

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA ELÉCTRICA
VALPARAÍSO-CHILE



“Diseño y construcción de un dispositivo que permita registrar la corriente de retorno de rayo en una estructura metálica que ha sido impactada”

FERNANDO HUMBERTO ESTRADA ÁVALOS

**MEMORIA TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO INGENIERO
ELECTRICISTA.**

PROFESOR GUÍA:

JOHNY MONTAÑA CHAPARRO

CORREFERENTE:

ROGER SCHURCH

Resumen ejecutivo

En esta memoria de título se presenta un proyecto de diseño y construcción de un dispositivo para medir la corriente máxima de retorno de rayo. El artefacto también deberá funcionar como un contador de las descargas atmosféricas que impactan a estructuras metálicas, en la cual se ha instalado el dispositivo. Permitirá obtener información cuantitativa y aportará datos estadísticos para la instalación de protecciones según las condiciones geográficas o para, simplemente, facilitar la obtención de datos de algunos parámetros eléctricos de los rayos. Al localizar y contar rayos nube-tierra, puede servir para la comprobación de sistemas de medición de descargas remotas.

Primero se realizó una revisión del estado del arte sobre los métodos de medición de corriente y finalmente se optó por un sensor tipo bobina Rogowski, apropiada por su respuesta en altas frecuencias, capaz de medir en hasta frecuencias de Megahertz.

Se analizó el sensor en profundidad para conocer su comportamiento y respuesta en frecuencia al variar sus parámetros eléctricos y geométricos.

La construcción y diseño de este instrumento involucra tres partes: un sensor Rogowski, un conjunto de Arduinos para la lectura y procesamiento de datos y un circuito PCB como adaptador con filtros de frecuencias, protector de la seguridad y buen funcionamiento del lector.

Construido el dispositivo, se le realizaron pruebas con un generador de impulsos de corriente para ver la respuesta y confirmar los parámetros eléctricos. De manera paralela, se probó la velocidad de muestreo y la respuesta del circuito adaptador con un generador de señales. Para las pruebas del Sistema Lector, se le incorporó el circuito adaptador y los Arduinos. Se confirmó el correcto almacenamiento y operación del Arduino.

Agradecimientos

Al iniciar este proceso, la verdad, pensé que sería más corto, que las cosas serían más fáciles, que la mayoría de los experimentos se darían al primer intento, que no tendría problemas de horario, ruidos, familiares, profesores, problemas de motivación y muchos otros que ahora no recuerdo. Sin embargo, al terminar esta memoria, concluyendo el trabajo propuesto y cumpliendo con los objetivos, sólo queda agradecer la infinita paciencia de mis más cercanos y la increíble motivación de los que también han pasado por esto.

Esta memoria de titulación está compuesta de pocas páginas, pero de muchas horas de esfuerzo, de sueño y de estrés, por eso gracias a mi familia por el apoyo constante, una paciencia gigante y por sobre todo la incondicionalidad con la cual se presentaron durante los muchos fracasos que tuve durante estos años. Prometo devolver, aunque sea un poco de todo el tiempo que me han dedicado.

Gracias a los muchos que quedaron en el camino y a los pocos que siguieron, ya que probablemente sin esa conversación importante o pequeña, tal vez no estaría aquí. Gracias por todas esas instancias, paseos, partidos, noches y hasta días enteros. A mis innumerables grupos de amigos, gracias.

Gracias a mi profesor guía, por no rendirse conmigo y por la paciencia que me tuvo. También por más de alguna conversación en su oficina que sirvió para motivarme y reencantarme de este trabajo.

A mi segunda familia, la de mi novia, que varias veces tuvieron que soportarme y llenarme de energía y ánimo para seguir peleando.

Gracias Javiera y espero que desde ahora podamos cumplir nuestros sueños varias veces frustrados.

Tabla de contenidos

Resumen ejecutivo	2
Agradecimientos	3
Tabla de contenidos	4
Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
Índice de ecuaciones	9
1. Introducción	10
2. Objetivos	12
3. Marco Teórico	13
3.1 Los rayos.....	14
3.1.1 Formación del Rayo.....	14
3.1.2 Tipos de rayos.....	15
3.1.3 Parámetros del rayo	16
3.2. Los sistemas de localización de rayo	23
3.2.1 Vaisala	23
3.2.2 Lightning image Senson (LIS).....	24
3.2.3 World Wide Lighning Location Network (WWLLN)	26
3.2.4 LINET.....	26
3.3 Métodos de obtención y detección de datos a distancia	28
3.3.1 Métodos de detección para los sistemas de localización de rayos.....	29
3.3.2 Características de los datos según frecuencia de operación	32
3.3.3 Dispositivos de medición.....	33
3.4 Métodos de medición de corriente.....	33
3.4.1 Métodos Directos	33
3.4.2 Métodos Indirectos	36
4. Diseño y Construcción	44
4.1 Sensor	44
4.1.1 Elección del sensor	44
4.1.2 Modelación de la bobina.....	46
4.1.3 Criterios de Construcción	50
4.1.4 Construcción de la bobina para medición.....	56

4.2 Lector.....	58
4.2.1 Arduino/Genuino	59
4.2.2 Lectura de datos.....	59
4.3 Adaptador.....	65
4.3.1 Fase de diseño	65
4.3.2 Circuito diseñado.....	67
5. Ensayos de Laboratorio	69
6. Conclusiones.....	76
Referencias.....	78
Anexos.....	84
1. Otros tipos de rayos	84
2. Otros sistemas de localización de rayos.....	85
3. Características/Data sheet de los Arduinos	87
4. Circuito modelado en Proteus y Placa PCB correspondiente.....	89
5. Elementos del Circuito de medición:	91
6. Construcción de una bobina y medición de su respuesta.....	93
7. Códigos de trabajo MATLAB.....	97
7.1 Código cálculo de parámetros de bobina Rogowski	97
7.2 Impacto del número de vueltas en la frecuencia de corte	98
7.3 Impacto en la frecuencia de corte al incrementar la inductancia propia	99
7.4 Impacto en la frecuencia de corte al incrementar la resistencia	100
7.5 Impacto en la frecuencia de corte al incrementar la capacitancia	100
7.6 Análisis de sensibilidad al aumentar el diámetro del núcleo.....	100
7.7 Análisis de sensibilidad al aumentar el largo de la bobina	102
7.8 Análisis de sensibilidad al aumentar el diámetro del alambre	103
7.9 Análisis de sensibilidad al aumentar el número de vueltas	105
7.10 Selección de valores de resistencia para la construcción del amplificador de instrumentación	107
7.11 Programación del generador de señales RIGOL.....	107
7.12 Determinación práctica de inductancia mutua M	107
8. Códigos de trabajo para Arduinos.....	109
8.1 Código de operación Arduino MEGA (Receptor)	109
8.2 Código de operación para Arduino DUE (Lector)	112

9. Manual de Usuario del Contador de Descargas Atmosféricas.....	117
Introducción	117
Aplicaciones.....	117
Funcionamiento	117
Especificaciones	118
Manual de instalación y operación	119
Manual de Prueba del Generador de Impulsos de Corriente	124

Índice de figuras

Figura 1 Modelo bipolar del cumulonimbos [8].....	14
Figura 2 Unión entre el rayo y el trazador ascendente [10].	15
Figura 3 Mapa nivel Cerámico mundial [15].	16
Figura 4 Tiempos de frente y cola [17].....	17
Figura 5 Secuencia de las fases de una descarga atmosférica [18].....	18
Figura 6 Frecuencia Acumulada del T1 y Segundo Stroke Visacro y Soares [19].	19
Figura 7 Descarga Atmosférica común [23].	20
Figura 8 Descarga atmosférica con stroke (tiempo no a escala) [23].	21
Figura 9 Rayo de polaridad positiva que usa el mismo canal de descarga que un rayo de polaridad negativa para crear una descarga atmosférica bipolar [25].	22
Figura 10 Cobertura del sistema Vaisala en EEUU [28].....	23
Figura 11 Países asociados al sistema Vaisala [27].	24
Figura 12 Satélite de medición LIS [30].	24
Figura 13 Área de mapeo sistema LIS [30].	25
Figura 14 Mapa de muestra 1300x1300 km ² del sistema [30].	25
Figura 15 Mapa de sensores activos en el mundo WWLLN [32].....	26
Figura 16 Mapa de sensores instalados en Europa por LINET [36].....	27
Figura 17 Gráfico de tecnología de muestreo vs Frecuencia [38].....	28
Figura 18 Triangulación de la dirección por los azimuts medidos [40].	30
Figura 19 Dispositivo de medición por detección de Campo Magnético [41].	30
Figura 20 Método de medición TOGA o TOA [37].	31
Figura 21 Forma de colocar un medidor de Corriente Shunt [47].	34
Figura 22 Incremento de la impedancia según la frecuencia de operación [47].	35
Figura 23 Funcionamiento de un transformador de corriente [49].	36
Figura 24 Circuito equivalente de una bobina Rogowski [47].....	38
Figura 25 Colocación de una bobina Rogowski para medir corrientes que pasan a través de un conductor [45].....	38
Figura 26 Principio de funcionamiento de un medidor por efecto Hall [45].	39
Figura 27 Principio de funcionamiento de un medidor de Flujo magnético [47].	40
Figura 28 Región de trabajo de una Resistencia magnética [47].	41

Figura 29 Esquema de funcionamiento del sensor de fibra óptica polarimétrico [47].	42
Figura 30 Esquema de funcionamiento del sensor de fibra óptica por interferómetro [47].	42
Figura 31 Diagrama de bloques del dispositivo.	44
Figura 32 Típica bobina Rogowski [54].	45
Figura 33 Modelo simple de la bobina Rogowski [58].	46
Figura 34 Representación del circuito equivalente de un sensor Rogowski.	47
Figura 35 Modelo de parámetros distribuidos de una bobina Rogowski.	48
Figura 36 Respuesta en frecuencia de un sensor Rogowski al aumentar la resistencia hasta 1[MOhm] (línea roja) pasando por diferentes valores menores (azul punteado). Los demás parámetros eléctricos se mantienen constantes.	50
Figura 37 Respuesta en frecuencia de un sensor Rogowski al aumentar la inductancia hasta 1[H] (línea roja) pasando por diferentes valores menores (azul punteado). Los demás parámetros eléctricos se mantienen constantes.	51
Figura 38 Respuesta en frecuencia de un sensor Rogowski al aumentar la capacitancia hasta 1[F] (línea roja) pasando por diferentes valores menores (azul punteado). Los demás parámetros eléctricos se mantienen constantes.	52
Figura 39 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del largo de la bobina.	53
Figura 40 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del diámetro del núcleo.	53
Figura 41 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del diámetro del alambre de Cobre.	54
Figura 42 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del número de vueltas.	55
Figura 43 Formas de núcleos de una bobina Rogowski [61].	55
Figura 44 Incremento de inductancia mutua (gráfico a la izquierda) y error porcentual relativo de medición (gráfico a la derecha) Vs la relación entre diámetro exterior/diámetro interior de una bobina Rogowski [61].	56
Figura 45 Bobina Rogowski construida y sus características.	58
Figura 46 Diagrama de bloques del sistema lector.	59
Figura 47 Arduino DUE [64].	60
Figura 48 Diagrama de funcionamiento del Arduino Due.	61
Figura 49 Conexión serial de comunicación entre pines de Arduinos.	62
Figura 50 Conexión física entre ambos Arduinos.	62
Figura 51 Arduino MEGA [64].	62
Figura 52 Adaptador de Tarjeta SD [64].	63
Figura 53 Conexión física entre Arduino MEGA y Tarjeta SD.	63
Figura 54 Conexión física entre Arduino MEGA y LCD Display.	64
Figura 55 Diagrama de funcionamiento del Arduino MEGA.	64
Figura 56 Proceso de transformación de la corriente [66].	65
Figura 57 Circuito Amplificador/Reductor con amplificadores operacionales.	66
Figura 58 Filtro pasa-bajo con estructura Múltiple FeedBack.	66
Figura 59 Estructura del circuito operacional de instrumentación.	67
Figura 60 Modelo del circuito de pruebas en Proteus.	68
Figura 61 Vista de Placa PCB: diseño 3D y placa de Cobre.	68
Figura 62 Circuito de impulso de corriente.	69
Figura 63 Simulación de un impulso de corriente subamortiguado.	69

Figura 64 Señal de corriente del impulso generado.	70
Figura 65 Respuesta de la bobina Rogowski (azul) construida a un impulso de corriente subamortiguado (amarillo).	70
Figura 66 Respuesta de la bobina construida (morado) y del circuito adaptador (azul) al impulso de 200[A] (amarillo).	71
Figura 67 Señal en los terminales de la placa PCB y montado sobre Offset Externo (morado) y pulso de tensión del generador de señales (azul).	72
Figura 68 Medición en Arduino Due del impulso de Tensión en bits.	72
Figura 69 Medición en Arduino Due del impulso de tensión en Volts.	72
Figura 70 Error de Offset.	73
Figura 71 Señal de entrada integrada e impacto del error provocado por OFFSET.	73
Figura 72 Datos almacenados en tarjeta SD correspondientes al número de eventos y al valor máximo de la descarga.	74
Figura 73 Contador de descargas atmosféricas construido.	75
Figura 74 Denominación de los rayos según altura y distancia.	85
Figura 75 Circuito Adaptador.	89
Figura 76 Circuito para placa PCB.	90
Figura 77 Respuesta en Frecuencia Circuito Adaptador.	91
Figura 78 Capacitor 22[uF]	91
Figura 79 Relé Interruptor de Laboratorio.	92
Figura 80 Transformador de alimentación DC del circuito.	93
Figura 81 Toma de muestras de varias bobinas construidas.	93
Figura 82 Comienzo de la construcción de una bobina.	94
Figura 83 Mitad de la construcción de una bobina.	95
Figura 84 Bobina Rogowski 16000 vueltas terminada.	96
Figura 85 Respuesta de frecuencia de diferentes bobinas con distinto número de vueltas.	96
Figura 86 Señal de entrada (azul) y aproximación matemática (roja).	108
Figura 87 Derivada de la función de entrada y aproximación matemática con Factor M.	108

Índice de tablas

Tabla 1 Tiempos T1 del primer Return Stroke [19].	18
Tabla 2 Tiempos T1 del segundo Stroke [19].	18
Tabla 3 Estadística de Corriente Máxima de las descargas según Cigre [20] [21].	19
Tabla 4 Estadística de Corriente Máxima de las descargas según IEEE [20] [21].	19
Tabla 5 Estadística de gradiente máximo según Cigre [20] [21].	20
Tabla 6 Estadística de gradiente máximo de las descargas según IEEE [20] [21].	20
Tabla 7 Datos estadísticos de Strokes en distintas localidades [26].	22
Tabla 8 Denominación de frecuencias según su rango.	29
Tabla 9 Comparación entre tecnologías de medición de corriente (Modificada de [47]).	43
Tabla 10 Tabla de comparación entre valor teórico y práctico.	58
Tabla 11 Información técnica Arduino DUE.	87
Tabla 12 Información técnica Arduino MEGA.	88
Tabla 13 Mediciones del contador de descarga y el error asociado.	116

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Densidad de rayos a tierra en función de días de tormenta	16
Ecuación 2 Densidad de rayos a tierra en función de horas de tormenta.....	17
Ecuación 3 Tensión en función del flujo enlazado y el número de vueltas	29
Ecuación 4 Ecuación que relaciona la dirección de los azimuts con la tensión inducida	29
Ecuación 5 Ecuación de Schumann para medición de frecuencias resonantes de las descargas atmosféricas.....	32
Ecuación 6 Relación entre corrientes del lado primario y secundario de un transformador de corriente.....	36
Ecuación 7 Corriente según Ley de Ampere	37
Ecuación 8 Flujo magnético en función de la corriente.	37
Ecuación 9 Tensión inducida por la variación de flujo en el tiempo.....	37
Ecuación 10 Tensión entre los terminales de una bobina Rogowski	37
Ecuación 11 Inductancia mutua de una bobina Rogowski.....	37
Ecuación 12 Tensión inducida por ley de Lorentz	39
Ecuación 13 Tensión resultante producida por la relación de la inducción magnética en el sensor.....	40
Ecuación 14 Ecuación de la Birrefringencia Circular de un material.....	41
Ecuación 15 Tensión inducida en una sola espira al haber un campo magnético.	46
Ecuación 16 Tensión total de la bobina como equivalente de la suma de todas las espiras.....	46
Ecuación 17 Inductancia mutua con núcleo de aire de la bobina Rogowski.	46
Ecuación 18 Resistencia en función de la longitud y área del conductor.	47
Ecuación 19 Inductancia en función de la sección y el número de vueltas del material.....	47
Ecuación 20 Capacitancia propia entre cada vuelta y el retorno.....	47
Ecuación 21 Capacitancia propia equivalente entre vueltas o espiras de una bobina.	47
Ecuación 22 Función de transferencia en los terminales de la bobina.	48
Ecuación 23 Comportamiento diferencial de la bobina según sus parámetros y las condiciones. ..	48
Ecuación 24 Restricciones del funcionamiento de una bobina Rogowski.	49
Ecuación 25 Función de transferencia en relación a los parámetros distribuidos.	49
Ecuación 26 Variables específicas de los parámetros distribuidos en función de los elementos del circuito equivalente de un sensor Rogowski.....	49
Ecuación 27 Función de transferencia para una bobina auto integrada.	49
Ecuación 28 Restricción para el funcionamiento correcto del modelo auto integrado.	50
Ecuación 29 Función de transferencia para el modelo auto integrado de la bobina Rogowski.	50
Ecuación 30 Tensión amplificada o disminuida en relación a las resistencias que componen el arreglo operacional.....	66
Ecuación 31 Resistencias y capacitancias necesarias para lograr la frecuencia de corte específica de diseño.....	66
Ecuación 32 Tensión de salida en los terminales de un amplificador de instrumentación.	67
Ecuación 33 Calibración del OFFSET en el Arduino Due.	71
Ecuación 34 Integración numérica de la señal de entrada.	73
Ecuación 35 Valor de corriente final considerando los factores del sistema.....	74

1. Introducción

El primer sistema de protección contra rayos fue inventado por Benjamín Franklin en el año 1752 [1]. El método consiste en una varilla enterrada en el suelo y un conductor que sube hacia un punto alto para traer la corriente de las descargas atmosféricas al suelo a través del camino con menor resistencia.

Benjamín Franklin descubrió la relación entre los rayos, la carga de las nubes y la influencia de la conexión a tierra de los conductores y aisladores. Desde esa fecha se han establecido relaciones en el campo magnético que crean las altas corrientes de los rayos además de ir mejorando constantemente los pararrayos existentes [2].

Durante el siglo XIX, por primera vez, se tomaron mediciones de la corriente de los rayos. En el siglo XX, Charles Thomson Rees Wilson recibió un premio Nobel por haber logrado visibilizar las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente por condensación de vapor y formular una teoría sobre la separación de las cargas en las tormentas eléctricas [3]. Este conocimiento permitiría acuñar el concepto de “Cumulonimbos”, para nombrar un fenómeno previo a la descarga atmosférica.

