez cargados con los sobrevoltajes buscan un camino para la descarga que puede ser a través del animal o de una persona. Es de vital importancia para un ganadero conocer el nivel de descargas que ocurre en su finca para así tomar precauciones, como la instalación de puntas Franklin asociadas a un sistema de puesta a tierra que proteja la zona previamente determinada.

El sector de la industrial, cuando la descarga es directa y afecta algún equipo de vital importancia, esto se convierte en pérdida material y económica que ninguna industria desea tener. Incluso, para el diseño de una línea de transmisión o subestación eléctrica, se considera el nivel isocerámico del sector, específicamente para definir la ruta de la línea y el apantallamiento ya sea de la línea o la subestación.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El principio de funcionamiento del prototipo está basado en una antena de lazo inductiva, que se comporta como un receptor de campos magnéticos al momento que se induce corriente en la misma, el rango de funcionamiento del prototipo desarrollado en este proyecto es de 0 a 5 microteslas y ha sido validada en laboratorio para detectar niveles de campo magnético de 0 a 5 microteslas, Obteniendo errores máximos de 4,1 % y errores promedio de 2,07 %.
- El sensor de campo magnético también permite el registro y almacenamiento de variaciones de campo magnético en función de un valor de referencia, que por defecto será de 3 uT, el cual se puede modificar en función de la aplicación. En el caso de los ensayos en laboratorio que emularon una descarga atmosférica se utilizó con un setpoint de referencia 1,28 uT, y tomando como evidencia de la descarga la disrupción en el transformador de pruebas, se obtuvieron que se registran 7 de cada 10 descargas.
- Respecto a las mediciones de campos magnéticos en los sistemas eléctricos de potencia, en el caso de las líneas de transmisión de 230 kV el campo magnético oscila en valores de 3,56 a 3,51 uT cuando el sensor se encuentra debajo de la línea. A medida que se aleja de la línea, el campo se reduce hasta valores promedio de 1,50 uT. En el caso de las subestaciones, se presenta un mayor campo magnético cerca los devanados del transformador de potencia, con valores promedio de 3.56 uT para una distancia de separación de 0.80 metros.
- Se ha definido que la posición ideal para el registro de campo magnético es de 45° grados respecto a un eje imaginario impuesto por la fuente generador de CEM, ya sea el caso de líneas de transmisión, subestaciones, etc. En el caso de las pruebas realizadas con el transformador para ensayos de disrupción se identificó que los valores detectados con el prototipo registran el error más bajo (1,7%) a 45 grados respecto al sensor EMF 450 EXTECH a diferencia del resto de posiciones.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se debe tener en cuenta, que el sensor mide variaciones de campo magnético en un rango de 0 a 5 uT, esto debe a que se construyó un filtro pasa banda en el rango de 10 kHz a 15 kHz, es importante que para investigaciones futuras que requieran captar o

medir campos magnéticos elevados, se debe realizar un filtro para escalas de MHz y por ende aumentar el tamaño de la antena para una mayor recepción de la señal.

- Es necesario revisar las baterías antes de realizar cualquier tipo medida, lo recomendable que no estén muy descargadas porque puede variar en el registro de las medidas, además no es recomendable dejarlas conectadas cuando ya estén cargadas en su totalidad debido que pueden llegar a sobre calentarse y perder sus ciclos de vida.
- Por otra parte, el mantenimiento del equipo se debe realizar cuidadosamente en la parte interna para evitar posibles desconexiones del circuito, es recomendable limpiarle del polvo frecuentemente y no exponerlo en exceso al agua ya que puede dañar la microSD.

5.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- El diseño del sensor en un futuro es de una aplicación para la investigación y la actualización del mapa isoceraúnico del país, si se incluyera en el prototipo la detección del punto donde se dio la descarga.
- Otra línea de investigación puede ser para detectar sismos o terremotos debido a que la tierra genera un campo electromagnético, al ocurrir un sismo el campo magnético aumenta y así en futuro prevenir o detectar la localización de los lugares propensos a estos fenómenos, que se relacionan con la magnetósfera o cavidad magnética en la cual se encuentra colocada la Tierra. Esta cavidad se forma en el espacio como resultado de la acción del campo magnético terrestre que no permite que las partículas cargadas (protones y electrones principalmente) emitidas continuamente por la atmósfera superior del Sol lleguen directamente a la atmósfera terrestre. Este campo externo presenta variaciones periódicas siendo la más importante la variación diaria con período de 24 horas; también son periódicas la variación lunar y la variación anual. Otras variaciones rápidas de origen externo son las pulsaciones magnéticas, las tormentas magnéticas, las bahías, los efectos cromosféricos (es una capa delgada de la atmósfera del sol), entre otras [36].

5.4. REFERENCIAS

- [1] *K. Verdugo, Contribución para la implementación de una red de detección de rayos en Ecuador, Leira: Instituto Politécnico de Leira, 2017.*
- [2] *A. Mejía, Protecciones contra Descargas Atmosféricas, Cuenca: IEEE, 2002.*
- [3] *C. Augusto, Incremento de la confiabilidad en sistemas eléctricos de 22.9/13.2 kV mediante aislamiento de líneas, Huancayo-Perú, 2010.*
- [4] *<http://cv.udl.cat/cursos/elsmitjans/t1/docs/radio2.pdf>, Historia de la radio, 2006.*
- [5] *A. Cortés, Implementación de un Sistema MDFGIS de Detección, Localización y Monitoreo de Descargas Atmosféricas en Tiempo Real., Manizales-Colombia, 2018.*
- [6] *P. O. R. Luis E. Fajardo, Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto de descargas atmosféricas, San Salvador, 2005, p. 17.*
- [7] *O. Puerta, Diseño de antena de lazos para medición de campo magnético producido por descargas atmosféricas, Medellín, 2009.*
- [8] *D. K. Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, Mexico, 1998.*
- [9] *G. P. S.A, Campos eléctricos y magnéticos de 50 hz, 2001.*
- [10] *Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz., Wisconsin, 2001.*
- [11] *D. K. Cheng, Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería, México: Parson ediciones, 2015.*
- [12] *J. S. A. y. M. L. Galicia, Implementación del Modelo de Volumen de Colección para Protección contra Descargas Eléctricas en la TDGL Poza Rica, Veracruz: Poza Rica de HGO, 2010.*
- [13] *R. P. FAJARDO L., Diseño e implementación de un sistema de monitoreo remoto de descargas atmosféricas, El Salvador: Universidad El Salvador, Ingeniería Eléctrica, 2005.*
- [14] *V. Cooray, The lightning flash, Reino Unido: Michael Faraday House, 2014.*
- [15] *M. Jurado, Análisis del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente al rayo, 2013.*
- [16] *R. E. Orville, Cloud-to-ground lightning in the blizzard of '93, Geophys., Res. Lett, 1993, pp. 1367-1370.*
- [17] *O. K. U. Finke, Review of existing lightning location systems, 2002.*
- [18] *J. López, Metodología para predicción de tormentas, Manizales, 2011, pp. 10-12.*

- [19] *F. D. R. E. R. P. J. Balcells, Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos, Barcelona, España, 1992.*
- [20] *P. G. J. Morales, Determinación de Campos Electromagnéticos en Sistemas Eléctricos, Quito, 2015.*
- [21] *SENSOVANT, BTD300 Detector de Tormentas y actividad electrostática, Estados Unidos.*
- [22] *CENACE, Fallas por descargas atmosféricas 2015-2017, Quito, 2017.*
- [23] *F. Martínez, EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE RADIACIONES NO IONIZANTES EN SISTEMAS DE TRANSFORMACION DE DISTRIBUCION EN MEDIA TENSION, Guatemala, 2015.*
- [24] *R. E. d. España, Resumen sobre los campos electricos y magneticos generados por las instalaciones electricas de alta tension., 2010.*
- [25] *P. C. LTDA., «campos electromagnéticos,» p. 5, 2011.*
- [26] *F. D. R. E. y. R. P. J. Balcells, Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos., Barcelona: MARCOMBO, 1992.*
- [27] *Ramires, Metodo experimental, introduccion a la psicologia.*
- [28] *S. Gomez, Metodología de la Investigación, México: Red Tercer Milenio, 2012.*
- [29] *J. Ferrer, «metodologia02.blogspot.com,» 2015. [En línea]. Available: <https://metodologia02.blogspot.com/p/operacionalizacion-de-variables.html?fbclid=IwAR1D493FZO1JhLNvtyMRhRkWvtJCID5vjgfTF14Vl53x294U09-I5R3PoNI>. [Último acceso: 01 Julio 2019].*
- [30] *C. C. J. A. a. e. V. Cruz, Diseño e implementación de Antena de Cuadro para Radio Onda Media, Lima.*
- [31] *A. Gac, Técnico Electricista 3: Magnetismo, Buenos Aires, 2014.*
- [32] *Lopera, Comportamientos de los elementos magnéticos.*
- [33] *PVC (Policloruro de Vinilo), Suárez.*
- [34] *N. G.-G. Loi, Arduino aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes, Barcelona-España: Ediciones ENI, 2016.*
- [35] *J. L.-J. Peligrí, LabVIEW: entorno gráfico de programación, Barcelona: marcombo ediciones técnicas, 2015.*
- [36] *A. Orozco, El magnetismo Terrestre, México, 2015.*

ANEXOS

ANEXO I. Mapa Isoceráunico del Ecuador

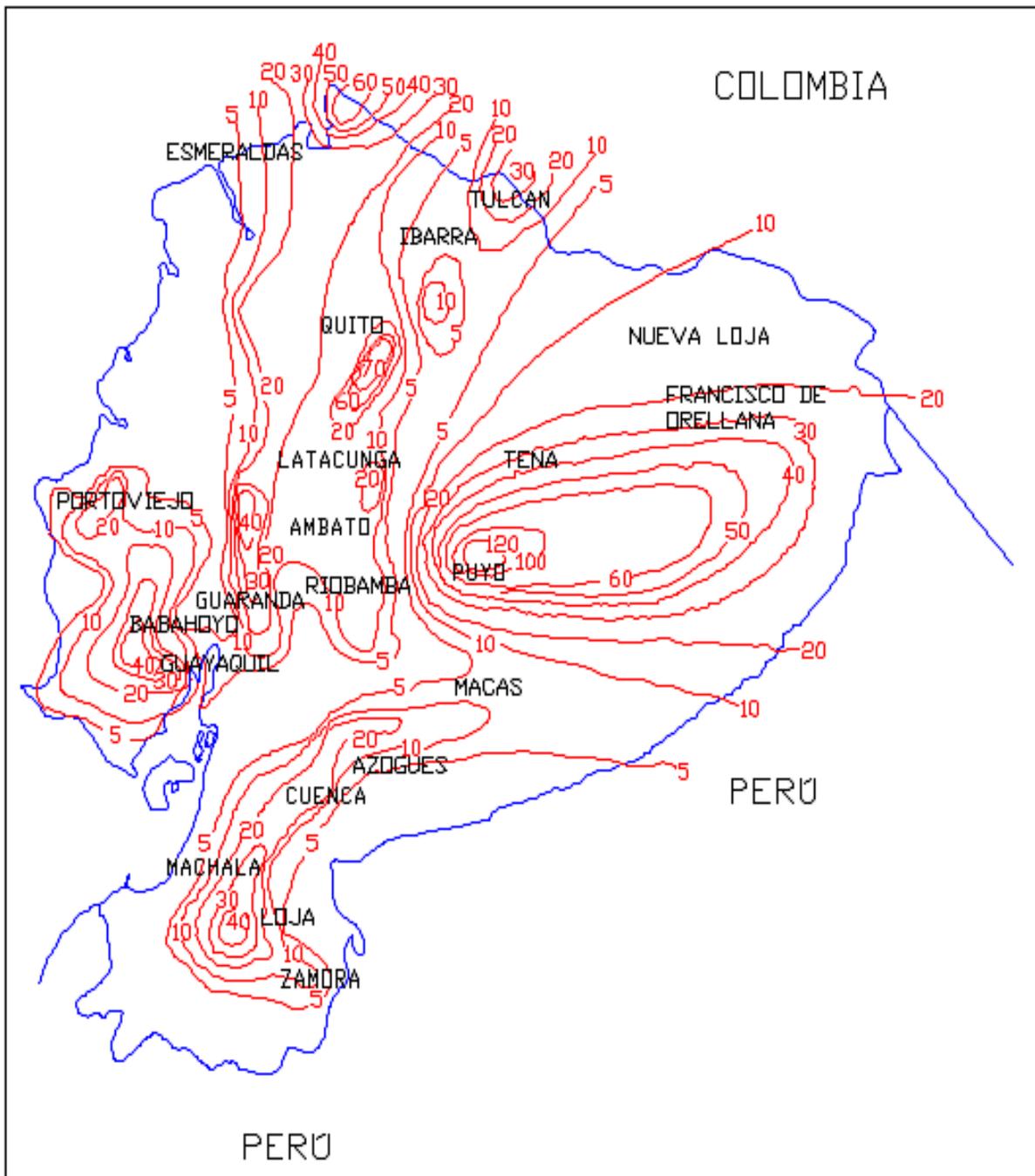


Figura I. Mapa del Nivel Isoceráunico del Ecuador.

ANEXO II. Estimación del número de Rayos para Ecuador, por parte del INAMHI basa en la información del sensor óptico (LIS).

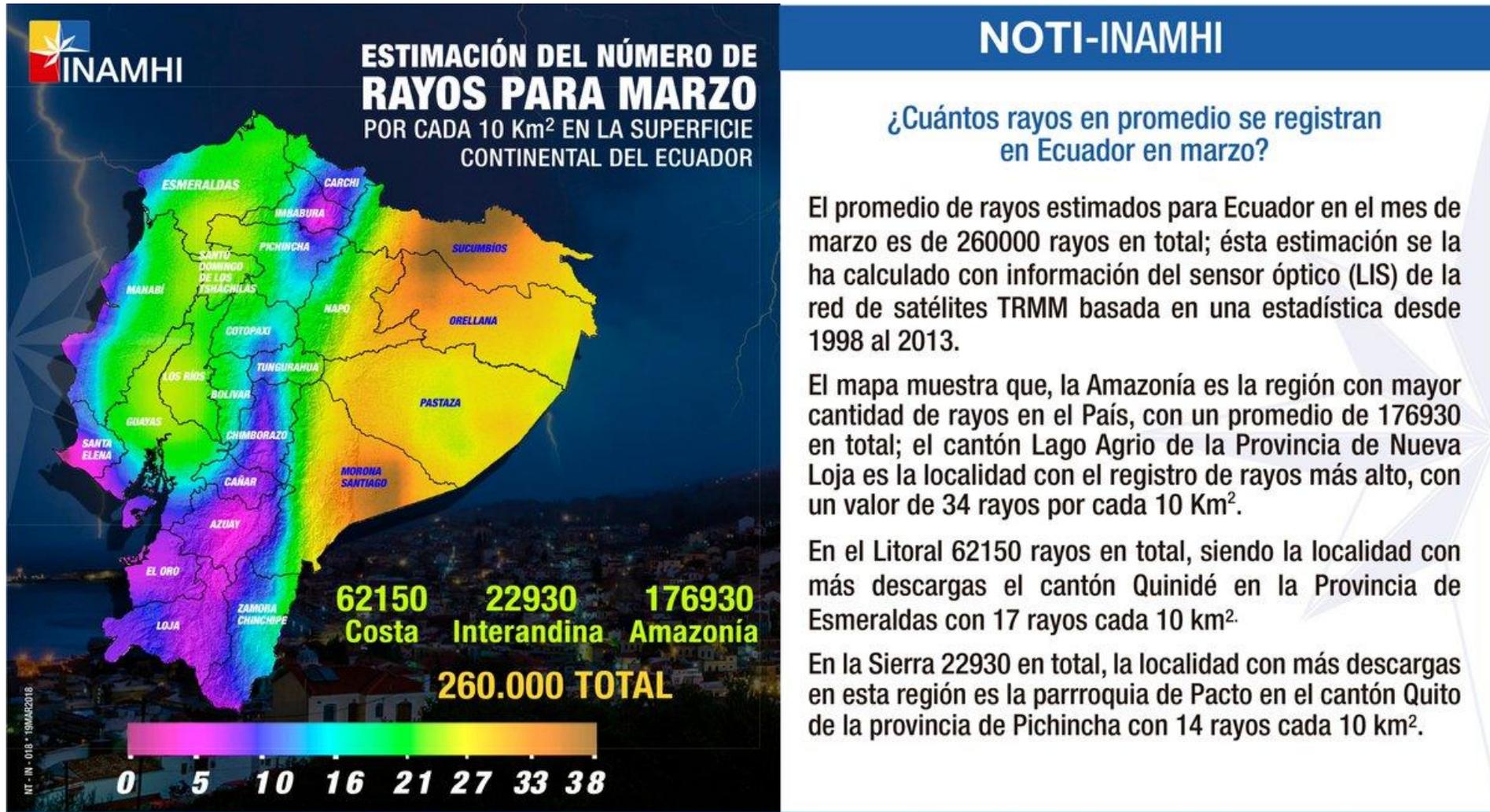


Figura II.1. Estimación del número de Rayos para el mes de Marzo 2018.

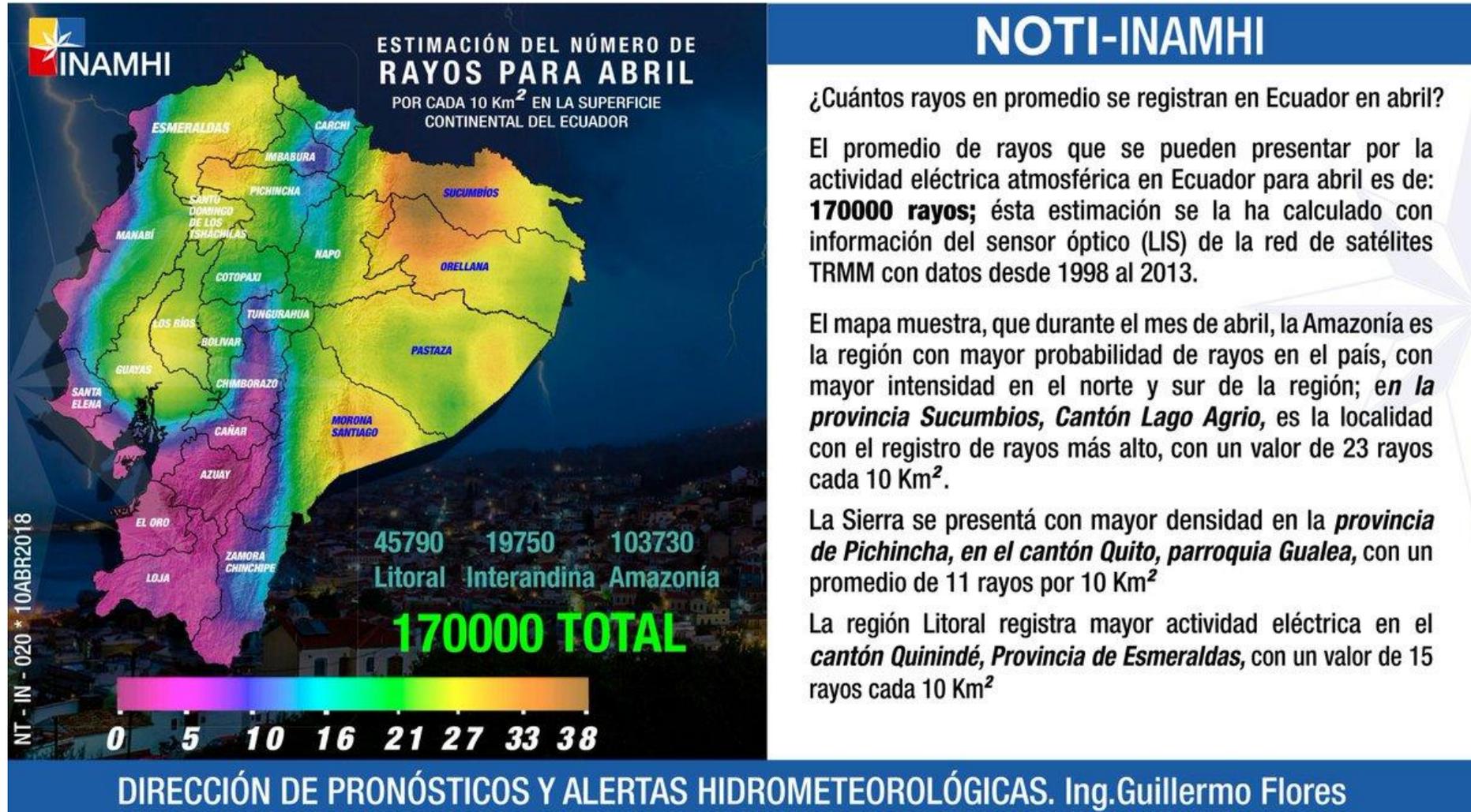


Figura II.2. Estimación del número de Rayos para el mes Abril 2018.

ANEXO III. Descargas anuales por km² detectada por el sensor óptico LIS, periodo Abril 1995 – Febrero 2003.

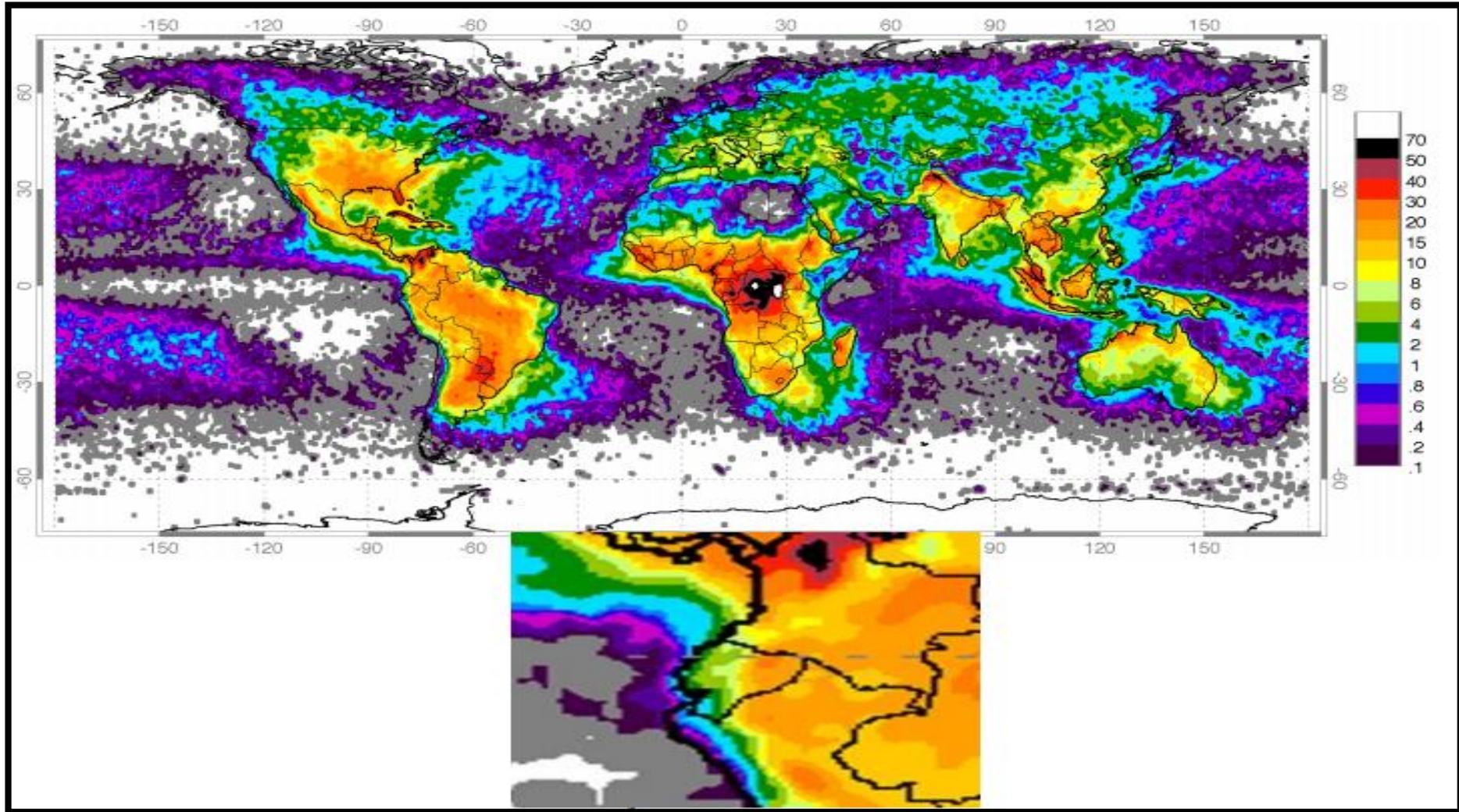


Figura III. Descargas anuales por km² detectada por el sensor óptico LIS.

ANEXO IV. Circuito electrónico del sensor de campo magnético.

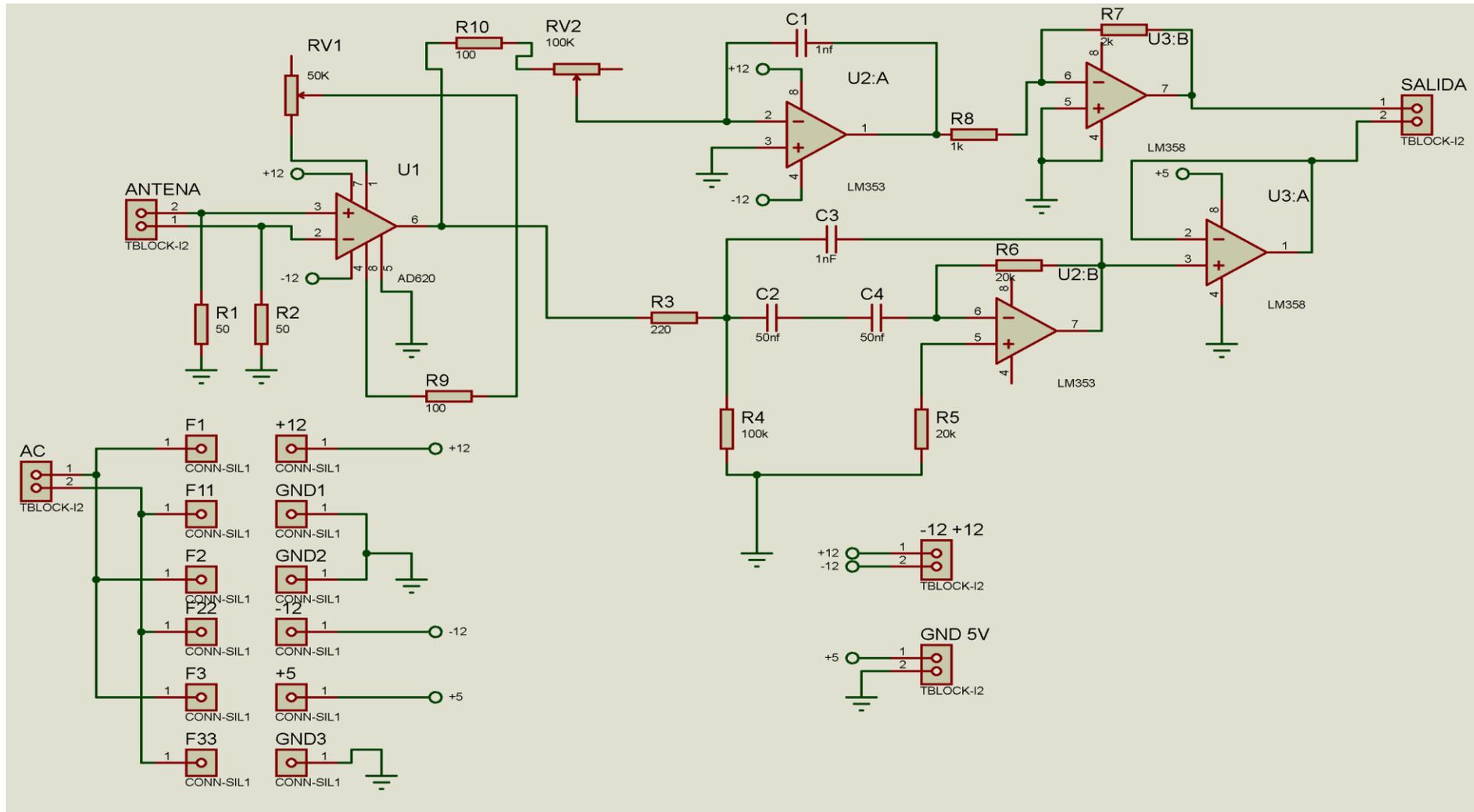


Figura IV. Circuito electrónico del sensor de campo magnético.