La posibilidad de que se produzcan estos fenómenos físicos atmosféricos en todos los lugares del planeta, ha obligado a establecer niveles de protección para que las descargas atmosféricas no causen daños ni a los bienes, ni a las personas; por lo que se establecen 3 niveles o tipos de protección [4]:

- El primero consiste en establecer un camino directo para la descarga, evitando la interacción entre el rayo y los bienes.

- El segundo nivel consiste en minimizar los efectos indirectos producidos por las descargas atmosféricas, evitando la inducción de señales mediante un diseño adecuado de elementos conductores que protejan los equipos.

- El tercer nivel de protección es a través de filtros o dispositivos descargadores, que absorben los excesos de energía y/o son capaces de disiparlos al ambiente.

Para diseñar y construir estos niveles de protección, se han tenido en cuenta las características locales del sitio en el cual se instalará un bien o se realizará una construcción. A nivel global, existen redes que continuamente y en tiempo real “muestran” distintos lugares del mundo. De esta manera se establecen patrones y se especifican características del ambiente, tanto por el número de descargas atmosféricas anuales como por la corriente máxima de los rayos, entre otros.

En el último tiempo, en Chile, las descargas atmosféricas han causado fallas en el sistema de transmisión [5]. Existe, por tanto, la posibilidad de que la corriente de las descargas atmosféricas haya superado los valores esperados en el diseño de las protecciones, así como las consideraciones de las puestas a tierra. Esta circunstancia obliga a actualizar la información de la corriente de retorno de las descargas atmosféricas.

Esta memoria está centrada en el diseño y la construcción de un mecanismo que registre las corrientes máximas de retorno desde estructuras metálicas impactadas por una descarga atmosférica. A la vez, se enfocará en la creación de una herramienta que registre los eventos ocurridos en el lugar donde se instalará el dispositivo, y que también almacene la intensidad peak de retorno de las descargas atmosféricas que impacten sobre dichas estructuras.

Para la realización de este proyecto primero se hará una descripción del proceso de formación del cumulonimbo y los parámetros característicos de las descargas atmosféricas.

Conocidos los parámetros y el comportamiento general de los rayos, se realizará un resumen de los sistemas de localización de descargas atmosféricas más importantes. Se describirán los sensores y métodos de obtención de datos de localización a distancia. Se hará una revisión bibliográfica de los métodos de obtención de datos de corriente.

Se elegirá un método de detección de corriente y se estudiará en profundidad. Este análisis permitirá determinar los parámetros geométricos y consideraciones para construir un sensor. Se usará un sistema electrónico para crear un dispositivo que analice los datos del sensor, realice un conteo de las descargas atmosféricas que caigan en la torre donde fue instalado y almacene el valor máximo de corriente de retorno.

Para la calibración de este sistema, éste se someterá a señales de tensión e impulsos de corriente de baja intensidad en los laboratorios y dependencias del departamento de electricidad de la Universidad Técnica Federico Santa María.

2. Objetivos

Para optar al título de ingeniero electricista esta memoria propone los siguientes objetivos:

- Revisar los dispositivos de medición de corriente y conteo de descargas eléctricas atmosféricas existentes en la actualidad.
- Diseñar un dispositivo que permita medir la corriente de retorno del rayo en una estructura metálica que ha sido impactada, almacene el número de impactos y el valor máximo de cada descarga.
- Construir el dispositivo diseñado y realizar prueba de calibración en el laboratorio de Alta Tensión.

3. Marco Teórico

Los dispositivos contadores de rayos o descargas atmosféricas son instrumentos eléctricos/electrónicos, cuyo propósito es contar los rayos que impactan las instalaciones, pararrayos o bajantes metálicas.

La instalación de dispositivos de conteo esta normada en algunos países según los siguientes reglamentos UNE 21.186, NFC 17.102, NE•EN62.305 y IEC 62561:2012 que constituyen los requisitos para los sistemas de protección contra rayos. Esta norma establece que: “Cuando esté prevista la instalación de un contador de impactos de rayos, éste debe ser instalado sobre el conductor de bajada más directo, por encima de la junta de control y, en todos los casos, aproximadamente por encima del suelo” [6] . Para Chile no es obligación instalar contadores de rayos.

Según esta Norma [6], las estructuras metálicas pueden ser dañadas de distintas maneras, por lo que se establece que se realice mantención a las estructuras por diversas razones, ya sea: “corrosión, golpes mecánicos, inclemencias atmosféricas e impactos de rayos” [6]. El contador de descargas ayuda a la verificación de impacto de rayos en las estructuras. Esta Norma establece la periodicidad de mantenimiento según el nivel de protección (I, II ó III). Para instalaciones nivel I se recomienda realizar mantenimiento cada dos años, en el caso de instalaciones de nivel II ó III se sugiere cada tres años. En ambientes corrosivos, se recomienda mantenimiento en periodicidad especial: para nivel I cada un año y para los niveles II y III cada dos años [6].

Para la construcción de un contador de descargas, es necesario conocer los sistemas de localización de rayos, ya que los contadores también sirven como apoyo para comprobar datos cuantitativos en los sistemas de medición a distancia. Para el correcto funcionamiento del sensor, es imprescindible conocer el comportamiento de los rayos y los métodos de medición de corriente.

En este marco teórico se explicarán los parámetros de las descargas atmosféricas, los sistemas de localización de rayos y los métodos de medición de corriente.

3.1 Los rayos

Los rayos son descargas atmosféricas transitorias producidas durante las tormentas eléctricas en la cual se forma un canal que se propaga a través del aire, dando paso a la corriente que ioniza las moléculas del aire. Las descargas eléctricas pueden ser nube-tierra, nube-nube, tierra-nube o nube-ionósfera. Su estudio ha permitido conocerlas mejor y prevenir los grandes daños que pueden causar en sistemas eléctricos, edificios y en el ambiente. La principal motivación para el estudio de los rayos es avanzar hacia la protección de los seres humanos y equipos eléctricos. Para la seguridad de usuarios, equipos e instalaciones, se investigan canales que disipen la energía de las descargas atmosféricas y métodos para predecir las trayectorias de las nubes de tormenta.

3.1.1 Formación del Rayo

El rayo, es un fenómeno que consta de dos partes, una previa a la descarga, la formación del cumulonimbos y una de formación del canal para dar lugar a una eventual descarga.

3.1.1.1 Formación del Cumulonimbos [7]: Las nubes son elementos sin carga, es decir, eléctricamente neutros, ya que en su estructura poseen cargas internas positivas y negativas bien balanceadas. Sin embargo, cuando dentro de una nube, por diversas razones se crean zonas de carga positiva y negativa, puede desencadenarse una tormenta eléctrica o una descarga atmosférica. Estas cargas polarizan la nube (llamada cumulonimbos), haciendo un dipolo, o a veces tripolo, que tiene una distribución de cargas que se comportan como se muestra en la figura 1:



Figura 1 Modelo bipolar del cumulonimbos [8].

El Cumulonimbos facilita la circulación de carga de la nube hacia otras nubes o hacia la tierra, donde las cargas de la nube interactúan con la carga del suelo.

El rayo se produce cuando la dinámica interna de la nube crea un camino por el cual las cargas avanzan hasta un punto final. Casi al momento del impacto, se produce una corriente opuesta al rayo que se junta con la carga desplazada de la nube generándose el trueno. Una vez que se produce este camino, queda abierto a que pasen más cargas a través de él, produciéndose los strokes, los cuales son repeticiones de descargas de corriente que utilizan el mismo canal creado previamente por el cumulonimbos. El resultado de las descargas atmosféricas, es el balance de las cargas internas de la nube [9].

3.1.1.2 Formación del Leader [7] [9]: En el instante previo antes del rayo, ocurre una descarga descendente (llamada Leader o trazador descendente) desde la nube hacia el suelo. Esta descarga avanza a través de saltos hacia la tierra. Simultáneamente, el campo eléctrico de la tierra aumenta a medida que se va acercando el Leader y cuando llega a un nivel límite, se genera una ionización en pararrayos, postes y otros objetos.

La ionización produce otro evento llamado trazador ascendente, una descarga que se origina desde el suelo hacia la nube. Si hay varios objetos en los que se produce un trazador ascendente, la descarga descendente “elige” el camino, que visto por él, parece el más cercano hasta encontrarse con el trazador ascendente. En el instante que se juntan ambos trazadores (ascendente y descendente) se crea el rayo o relámpago, un canal en el cual hay una transferencia importante de corriente y un ruido, más conocido como trueno (Ver figura 2):

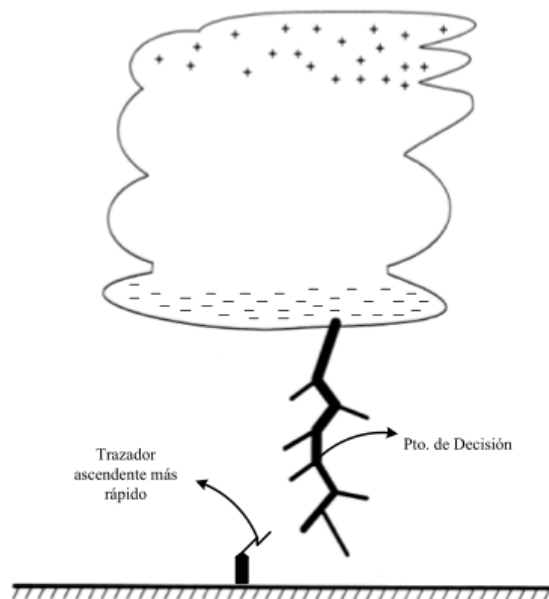


Figura 2 Unión entre el rayo y el trazador ascendente [10].

3.1.2 Tipos de rayos

Aunque ningún rayo es igual a otro, es posible determinar ciertas semejanzas, que han permitido su clasificación [11] [12]:

3.1.2.1 Rayos nube-tierra/tierra-nube: la trayectoria del rayo tierra-nube va desde la nube (cumulonimbos) a la tierra o viceversa, este rayo generalmente va de la carga negativa a positiva. Para identificar si un rayo es nube-tierra se debe observar el sentido de las ramificaciones que estos tienen, si es que estas apuntan hacia el suelo o hacia abajo, es un rayo nube-tierra, en caso contrario, es un tierra-nube. La dirección del rayo no influye en la polaridad de la corriente. Los rayos que se dirigen o vienen de la tierra no son los más frecuentes, pero son con los que hay que tener mayor cuidado ya que pueden afectar directamente instalaciones, maquinaria e incluso al ser humano.

3.1.2.2 Rayos nube-nube: los rayos nube-nube son los más frecuentes. Ocurren entre cumulonimbos y una nube cercana (entre nubes) o incluso pueden ocurrir dentro de la misma nube (intra nube).

Estos rayos se producen por las distintas zonas de carga en el cumulonimbos y ayudan a balancear la ionización de las partículas de la nube.

Para otros tipos de Rayos ver *Anexo 1*.

3.1.3 Parámetros del rayo

En esencia, los rayos poseen los mismos parámetros o características, estos son medibles directa o indirectamente. Las mediciones han sido útiles para obtener y determinar formas de onda de las descargas de los rayos. Además, por medio de distintos métodos, han permitido establecer características de comportamiento, sin embargo, no existe ningún rayo igual a otro [13], [14]:

3.1.3.1 Nivel Ceráunico: se refiere al número de días al año promedio donde se escucha al menos una descarga en una caseta o punto de medición durante 24 horas. En algunas zonas del planeta (ver figura 3) este nivel puede llegar a 300, es decir 300 días del año cae al menos 1 rayo. También representa los días que hay tormenta eléctrica en una zona. Se puede escribir de 2 formas diferentes, como el total de días en los cuales hubo tormenta (Td) o como el número de horas en las cuales hubo tormenta (Th). Para el caso de Chile, el nivel ceráunico (Td) varía bastante entre las zonas costeras de las montañosas, suele variar desde “5” en las costas y “30” en las montañas en algunas partes del país [10].

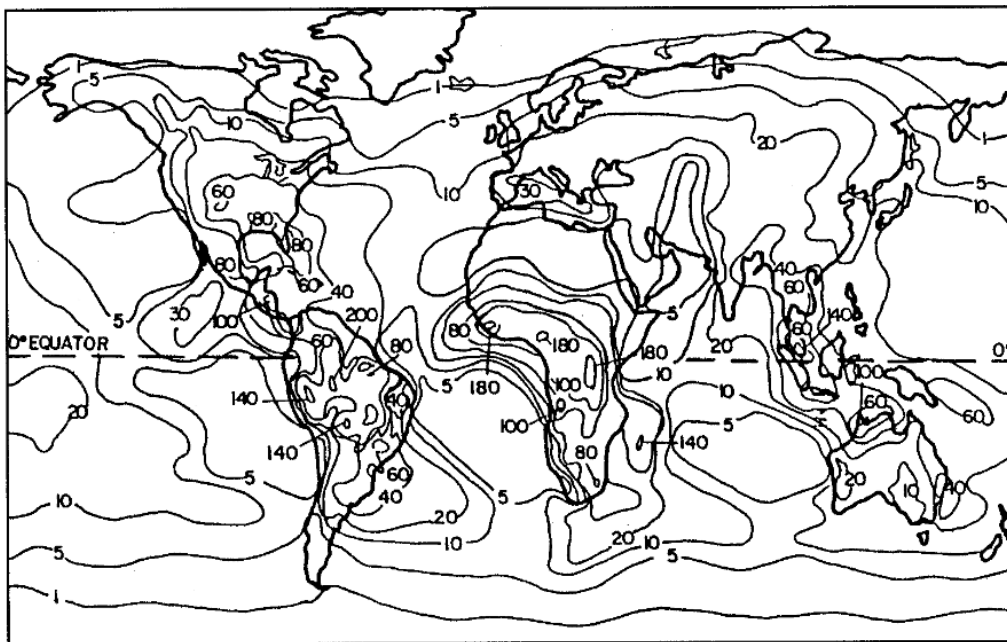


Figura 3 Mapa nivel Ceráunico mundial [15].

3.1.3.2 Densidad de rayos a tierra: es el número de rayos por kilómetro cuadrado al año, directamente relacionado con el nivel ceráunico, permite cuantificar el número de rayos que caen en una zona. La manera de relacionar el nivel ceráunico (días de tormenta Td u horas de tormenta Th , ver 3.1.3.1) con la densidad de rayos es la siguiente (Ng) [10]:

$$Ng = 0.04 * Td^{1.25}$$

Ecuación 1 Densidad de rayos a tierra en función de días de tormenta

o

$$Ng = 0.054 * Th^{1.1}$$

Ecuación 2 Densidad de rayos a tierra en función de horas de tormenta.

3.1.3.3 Polaridad del rayo: se refiere al signo de las cargas transferidas. Generalmente la carga del rayo es negativa, pero en algunas ocasiones se pueden transferir cargas positivas (Ver en 3.1.3.9 “Forma de ondas de los rayos”).

3.1.3.4 Strokes: los Strokes son cada una de las descargas de energía que ocurren dentro del mismo canal del rayo. La primera descarga de corriente, con mayor intensidad se denomina *Return Stroke*, que ocurre al unirse los leader ascendente y descendente (Ver en 3.1.3.9 “Forma de ondas de los rayos”).

3.1.3.5 Velocidad de retorno del rayo: este parámetro del rayo mide la velocidad con que la corriente envía la carga y se representa en la primera región del rayo. Este parámetro se mide generalmente con técnicas ópticas y es un parámetro importante al preparar la simulación de un rayo.

Aunque no tienen la misma forma, la velocidad de retorno del rayo cumple ciertos patrones. Éstas se diferencian notoriamente según la polaridad del rayo, donde los rayos de polaridad positiva tienen un frente de onda más lento y duración más prolongada que los negativos. Los negativos tienen frentes de onda más pequeños y duran menos tiempo. Es importante definir dos tiempos en la forma de onda de los rayos que se encuentran normalizados (Ver figura 4) [16]:

T1: el tiempo de frente del rayo corresponde al intervalo de tiempo entre 10% y 90% de la corriente peak del rayo.

T2: el tiempo de cola es el intervalo de tiempo en el cual el pulso alcanza el 50% del valor máximo de la cresta.

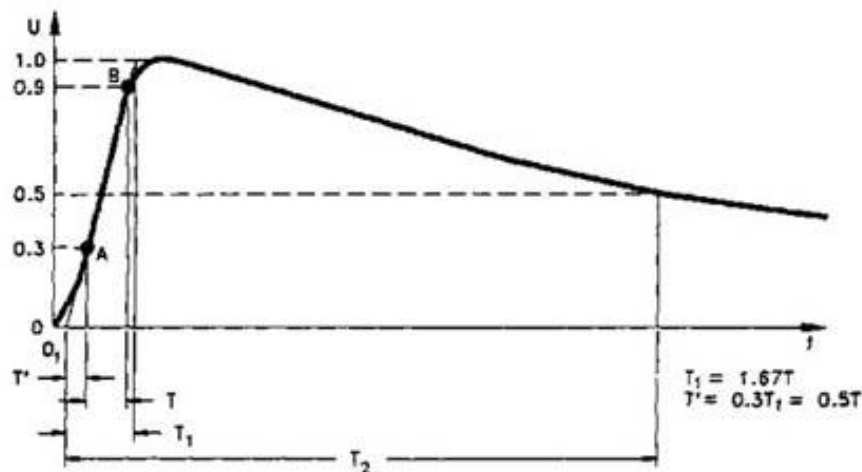


Figura 4 Tiempos de frente y cola [17].

Esta forma de onda sin embargo sirve sólo para estudios de ingeniería ya que como se mencionó anteriormente, los strokes consecutivos pueden variar su forma. Los tiempos de duración

de los rayos varían, pero cumplen etapas que se presentan en la figura 5 y el impacto de mayor duración entre 5 a 50 microsegundos [18].

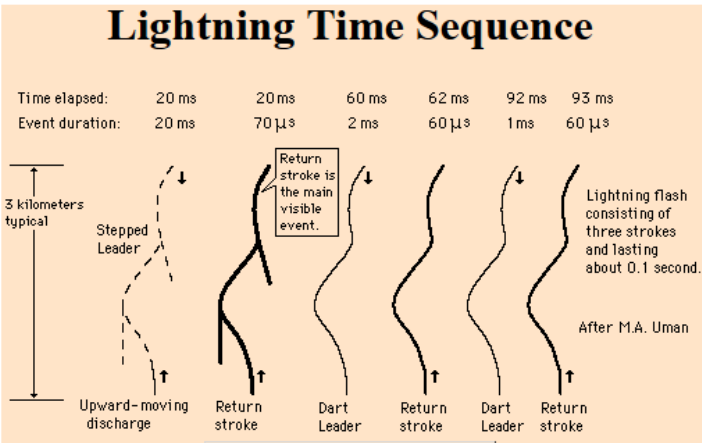


Figura 5 Secuencia de las fases de una descarga atmosférica [18].

Según algunos autores, los tiempos de frente para el 95% de los casos es menor a 11,3 microsegundos.

	Tiempos T1 del rayo (uS) Primer Return Stroke		
	5%	50%	95%
Visacro y Soares	9,9	5,6	3,1
Anderson y Eriksson	11,3	4,5	1,8
% muestra los casos que exceden el porcentaje			

Tabla 1 Tiempos T1 del primer Return Stroke [19].