ANEXO V. Placa del sensor de campo magnético.

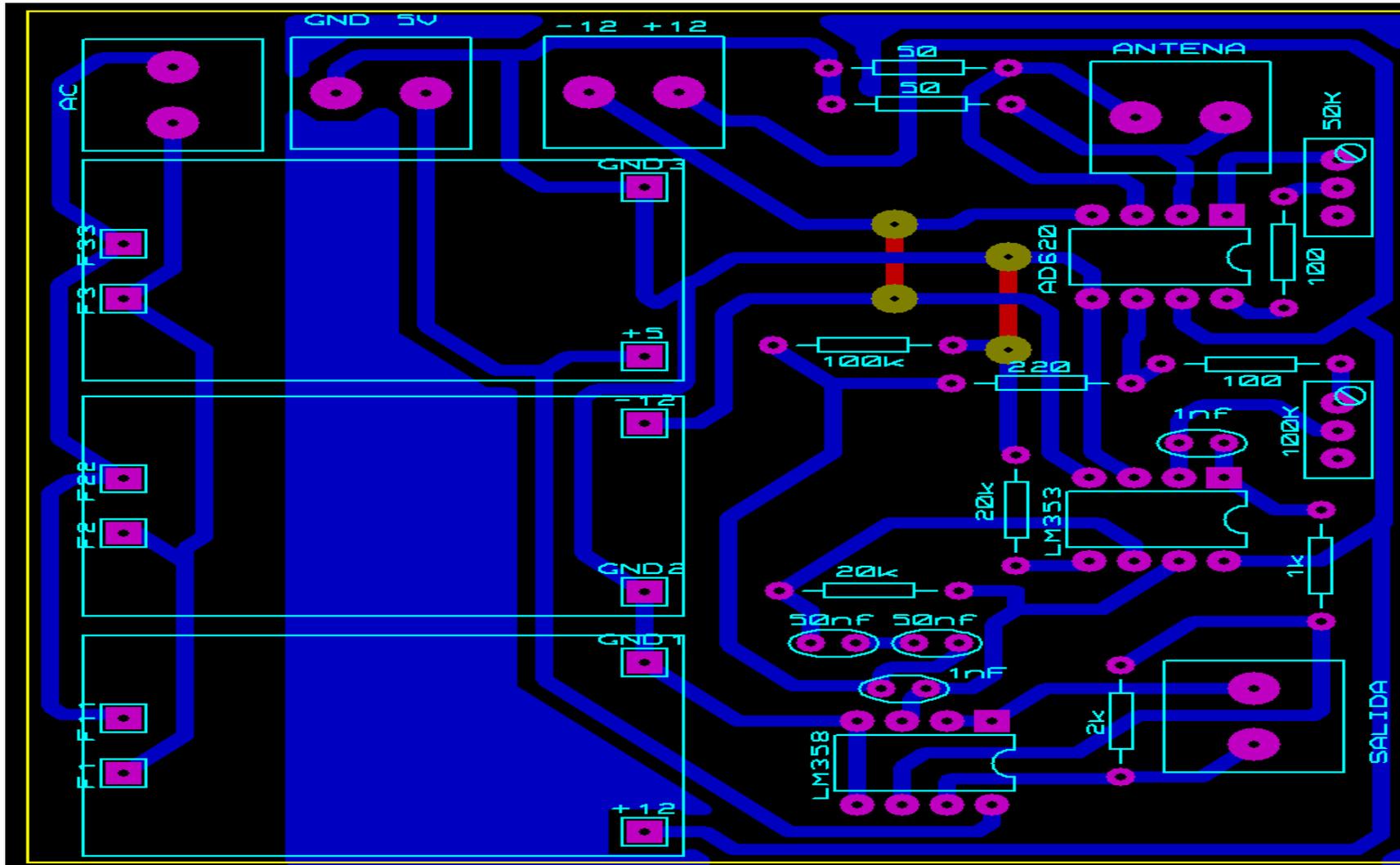


Figura V. Diseño de la placa del sensor de campo magnético.

ANEXO VI. Código para el cálculo del número de vueltas de la antena.

```
clear
```

```
clc
```

```
u0=4*pi*10e-7;
```

```
ur=1;
```

```
%freq=input('Introducir Frecuencia en Hz: ');
```

```
cap=input('Introducir la capacitancia en pf: ');
```

```
cap=cap*1e-12;
```

```
freq=12000;
```

```
ind_antena=1/((2*pi*freq)^2*cap);
```

```
disp('La inducctancia de la Antena es: ');
```

```
ind_antena
```

```
%a=input('Introducir el grosor del cable en cm: ');
```

```
%W=input('Introducir el tamaño del lado del cuadrado en cm: ');
```

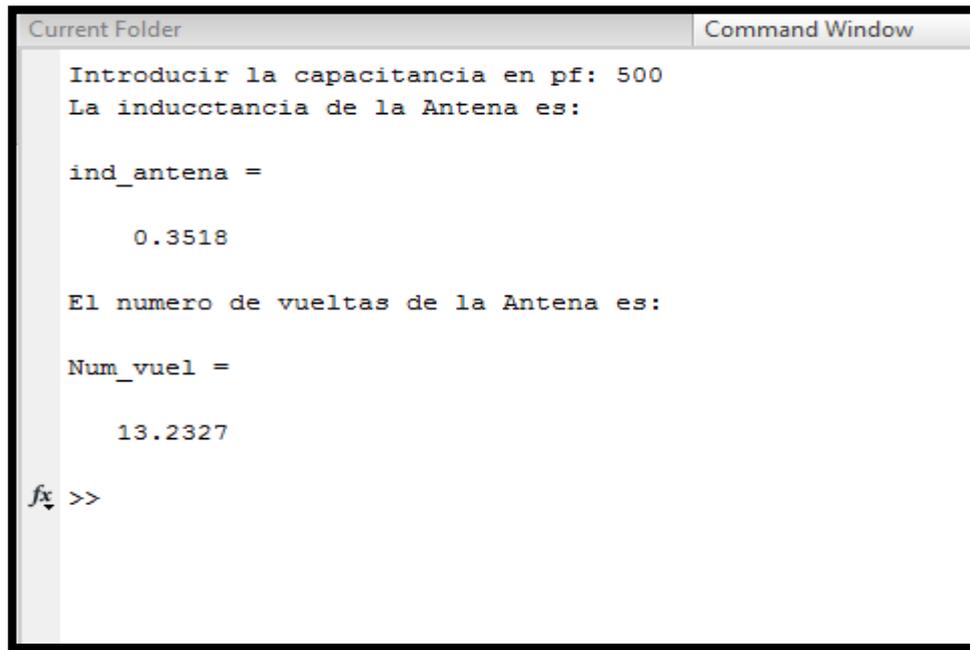
```
a=0.0005;
```

```
W=25;
```

```
Num_vuel=sqrt(ind_antena/((2*u0*ur*W/pi)*((log(W/a))-0.774)));
```

```
disp('El numero de vueltas de la Antena es: ');
```

```
Num_vuel
```



```
Current Folder | Command Window
Introducir la capacitancia en pf: 500
La inducctancia de la Antena es:

ind_antena =

    0.3518

El numero de vueltas de la Antena es:

Num_vuel =

    13.2327

fx >>
```

Figura VI. Calculo del número de vueltas de la antena en Matlab.

ANEXO VII. Código para el cálculo de los valores del filtro pasa banda.

```
clear
```

```
clc
```

```
f1=input('Ingrese f1 en Hertz: ');
```

```
f2=input('Ingrese f2 en Hertz: ');
```

```
A=input('Ingrese factor de Ganancia: ');
```

```
C1=input('Ingrese valor de condensador 1 en pf: ');
```

```
C1=C1*1e-12;
```

```
f0=sqrt(f1*f2);
```

```
Q= f0/(f2-f1);
```

```
disp('Resistencia 1 es ')
```

```
R1=Q/(2*pi*f0*A*C1)
```

```
disp('Resistencia 2 es ')
```

```
R2=1/(4*pi*f0*Q*C1)
```

```
disp('Resistencia 3 y Resistencia 4 son: ')
```

```
R3=(((Q^2)/(Q^2+A))+1)*(Q/(2*pi*f0*C1))
```

```
R4=R3
```

```
disp('El condensador C2 es: ')
```

```
C2=((A/(Q^2))+1)*C1
```

ANEXO VIII. Código de comunicación Arduino.

```
#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

unsigned long timeold=0;

// Constructor de la librería de LCD 16x2

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); //

float campo=0;

float acum_camp=0;

bool condi=0,cont_luz=0,descarga_detect=0;

void setup() {

  // put your setup code here, to run once:

  pinMode(13,OUTPUT);

  digitalWrite(13,LOW);

  Serial.begin(115200); // velocidad de comunicacion serial nativo

  lcd.init();

  //Encender la luz de fondo.

  lcd.backlight();

  // Escribimos el Mensaje en el LCD.

  lcd.setCursor(0, 0);

  lcd.print(" Sensor de ");

  lcd.setCursor(0, 1);

  lcd.print("Campo Magnetico");

  delay(2000);

  lcd.clear();
```

```
    condi=analogRead(1)>512;
}

void loop() {

    int dato1=0;

    float dato2=0;

    int descarga=analogRead(3); // filtro

    float oscilos=analogRead(0);

    if(condi) {

        dato1=1023-analogRead(1); // filtro

        dato2=((1023-300)-oscilos)*5.0*3*16/(1023.0); //campo

    }

    else{

        dato1=analogRead(1); // filtro

        dato2=((300)-oscilos)*5.0*3*16/(1023.0); //campo

    }

    if (millis() - timeold >= 1000){

        campo=acum_camp/(25*25);// convierto de weber a teslas dependiendo de la dimension de la
        antena que es de 25cm

        if (campo<0)

            campo=0;

        timeold = millis();

        lcd.setCursor(0, 0);

        lcd.print("Campo Magnetico");
```

```
lcd.setCursor(0, 1);  
  
lcd.print("      ");  
  
lcd.setCursor(0, 1);  
  
lcd.print(campo);  
  
lcd.setCursor(8, 1);  
  
lcd.print("uT");  
  
acum_camp=0;  
  
if(descarga_detect){  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("DESCARGA DETECT.");  
}  
  
}  
  
else{  
    acum_camp=acum_camp+dato2;  
}  
  
if(dato1>700 && descarga >760)  
  
    descarga_detect=1;  
  
else  
  
    descarga_detect=0;  
  
Serial.print(dato1);  
  
Serial.print("B");
```

```
Serial.print(dato2);
```

```
Serial.print("C");
```

```
Serial.print(campo*1000);
```

```
Serial.print("D");
```

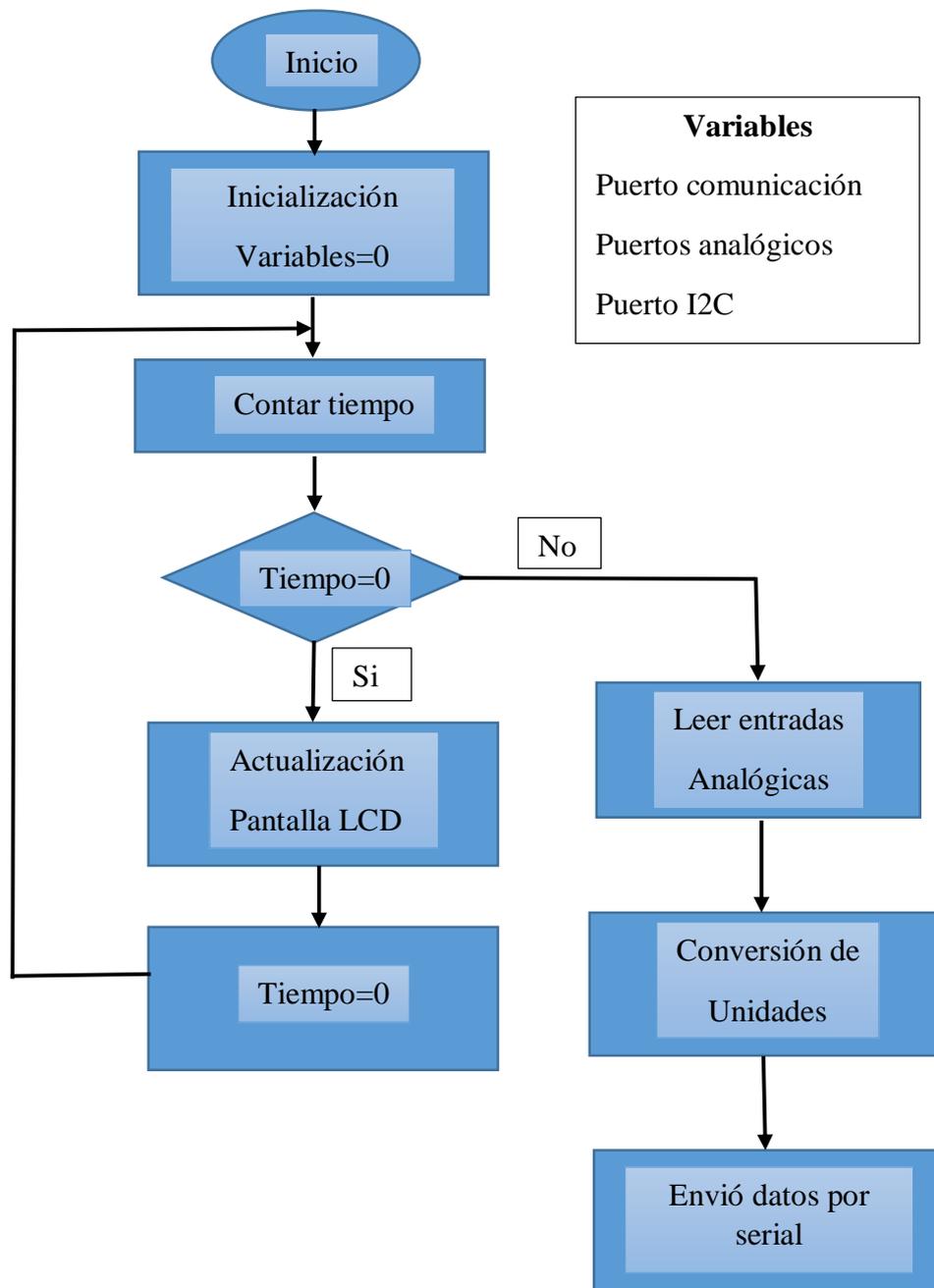
```
Serial.println(descarga);
```

```
delay(50);
```

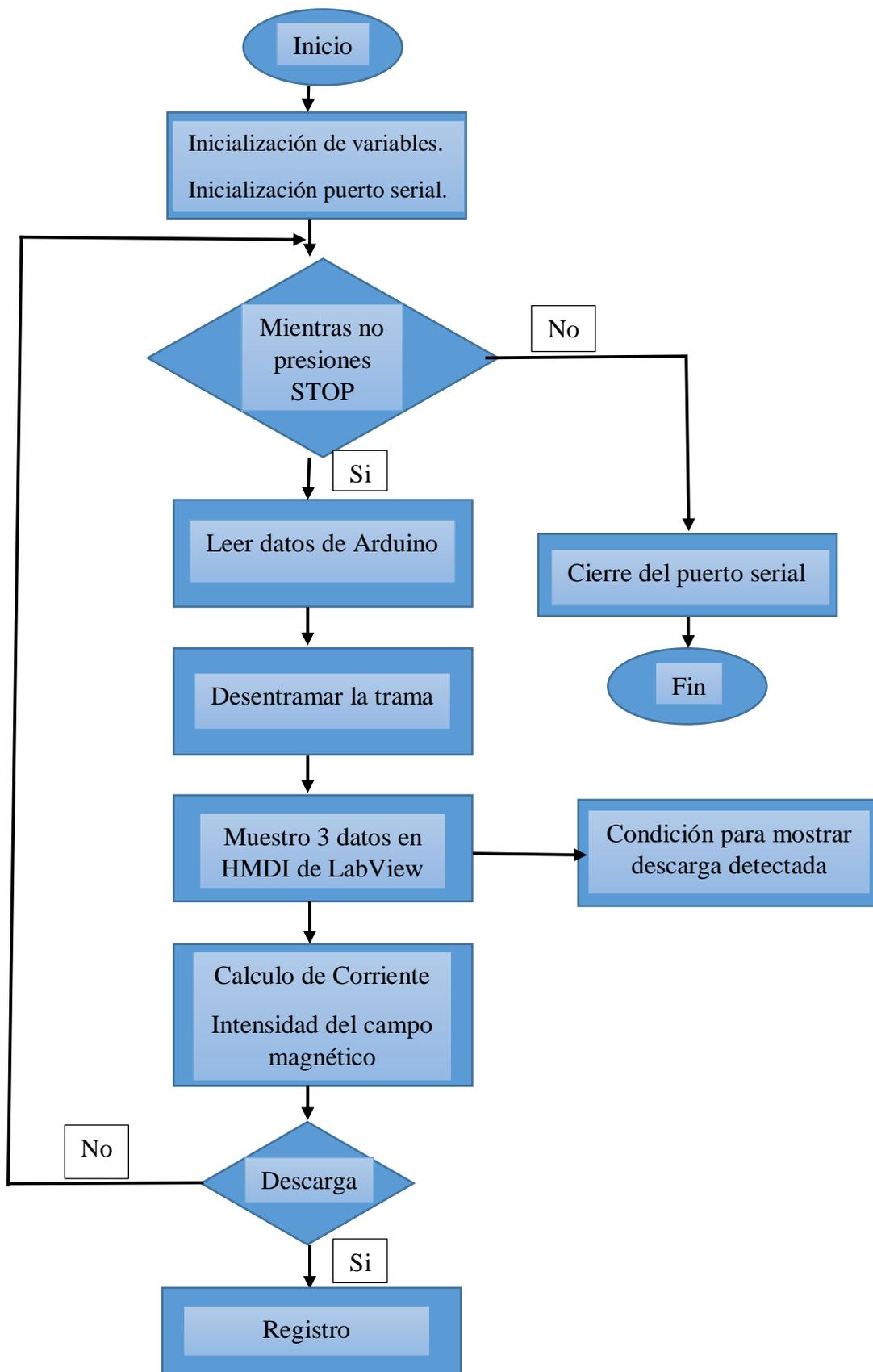
```
}
```

Fin de la conversación

ANEXO IX. Diagrama de Flujo Arduino.

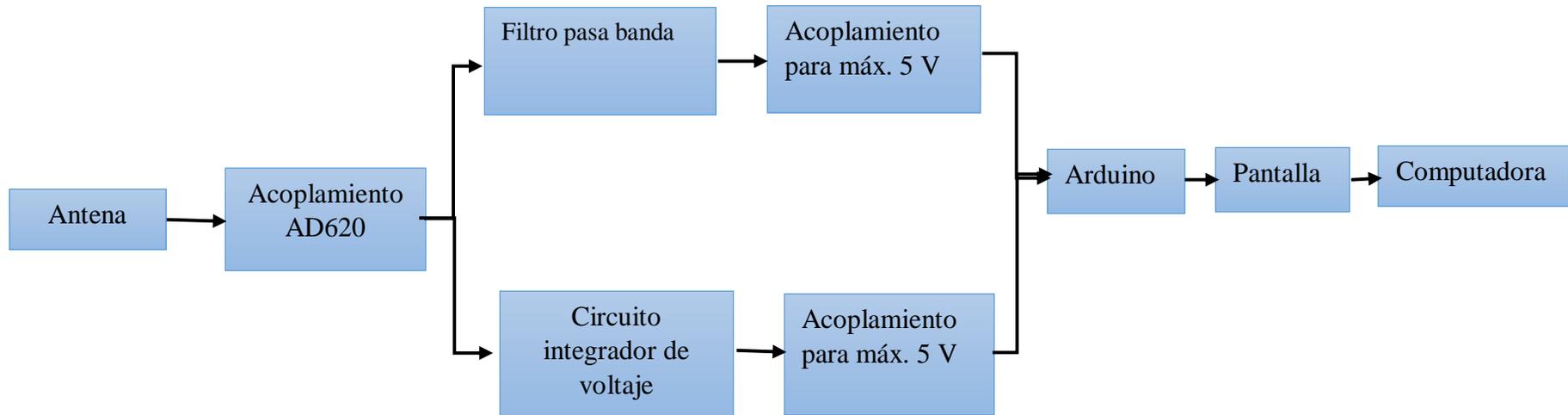


ANEXO X. Diagrama de flujo LabView.



ANEXO XI. Diagrama de bloques del funcionamiento del sensor

Diagrama de bloques



ANEXO XII. Programación para obtener datos en el interfaz LabVIEW.

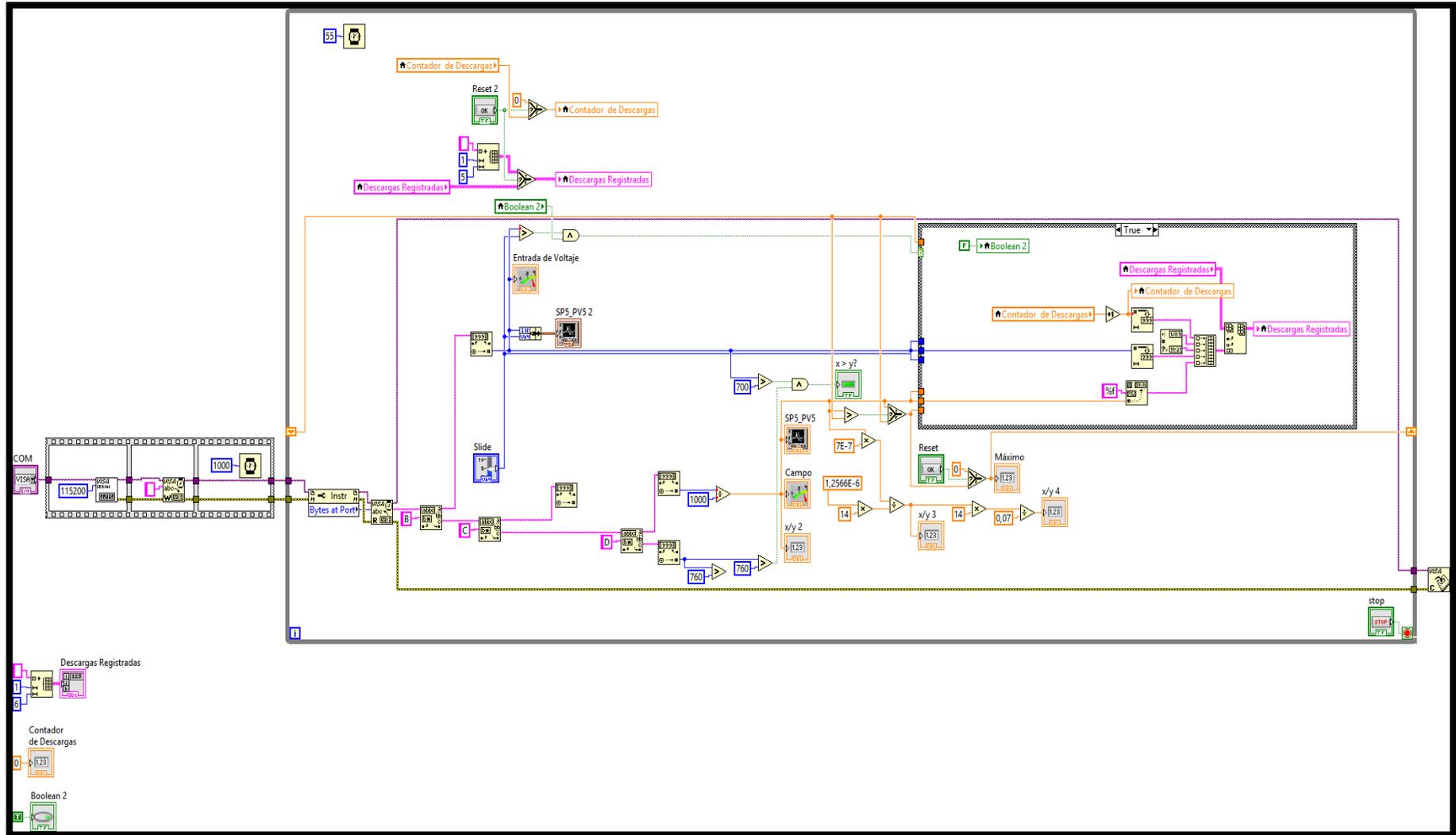


Figura XII. Programación para obtener datos en el interfaz LabVIEW.

ANEXO XIII. Datos obtenidos del sensor de campo magnético.