	T1 del rayo (uS) Segundo Stroke		
	5%	50%	95%
Visacro y Soares	62,5	18,7	5,8
Anderson y Eriksson	72	15,4	3,3
% muestra los casos que exceden el porcentaje			

Tabla 2 Tiempos T1 del segundo Stroke [19].

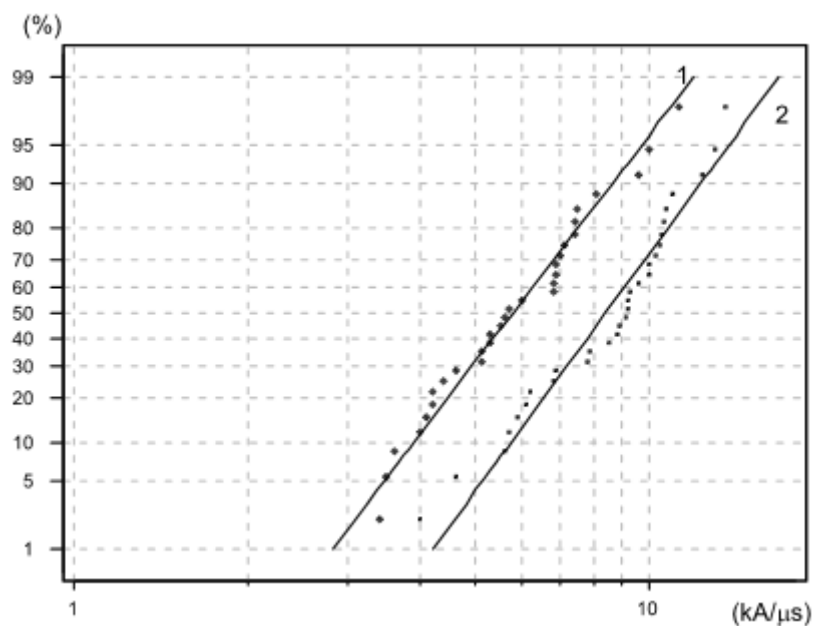


Figura 6 Frecuencia Acumulada del T1 y Segundo Stroke Visacro y Soares [19].

3.1.3.6 Corriente máxima: Equivale a la corriente máxima del rayo. En promedio la corriente máxima de los rayos es de 25[kA] [20]. Estadísticamente tiene la siguiente probabilidad de alcanzar los siguientes valores, según Cigre o IEEE.

Corriente Máxima									
I max (cigre) (kA)	3	4	5	10	30	40	50	100	200
probabilidad %	99	98	96	85	40	30	20	6	1

Tabla 3 Estadística de Corriente Máxima de las descargas según Cigre [20] [21].

Corriente Máxima								
I max (IEEE) (kA)	2	7	10	11	20	24	50	100
probabilidad%	99	90	74	70	40	20	7	1

Tabla 4 Estadística de Corriente Máxima de las descargas según IEEE [20] [21].

3.1.3.7 Gradiente máximo de corriente: Es la variación máxima de corriente en un intervalo de tiempo. Este dato es utilizado para calcular las tensiones inducidas electromagnéticamente [20]. Estadísticamente tiene la siguiente probabilidad de alcanzar los siguientes valores, según Cigre o IEEE.

Gradiente Máximo de Corriente							
di/dt (Anderson) (kA/uS)	10	20	50	80	100	200	300
probabilidad %	98	78	40	20	12	3	<1

Tabla 5 Estadística de gradiente máximo según Cigre [20] [21].

Gradiente Máximo de Corriente						
di/dt (IEEE) (kA/uS)	2	5	10	20	50	100
probabilidad %	99	96	82	58	20	5

Tabla 6 Estadística de gradiente máximo de las descargas según IEEE [20] [21].

3.1.3.8 Energía específica: equivale a la energía disipada por la corriente del rayo y se calcula como la integral de la corriente al cuadrado del rayo sobre el tiempo de duración de la descarga.

3.1.3.9 Forma de Onda de los rayos: Como ya se mencionó anteriormente, existen varios tipos de rayos, sin embargo, respecto a los rayos nube-tierra es importante comprender la forma de onda: un rayo nube-tierra está formado de 4 partes principales [8] (Figura 8), una parte transitoria[A] que alcanza corrientes de gran magnitud, donde se han llegado a medir rayos sobre 300 [kA] de corriente, una segunda parte[B], de transición en el cual la corriente del rayo desciende hasta la tercera parte[C], la cual corresponde a otra parte transiente, pero de un valor menor a 1[kA], que decrece en el tiempo hasta llegar a cero (Figura 7). La cuarta parte [D] de un rayo sólo ocurre si es que hay strokes (ver 3.1.3.4 “Strokes”) que es otra descarga de energía dentro del mismo canal del rayo; ésta tiene las mismas partes anteriores, sin embargo, la corriente peak nueva de cada stroke se dice que es hasta la mitad de la corriente peak anterior (Figura 8) [22].

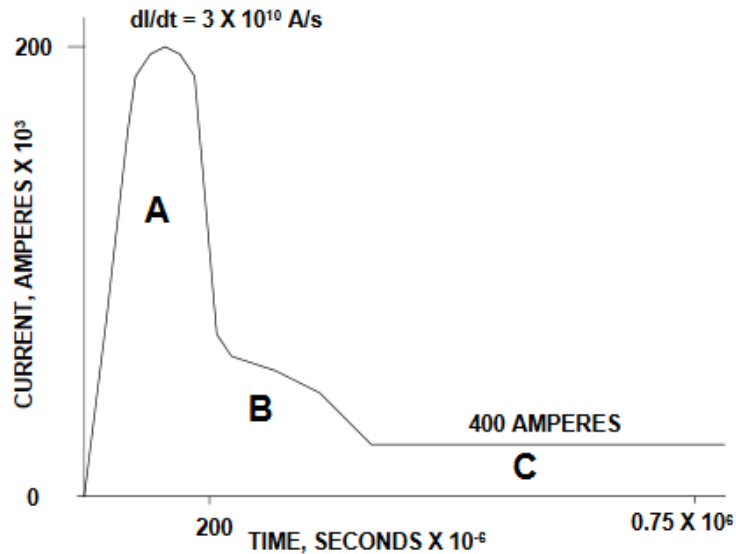


Figura 7 Descarga Atmosférica común [23].

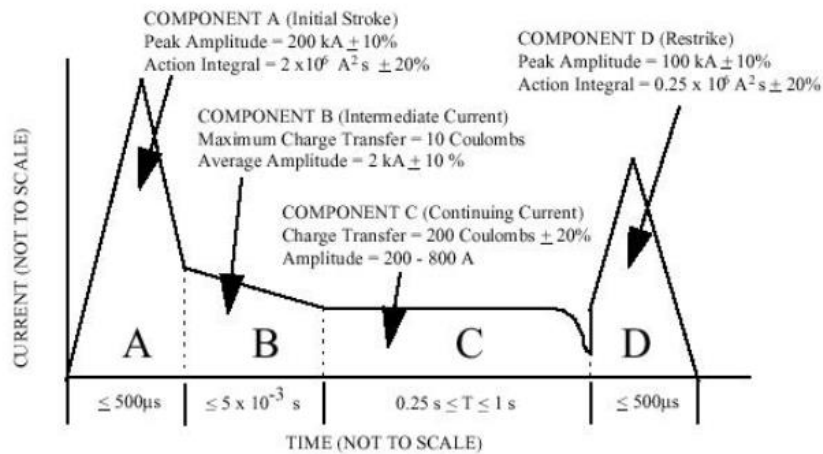


Figura 8 Descarga atmosférica con stroke (tiempo no a escala) [23].

3.1.3.10.1 Rayos de polaridad positiva [24]: cerca del 10% de los rayos nube-tierra son de polaridad positiva, esto quiere decir que hay una transferencia de cargas positivas de la nube a la tierra. Una característica que diferencia a los rayos de polaridad positiva a los de negativa es que generalmente tienen sólo el primer stroke. Una característica de los rayos positivos nube-tierra, es que no irradian frecuencias en Very High Frequency (VHF) o en Ultra High Frequency (UHF), por lo que a veces quedan fuera de los datos de detección de sistemas o instrumentos de localización de rayos que trabajan en esos rangos de frecuencia [25].

3.1.3.10.2 Rayos bipolares: los rayos bipolares no son considerados como componentes significativos en los estudios, aunque la probabilidad con la que estos ocurren es parecida a la de los rayos de polaridad positiva. Se estima que entre el 6 y 7% de los rayos presentan como rasgo la bipolaridad. Los rayos bipolares pueden ser clasificados en tres categorías. Hay algunos rayos que varían su polaridad de manera lenta, en escalas de milisegundos. En estos casos su corriente inicial varía lentamente hasta cambiar de polaridad. Este cambio puede ocurrir más de una vez. Otros que se reconocen por las diferentes polaridades entre las corrientes iniciales y los strokes que le suceden al rayo. Varios de los casos de este tipo mostraron que en el primer stroke con cambio de polaridad había un incremento en el valor máximo de la corriente. Una tercera categoría agrupa los rayos bipolares que presentan rasgos particulares de los strokes, estos son de distinta polaridad que el primer peak de corriente. Una de las posibles explicaciones de los rayos bipolares es el uso del mismo canal para transferir cargas de distintos lugares de la nube (Ver figura 10) [25].

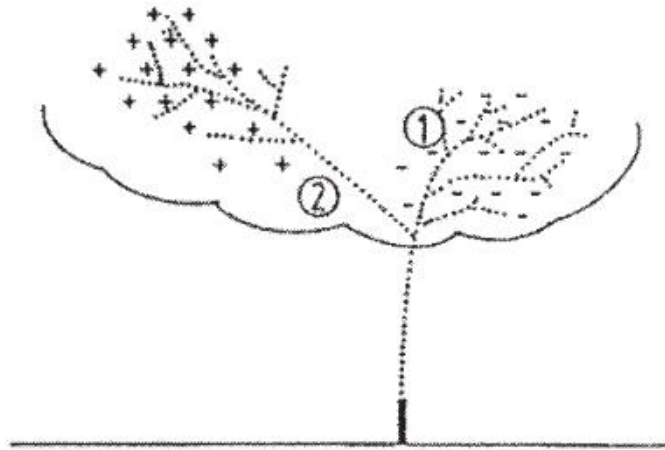


Figura 9 Rayo de polaridad positiva que usa el mismo canal de descarga que un rayo de polaridad negativa para crear una descarga atmosférica bipolar [25].

3.1.3.10.3 Rayos de polaridad negativa: se afirma que cerca del 80% de los rayos son de polaridad negativa por lo que son los que más probabilidad tienen de ocurrir. Cabe decir que el 25% de todos los rayos reportados corresponden a rayos nube-tierra, el otro 75% ocurre entre nubes y los rayos de polaridad negativa generalmente tienen entre 4 y 5 *strokes* [24]. Este tipo de rayos tiene la menor magnitud de corriente llegando a los 30 [kA] [25] de magnitud peak de corriente y el menor tiempo de duración. El número de *strokes* varía de país a otro como se ve en la Tabla 7 [26].

Lugar	Nº de Strokes	Porcentaje de rayos que presenta 1 Solo stroke	Muestra
Nuevo México	6,4	13	83
Florida	4,6	17	76
Suecia	3,4	18	137
Sri Lanka	4,5	21	81
Brasil	3,8	20	233

Tabla 7 Datos estadísticos de Strokes en distintas localidades [26].

El rayo de polaridad negativa ocurre debido a que las cargas positivas tienden a acumularse en la parte superior de la nube y las cargas negativas en la parte inferior. Cuando el campo eléctrico de la tierra llega a cierto nivel, se abre al leader para luego formar el canal del rayo. El rayo de polaridad negativa es del cual más información se tiene. Sus parámetros más comunes se representan en las tablas 3, 4, 5 y 6 (Ver 3.1.3.6 y 3.1.3.7).

3.2. Los sistemas de localización de rayo

Los *Lightning Location System* (LLS) o sistemas de localización de rayo ofrecen una ayuda útil y práctica al momento de encontrar los puntos en los que un rayo impactó, ya que las descargas atmosféricas son la mayor causa de falla en los sistemas eléctricos de potencia. Estos sistemas han ido aumentando su tecnología creando y mejorando sensores, antenas y redes de detección de rayos. Actualmente no solamente pueden detectar la ocurrencia de una descarga atmosférica, ya sea intra nube o nube-tierra, sino que también se puede precisar el lugar geográfico aproximado de la descarga, la corriente y el movimiento de las nubes cumulonimbos de la tormenta. No todos los sistemas son iguales y no todos proveen la misma información debido a las tecnologías que utilizan. Algunos de los sistemas que existen en la actualidad son los siguientes:

3.2.1 Vaisala: la empresa VAISALA es una de las compañías a nivel mundial que se preocupa de desarrollar tecnologías relacionadas con la meteorología. Su sistema de detección de rayos es usado principalmente en aeropuertos, sistemas de transmisión de energía, buques, informes y reportes del clima, permitiendo resguardar a personas, equipos e instalaciones, mejorar las planificaciones y operaciones. Actualmente operan con varios sistemas de localización de rayos entre estos uno de los más importantes a nivel mundial llamado National lightning detection network (NALDN) que funciona hace aproximadamente 30 años en Estados Unidos. Actualmente es el sistema de mayor confianza y precisión comparado con otros sistemas de alto alcance [27].

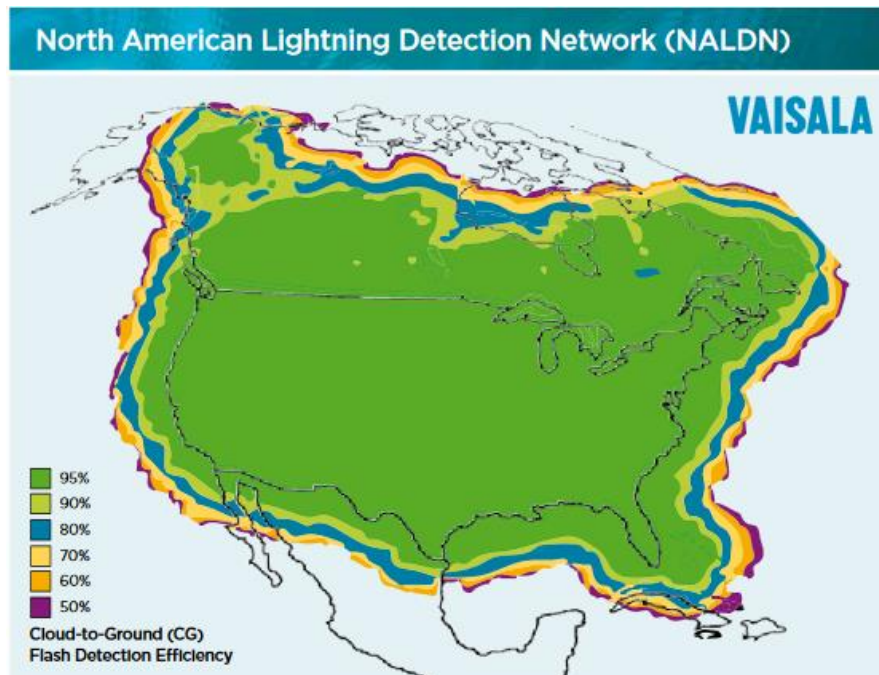


Figura 10 Cobertura del sistema Vaisala en EEUU [28].

Este sistema usa métodos de Time-of-Arrival (TOA) de medición donde se utilizan distintos sensores ubicados a lo largo del país para ubicar geográficamente la descarga atmosférica, tanto dentro de la nube, rayos nube-nube o rayos nube-tierra. Su sede está instalada en Arizona, Tucson, pero tiene instalados medidores y sensores a lo largo del país. Se ha expandido considerablemente

a nivel mundial como se muestra en la figura 12, siendo uno de los principales creadores de tecnología para detección de rayos a nivel mundial [29] [27].



Figura 11 Países asociados al sistema Vaisala [27].

3.2.2 Lightning image Sensor (LIS): actualmente el sistema LIS es administrado por la NASA y consiste en un satélite que rodea el planeta tomando fotos y grabando los eventos que van sucediendo. Este sistema es parte de un satélite que incorpora cinco instrumentos de medición: TMI (TRMM microwave imager), VIRS (visible and infrared scanner), PR (precipitation scanner), CERES (cloud and earth radiant energy system) además del LIS. Este sistema recorre el planeta de manera orbital, permitiendo censar gran parte de éste, sin embargo, el sistema no puede abastecer información de todo el globo, dejando de lado los polos del globo terráqueo (ver figura 14) [29] [30].

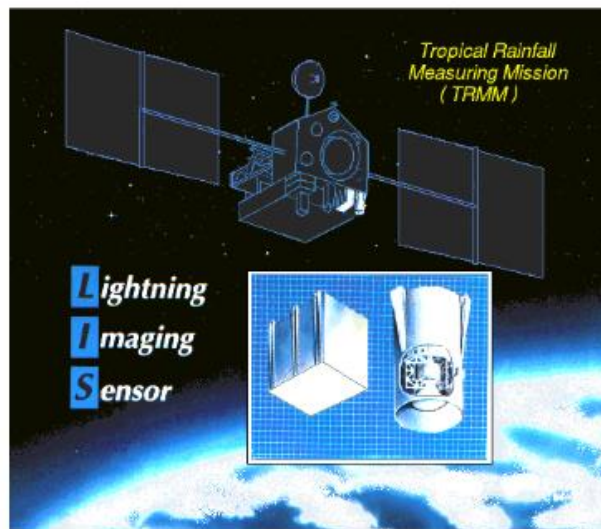


Figura 12 Satélite de medición LIS [30].

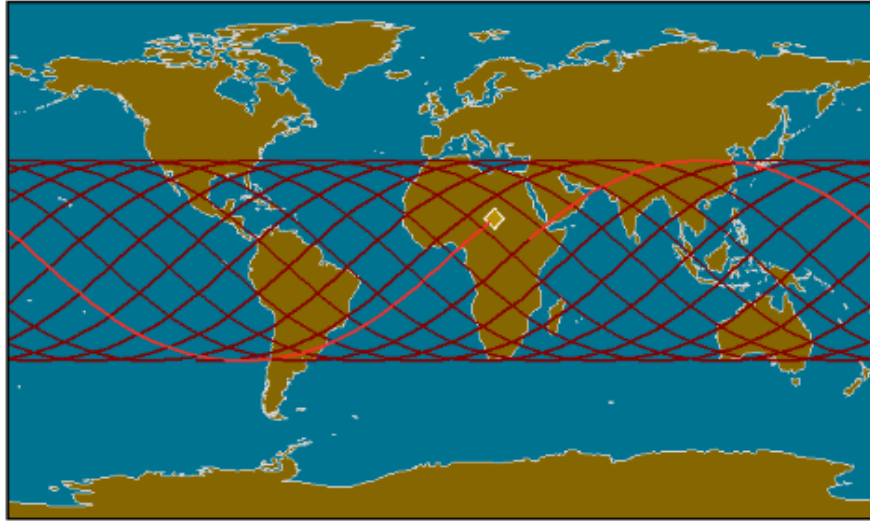


Figura 13 Área de mapeo sistema LIS [30].