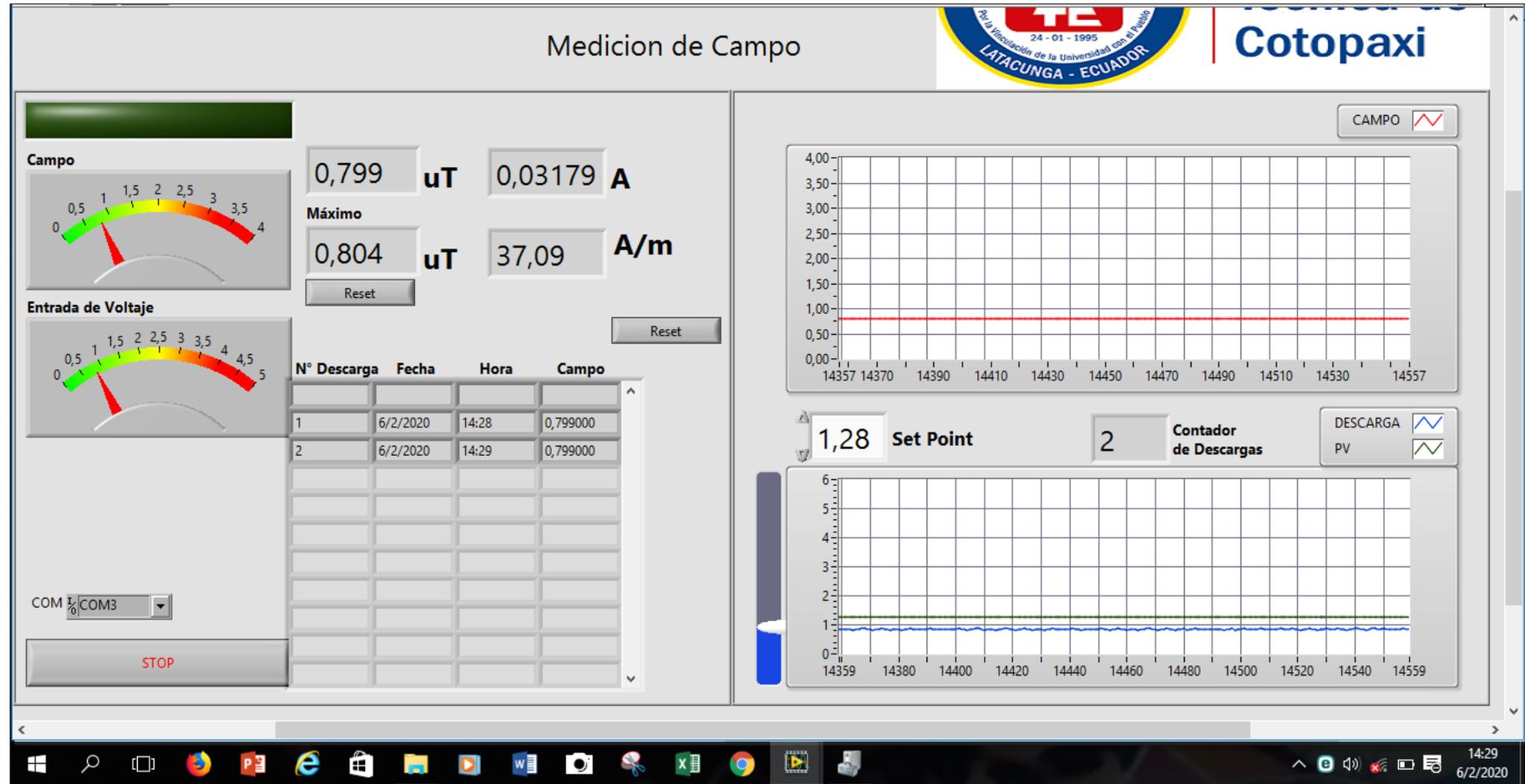


Figura XIII.1. Datos de obtenidos del sensor de campo magnético.

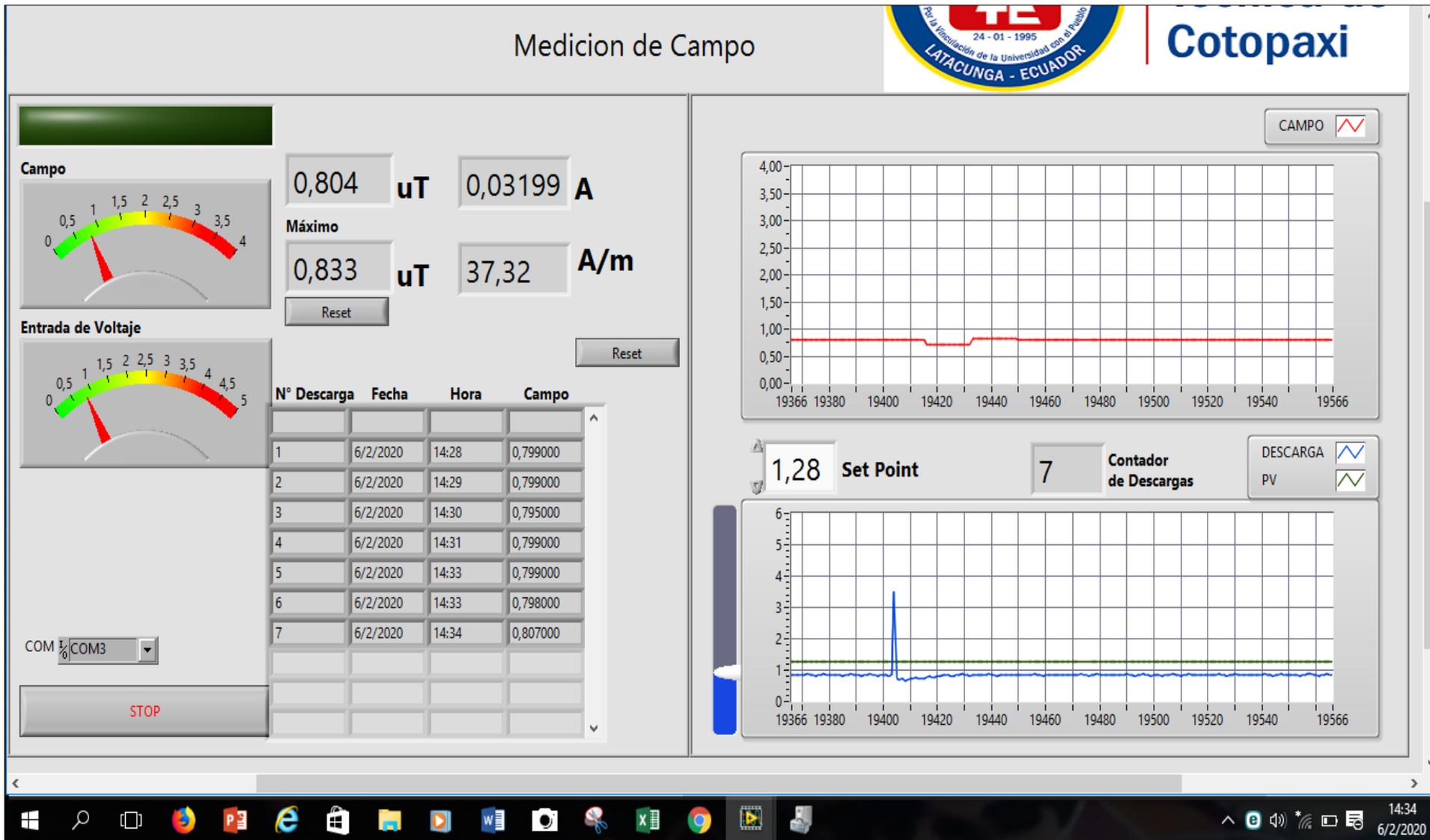
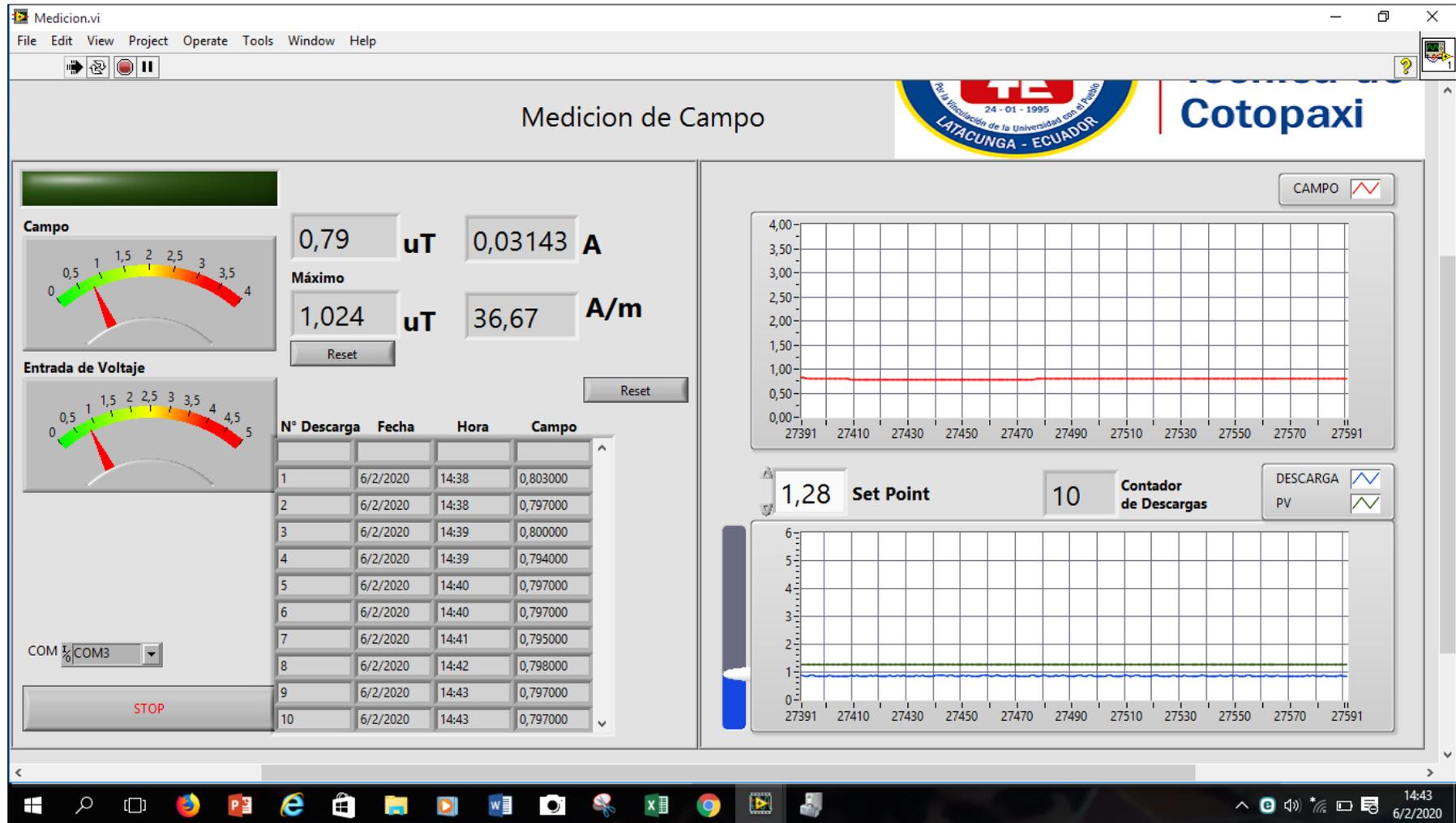
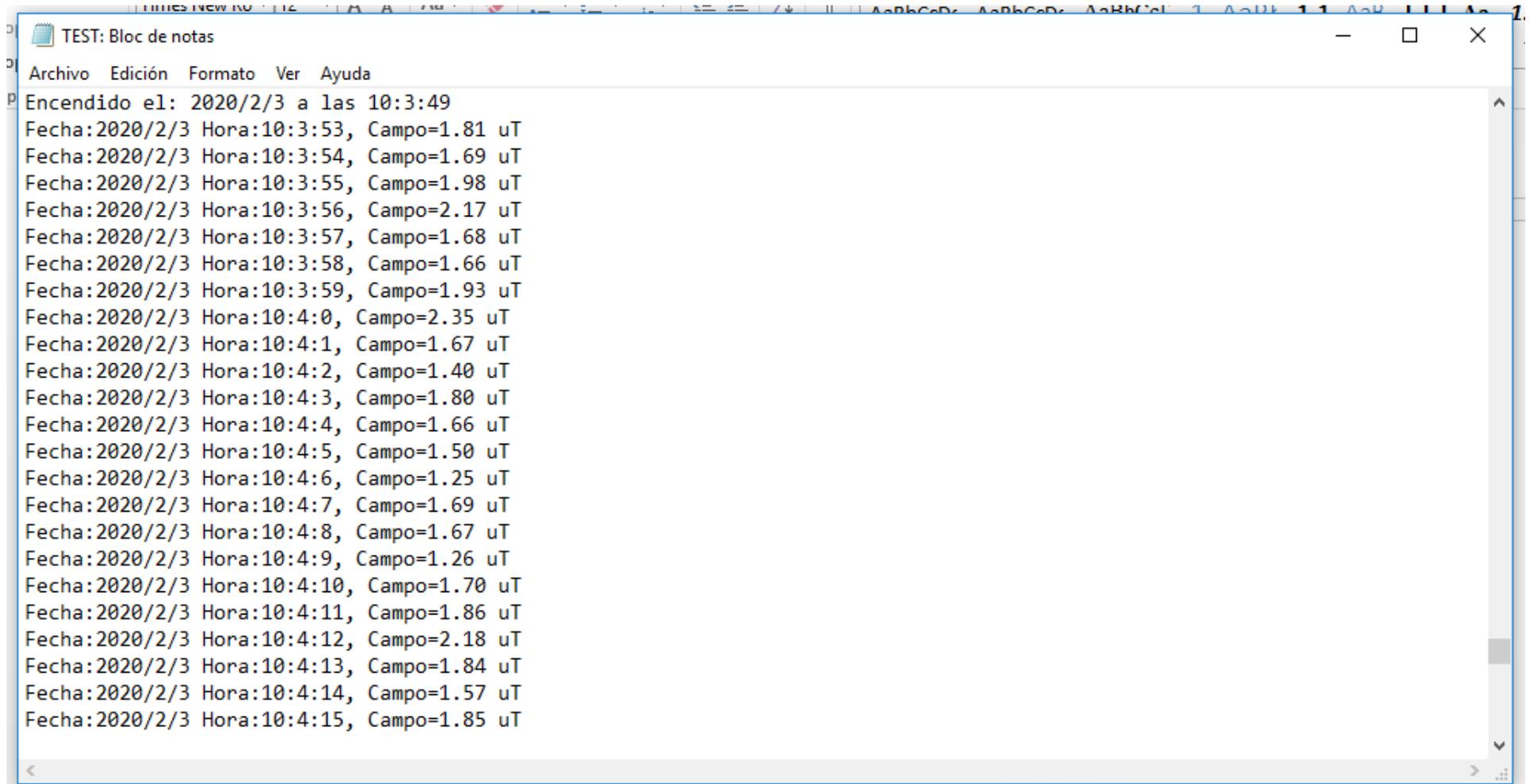


Figura XIII.2. Registro del número de descargas atmosféricas.

ANEXO XIV. Registro del conteo de descargas de un total 24 generadas.



ANEXO XV. Registros obtenidos desde la microSD del sensor de campo magnético.