El LIS es uno de los primeros sistemas de localización de rayos en obtener datos de climatología, tasas, distribuciones y variabilidades referidas a los rayos que ocurren en el área de captación (ver figura 15). Uno de sus objetivos es diferenciar los rayos tierra-nube y los nube-nube, como las frecuencias de los mismos por medio de los fenómenos micro físicos, que se relacionan con el flujo y las tasas de precipitaciones.

El sistema LIS funciona a 350 km de altura con un sensor óptico que capta las tormentas y la actividad de rayos nube-nube y nube-tierra con una resolución espacial de 10 km durante día y noche, en un rango de 1300 x 1300 km (ver figura 15). Tiene una eficacia de detección del 50%. Su inclinación es de 35° de órbita a una velocidad de 7 km/s y capta la actividad eléctrica entre 80 y 85 segundos, además de guardar una imagen de lo que está captando cada 30 ó 40 segundos [30].

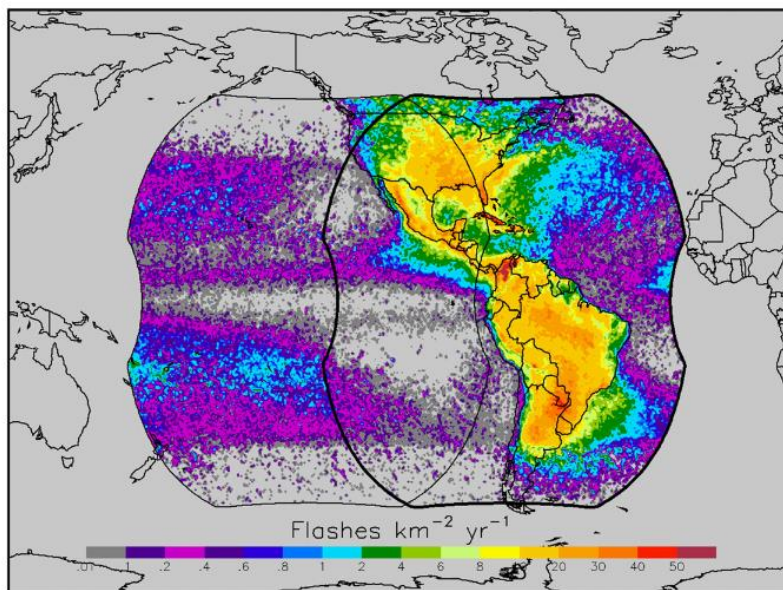


Figura 14 Mapa de muestra 1300x1300 km² del sistema [30].

Todos los datos captados entran a los algoritmos de detección que funcionó desde el año 1995 hasta el 2012. En el año 2015 volvió a la atmósfera [30]. Se envió un nuevo sistema LIS el año 2017, el cual opera de la misma manera que el anterior, pero aumentando el ángulo de observación de 35° a 54°, por lo que tiene mayor área de captación. Además, el nuevo sistema LIS está conectado con “Geostationary Lightning Mapper” para hacer mediciones cruzadas y calibración [31].

3.2.3 World Wide Lightning Location Network (WWLLN): el sistema mundial de localización de rayos opera en la universidad de Washington ubicada en Seattle. Este sistema funciona a base de antenas colocadas en distintas localizaciones y capta a frecuencias muy bajas (VLF) las descargas atmosféricas. Ofrece un amplio rango de captación de frecuencias que fluctúa entre los 3-30[kHz] y cubre un área de kilómetros por antena, captando señales de alta longitud de onda que se ven poco atenuadas dentro de la Ionósfera. Elabora un mapa de localización de rayos con la ayuda de todas las antenas instaladas a lo largo del mundo [32].

Los métodos con los que funciona el sistema WWLLN, son los Time of Group of Arrival. Actualmente el WWLLN consta con más de 70 sensores activos alrededor del mundo (ver figura 16).

El objetivo principal es proveer datos de descargas tanto nube-nube como nube-tierra con una eficiencia de detección superior al 50% y una precisión menor a los 10 km, aunque los beneficios de detección son el cubrimiento total del globo. Los datos del WWLLN han sido utilizados para mostrar las mayores actividades de tormentas eléctricas de Sprites (ver definición en anexo 1) en el mundo [33] [32].

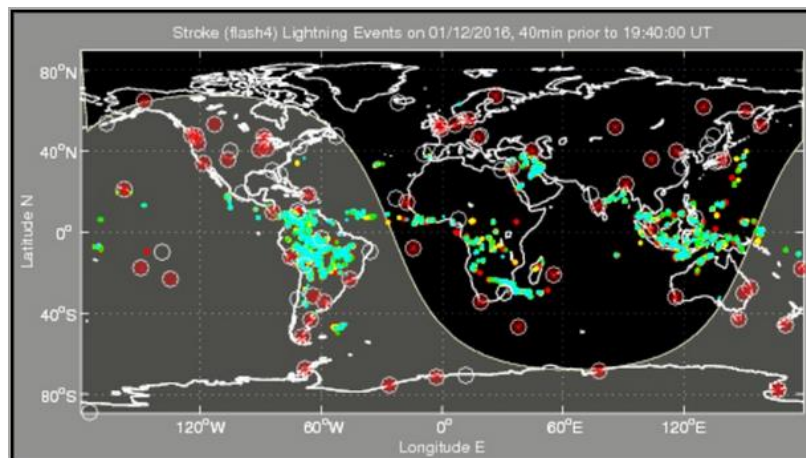


Figura 15 Mapa de sensores activos en el mundo WWLLN [32].

3.2.4 LINET: desarrollado en la Universidad de Múnich, el sistema Linet utiliza Low frequency (VF) y Very low frequency (VLF) para realizar mediciones en su red de datos, que se expande a 90 sensores en 17 países de Europa (Ver figura 17) y otros países del mundo como Colombia, Tailandia, Canadá, Kazajstán y Estados Unidos [34]. No sólo detecta los rayos nube-tierra, sino que también los rayos nube-nube que son discriminados entre sí por el “Time of Arrival”, el cual consiste en un sistema de recepción de datos 3D, que evalúa el tiempo de señal de llegada para determinar el tipo de rayo [35].

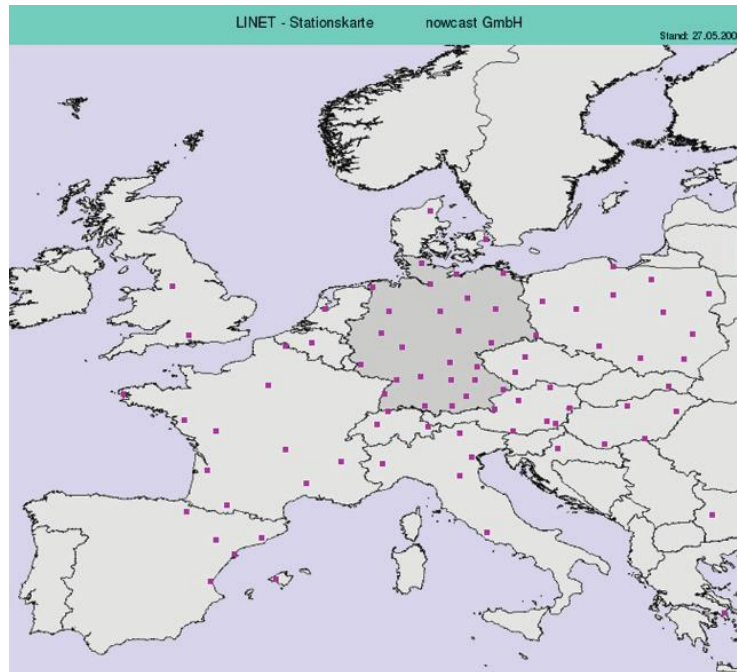


Figura 16 Mapa de sensores instalados en Europa por LINET [36].

Actualmente utiliza un dispositivo modular de 4 componentes. El primero es el encargado de sensor la señal, el segundo envía la señal vía GPS del evento, el tercer módulo filtra la señal y procesa la información para tener un dato que ingresa al cuarto modulo que conecta la información obtenida con el sistema LINET [35].

El instrumento encargado de captar los datos consta de dos loops unidos que funcionan como sensor pasivo del campo magnético. Están orientados en noventa grados uno con respecto al otro y cubren frecuencias variables entre 1 a 200 kHz induciendo tensión cada vez que ocurre un evento que produzca cambio en el campo magnético para medir la corriente y registrar el evento que se almacena en el sistema [35]. El sistema muestrea las señales de hasta 1MHz.

Cada sensor recopila información que es enviada a la Universidad de Múnich, sin discriminar el tipo de rayo. La información se revisa en el centro de operaciones a través de un algoritmo 3D. Toda la información de las ondas de rayo se almacena para investigaciones futuras. El error de captación de este sistema llega a los 150 m y puede disminuir si es que existe mayor cantidad de sensores ubicados de manera conjunta [35].

Resumiendo, la información de todos los sistemas, se pueden agrupar en 2 tipos de funcionamiento: los sistemas que funcionan en VHF, que tienen menos rango, pero pueden discriminar y captar eventos nube-nube y tierra-nube, y los que funcionan en VLF y LF, que sólo captan los rayos nube-tierra [35].

Para más sistemas de localización de rayos ver Anexo 2.

3.3 Métodos de obtención y detección de datos a distancia

Los dispositivos de detección de datos se clasifican en tres grupos: captación de datos por antenas, sistemas móviles y sistemas de captación en el espacio. Existen otros métodos más directos de obtención de datos de los rayos, que permiten medir directamente la corriente del rayo en alguna estructura metálica que ha sido impactada por una descarga o a través de una inducción del rayo por medio del acercamiento de un punto aterrizado eléctricamente hacia la nube.

Los métodos indirectos de medición son los más usados por los sistemas de localización de rayos e instrumentos de medición basándose en el principio de formación de un campo eléctrico y magnético producto de las descargas atmosféricas. Otro método que se utiliza en la captación de señales emitidas por las descargas atmosféricas son los espectros de frecuencia de la señal del rayo. El espectro de frecuencia que se utilice para la captación de datos, determinará el rango de distancia al cual se pueden localizar las descargas eléctricas y fijará los parámetros del rayo que puedan ser medidos.

Por último, cabe decir que también se pueden detectar rayos tanto óptica como acústicamente. En la figura 18 se muestra qué método se utiliza para la detección de descargas según el rango de frecuencias en el que se utilice el sensor [33] [37].

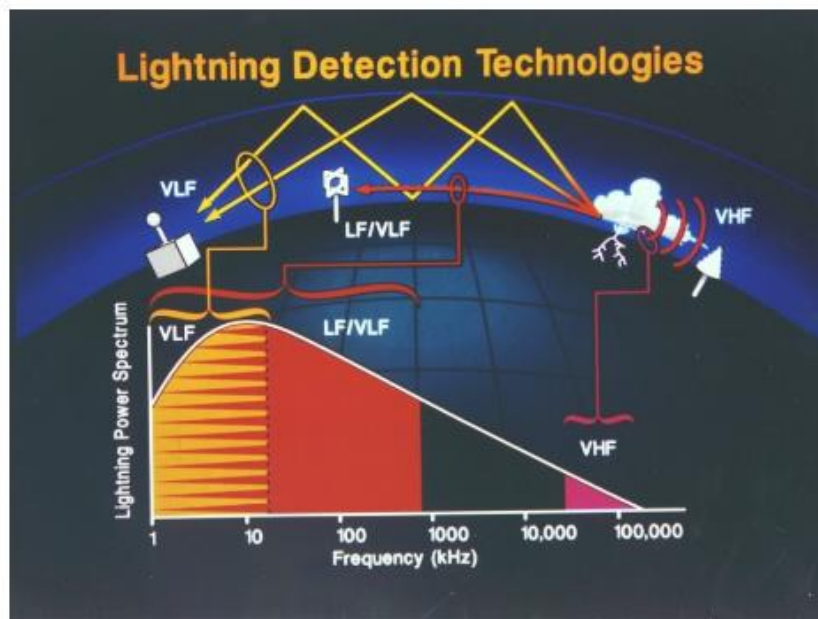


Figura 17 Gráfico de tecnología de muestreo vs Frecuencia [38].

Por definición, se agrupan los conjuntos de frecuencias en los siguientes rangos:

Nombre	Rango
Ultra High frequency (UHF)	300 MHz < f
Very High frequency(VHF)	30MHz < f < 300MHz
High frequency (HF)	3MHz < f < 30MHz
Medium frequency (MDF)	300kHz < f < 3MHz
Low frequency (LF)	30kHz < f < 300kHz
Very low frequency(VLF)	3kHz < f < 30kHz

Tabla 8 Denominación de frecuencias según su rango.

3.3.1 Métodos de detección para los sistemas de localización de rayos

3.3.1.1 Buscador de Campos Magnéticos (Magnetic field direction finding): en esta técnica se usan dos loops magnéticos ubicados de forma vertical orientados según los polos del planeta. En ellos se genera una tensión inducida debido al cambio de campo magnético cuando ha ocurrido algún evento, basándose en la ley de Lenz para el funcionamiento.

La siguiente ecuación permite determinar la localización de los rayos.

$$E = -N * \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

Ecuación 3 Tensión en función del flujo enlazado y el número de vueltas

$$E = -N * (A \cos(n) * \partial B / \partial t + B * \cos(n) * \partial A / \partial t + B * A * \partial \cos(n) / \partial t)$$

Ecuación 4 Ecuación que relaciona la dirección de los azimuts con la tensión inducida

El primer término de la ecuación es el cambio del campo eléctrico en una dirección “n”, que es el ángulo entre la normal del campo magnético y la dirección del loop, el segundo término es la variación de área del loop y el tercer término es la variación de la orientación con respecto al loop.

Dado que el área y la dirección del evento no cambian, lo único que presenta un valor distinto a 0 es la variación del campo magnético. Al recibir la variación de campo, cada varilla recibe un ángulo distinto generando un desfase entre ambas de 90°. Así, la relación entre ambos loops se puede expresar como la tangente de “n” con la cual se puede encontrar la dirección en la cual ocurrió una descarga eléctrica.

Para encontrar la dirección exacta en la cual ocurre una descarga, se necesitan varios dispositivos (Ver figura 19) para triangular la posición aproximada del rayo [9] [37] [39].

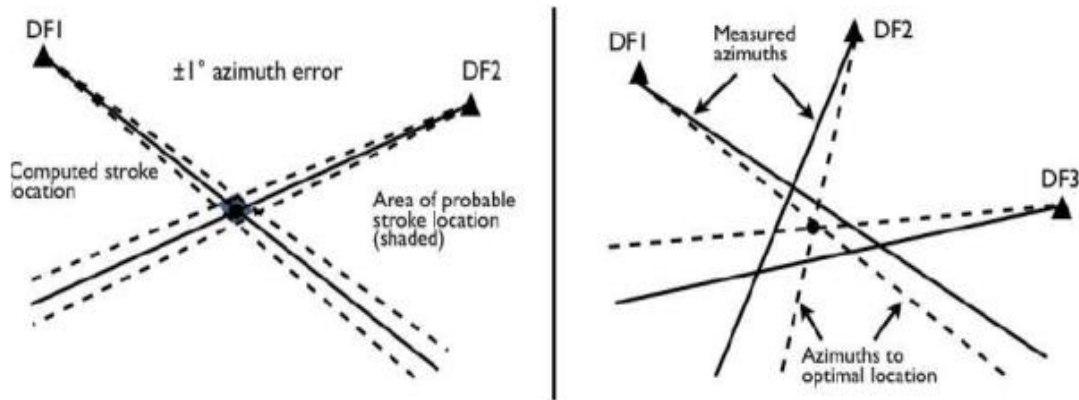


Figura 18 Triangulación de la dirección por los azimuts medidos [40].

Este método de localización de rayos cubre frecuencias desde 1 kHz hasta 1 MHz. Para la captación de datos se necesita cubrir el tiempo de crecimiento, el tiempo de frente y el tiempo de cola de la señal. Éstos son distintos tanto para rayos nube-nube como nube-tierra.

Los dispositivos que usan este método de captación de datos en conjunto con los TOA, tienen una precisión de localización de entre 100 y 500 metros [40].



Figura 19 Dispositivo de medición por detección de Campo Magnético [41].

3.3.1.2 Tiempo de Llegada (Time of Arrival): este método, también conocido como TOA, triangula la posición de la descarga atmosférica considerando el tiempo que tardó en llegar a varios puntos de registro.

A veces llamado “TOGA” (time of group of arrival), cuando se utilizan varios instrumentos para determinar la ubicación aproximada del rayo. Cada sensor forma una hipérbola (ver figura 22) que representa el tiempo de llegada desde la ubicación del evento al sensor. Cuando se interceptan los puntos de cruce entre dos sensores, muchas veces se encuentran puntos falsos de medición. Para obtener confiabilidad en el sistema, se necesitan al menos tres sensores. Idealmente, debe haber una distancia de 10 kilómetros entre las antenas [37]. Como los sensores captan la onda

producida por la corriente peak, se pueden tener problemas con los strokes, ya que se pueden contabilizar como eventos aparte y no descargas dentro de un mismo evento.

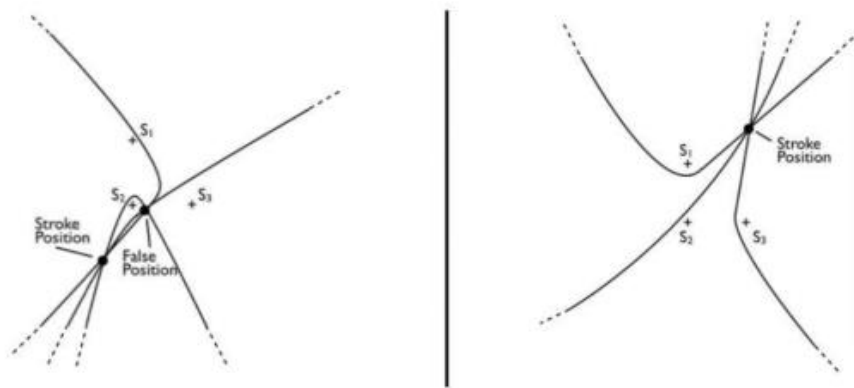


Figura 20 Método de medición TOGA o TOA [37].

Los rangos de frecuencia de este sistema pueden ser tanto VLF como LF. Los sensores rondan los 10 kHz de frecuencia de medición, también puede ser utilizado en mediciones de frecuencias más altas, para determinar y medir perturbaciones. Los sistemas TOA pueden detectar tanto eventos nube-nube como nube-tierra, sin embargo los eventos nube-nube tienden a ser más largos que la duración de un rayo nube-tierra, por lo que algunos dispositivos no alcanzan a obtener una medición [39] [37] [42].

3.3.1.3 Localización de rayos mediante Interferómetros (Interferometric lightning location retrieval): durante la fase de VHF del rayo, el rayo produce radiación magnética difícil de filtrar y reducir, por lo que resulta difícil diferenciar entre una serie de strokes o eventos singulares. A través de la Interferometría, es posible mapear un rayo y captar su longitud de onda a través de dispositivos separados de una distancia definida. Al trabajar con frecuencias de rango VHF la distancia de captación de rayos es muy baja, captando solamente puntos sobre los instrumentos de medición. El umbral de VHF disminuye con la distancia, por lo que con este método se pueden localizar rayos a tan sólo metros del punto de impacto. La captación del rayo se logra por la diferencia de fase en las señales entre las antenas, que dependen del ángulo de incidencia del rayo.

Las antenas usan VHF entre los rangos 110-120 MHz, por lo que, dependiendo del número de sensores, el método de la interferometría puede entregar tanto el ángulo de incidencia, como la dirección y la altitud del rayo [43] [42].

3.3.1.4 Observaciones Satelitales: existen sistemas de sondeo espacial que constantemente están obteniendo datos de actividad eléctrica a lo largo del globo, este método originó tres generaciones de satélites que mapean tormentas o eventos singulares siguiendo su órbita. El beneficio de tomar mediciones en el espacio es que permite obtener datos de eventos que suceden en el océano, cosa que otros métodos no pueden lograr. El 85% de las descargas eléctricas ocurren en tierra, por lo que el 15% restante puede mapearse de esta forma [37].

3.3.1.5 Mediante Radar: debido al espectro de frecuencia presente durante una descarga eléctrica, las señales provenientes de los rayos pueden ser interceptadas a través de frecuencias de radio.

Principalmente, se utilizan antenas de materiales ferromagnéticos para captar las señales a frecuencias específicas formando una resonancia entre elementos capacitivos e inductivos. Esto permite captar señales producidas por descargas atmosféricas distantes [43].

3.3.1.6 Resonancia de Schumann: las señales de extrema baja frecuencia (ELF-Extreme Low Frequency, 3-300 Hz) sufren poca atenuación y se propagan en el globo un par de veces antes de debilitarse. Ocurre entonces una interferencia entre la señal directa de las descargas y la propagación de ésta que está recorriendo el globo. Este fenómeno se conoce como resonancia de Schumann. El fenómeno se produce debido a que la superficie de la tierra provoca estados de resonancia si la longitud ecuatorial de la tierra es igual a la integral del número de longitudes de onda de la onda a propagarse. Las ondas de hasta 100 Hz, son amplificadas en resonancia. La descripción de la frecuencia resonante de las ondas amplificadas es la siguiente:

$$W = \sqrt{(n * (n + 1))} * \frac{c}{2\pi * R}$$

Ecuación 5 Ecuación de Schumann para medición de frecuencias resonantes de las descargas atmosféricas

Donde R es el radio de la cavidad por la que se mueve la onda, es decir ionósfera de la tierra, c es la velocidad de la luz y n números enteros. Los sensores de resonancia de Schumann usan dos sensores magnéticos para detectar el campo magnético en los cuatro puntos cardinales y una antena en forma de esfera para medir el campo magnético vertical [44].

El método de medición de resonancia de Schumann permite medir eventos a lo largo del globo con un rango de medición de miles de kilómetros dependiendo de la frecuencia a utilizar, sin embargo, no permite diferenciar eventos singulares de los strokes que se producen, aunque es un buen método de medición de actividad de descargas eléctricas y tormentas eléctricas a lo largo del globo. [37]

3.3.2 Características de los datos según frecuencia de operación

La mayoría de estos métodos pueden operar en ciertos rangos de frecuencia, que agrupan las siguientes características según su frecuencia de operación [40] [43] [37]:

3.3.2.1 Detección en VHF: cubre áreas pequeñas hasta los 200 kilómetros cuadrados y está limitado por los obstáculos en el camino del sensor, ya sean montañas o edificios. El tiempo y localización del evento registrado puede ser triangulado según las técnicas mencionadas anteriormente y entregan bastante información, no pueden medir la corriente. La distancia entre sensores debe ser inferior a 150 km. Por tal razón son utilizados para investigación en áreas de mucho impacto, como aeropuertos y bases militares. Además, estos sistemas tienen alto costo debido al uso necesario de antenas y la incorporación de filtros para limpiar la señal [11].

3.3.2.2 Detección en LF: las distancias de la detección en Low Frequency (LF) llegan hasta los 1000 kilómetros y no son afectados por el terreno. La distancia entre sensores varía entre los 200 y los 400 kilómetros de separación. Obtener datos en LF permite estimar los tiempos de llegada, guardar la señal completa del rayo y determinar la intensidad de éste. Permite detectar tanto rayos nube-nube como tierra-nube, sin embargo, la eficiencia en las mediciones varía para cada tipo correspondiendo al 90% de los primeros y 50% de los segundos. Una medición en LF permite determinar las corrientes peak de los rayos con errores del 10 % al 20% para algunas antenas [11].

3.3.2.3 Detección en VLF: en rangos de 3-5 Giga metros de distancia pueden localizar rayos aprovechando las resonancias de Schumann que suceden alrededor del globo. A pesar de su largo alcance, está limitado a la energía de los rayos. Las descargas de poca corriente, poca energía y los rayos nube-nube no son detectados por los sistemas de VLF. La detección de rayos en sistemas VLF dependen de la calidad tecnológica de antenas y dispositivos. Ubicados estratégicamente, pueden bastar 10 sensores para cubrir el mundo entero [11].

3.3.3 Dispositivos de medición

Los instrumentos de localización de rayos usan 1 o más de estos métodos para medir y dependiendo de la tecnología que usen, se clasifican en los siguientes grupos [40]:

3.3.3.1 LPATS: el Lightning Position and Tracking System, es un dispositivo que usa el método TOA para un específico rango de frecuencias, en las que puede captar rayos que ocurrieron a largas y medianas distancias.

3.3.3.2 IMPACT: el Improved Accuracy Using Combined Technology, usa tanto la tecnología MDF (magnetic direction finding o buscador de campos magnéticos) como la de los TOA y los LPATS (TOA a varios rangos) para poder obtener información de rayos tanto nube-nube como nube-tierra.

3.3.3.3 SAFIR: usa detectores VHF y LF. Para rangos cortos se usa la técnica interferométrica y un sensor LF para la caracterización de los rayos, donde la información se entrega a un GPS que procesa y determina una posición.

3.3.3.4 Dead-time: es un sensor que posee un tiempo muerto de funcionamiento, el cual se activa tras recibir información de un rayo, registra el evento único y descarta toda la información posterior al evento durante un tiempo determinado.

3.4 Métodos de medición de corriente

Existen métodos más sencillos de medición directa o indirecta de corriente. El propósito de estos medidores es entregar información real y precisa sobre la corriente que circula a través de los elementos.

3.4.1 Métodos Directos

3.4.1.1 Resistivo: es un método directo de medición de corriente que cuenta con el beneficio de ser simple y lineal. Con él se puede medir directamente la corriente poniendo una resistencia conocida en serie (ver figura 24) con el circuito. La medición de la corriente se obtiene a través de la relación entre la tensión y la resistencia. Además de su linealidad y simpleza, son económicas y efectivas. Poseen coeficientes de temperatura constantes, no sufren problemas en los impulsos y ofrecen protección ante los cortocircuitos y eventos de sobre corrientes. Este método de medir corriente usando resistencias, se conoce como Shunt [45] [46].

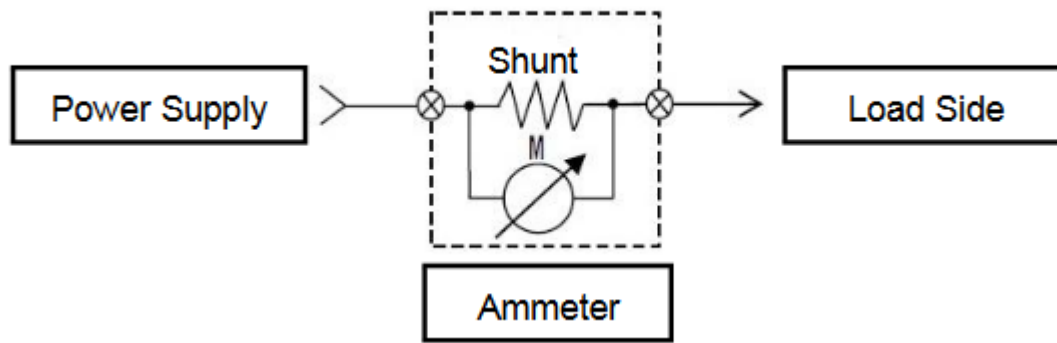


Figura 21 Forma de colocar un medidor de Corriente Shunt [47].

El método Shunt se usa para medir corrientes conectando una resistencia de valor conocido en paralelo a los circuitos de medición. Es más utilizado para sensar corrientes y determinar si hay alguna corriente circulando a través del circuito debido al alto consumo en potencia que puede representar ($I^2 \cdot R$).

Este método es el más común y simple de conectar ya que sólo requiere conectar una resistencia apropiada entre los terminales de la carga y la fuente de poder.

Los métodos de medición Shunt más comunes son los siguientes:

3.4.1.1.1 Shunt Coaxial de alto rendimiento: los circuitos de medición Shunt de este tipo se emplean para medir corrientes de corta duración, como los impulsos. En éstos, los parámetros de inductancia y resistencia propia se vuelven críticos a altas frecuencias, siendo la inductancia mutua el parámetro más importante que puede coartar el rango de frecuencias de operación.

En los Shunt Coaxiales, el efecto piel es alto mientras que las inductancias parásitas son bajas. El efecto piel se convierte en una limitante a altas corrientes, (aproximadamente 100kA) limitando también el buen funcionamiento a frecuencias muy altas [47].

3.4.1.1.2 Shunt de bajo costo montado sobre la superficie (SMD): en algunos casos se pueden integrar los Shunt de bajo costo que permiten medir corrientes de baja intensidad (100-200 A), ya que a altas corrientes existe una alta pérdida debido a la alta intensidad de corriente ($I^2 \cdot R$).

La principal diferencia entre estos 2 tipos de Shunt es que el SMD es de menor tamaño, lo que hace que el efecto piel presente sea mucho menor y la modelación de estos sea a través de una impedancia Z [47].

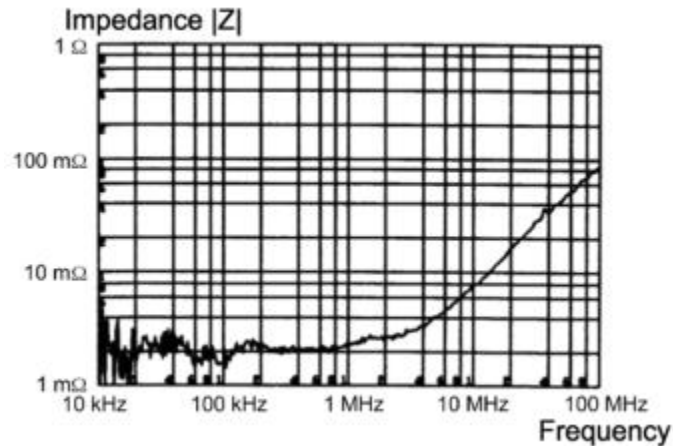


Figura 22 Incremento de la impedancia según la frecuencia de operación [47].

3.4.1.1.3 Trazo de Resistencia de medición: en casos especiales es posible utilizar un pedazo del conductor como medidor. En tal caso, debido a los bajos resultados de tensión, es necesario incorporar circuitos amplificadores para tener mediciones más significativas. Las restricciones principales son las características térmicas de los conductores, lo que hace que las mediciones puedan presentar errores [47].

3.4.1.2 Inductor de Resistencia DC: este método considera pocas pérdidas en el sensor debido a la baja resistencia de los elementos de cobre que utiliza. Para calcular la corriente, se encuentra una relación entre la tensión y resistencia. La resistencia total es menor a 1 mili ohm en la mayoría de los casos, por lo que su tensión de salida generalmente es baja. El inconveniente de este método es la variación que se presenta a temperaturas altas.

El método de resistencia DC usa la resistencia total del inductor a una frecuencia de 0 Hz, o valores cercanos a éstos. Filtra las altas frecuencias y se conecta en serie con el instrumento a medir. Para obtener el valor de corriente se mide la relación entre la tensión y resistencia [46] [45].

3.4.1.3 Transistor: los transistores se consideran como métodos sin pérdidas para mediciones de sobre corrientes, ya que ellos son métodos de control y no se requieren elementos extras (Resistores o elementos de disipación de calor).

La información del transistor se puede obtener de su hoja de datos, en la cual se encuentran los valores a los cuales pueden ser sometidos los terminales del transistor y los valores máximos que aguanta el transistor. La medición de corriente con transistores se realiza con 2 métodos distintos [45]:

3.4.1.3.1 R_{ds} Drain to Source On-Resistance (R_{ds}): la determinación de la corriente se obtiene usando la ley de Ohm con la resistencia R_{ds} (que se obtiene de su data sheet). Los errores por temperatura varían la precisión de este método entre el 10% y 20%.

3.4.1.3.2 Ratio Metric Mosfet: los Mosfet constituyen miles de celdas transistores en paralelo. Una parte de ellos se conecta a los terminales de salida Gate y Drain creando un transistor aislado para monitorear tensión y medir la corriente que pasa por él, conectado en paralelo usando

la ley de Ohm. Esta corriente es una parte de la corriente total, pero usando “división de corriente” se puede determinar la corriente total.

El error total de esta técnica varía ampliamente entre el 5% y 20% dependiendo de la calidad de los Mosfet de medición [47].

3.4.2 Métodos Indirectos

3.4.2.1 Transformador de corriente: los transformadores de corriente aíslan la línea de trabajo, lo cual brinda seguridad. Las pérdidas de corriente en este método se consideran despreciables.

Los transformadores de corriente permiten tomar mediciones de alta magnitud, utilizando la variación de campo magnético que pasa por la bobina enrollada, que induce una corriente por el lado secundario. La corriente es medida a través de la relación entre una resistencia conocida, la tensión inducida en ésta y el número de vueltas.

La tensión de salida del segundo lado puede escalarse por medio de la cantidad de vueltas que posee el secundario y lograr un control del valor de la corriente que sale en la resistencia de medición que posee el transformador. El método funciona según el principio de un transformador normal, por lo que consideramos el siguiente circuito equivalente [48]:

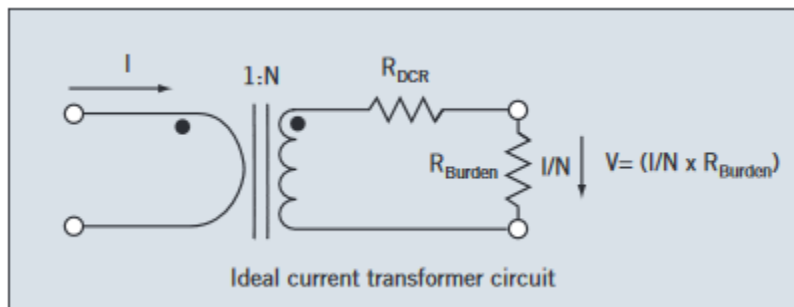


Figura 23 Funcionamiento de un transformador de corriente [49].

Los transformadores funcionan con la inducción magnética provocada por la corriente y la fuerza electromotriz que genera una fuerza en el lado secundario. La relación de transformación que regula la corriente del lado secundario se expresa como:

$$I_p = I_s * \frac{N_s}{N_p}$$

Ecuación 6 Relación entre corrientes del lado primario y secundario de un transformador de corriente

3.4.2.2 Bobina Rogowski: la bobina Rogowski consiste en un método de medición de corriente utilizando los principios de ley de Ampere, similar al del transformador. La diferencia es que su núcleo es de aire, o algún material no magnético el cual no tiene saturación. La bobina enlaza el flujo magnético induciendo tensión entre sus terminales. Se obtiene una tensión que depende directamente de la corriente y ésta a su vez depende del campo magnético que enrolla la bobina.

Por ley de Ampere, podemos escribir la corriente en función de un campo magnético (H) que está en dirección (α) del elemento con una longitud perimetral (l) (ver figura 25).

$$I = \int H \cos(\alpha) dl$$

Ecuación 7 Corriente según Ley de Ampere

Si el elemento enrolla un conductor, que posee una sección transversal (A) y una longitud equivalente ($N * dl$), por el cual pasa una corriente (I), entonces podemos escribir el flujo magnético (Φ) en función de ésta.

$$\Phi = \int d\Phi = \mu_0 * A * N * \int H \cos(\alpha) dl = \mu_0 * A * N * I$$

Ecuación 8 Flujo magnético en función de la corriente.

Sabemos que se produce una tensión inducida cuando existe variación del flujo en el tiempo, podemos escribirla como se describe en la ecuación:

$$v_{bobina} = \frac{d\Phi}{dt}$$

Ecuación 9 Tensión inducida por la variación de flujo en el tiempo.

Por lo tanto, podemos establecer la relación existente entre la tensión inducida en la bobina por la corriente que pasa a través del conductor si es que consideramos la sección y el número de vueltas existentes constantes.

$$v_{bobina} = \mu_0 * A * N * \frac{dI}{dt}$$

Ecuación 10 Tensión entre los terminales de una bobina Rogowski

De forma general, se obtiene una relación de proporción consecuente al número de vueltas (N) de la bobina a la cual fue diseñada, siendo también proporcional a la inductancia mutua, considerando la constante magnética del aire (μ_0) y su sección transversal (A) [50] .

$$M = \mu_0 * A * N$$

Ecuación 11 Inductancia mutua de una bobina Rogowski

La bobina Rogowski tiene su circuito equivalente como se muestra en la figura 24, la cual considera una resistencia, una inductancia, una capacitancia propia y la tensión inducida proporcional a la corriente que circula en el circuito enlazado.

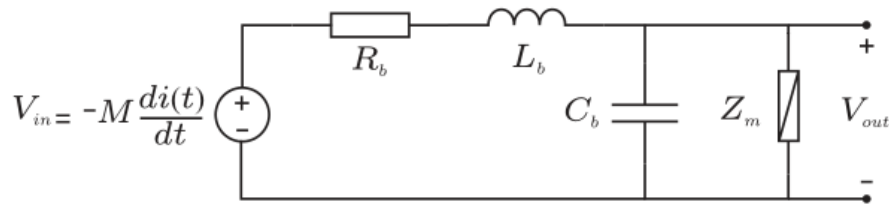


Figura 24 Circuito equivalente de una bobina Rogowski [47].

Existe una impedancia Z_m correspondiente a la impedancia equivalente del circuito integrador que se debe incluir para obtener una medición real debido a que el circuito de Rogowski deriva la señal de entrada.

Los beneficios e inconvenientes que posee la bobina Rogowski al medir señales se asemejan a los del transformador, sin embargo, al no ocupar metal en su núcleo, sino un material no magnético, éste no se satura. Otro beneficio es que, al no poseer núcleo, la inductancia es mucho menor, por lo que las respuestas son más rápidas y los materiales más baratos.