ANEXO XVI. Hoja registro de datos de la IEEE

A. Line Voltage, kV/ Line Current, A	_____
(1) Nominal	_____
(2) Actual	_____
B. Line Conductors and Overhead Ground Wires	
(1) Type	_____
(2) Diameter, cm	_____
(3) Height, m	_____
(4) Phase relation of conductors	_____
(5) Sketch of line configuration (for example, figure 7)	_____
C. Atmospheric Conditions	
(1) Temperature, °C	_____
(2) Relative humidity	_____
(3) Barometric pressure, pascal (Pa)	_____
(4) Wind velocity, m/s	_____
(5) Fair, rain, snow, etc.	_____
D. Towers	
(1) Metal	_____
(2) Wood	_____
(3) Others	_____
(4) Sketch with dimensions	_____
E. Harmonics	
(1) Content, percent	_____
(2) Nature of source, for example, industrial load	_____
(3) Distance to source, m	_____
F. Number of Measurements	
G. Instruments	
(1) Meter type	
(a) Manufacturer	_____
(b) Model	_____
(2) Probe and signal conditioning circuit	
(a) Description (shape)	_____
(b) Dimensions	_____
(c) Equivalent circuit	_____
(d) Frequency response	_____
(e) Directional characteristics	_____
(f) Corona onset field strength	_____
(g) Effects of	_____
(1) Electric or magnetic field	_____
(2) Temperature	_____
(3) Humidity	_____
(h) Reading characteristics (rms, etc.)	_____
(i) Accuracy and sensitivity	_____
(3) Holding devices	
(a) Length	_____
(b) Electrical characteristics	_____
(4) Connecting cable (if signal conditioning circuit is separate from probe)	
(a) Length	_____
(b) Type	_____

ANEXO XVII. Imágenes de la toma de muestra de la detección del campo magnético



Figura XVII.1: Valores obtenidos en el sensor en 45°, cuando no existe fuente de campo magnético



Figura XVII.2: Valores obtenidos en el sensor en 90°, cuando existe fuente de campo magnético

ANEXO XVIII. Mediciones realizadas en los sistemas eléctricos.



Figura XVIII.1: Valores obtenidos de campo magnético en el prototipo en la subestación Montalvo.



Figura XVIII.2: Valores obtenidos de campo magnético en la subestación Montalvo el sensor patron versus el sensor prototipo.



Figura XVIII.3: Valores obtenidos de campo magnético en el prototipo en la línea de Transmisión de 230 kV en el cantón Mocha.



Figura XVIII.3: Valores obtenidos de campo magnético entre el sensor patrón y el sensor prototipo.

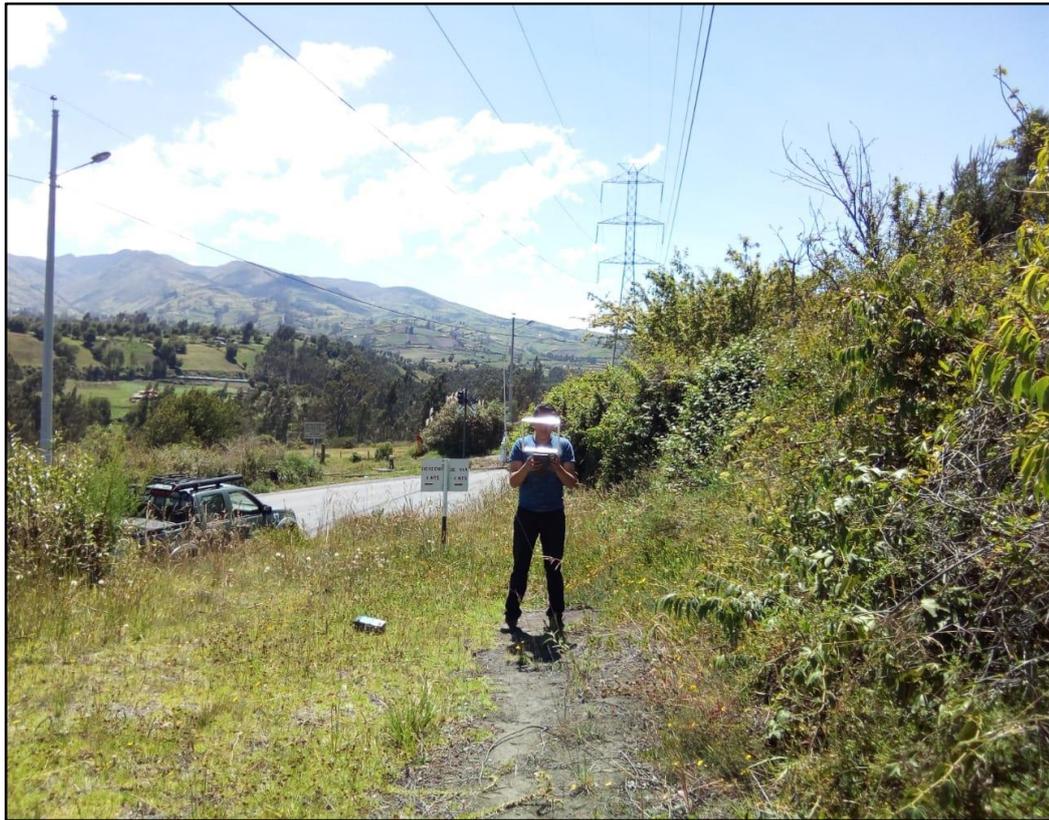


Figura XVIII.4: Realizando mediciones en la línea de transmisión de 230 kV, Santa Rosa-Riobamba.



Figura XVIII.5: Realizando mediciones en la subestación Montalvo.

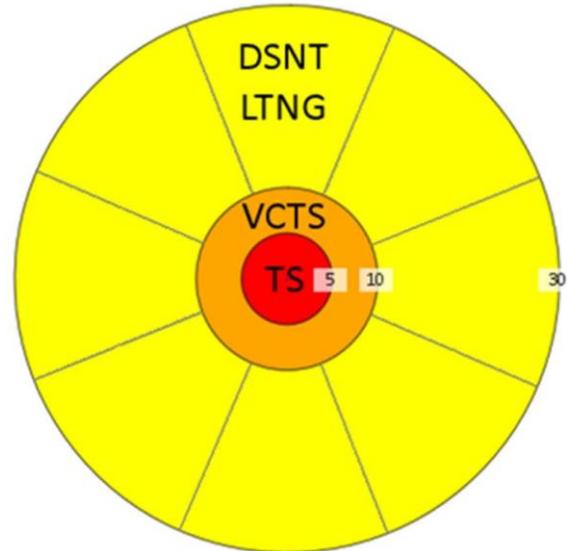
ANEXO XIX. Sensor comercial Thunderstorm Detector Biral



Aerodrome thunderstorm reporting

Thunderstorms are reported in US Federal Aviation standard according to the location of lightning.

- Thunderstorms producing lightning within 5 nautical miles (9 km) of the site are referred to as at the site itself (**TS**).
- Thunderstorms between 5-10 nautical miles (9-19 km) are defined as being in the vicinity (**VCTS**).



For these two classifications only the proximity is important, with no requirement to report direction.

For thunderstorms detected between 10-30 nautical miles (19-56 km), referred to as distant lightning (**DSNT LTNG**) a direction is required, although only as to which octant (N, NE etc.) or octants were affected.

There is no requirement to report thunderstorms at distances greater than this 30 nautical mile (56 km) limit.

5.1. More than lightning

In addition to lightning reporting, the BTD-300 detects the presence of electrically charged precipitation and strong electric field. Both of these features indicate the presence of a **Cumulonimbus (CB) cloud** overhead, which will aid the reporting of this significant weather classification by the aerodrome. Not all developing Cumulonimbi go on to produce lightning but all will be associated with an increased risk to aircraft from **severe turbulence, icing, hail and induced lightning strike**.

The BTD-300 is designed to operate under the intense electrostatic fields beneath thunderstorms and is immune to all forms of man-made radio-frequency interference.

All types of lightning are detected and ranged (cloud-to-ground, intra-cloud, cloud-to-cloud etc.) with >90% detection efficiency and <2% false alarm rate, providing a reliable and accurate assessment of total lightning activity. The system is particularly sensitive to the weak intra-cloud flashes which can signal the onset of thunderstorm activity before the first cloud-to-ground flash.

5.2. Local thunderstorm activity – who needs to know?

Examples of potential thunderstorm data users include:

- Aviation
- Meteorological observation
- Wind turbine and other tall structure maintenance
- Power and utilities operators
- Explosive material handling and storage
- Outdoor public events and leisure facilities
- Thunderstorm research and education



5.3. BTD-300 compared to lightning network data

Stand-alone lightning detectors like the BTD-300 are designed to provide thunderstorm warnings for a specific fixed site such as an airport. They are owned by the customer and designed to have a very high detection efficiency but limited range (typically ~60 km), with location accuracy suitable for thunderstorm identification (few km).

Lightning networks provide information for a larger region (national or continental level) and are not usually owned by the customer, who instead subscribes to a data feed. Their principle of operation mean that networks tend to have good lightning location accuracy (sometimes less than 1 km) but may miss the weaker and/or intra-cloud lightning flashes, especially towards the edge of the network.

5.4. Advantages of BTD-300:

- Exceptionally high lightning detection efficiency surrounding your site - right where you want it!
- User owned - no on-going subscription costs or reliance on external providers
- Immune to radio-interference
- Warns of potential overhead thunderstorm development, before the first flash
- Very low maintenance, robust and reliable
- Real-time warnings – 2 second update period

Biral BTD-300 Specifications	
Maximum reporting range	60 km (37 miles), reported to nearest km
Flash detection efficiency	>90%
False alarm rate	<2%
Flash location accuracy	±5 km between a range of 0-20 km and ±11 km between 20-60 km
Flash types detected and ranged	All types – cloud-to-ground (CG), intra-cloud (IC), cloud-to-cloud (CC)
Flash polarity, multiplicity and type reporting?	No
Direction finding	Yes, reported to nearest degree (requires optional module)
Update period	2s
Report time of each flash	Yes, to nearest 10ms
Maximum detectable flash rate	120 flashes per minute
Automatic self-checking	Yes
Detection method	Passive, quasi-electrostatic (RF for optional direction finder)
Operating (listening) frequency	1-50 Hz for the main unit. The optional direction finder receiving band is ~30 kHz to 3 MHz
Filter for RF interference	Analog front end with additional digital filtering
Additional environmental monitoring	Overhead Cumulonimbus warning via detection of strong electric field and charged precipitation
Operating environment	Designed to meet US FAA harsh weather conditions (FAA class 2) which includes: Temperature: -55°C to +55°C Relative humidity: 5% to 100% condensing Wind: Up to 85 kt (44m/s)
Power supply	110-240V AC supply
Power consumption	<10W
IP rating	IP66
Connections	Ethernet or RS422 / RS485
External indicators	Status LED
Interface	Computer, with option for additional relay outputs (x3)
Visualisation software	Included for use on PC computer systems
Customisable warning ranges?	Yes
Weight	23 Kg
Installation site	Outdoors only, no overhead obstructions



tel: +44(0)1275 847787 email:
enquiries@biral.com

ANEXO XX. Guías de práctica para laboratorio.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI		GUÍA PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO		 Ingeniería Eléctrica
FACULTAD:	CIYA	CARRERA:	Ingeniería Eléctrica	
ASIGNATURA:	ALTO VOLTAJE	PERIODO ACADÉMICO:	Octubre 2019 – Febrero 2020	
DOCENTE:	Ing. Ms.C. Wilian Guamán	FECHA:		
NIVEL:		PRACTICA N°:	1	
LABORATORIO DONDE SE DESARROLLA LA PRÁCTICA:		Laboratorio de Alto Voltaje		
TEMA DE LA PRÁCTICA:		Identificación de los elementos del sensor y su funcionamiento.		
INTRODUCCIÓN				
<p>Las descargas atmosféricas es un fenómeno de la naturaleza imprevisible y aleatoria, la unión violenta de las cargas positivas y negativas, constituyendo una descarga eléctrica a través de gases de baja conductividad que ocurre cuando la energía acumulada en una nube alcanza valor crítico y rompe la rigidez dieléctrica del aire, las descargas pueden ocurrir de nube a nube o de nube a tierra. Las descargas atmosféricas generan un campo magnético de gran capacidad, las frecuencias que produce son en rangos de KHz a MHz.</p> <p>Las descargas atmosféricas generan un campo magnético de gran capacidad, la frecuencia de estable en un rango de KHz a MHz, los sensores de campo magnético funcionan cuando se hace circular una corriente eléctrica a través del sensor y acercamos al sensor un campo magnético transversal a la corriente, entonces el sensor devolverá un voltaje por la tensión por el terminal de salida.</p> <p>El sensor de campo magnético cuenta con una antena de lazo, es transmisora transforma energía eléctrica en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa. Las características de la antena es que depende de la relación entre sus dimensiones y la longitud de</p>				

onda de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida.

La antena es construida con alambre de cobre, cuenta con un bobinado de 14 vueltas sobre una estructura de PVC, á demás tiene una microSD para la extracción de datos de relevancia, su composición está realizada con batería de LIPO, que son recargables. Tiene un filtro pasa-banda el cual purifica las señales recibidas y no deja ingresar frecuencias inferiores a 10 kHz o superiores a 15 kHz.

OBJETIVOS:

GENERAL

Identificar el funcionamiento del sensor de campo magnético para el correcto uso y funcionamiento cuando se realice las prácticas pertinentes.

ESPECÍFICOS

- Identificar los elementos que componen al sensor.
- Examinar el funcionamiento de la pantalla LCD y del sensor de detección del contador de las descargas atmosféricas.
- Identificar la ubicación correcta del sensor frente a campos magnéticos de un equipo electrónico o de una descarga atmosférica.

LISTADO DE EQUIPOS, MATERIALES:

- Sensor de campo magnético.
- Fuente de campo magnético.