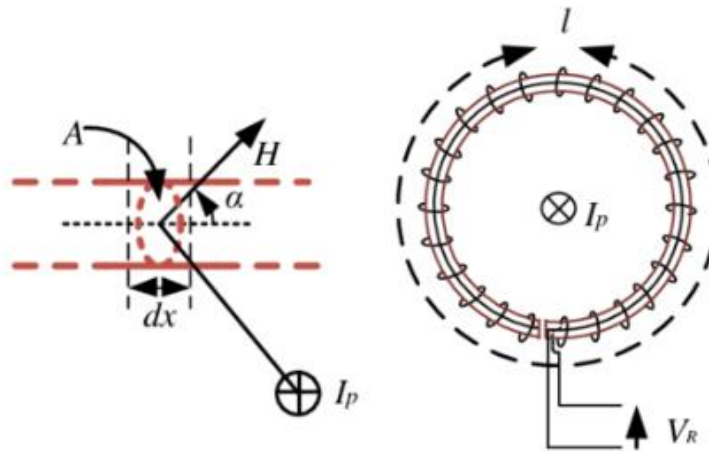


Figura 25 Colocación de una bobina Rogowski para medir una corriente I_p que pasa a través de un conductor de largo l y sección transversal A , donde el campo Magnético es H [45] [51].

3.4.2.3 Hall Effect: los sensores de efecto Hall captan el campo magnético perpendicular al pequeño rectángulo de medición que es un material conductor. Al principio, este rectángulo era de oro. Posteriormente fue remplazado por cobre u otros materiales conductores y semiconductores. En esta zona se produce una caída de tensión donde la corriente a medir genera un campo magnético proporcional a la intensidad de ésta. En ausencia de campo magnético (B), con presencia de corriente (I), no existe tensión inducida (V_h). Cuando existe campo (B) y corriente (I) se produce la tensión inducida de Hall (V_h). Los sensores de efecto Hall, son capaces de medir grandes corrientes, pero tienen limitaciones como: el ancho de banda, problemas de variación de temperatura, baja sensibilidad a corrientes muy pequeñas y es muy susceptible a campos magnéticos externos [52].

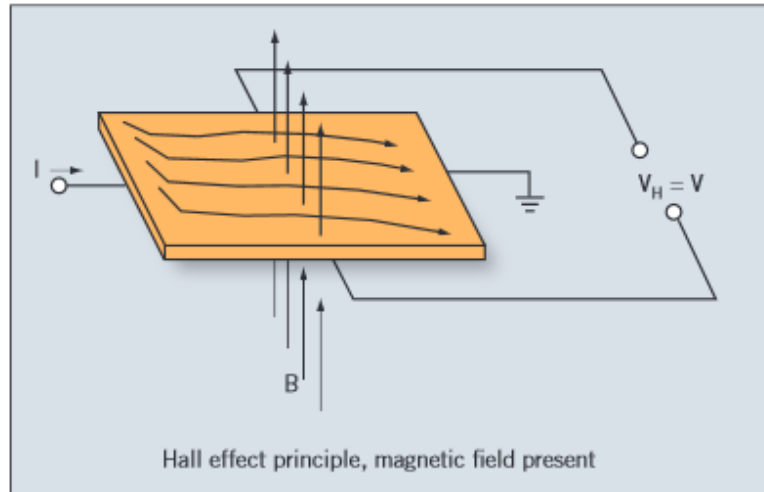


Figura 26 Principio de funcionamiento de un medidor por efecto Hall [45].

En la actualidad se usan materiales semiconductores como sensores de campo magnético sobre el cual pasa una corriente, esta genera un campo que por ley de Lorentz genera una fuerza resultando en una tensión inducida cumpliendo:

$$V_h = I * \frac{B}{n * q * d}$$

Ecuación 12 Tensión inducida por ley de Lorentz

Si es que no existe campo magnético, la tensión inducida de Hall (V_h) es cero. La tensión V_h es proporcional al vector obtenido del producto entre la corriente (I) y el campo magnético (B) considerando que n es la densidad, del grosor de la placa (d) y q la carga que circula por la misma. Uno de los problemas del sensor de Hall es atenuar la resistencia del material semiconductor para que el sensor de Hall funcione, ya que esta variación genera cambios en la tensión inducida V_h . También hay que disminuir el área activa del material para eliminar la tensión inducida en los cables del sensor.

Para medir la tensión V_h se debe considerar que si se mide la tensión cuando no existe campo magnético, la tensión inducida debe ser cero, sin embargo si se mide con respecto a tierra, existe tensión offset distinta a cero, conocida como “Modo Común de tensión” (“CMV” o “Common mode Voltage”). Este offset se anula usando circuitos adicionales [47] [53].

3.4.2.4 Tecnología Flux Gate: es una de las tecnologías más exactas y precisas hasta la fecha. Se basa en la relación no lineal de campo (H) e inducción magnética (B) en un material magnético. Como se muestra en la figura 27, hay un embobinado que provoca un aumento en el campo magnético del material enrollado, compuesto de dos varillas. Este campo fluctúa entre valores positivos y negativos y es captado por un “pick up Winding” que genera una tensión que depende de la inducción en cada varilla.

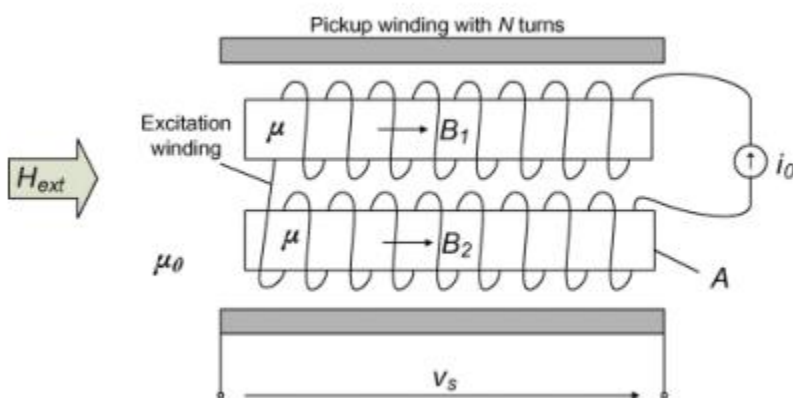


Figura 27 Principio de funcionamiento de un medidor de Flujo magnético [47].

El principio de funcionamiento consiste en 2 varillas que apuntan en direcciones opuestas, por lo que no ven el campo producido por la excitación. Como consecuencia de la variación de flujo entre ellas e influenciadas por el área de la varilla (A) y el número de vueltas del embobinado (N), ocurre una tensión (v_s) proporcional de la variación magnética interna y la permeabilidad μ_d [47] [52]:

$$v_s = -2 * N * A * \mu_d * \frac{dH_0}{dt}$$

Ecuación 13 Tensión resultante producida por la relación de la inducción magnética en el sensor

3.4.2.5 Resistencia Magnética: las resistencias magnéticas son sensores que son usados principalmente en lecturas de campos magnéticos. Se trata de estructuras construidas que varían su resistencia magnética en función de variación de los campos. Actualmente los más populares son:

3.4.2.5.1 Resistencia Magnética Anisotrópica (AMR): consiste en una aleación de níquel con acero muy sensible a los campos magnéticos que depende de la dirección y fuerza de éstos. La impedancia del material varía según la dirección de la corriente, siendo más débil cuando la corriente esta paralela al campo y más fuerte cuando está perpendicular a éste, por lo que se fuerza al conductor de corriente a estar en 45 grados.

La variación de la resistencia magnética depende del ángulo y la magnitud de la corriente. Se puede calcular la intensidad de la corriente conociendo el ángulo, la magnetización inicial M_0 y la variación de la impedancia de la resistencia magnética (generalmente está entre el 2 a 4%)[37].

La magnetización se produce al superponerse la dirección de la magnetización inicial y un campo externo H_x , por lo que si se usa una corriente constante se puede calcular la caída de tensión en la resistencia y ajustar un campo H externo para funcionar en una zona lineal de trabajo en la resistencia magnética.

Campos magnéticos externos de gran intensidad pueden cambiar la magnetización inicial por lo que el medidor entrega información falsa hasta realizar una reorientación de

los campos internos de la resistencia. Las resistencias magnéticas Anisotrópica tienen un rango de funcionamiento de frecuencias que puede llegar hasta los 100 kHz [47].

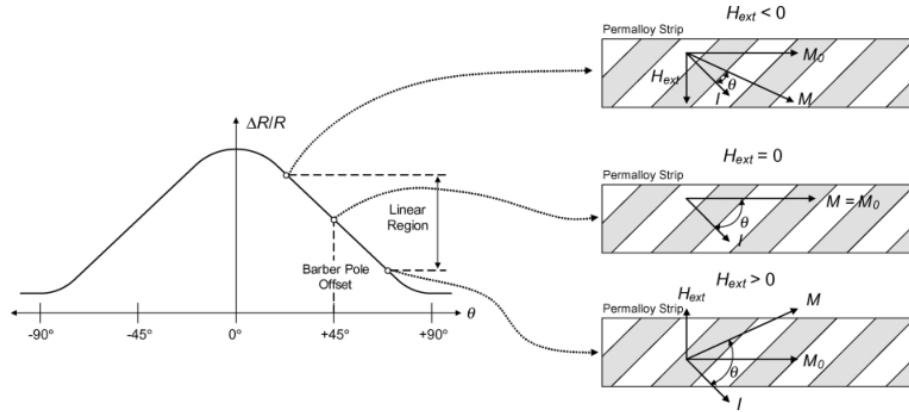


Figura 28 Región de trabajo de una Resistencia magnética [47].

3.4.2.5.2 Resistencia Magnética Gigante (GMR): en las GMR, al igual que en las AMR, el campo externo influye en el valor de su resistencia interna. Se diferencian en que presentan variación de hasta un 12%, por lo que tienen mediciones más precisas en campos externos de menor intensidad.

El GMR varía su resistencia dependiendo de la polaridad del campo externo y su intensidad, pudiendo calcular la intensidad del campo con la misma variación de la resistencia magnética del GMR. Los principales problemas de esta tecnología de medición son que si existe un campo externo muy fuerte éste puede desorientar la capa ferromagnética de pines orientados, y que la banda ancha depende directamente del conductor presente en medio del GMR [47].

3.4.2.6 Fibra Óptica: la medición por fibra óptica usa la ley de Faraday como principio de funcionamiento para obtener señales de tensión producidas por el campo eléctrico que se genera cuando fluye una corriente. El método de captación utiliza la luz que se mueve en forma elíptica/circular a través de un medio polarizado por un campo eléctrico.

Matemáticamente, este campo se puede descomponer en dos ondas de luz ortogonales polarizadas y el medio que cambia su polaridad se conoce como Birrefringente. Uno de los descubrimientos de Faraday, fue la inducción de una birrefringencia circular a un material, aplicando un campo eléctrico paralelo a la dirección de la propagación de la luz. Si la birrefringencia es pequeña, el plano de polarización lineal se describe como la integral del campo magnético en un camino cerrado S , proporcional a la constante de Verdet " V " [54].

$$\theta = V \int H * ds$$

Ecuación 14 Ecuación de la Birrefringencia Circular de un material.

Con este principio se han realizado 2 técnicas de medición [47]:

3.4.2.6.1 Método de detección Polarimétrico: la luz se introduce en un sistema de fibra óptica con N vueltas, que encierra la corriente a medir. La rotación (θ) de la luz polarizada se calcula por la ley de ampere.

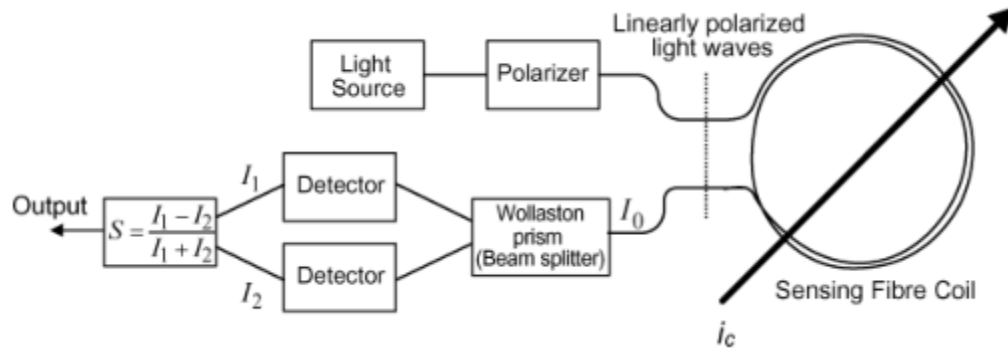


Figura 29 Esquema de funcionamiento del sensor de fibra óptica polarimétrico [47].

3.4.2.6.2 Método de detección por interferómetro: el método de detección por interferómetro utiliza dos contadores de propagación de luz y un interferómetro Sagnac. El interferómetro mide el desfase entre ambos rayos de luz medidos, en una fibra óptica que envuelve la corriente.

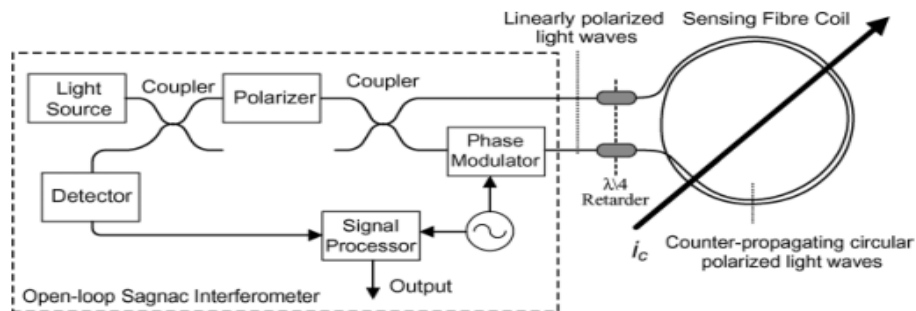


Figura 30 Esquema de funcionamiento del sensor de fibra óptica por interferómetro [47].

	Tecnología	Tipo	Ancho de Banda	Precisión [%]	Aislado	Rango de medición	Pérdidas	Observaciones	Precio [USD]
Directo									
	Resistivo	shunt Coaxial	MHz	0,1-2	No	kA	W-kW	Las sobrecorrientes pueden dañar permanentemente los Shunt de medición y su alta pérdida hace que las altas corrientes no sean precisas.	>0,5
		SMD	kHz-MHz			mA-A	mW		
		Trazo de cobre	kHz	0,5-5		A-kA	mW	Debido a su alta amplificación el ancho de banda disminuye, también es difícil medir la variación de temperatura	>0,5
	Inductor de resistencia DC		DC	5-30%	No	mA-A	W	A altas corrientes los cambios de temperatura generan mucha variabilidad en la resistencia	>0,5
	Transistor	Rds	Hz-MHz	10-20	No	mA-A	mW	Las variaciones de temperatura cambian mucho su resistencia de medición, por lo que se necesitan curvas apropiadas	>0,5
		Mosfet		5-20	No	mA-A	mW		
Indirecto									
	Transformador de corriente		kHz-MHz	0,1-1	Si	A-kA	mW	Es incapaz de leer mediciones DC y para altas corrientes se requiere una amplia sección transversal, para altas tensiones se requiere muy buena aislación.	>0,5
	Bobina Rogowski		Hz-MHz	0,2-5	Si	A-MA	mW	Su precisión depende de la colocación del conductor, y un alto número de vueltas disminuye el ancho de banda	>1
	Hall Effect		kHz	0,5-5	Si	mA-kA	mW	Altas frecuencias saturan el material del núcleo y sobre corrientes pueden magnetizar el medidor.	>4
	Flux Gate		kHz	0,001-0,5	Si	mA-kA	mW-W	Con altas vueltas se disminuye el ancho de banda, además muchas variables pueden inducir ruido	>10
	Resistencia Magnética	A MR	kHz	1-10	Si	mA-kA	mW	Muy sensible a campos magnéticos externos y el efecto piel disminuye el ancho de banda	>2
		G MR							
	Fibra Optica	Metodo de detección Polarimétrico	kHz-MHz	0,1-1	Si	kA-MA	W	No se recomienda para mediciones de bajas corrientes y si se sobre exige, deteriora el material de fibra optica	>1000
		Metodo de detección Interferómetro							

Tabla 9 Comparación entre tecnologías de medición de corriente (Modificada de [47]).

4. Diseño y Construcción

La construcción del dispositivo se ajustó a los objetivos principales y los criterios mínimos de funcionamiento fijados por la norma IEC 62561-6:2018. Se diseñó un sistema constituido de tres elementos que reciben una señal y la transforman en información. El sistema asegura el conteo de descargas o impulsos que ha recibido y almacena la corriente máxima de cada uno de éstos.

La construcción contempló tres fases conectadas: un sensor para recibir la señal de las descargas atmosféricas considerando la velocidad de respuesta y corta duración de ésta, un circuito adaptador compuesto de un sistema de filtros que reduzcan el ruido ambiental y señales no deseadas, y un elemento lector que transforme la señal en información.

Funcionamiento del dispositivo

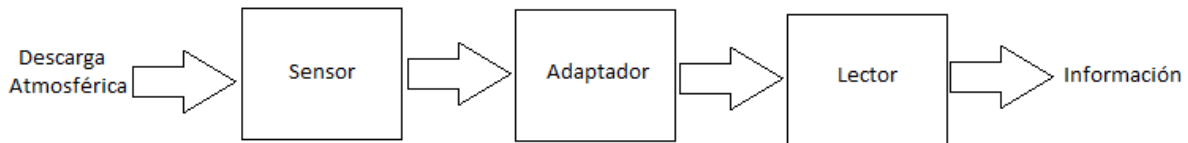


Figura 31 Diagrama de bloques del dispositivo.

4.1 Sensor

4.1.1 Elección del sensor

Entre los métodos de medición explicados, se eligió usar una bobina de Rogowski por sus múltiples beneficios, algunos de ellos son:

- **Linealidad:** debido a las altas corrientes de las descargas y puesto que el sensor Rogowski usa materiales no ferromagnéticos en su núcleo, se consideró usar el aire como material de construcción. Es necesario no tener saturación ni histéresis en el núcleo de medición. Un material no magnético permite medir altas corrientes sin saturarse.
- **Ancho de banda:** la buena respuesta de la bobina Rogowski a señales de alta frecuencia la hacen ideal para la medición de las corrientes de los rayos. El valor de la corriente máxima encuentra rangos de frecuencia altos (High Frequency) por lo que fue un factor de consideración importante para la selección de este método como sensor.
- **Flexibilidad:** debido a que esta memoria apunta a obtener datos en estructuras metálicas, la incorporación de un sensor de medición directa puede resultar costosa. La flexibilidad en la construcción de la bobina permite instalar el sensor en cualquier armazón ya que es externo e independiente.
- **Fácil montaje:** su flexibilidad va acompañada de una facilidad en la instalación, que consiste en “cercar” el lugar que se quiere medir con la bobina construida (Ver “Manual de instalación y operación”).

- **Aislación:** otro beneficio presente en este método de medición indirecta, es que al estar aislado del sistema otorga seguridad a los usuarios.

Principio de funcionamiento:

El principio de funcionamiento está descrito en 3.4.2.2, sin embargo, hay aspectos en los cuales se puede profundizar.