PREPARATORIO:

Se refiere a nociones preliminares enviados al estudiante como un trabajo autónomo, simulaciones, cálculos previos que corroborará a la implementación práctica:

1. **Describa que es una antena de lazo.**
2. **¿Cuál es principio de funcionamiento de una antena de lazo?**
3. **¿Cómo es considerada una antena de lazo?**
4. **¿Qué es un campo magnético?**

5. Unidades del campo magnético según el SI.

INSTRUCCIONES:

Advertencia: ¡En este ensayo de laboratorio se manejan elementos electrónicos de alta sensibilidad! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada! ¡La fuente debe desconectarse después de hacer cada medición!

- Mantener un plan de emergencia por presentarse cualquier eventualidad por falla en el equipo.
- Establecer un cronograma de las actividades a desarrollar y responsables de cada una de ellas.
- Verifique la disponibilidad de los equipos a usar en la práctica y comprobar que todos los elementos estén en buen estado.

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

Se refiere al procedimiento a seguir en la práctica:

1. Identificación de componentes que elementos conforman el sensor de campo magnético en la siguiente figura:

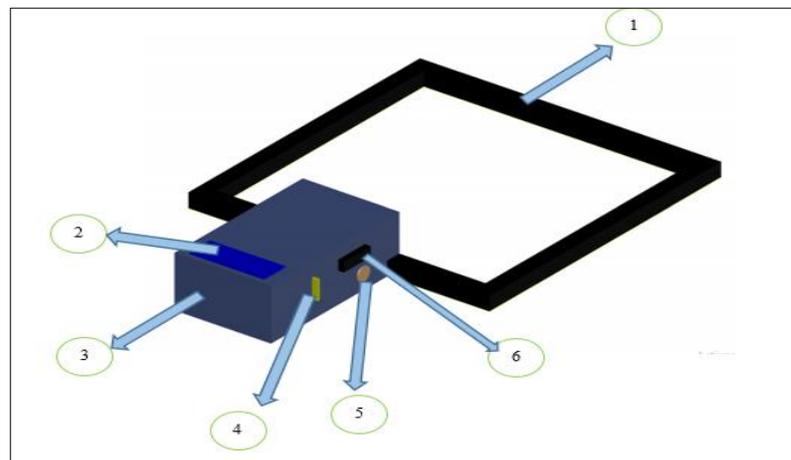


Figura 14. Sensor de campo magnético.

2. Identificar la fuente de alimentación del sensor.

3. Verificar que el sensor está detectando la variación del campo magnético.
4. Visualizar que me esté dando valores en la Pantalla LCD.

RESULTADOS OBTENIDOS:

CUESTIONARIO:

- ¿Explique cómo se induce el campo magnético en el sensor?
- ¿Explique cuando opera el filtro pasa banda?
- ¿Cómo está constituido el circuito electrónico del sensor?

CONCLUSIONES:

RECOMENDACIONES:

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	GUÍA PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO		 Ingeniería Eléctrica
FACULTAD:	CIYA	CARRERA:	Ingeniería Eléctrica
ASIGNATURA:	ALTO VOLTAJE	PERIODO ACADÉMICO:	Octubre 2019 – Febrero 2020
DOCENTE:	Ing. Ms.C. Wilian Guamán	FECHA:	
NIVEL:		PRACTICA Nº:	2
LABORATORIO DONDE SE DESARROLLA LA PRÁCTICA:		Laboratorio de Alto Voltaje	
TEMA DE LA PRÁCTICA:		Registro de Campo Magnético	

INTRODUCCIÓN

El campo magnético es un concepto introducido en la teoría electromagnética para explicar las fuerzas que aparecen entre corrientes eléctricas. Los campos electromagnéticos son producidos por cargas en movimiento, es decir, por corrientes eléctricas; aunque también se pueden producir campos magnéticos con imanes permanentes.

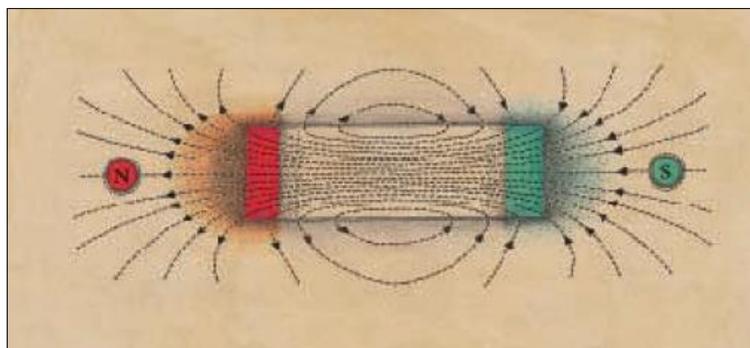


Figura 1. Líneas de campo magnético de un imán en forma de barra.

El campo magnético H en un punto dado del espacio se define como la fuerza que ejerce sobre un elemento de corriente situado en dicho punto, y se expresa en amperios por metro (A/m). Así pues, el campo eléctrico existe siempre que haya cargas eléctricas, mientras que solo hay campo

magnético cuando esas cargas están en movimiento, es decir, cuando hay un flujo de corriente eléctrica. La intensidad de campo magnético debido a una corriente **I** que recorre un solo conductor rectilíneo sobre un punto situado a una distancia **d**, se expresa como:

$$H = \frac{I}{2\pi d}$$

Para que exista un campo magnético debe haber una fuente de energía magnética, esto es, un imán o electroimán, o una corriente eléctrica en desplazamiento. La correlación entre electricidad y magnetismo está descrita en la Ley de Ampère y las ecuaciones de Maxwell. La presencia de un campo magnético puede detectarse mediante un magnetómetro.

Tabla 1. Ecuaciones de Maxwell

Forma diferencial	Forma integral	Importancia
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_C E \cdot dl = -\frac{d\phi}{dt}$	Ley de Faraday
$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_C H \cdot dl = I + \int_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot ds$	Ley circuital de Amperé
$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\oint_S D \cdot ds = Q$	Ley de Gauss
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_S B \cdot ds = Q$	No hay carga magnética aislada

OBJETIVOS:

GENERAL

Realizar una práctica con el transformador de disrupción o con un equipo que campos electromagnéticos (CEM) para el registro de campo magnético.

ESPECÍFICOS

- Observar las variaciones de campo magnéticos que genera el equipo.
- Visualizar el comportamiento del campo magnético para la comprensión del campo magnético.
- Registrar el campo magnético registrado en el sensor.

LISTADO DE EQUIPOS, MATERIALES:

- Sensor de campo magnético.
- Computadora.
- Equipo que genere campo magnético.

PREPARATORIO:

Se refiere a nociones preliminares enviados al estudiante como un trabajo autónomo, simulaciones, cálculos previos que corroborará a la implementación práctica:

- Describa leyes para el análisis del campo magnético.
- ¿Cómo se genera un campo magnético?
- ¿Cuál es el funcionamiento de LabView?
- ¿A qué se debe la generación de un campo magnético por un equipo?

INSTRUCCIONES:

Advertencia: ¡En este ensayo de laboratorio se manejan elementos electrónicos de alta sensibilidad! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada! ¡La fuente debe desconectarse después de hacer cada medición!

- Mantener un plan de emergencia por presentarse cualquier eventualidad por accidente de trabajo o enfermedad ocupacional.
- Establecer un cronograma de las actividades a desarrollar y responsables de cada una de ellas.
- Evitar distracciones en el momento de desarrollar la práctica.
- Verifique la disponibilidad de los equipos a usar en la práctica y comprobar que todos los elementos estén en buen estado.

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

Se refiere al procedimiento a seguir en la práctica:

1. Realizar mediciones con el equipo de Campo magnético, Corriente, Intensidad de campo magnético con el equipo a diferentes distancias.

Tabla 2: Tabla de valores de variaciones de campo.

Distancia (m)	Voltaje (V)	Campo magnético (uT)

2. Visualizar el comportamiento de la onda del campo magnético en LabView.

RESULTADOS OBTENIDOS:**CUESTIONARIO:**

- ¿Explique cómo se induce el campo magnético en el sensor?
- ¿Cómo varia el valor del campo magnético con la distancia?
- ¿Cómo se da el valor de la intensidad del campo magnético?

CONCLUSIONES:

RECOMENDACIONES:

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	GUÍA PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO		 Ingeniería Eléctrica
FACULTAD:	CIYA	CARRERA:	Ingeniería Eléctrica
ASIGNATURA:	ALTO VOLTAJE	PERIODO ACADÉMICO:	Octubre 2019 – Febrero 2020
DOCENTE:	Ing. Wilian Guamán	FECHA:	
NIVEL:		PRACTICA N°:	3
LABORATORIO DONDE SE DESARROLLA LA PRÁCTICA:		Laboratorio de Alto Voltaje	
TEMA DE LA PRÁCTICA:		Detección de variaciones de campo magnético.	
INTRODUCCIÓN			
<p>Transformador de disrupción</p> <p>Es un dispositivo eléctrico para cambiar las amplitudes relativas de voltaje y corriente en un circuito de CA, manteniendo la frecuencia, también se puede usar para aislar eléctricamente un circuito, se debe tener en consideración que no existen transformadores de corriente directa. Está conformado por un devanado primario y un devanado secundario, cuyos flujos magnéticos están ligados mediante un núcleo ferromagnético.</p> <p>El transformador de disrupción varía en los voltajes de 0 a 50 kV, cuenta con una protección en la cual cuando existe un corto circuito el equipo automáticamente vuelve a cero voltios. Para esta práctica es necesario realizar una emulación de una descarga, para ello se debe colocar un conductor cerca del transformador para que se genere la chispa y posteriormente se detectada por el sensor.</p> <p>Sensor de campo magnético</p> <p>El sensor detecta campo magnético, el campo inducido es transformado por la antena y el circuito electrónico en valores de voltaje, este valor de voltaje será introducido en el interfaz Arduino y posteriormente en LabView para obtener valores para el Flujo magnético, Campo magnético, Corriente eléctrica e intensidad del campo magnético. Se puede visualizar el comportamiento de la variación el campo magnético y detectar la descarga que ocurre.</p>			

Para el registro de las variaciones de campo magnético, se introduce un punto de referencia en el prototipo, cuando se emula una descarga, se forma un pico y ese pico es detectado por sensor para luego registrar, almacenar y posteriormente ser extraída los datos de la microSD.

OBJETIVOS:

GENERAL

Realizar emulaciones de descargar atmosféricas mediante el uso del transformador de disrupción para el registro de datos.

ESPECÍFICOS

- Simular descargas atmosféricas con el transformador de disrupción.
- Registrar el conteo del número total de las descargas atmosféricas ocurridas.
- Observar el registro de datos en el programa LabView

LISTADO DE EQUIPOS, MATERIALES:

- Sensor de campo magnético.
- Computadora.
- Transformador de disrupción.

PREPARATORIO:

Se refiere a nociones preliminares enviados al estudiante como un trabajo autónomo, simulaciones, cálculos previos que corroborará a la implementación práctica:

- Describa leyes para el análisis del campo magnético.
- ¿Qué es un transformador para ensayos de disrupción?
- ¿Qué es una descarga atmosférica?
- ¿Cómo se forma una descarga atmosférica?
- ¿Cuáles son los valores de campos magnéticos en una descarga atmosférica?

INSTRUCCIONES:

Advertencia: ¡En este ensayo de laboratorio se manejan elementos electrónicos de alta sensibilidad! ¡No haga ninguna conexión cuando la fuente esté conectada! ¡La fuente debe desconectarse después de hacer cada medición!

- Mantener un plan de emergencia por presentarse cualquier eventualidad por accidente de trabajo o enfermedad ocupacional.
- Establecer un cronograma de las actividades a desarrollar y responsables de cada una de ellas.
- Evitar distracciones en el momento de desarrollar la práctica.
- Verifique la disponibilidad de los equipos a usar en la práctica y comprobar que todos los elementos estén en buen estado.

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

Se refiere al procedimiento a seguir en la práctica:

1. Realizar mediciones con el equipo de Campo magnético en cada descarga emulada

Tabla 1: Mediciones realizadas

Número de descargas	Nivel de Voltaje (kV)	Distancia (m)	Campo magnético (uT)	Hora/Fecha/Año

2. Visualizar el comportamiento del pico del campo magnético en LabView.
3. Simular una descarga en el transformador de disrupción.

4. Visualizar en LabView la detección de la descarga atmosférica.
5. Comprobar si se registra la detección de la descarga.

RESULTADOS OBTENIDOS:

CUESTIONARIO:

- ¿Explique cómo se induce el campo magnético en el sensor?
- ¿Cuándo se registra un dato de descarga atmosférica?
- ¿Se puede extraer datos de sensor de campo magnético?
- ¿En qué se puede aplicar el sensor?

CONCLUSIONES:

RECOMENDACIONES:

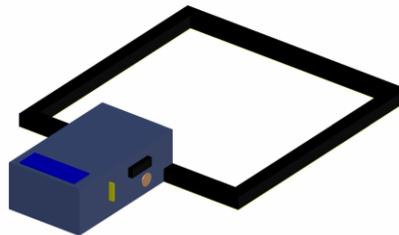


ANEXO XXI. Manual del sensor de campo magnético.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADA

INGENIERÍA ELÉCTRICA

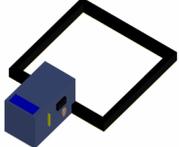


**“DISEÑO DE UN SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO MEDIANTE EL ESTUDIO DE LA
CORRIENTE INDUCIDA PARA DETECTAR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”**

Manual de Usuario

Versión: 0001

Fecha: 07/2020

	SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO	Ingeniería Eléctrica
---	--	-----------------------------

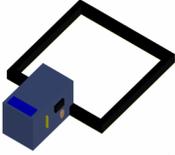
HOJA DE CONTROL

Institución	Universidad Técnica de Cotopaxi		
Carrera	Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia		
Proyecto	“Diseño de un sensor de campo magnético mediante el estudio de la corriente inducida para detectar descargas atmosféricas”		
Entregable	Manual de Usuario	Fecha Versión	Febrero/2020
Versión/Edición	0001	Fecha Aprobación	Febrero/2020
Aprobado por	Ing. MsC. Wilian Patricio Guaman Cuenca	Nº Total de Páginas	8

Autores

Nombre y Apellidos
Sandra Marible Naula Allaica
Edison Danilo Tubón Laguna

INFORMACIÓN GENERAL



SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO

Ingeniería Eléctrica

Este prototipo está diseñado para detectar variaciones de campo magnético, por tal motivo nace la necesidad de crear este manual de instrucciones que contiene las debidas precauciones y advertencias que deben ser observadas por el usuario para garantizar un funcionamiento seguro del sensor y mantenerlo en óptimas condiciones de seguridad. Por ello, es recomendable leer completamente este manual si lo va a utilizar por primera vez.