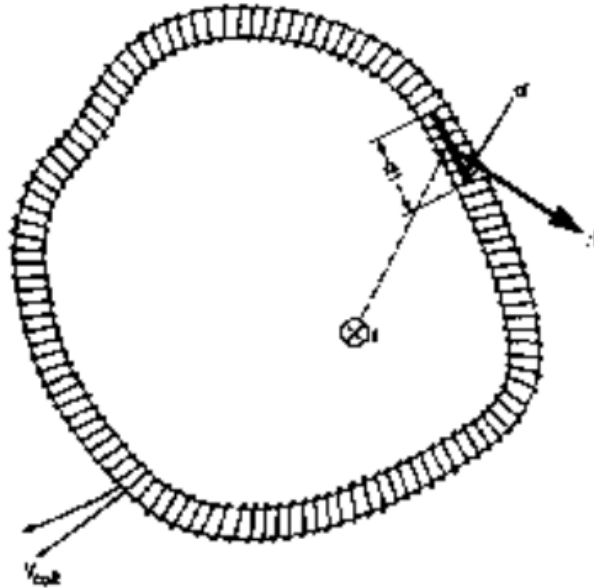


Figura 32 Típica bobina Rogowski [55].

La bobina Rogowski funciona con las leyes de Ampere y Faraday, donde éstas se definen como:

4.1.1.1 Ley de Ampere:

“El campo magnético en el espacio alrededor de una corriente eléctrica, es proporcional a la corriente eléctrica que constituye su fuente, de la misma forma que el campo eléctrico alrededor de una carga, es proporcional a esa carga que constituye su fuente. La ley de Ampere establece que, para cualquier trayecto de bucle cerrado, la suma de los elementos de longitud, multiplicado por el campo magnético en la dirección de esos elementos de longitud, es igual a la permeabilidad multiplicada por la corriente eléctrica encerrada en ese bucle” [56].

4.1.1.2 Ley de Faraday:

“Cualquier variación en el entorno magnético en que se encuentra una bobina de cable, originará un voltaje (fem inducida en la bobina). No importa cómo se produzca el cambio, el voltaje será generado en la bobina, este cambio se puede producir por un aumento o disminución en la intensidad del campo magnético, el movimiento de un imán entrando y saliendo del interior de una bobina, moviendo la bobina hacia fuera o hacia dentro de un campo magnético, girando la bobina dentro de un campo magnético, entre otras cosas” [57].

La combinación de ambas leyes sugiere que cuando existe una descarga atmosférica que impacta una estructura metálica, si ella está rodeada de una bobina Rogowski, producirá una tensión inducida en los terminales de la bobina proporcional a la corriente de la descarga que baja

a tierra a través del armazón. La tensión, equivalente a la suma de las tensiones inducidas en cada espira, se puede expresar como [58]:

$$v_{\text{espira}} = -\left(\frac{d\phi}{dt}\right) = -\frac{d}{dt} * (\oint B * dA) = -\frac{d}{dt} \left(\oint \mu_0 * H * dA \right) = -\mu_0 * A * \frac{dH}{dt} * \cos \alpha$$

Ecuación 15 Tensión inducida en una sola espira al haber un campo magnético.

Y la tensión total de la bobina es la suma de cada tensión inducida en las espiras:

$$v_{\text{bobina}} = \int_0^1 v_{\text{espira}} * N * dl = -\mu_0 * A * N \int_0^1 \frac{dH}{dt} * \cos(\alpha) * dl = -\mu_0 * A * N * \frac{di}{dt}$$

Ecuación 16 Tensión total de la bobina como equivalente de la suma de todas las espiras.

Donde el campo magnético producido por la corriente del rayo induce una tensión proporcional a la variación de corriente. Se puede describir, la inductancia mutua M equivalente a la multiplicación entre la constante magnética del aire (μ_0), el área del núcleo (A) y el número de vueltas que la bobina posea (N).

$$M = \mu_0 * A * N$$

Ecuación 17 Inductancia mutua con núcleo de aire de la bobina Rogowski.

La corriente será independiente de la forma del camino cerrado de la bobina y de la posición de éste con respecto al circuito a medir. Sin embargo, existe un error causado por el área transversal de construcción si es que hay irregularidades en ésta. Al construir una bobina Rogowski se debe tratar de obtener la misma forma y medida del núcleo, por lo que para disminuir el error la bobina se debe enrollar sobre la misma superficie logrando un área uniforme [47].

4.1.2 Modelación de la bobina

Para la representación eléctrica del sensor Bobina Rogowski existen dos modelos, los cuales expresan parámetros de la siguiente forma:

4.1.2.1 Modelo Simple:

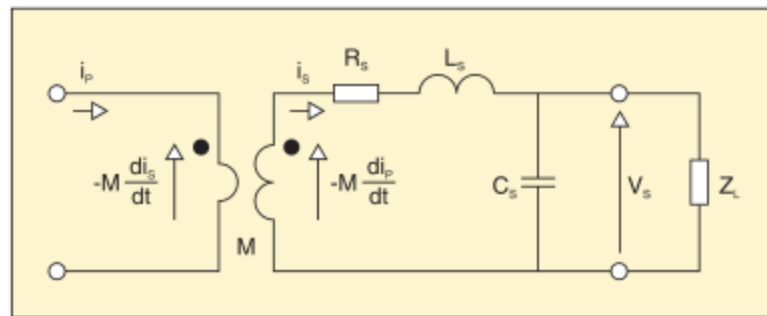


Figura 33 Modelo simple de la bobina Rogowski [59].

El modelo simple expresa tres parámetros eléctricos importantes y una tensión inducida como fuente. La resistencia y la inductancia son ambos parámetros propios de la bobina de medición y la capacitancia se define como parásita en el sistema. Estos parámetros dependen directamente del diseño y construcción física de la bobina, se pueden escribir como [60]:

$$R = \rho * \frac{l_1}{\pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Ecuación 18 Resistencia en función de la longitud y área del conductor.

$$L = \mu_0 * \frac{N^2}{l} * S$$

Ecuación 19 Inductancia en función de la sección y el número de vueltas del material.

Donde ρ es la resistividad del cobre, d el diámetro del alambre de cobre, l_1 el largo total del alambre, l y S : corresponden a la longitud y área transversal del núcleo, N el número de vueltas y μ_0 es la permeabilidad magnética del núcleo (aire). Para los cálculos de la capacitancia propia de la bobina se consideran dos factores importantes, la capacitancia entre vueltas (C_t) y la capacitancia hacia el cable de retorno (C_c).

$$C_c = 4 * \pi^2 * \epsilon^2 * \frac{Do + Di}{\ln\left(\frac{Do + Di}{Do - Di}\right)}$$

Ecuación 20 Capacitancia propia entre cada vuelta y el retorno.

$$C_t = \frac{\pi * \epsilon * (\pi * (Do - Di))}{(N - 1) * \ln\left(\frac{pw}{(Do - Di)}\right) + \sqrt{\left(\frac{pw}{(Do - Di)}\right)^2 - 1}}$$

Ecuación 21 Capacitancia propia equivalente entre vueltas o espiras de una bobina.

Donde pw es el espacio entre espiras, Do es el diámetro exterior de la Bobina Rogowski, Di es el diámetro interior de la Bobina Rogowski, ϵ es la permitividad eléctrica del núcleo (aire).

Conociendo ya estas referencias se puede establecer una relación entre la señal de entrada, correspondiente a la tensión inducida en la bobina, y una señal de salida, que se muestra en la figura 34 como V_{out} [60] [55] [59]:

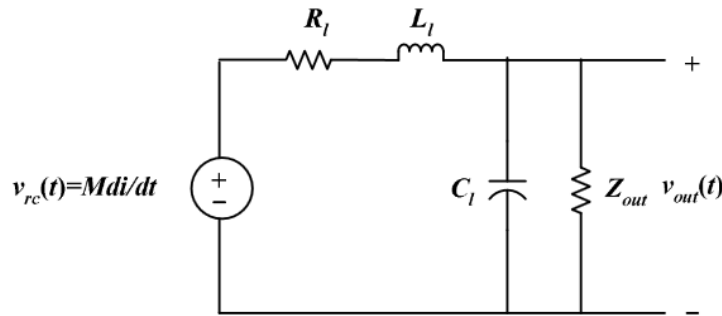


Figura 34 Representación del circuito equivalente de un sensor Rogowski.

La relación entre V_{out} (V_o) y v_{rc} (V_i), se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_{out}}{L * C * Z_{out} * s^2 + (L + Z_{out} * R * C) * s + (R + Z_{out})}$$

Ecuación 22 Función de transferencia en los terminales de la bobina.

Donde R , L y C son los parámetros definidos anteriormente. Incluyendo un Z_{out} mucho más grande en comparación a los parámetros R y L del sistema, se puede simplificar la función de transferencia para despreciar su impacto en ésta.

4.1.2.2 Modelo de parámetros distribuidos:

El modelo considera la bobina como una línea de parámetros distribuidos de longitud infinitesimal, donde las ecuaciones resultantes se integran a lo largo de toda la longitud de la bobina para obtener magnitudes macroscópicas. El circuito equivalente representa cada elemento como diferencial, incluyendo resistencias, inductancias y capacitancias entre cada espira, incluyendo sus tensiones inducidas. Su circuito equivalente se representa por la figura 35 [60] [55] [59]:

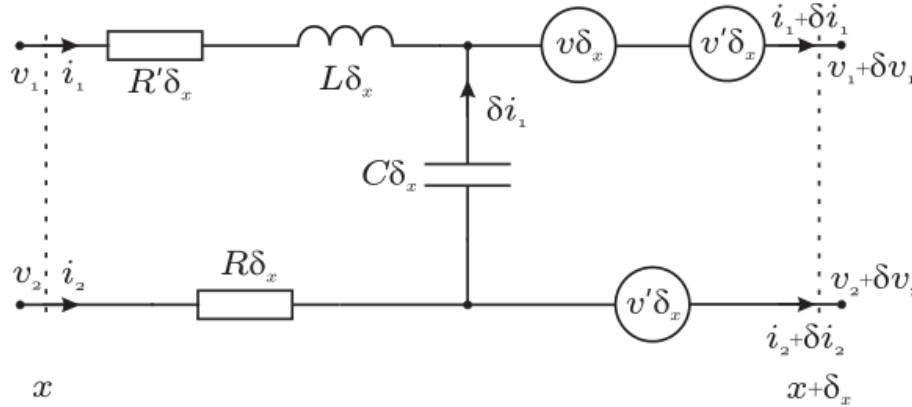


Figura 35 Modelo de parámetros distribuidos de una bobina Rogowski.

$R\delta_x$ representa la resistencia infinitesimal de la bobina; $L\delta_x$ la inductancia infinitesimal de la bobina, $R'\delta_x$ representa la resistencia del camino de vuelta de la bobina, $V\delta_x$ presentan las tensiones inducidas por los campos magnéticos perpendiculares que contrarrestan con la vuelta de retorno, $V'\delta_x$ la tensión inducida creada por la corriente de la descarga. Las ecuaciones que describen el comportamiento diferencial son las siguientes:

$$\begin{aligned}\frac{\delta v_1}{\delta x} &= -L * \frac{\partial i_1}{\partial x} - \mu_1 + R' + v + v' \\ \frac{\delta v_2}{\delta x} &= -i_2 * R + v' \\ \frac{\delta i_1}{\delta x} &= -\frac{C * \delta(v_1 - v_2)}{\delta t} \\ \partial i_1 + \partial i_2 &= 0\end{aligned}$$

Ecuación 23 Comportamiento diferencial de la bobina según sus parámetros y las condiciones.

Suponiendo que el cable de retorno está centrado y es homogénea el área transversal de la bobina, se generan las siguientes restricciones:

$$x = 0 \begin{cases} v_{out} = V(0) \\ i_1(0) = \frac{v_{out}}{Z} \\ v_2(0) = 0 \end{cases}$$

$$x = l \begin{cases} i_1 = -i_2 \\ V(l) = 0 \end{cases}$$

Ecuación 24 Restricciones del funcionamiento de una bobina Rogowski.

Si se conecta una impedancia Z_{out} en los terminales de la bobina, se determina la función de transferencia como la siguiente:

$$v_1/v_2 = \frac{1}{l} * \left(\frac{\frac{Z_{out}}{sL_d + R_d}}{1 + \frac{Z_{out}}{Z_0} * \frac{1 + e^{-2\gamma l}}{1 - e^{-2\gamma l}}} \right)$$

Ecuación 25 Función de transferencia en relación a los parámetros distribuidos.

Donde l es la longitud de la bobina y Z_0 como gamma (γ) se determinan según:

$$Z_0 = \sqrt{(sL_d + R_d)/(s * C_d)}$$

$$\gamma = \sqrt{(sL_d + R_d) * s * C_d}$$

Ecuación 26 Variables específicas de los parámetros distribuidos en función de los elementos del circuito equivalente de un sensor Rogowski.

4.1.2.3 Modelo de bobina auto integradora:

Desde el modelo de parámetros distribuidos, se puede lograr que la bobina integre la señal de tensión inducida desde la inductancia propia junto a la impedancia de medida Z_{out} , si es que ésta cumple con algunas restricciones que se comentan a continuación [60] [55] [59]:

Si la impedancia de medida Z_{out} es mucho menor a la impedancia propia de la bobina de Rogowski, ($Z \ll Z_{out}$), el denominador de la ecuación tiende a 1, por lo que la función de transferencia queda simplificada como se muestra en la ecuación 26:

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{l} * \frac{Z_{out}}{s * L_d + R_d}$$

Ecuación 27 Función de transferencia para una bobina auto integrada.

Sin embargo, esta función sólo funciona si es que la señal a medir es menor que la constante del sistema Tau (τ), que se establece como la relación entre L_d y R_d , además si es que cumple esa restricción, se puede despreciar R_d de la función de transferencia, quedando la función total como se ve en la ecuación 28.

$$\tau = \frac{L_d}{R_d}$$

Ecuación 28 Restricción para el funcionamiento correcto del modelo auto integrado.

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{l} * \frac{Z}{s * L_d}$$

Ecuación 29 Función de transferencia para el modelo auto integrado de la bobina Rogowski.

4.1.3 Criterios de Construcción

Los criterios de construcción del sensor están directamente relacionados a los parámetros eléctricos de la bobina y éstos con su geometría y propiedades de los materiales involucrados. Por eso, debe analizarse la sensibilidad cuando varían sus parámetros geométricos. Para decidir cómo construir, antes hay que evaluar la variación de los parámetros eléctricos.

4.1.3.1 Análisis de parámetros eléctricos

4.1.3.1.1. Incremento de resistencia: son varios parámetros geométricos que influyen en el valor final de la resistencia eléctrica. Al aumentar la resistencia, no se afecta la frecuencia de corte para los diagramas de Bode de la función de transferencia del sensor, aunque sí afecta en el comportamiento de resonancia, teniendo ante una mayor resistencia, menos factor de magnitud. El incremento o disminución de la resistencia no afecta la pendiente en la atenuación de la señal, sin embargo, al tener mayor presencia resistiva, existe mayor desfase.

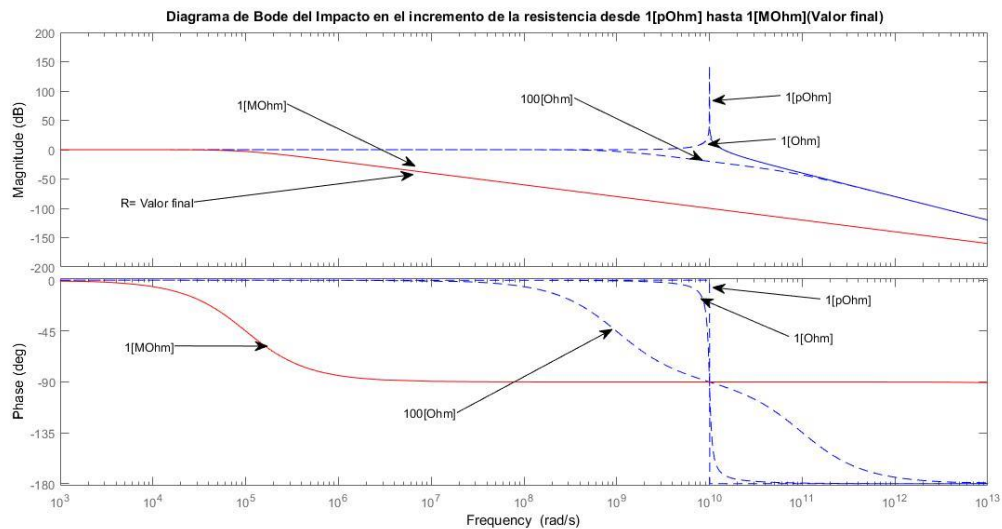


Figura 36 Respuesta en frecuencia de un sensor Rogowski al aumentar la resistencia hasta 1[MOhm] (línea roja) pasando por diferentes valores menores (azul punteado). Los demás parámetros eléctricos se mantienen constantes.

4.1.3.1.2 Incremento de inductancia: el incremento del número de vueltas aumenta el valor de la inductancia, lo que aumenta la sensibilidad de medición y la inductancia mutua. Inductancias de mayor magnitud restringen la frecuencia de corte. A mayores valores de

inductancia propia, disminuye el ancho de banda. El diámetro del núcleo afecta el valor total de la inductancia, disminuciones o aumentos del diámetro afectan directa y cuadráticamente la inductancia (ver ecuación 19). El largo del sensor es inversamente proporcional al valor de inductancia resultante.

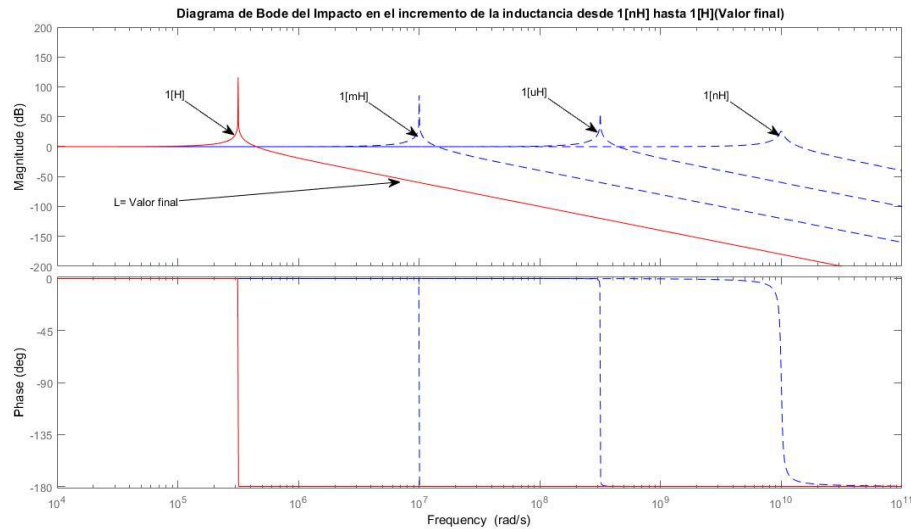


Figura 37 Respuesta en frecuencia de un sensor Rogowski al aumentar la inductancia hasta 1[H] (línea roja) pasando por diferentes valores menores (azul punteado). Los demás parámetros eléctricos se mantienen constantes.