INTRODUCCIÓN

El diseño del sensor nos permite medir variaciones de campo magnético y mostrar simultáneamente el valor del campo, corriente y la intensidad de campo magnético. Las unidades de medida del sensor se encuentran en micro tesla para el campo magnético, en amperios para la corriente y en Amperios/metros para la intensidad de campo magnético. Este medidor es ideal para detectar variaciones de campos magnéticos presentados en el entorno, líneas de eléctricas, equipos electrónicos, eléctricos o campos magnéticos producidos por las descargas atmosféricas.

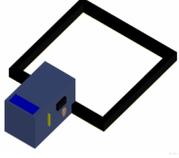
OBJETIVO

Registrar el número de descargas atmosféricas, mediante la detección del campo magnético y visualizar los valores de: campo magnético, corriente e intensidad del campo magnético que se produjo la descarga.

CONCEPTOS

Campos electromagnéticos: Los campos eléctricos y magnéticos variables con el tiempo están acoplados, produciendo un campo electromagnético. En el electromagnetismo hay cuatro cantidades de campo vectoriales fundamentales: intensidad de campo eléctrico **E**, densidad de flujo eléctrico o desplazamiento eléctrico **D**, densidad de flujo magnético **B** e intensidad de campo magnético **H**.

Campo eléctrico: El concepto de campo eléctrico fue introducido en la teoría

	SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO	Ingeniería Eléctrica
---	--	-----------------------------

electromagnética para describir las fuerzas existentes entre cargas eléctricas. El campo eléctrico en un punto del espacio producido por una o varias cargas eléctricas se define en términos de la fuerza que experimenta una unidad de carga estacionaria situada en dicho punto.

Densidad de flujo eléctrico: La dirección de la densidad de flujo D en un punto es la dirección de las líneas de flujo en ese punto, y su magnitud es igual al número de líneas de flujo que atraviesan una superficie normal a las líneas, dividida entre el área de la superficie.

Campo magnético: El campo magnético es un concepto introducido en la teoría electromagnética para explicar las fuerzas que aparecen entre corrientes eléctricas. Los campos electromagnéticos son producidos por cargas en movimiento, es decir, por corrientes eléctricas; aunque también se pueden producir campos magnéticos con imanes permanentes.

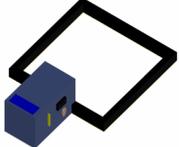
Intensidad de campo magnético: Los campos magnéticos generados por las corrientes y que se calculan por la ley de Ampere o la ley de Biot-Savart, se caracterizan por el campo magnético B medido en Teslas.

Descarga atmosférica: La descarga atmosférica es la unión violenta de las cargas positivas y negativas, constituyendo una descarga eléctrica a través de gases de baja conductividad. Las descargas pueden ocurrir de nube a nube o de nube a tierra. Estas últimas son a las que nos referiremos, por ser las que provocan daños tanto en tierra, como en el agua.

FUENTE DE ENTRADA DE ALIMENTACIÓN.

El sensor está adaptado para dos fuentes de alimentación mediante baterías flipo de 7.4 voltios con 1000mA, las mismas que deben ser tratadas y cargadas cuidadosamente, las baterías se encuentran conectadas al integrador de instrumentación AD620, el cual amplifica la onda de ingreso de la antena. Además, las baterías alimentan a la pantalla LCD y arduino.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

	SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO	Ingeniería Eléctrica
---	--	-----------------------------

El sensor de campo magnético está diseñado para detectar las variaciones de campo magnético generado por todo equipo o circuito eléctrico, además se diseña el sensor de campo magnético con el fin de detectar descargas atmosféricas mediante el estudio de la corriente inducida. Los estudiantes de ingeniería podar dar uso del sensor para medir variaciones de campo magnético y simular las descargas atmosféricas el laboratorio de alto voltaje con la ayuda del transformador de disrupciones, por otra parte toda descarga simulada será registrada con hora, fecha y valor de campo magnético ya cuento con una microSD de almacenamiento.

Características

- Interruptor ON/OFF
- Almacenar datos
- Visualizar el pico de descarga: interfaz de LabView
- Lectura de variaciones campo magnético
- Lectura de la corriente
- Lectura de la corriente inducida
- Reseteo de datos
- Sep point de 0 a 5.

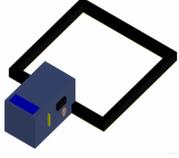
Pantalla Principal del sensor

En la pantalla principal del sensor muestra el valor de campo magnético que está midiendo en unidades de micro teslas y un set-point para variar el rango de campo magnético y para determinar si lo considera como descarga atmosférica, el rango del set-poin es de 0 a 5.



Figura 1: Pantalla principal del sensor

- 1) Valor de campo magnético en micro teslas.

	SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO	Ingeniería Eléctrica
---	--	-----------------------------

2) Set-point

Pantalla de interfaz LabView

En la pantalla de interfaz LabView se puede observar de una manera más demostrativa el valor de las variaciones de campo magnético medido por el sensor ya que se muestra la onda de campo magnético medido en tiempo real. Esta ventana nos mostrará las variables que cuenta el sensor de campo magnético registradas en tiempo real, tanto de la descarga eléctrica simulada y su registro, también cuenta con un set-point el cual podrá ser modificado, además cuenta con un contador de descargas y un botón de reset para borrar los registros mostrados en la pantalla, pero el reset borra los registros en pantalla mas no los datos almacenados en la microSD.

Al momento de conectar el sensor a la computadora o PC, se debe tener en cuenta que no cause ninguna interferencia a la señal recibida por el sensor. Posteriormente si se desea visualizar las variaciones de campo magnético el cable debe estar conectando permanentemente con la computadora, ya que está directamente relacionada con la comunicación de Arduino y para visualizar los valores obtenidos con la interfaz de LabView.

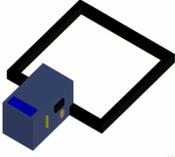
Requerimientos para interfaz de LabView:

- Sensor de campo magnético
- Computadora PC
- Programa LabView
- Interfaz Arduino
- Cable del Arduino

Opciones del sistema:

El presente Manual está organizado de acuerdo a la secuencia de uso e ingreso a los programas para observar los valores medido o registrados en la computadora, para visualizar se debe realizar lo siguiente:

- Encender el sensor de campo magnético.



SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO

Ingeniería Eléctrica

- Conectar el sensor con el cable del Arduino a la computadora.
- Abrir el programa de LabView.
- Conectar el puerto de la entrada con el interfaz LabView.
- Correr el programa para visualizar la descarga o las variaciones de campo magnético

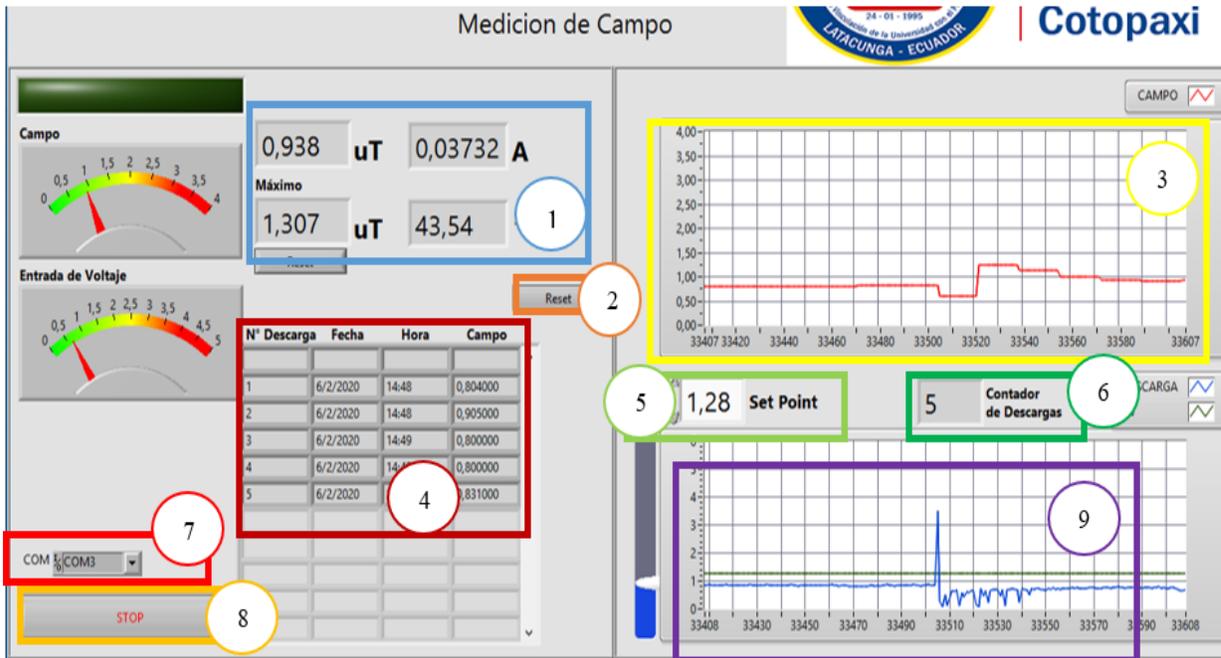
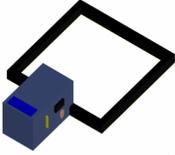


Figura 2: Pantalla de interfaz LabView.

- 1) Valores de campo magnético medido en micro teslas.
- 2) Reset para valores registrados (4).
- 3) Onda del campo magnético en tiempo real.
- 4) Registro de descargas.
- 5) Set-point.
- 6) Contador de descargas.
- 7) Puerto para conexión a PC.
- 8) Stop.
- 9) Onda de la descarga en tiempo real.

DESCRIPCION DEL SENSOR



SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO

Ingeniería Eléctrica

1. Antena
2. Pantalla LCD
3. Carcaza o cubierta
4. Micro SD
5. ON/OFF
6. USB

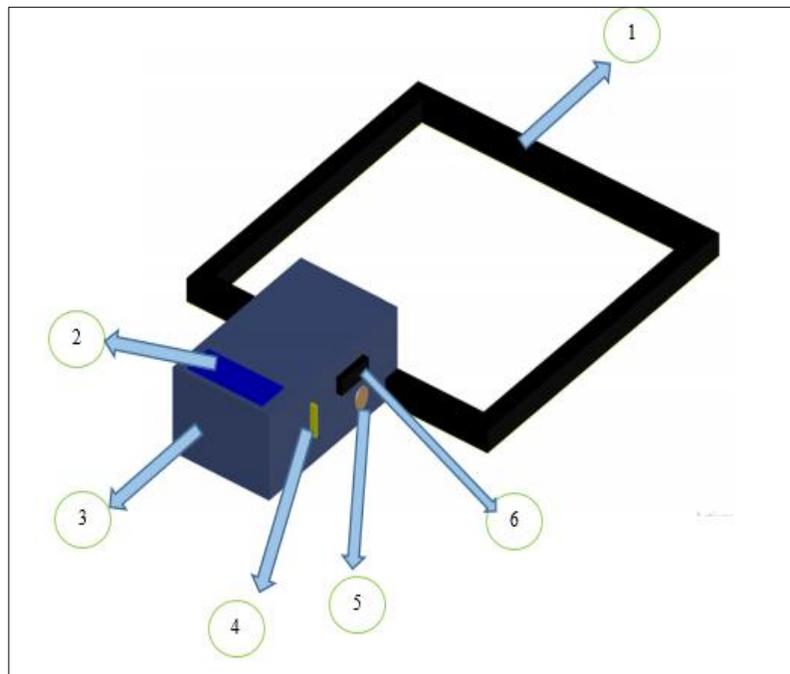
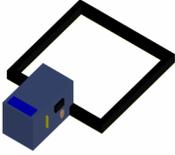


Figura 3: Partes del sensor de campo magnético

PRECAUCIONES:

- Antes de realizar pruebas o toma de medidas, compruebe que las baterías estén totalmente cargadas ya que pueden alterar en la recepción de la señal.
- Es necesario que el sensor cuente con la tarjeta SD para el almacenamiento de datos medidos.
- Limpie el sensor con un pañuelo suave o seco, la humedad puede dañar el sensor.
- Realice las mediciones de acuerdo a las indicaciones instruidas.
- Revise que no existan daños o rupturas en el sensor.



SENSOR PARA MEDIR VARIACIONES DE CAMPO MAGNETIO

Ingeniería Eléctrica

ADVERTENCIAS:

- Sea cuidadoso al momento de trabajar cerca de fuentes de CEM extremadamente altas.
- No arrojar al piso.
- Inserte el código adecuado para el funcionamiento del equipo.
- Asegúrese que no existan otras fuentes de CEM, para que sus datos sean óptimos.
- Nunca intente realizar mediciones si observa alguna anomalía, como cables rotos, cables metálicos expuestos al sensor.
- Antes de cambiar las baterías procure que el sensor se encuentre en la posición OFF