4.1.3.1.3 Incremento de capacitancia: Al igual que la inductancia, el incremento de la capacitancia sugiere una disminución en la frecuencia de corte de la función de transferencia. Esta capacitancia se expresa en dos partes, la capacitancia entre espiras y la capacitancia de la bobina al cable de retorno, siendo la segunda despreciable con respecto a la primera.

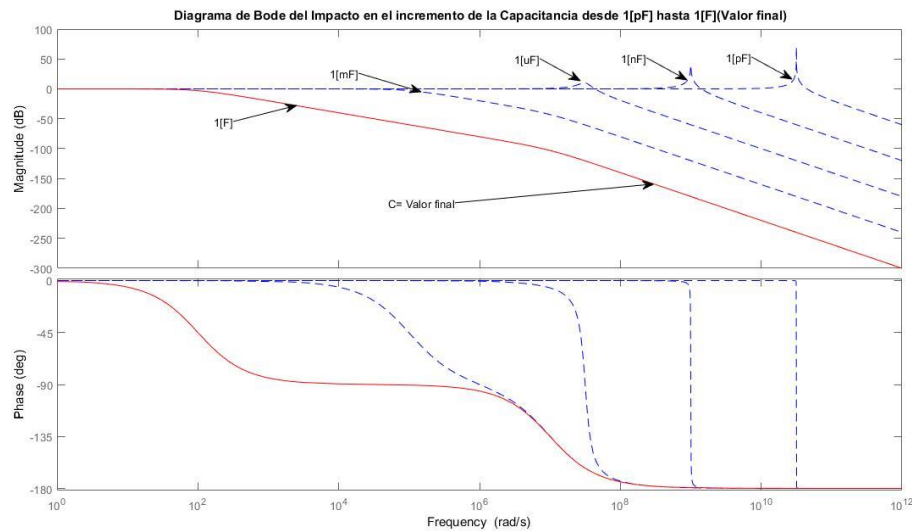


Figura 38 Respuesta en frecuencia de un sensor Rogowski al aumentar la capacitancia hasta 1[F] (línea roja) pasando por diferentes valores menores (azul punteado). Los demás parámetros eléctricos se mantienen constantes.

4.1.3.2 Análisis de parámetros geométricos

Para el análisis de los parámetros geométricos, se varió solamente el parámetro en estudio. Se mantuvo el resto de las variables constantes (ver figura 45).

4.1.3.2.1 Largo de la bobina: el aumento del largo de la bobina crea un área de medición más grande, pero causa un crecimiento del ángulo de enrollamiento lo que provoca un espacio más grande entre cada espira, que conlleva a un aumento en la capacitancia entre vueltas al aumentar el largo de la bobina. Al agrandar el espacio entre las espiras, es necesario usar un alambre más largo para poder satisfacer el mismo número de vueltas, por lo que la resistencia eléctrica crece. La inductancia mutua disminuye exponencialmente debido a que la inductancia propia depende directamente del área que cubre la bobina y su largo total.

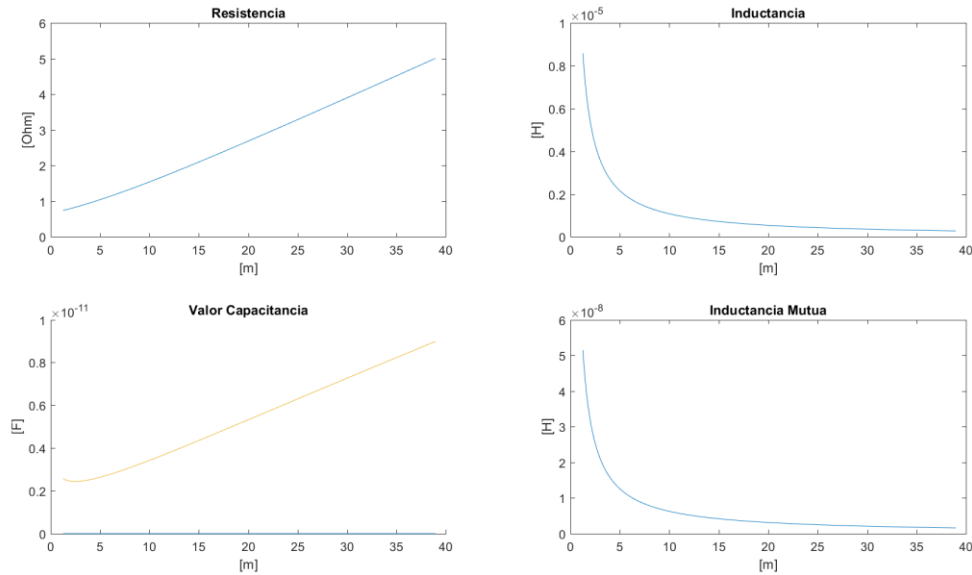


Figura 39 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del largo de la bobina.

4.1.3.2.2 Diámetro del núcleo: un aumento de diámetro causa que todos los parámetros eléctricos incrementen. La inductancia, que depende cuadráticamente de él, aumenta de esta misma manera, por ende, la inductancia mutua crece de la misma forma. La capacitancia crece linealmente ya que depende del largo del perímetro de cada espira. La resistencia aumenta con el largo del alambre. El número de vueltas se mantiene igual, por lo que el espacio entre espiras también. El largo del cable aumenta por el incremento de alambre que se necesita para enrollar cada vuelta debido al aumento del perímetro del núcleo.

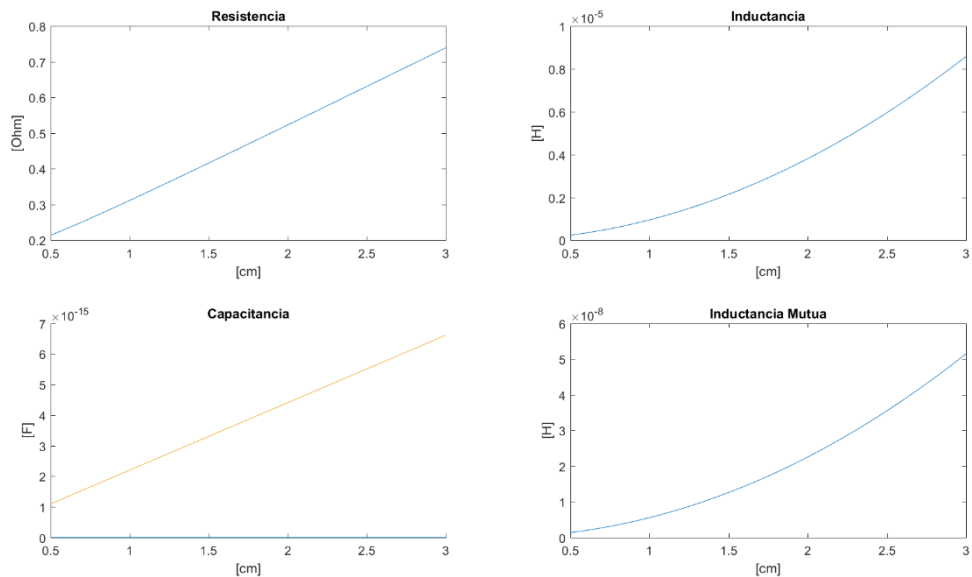


Figura 40 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del diámetro del núcleo.

4.1.3.2.3 Diámetro del alambre de cobre: un aumento del diámetro del alambre no causa impacto en las inductancias porque no genera un aumento del largo del sensor o del núcleo, pero disminuye exponencialmente la resistencia. La capacitancia aumenta ya que ésta se ve influenciada por el grosor de cada espira en el ángulo de enrollamiento.

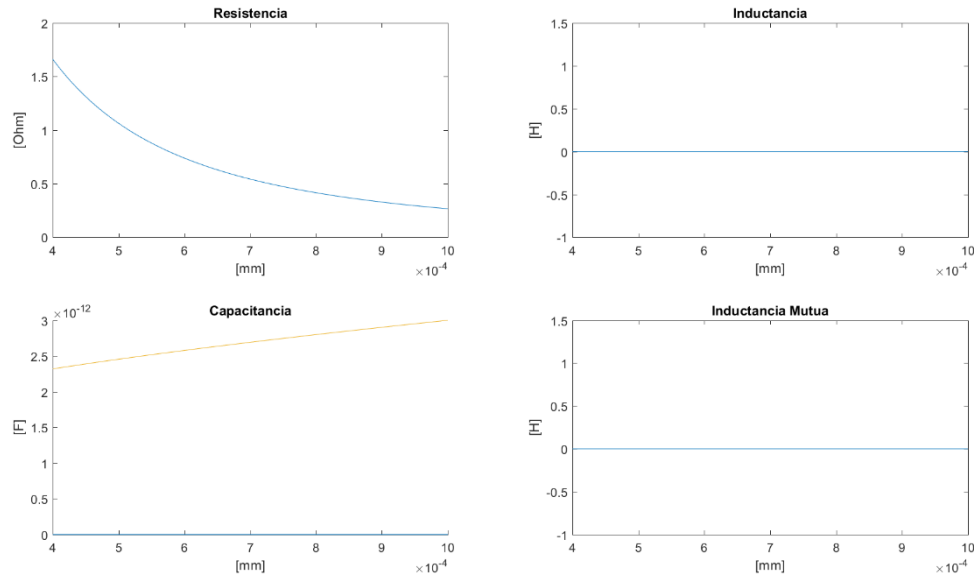


Figura 41 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del diámetro del alambre de Cobre.

4.1.3.2.4 Número de vueltas: el incremento de espiras hace crecer el largo del cable. La resistencia eléctrica y la sensibilidad aumentan linealmente. La inductancia propia aumenta cuadráticamente con el aumento de vueltas. La capacitancia entre espiras disminuye ya que el espacio disminuye con un largo constante, pero la capacitancia total aumenta lentamente por el aumento del número de vueltas. Cuando se alcanza un punto en el que el núcleo está completamente cubierto por el cable, seguir aumentando el número de vueltas provoca que la capacitancia tienda al infinito.

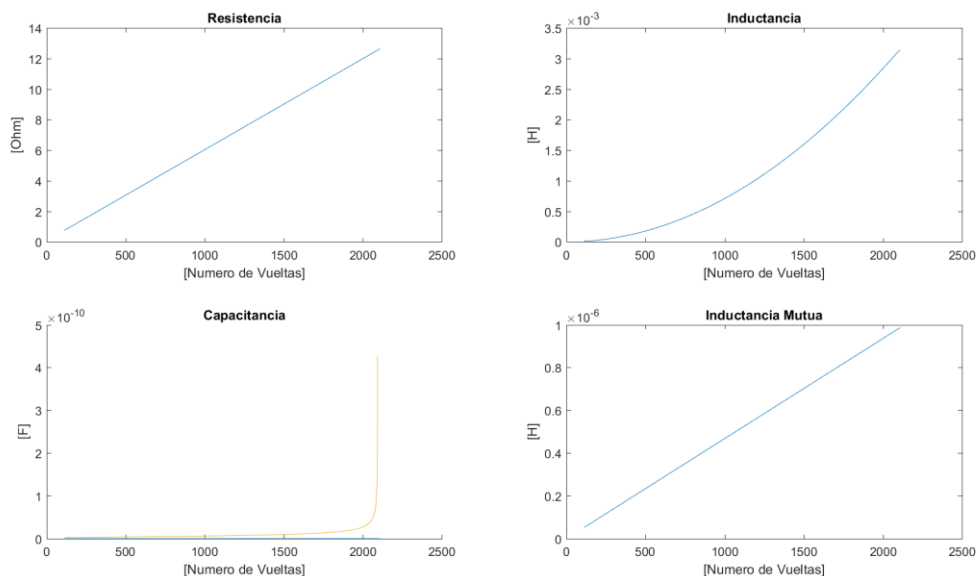


Figura 42 Impacto en los parámetros eléctricos por el aumento del número de vueltas.

4.1.3.3 Otros factores de construcción

4.1.3.3.1 **Forma del núcleo:** de manera general los instrumentos de medición Rogowski se construyen considerando tres tipos de núcleos: cuadrado, circular y en forma de óvalo. Esta forma del núcleo causa impacto en el valor de la sensibilidad final de la bobina [61], dependiendo principalmente de la diferencia entre el diámetro exterior y el diámetro interior.

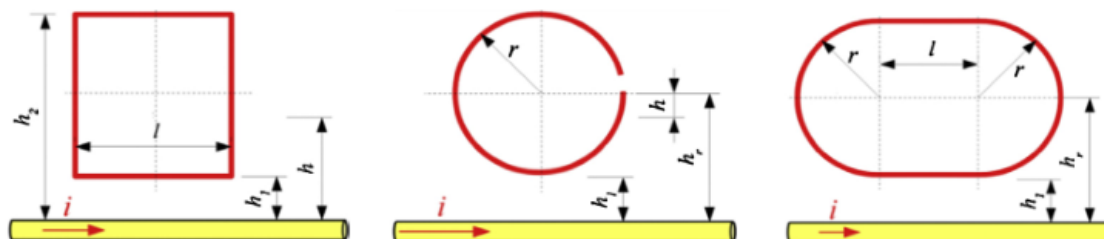


Figura 43 Formas de núcleos de una bobina Rogowski [62].

En relación a la inductancia mutua, considerando el mismo largo y número de vueltas los núcleos con forma rectangular presentan mayor sensibilidad en comparación con los de forma circular y ovalada, siendo estos últimos los de menor sensibilidad. Sin embargo, el error relativo que depende de la relación entre el diámetro interior y exterior, es contrario al incremento de inductancia, por lo que los núcleos con menor error relativo de medición son ovalados y los mayores, cuadrados (ver Figura 44) [62].

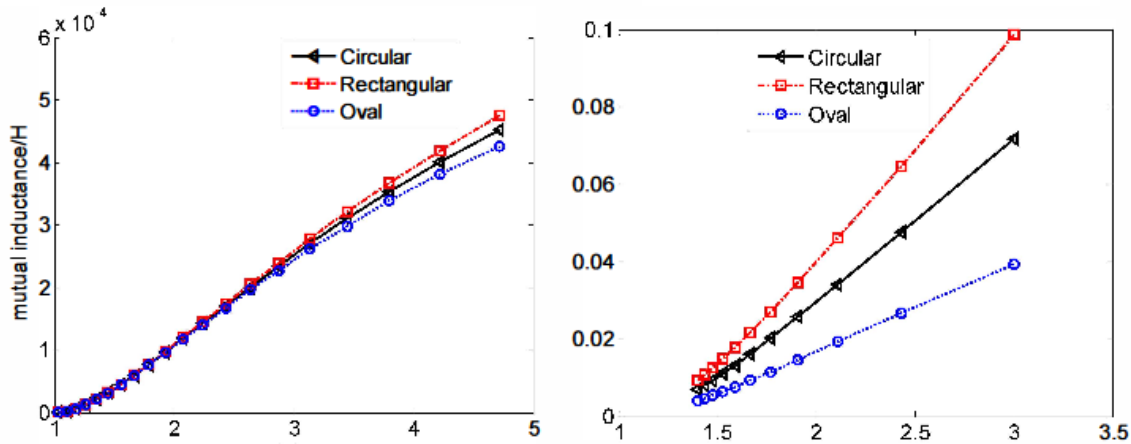


Figura 44 Incremento de inductancia mutua (gráfico a la izquierda) y error porcentual relativo de medición (gráfico a la derecha) Vs la relación entre diámetro exterior/diámetro interior de una bobina Rogowski [62].

4.1.3.3.2 Cable de retorno: es recomendable incorporar un cable de retorno al interior de la bobina debido a que el enrollado, por sí solo, crea una vuelta que genera una tensión, causando un error o ruido, que se cancela con la vuelta generada por el interior del cable. Este error es despreciable a bajas frecuencias. Cuando éstas aumentan, la importancia del cable se vuelve mayor [63]. A pesar de utilizar un cable de retorno, no es posible cancelar completamente el error generado, ya que el área que envuelve el cable es menor al área que envuelve el total de la circunferencia de la bobina debido al espacio que se forma al unir ambos extremos de ésta.

Existe otra alternativa para eliminar el ruido o error provocado por esta vuelta creada, que consiste en la incorporación de un enrollado con el mismo número de vueltas contrarias a la principal, que no afecta en la inductancia mutua del sensor total, pero afecta drásticamente en su frecuencia de corte, disminuyendo considerablemente su valor.

4.1.3.3.3 Impedancia terminal: la impedancia en los terminales de la bobina es muy importante ya que su valor puede provocar la autointegración de la señal de salida. Este valor disminuye el valor de frecuencia de corte. Para mediciones de impulsos o pulsos de corriente, se recomienda incorporar impedancias que no alteren el comportamiento de la señal e incluir circuitos externos que realicen la integración de la misma ya sean digitales o a través de circuitos integrados pasivos o activos.

4.1.4 Construcción de la bobina para medición

Para la construcción se debe tener en cuenta la frecuencia de corte, principal factor dictado tanto por el valor de la capacitancia propia como el de la inductancia, por lo que, en base a la bibliografía revisada al momento de construcción, se eligió como principal criterio una respuesta en frecuencia de al menos 1 [MHz] de ancho de banda. Se deben acomodar tanto los valores de inductancia como capacitancia para cumplir con este requisito.

4.1.4.1 Diámetro del cable: el diámetro del cable se ve restringido por los alambres disponibles en el mercado. Se trata de tener la menor resistencia posible para disminuir el desfase de la señal causado por el aumento de resistencia propia del sistema. La capacitancia aumenta a medida que aumenta el diámetro del cable, pero este parámetro no es tan decisivo al momento de construir. De la variedad presente, se eligió un alambre de 0.81[mm] de diámetro el cual se confirmó con un micrómetro eliminando el esmalte en varios puntos de su longitud. Estas mediciones mostraron que el diámetro no era constante, pues variaba entre los 0.4[mm] y 0.5[mm]. Se eligió el promedio de las mediciones como valor para los cálculos teóricos, correspondiente a 0.46[mm].

4.1.4.2 Largo de la bobina: considerando las mediciones de terreno por los sectores de Agua Santa, Placilla y Curauma, en las cuales se midió el espacio entre piernas de estructuras metálicas, como torres de alta tensión y antenas, se construyeron bobinas de 6.5[m] de largo, pero luego se optó por cambiar a un largo de 1.3 metros, pensado para torres arriostradas con base cuadrada de 20 centímetros de separación entre piernas o base triangular de 30 centímetros por lado.

4.1.4.3 Diámetro del núcleo: el diámetro del núcleo está restringido por el material sobre el cual se enrolla el alambre. Se utilizó Policloruro de Vinilo (PVC), de 6,5 [mm] de diámetro. El diámetro del núcleo es uno de los factores geométricos que más impacto tiene en los parámetros eléctricos, por lo que eligiendo uno de menor tamaño se puede disminuir el valor de la inductancia final, ampliando el ancho de banda.

4.1.4.4 Resistencia terminal: se utilizó una resistencia entre terminales alta (4770 Ohm) debido a que un valor muy bajo provocaría una disminución considerable de la frecuencia de corte [63] y la auto integración de la señal. Conectar impedancias de baja magnitud es recomendable para mediciones de señales de la red u otras aplicaciones en baja frecuencia, no para mediciones de pulsos de corriente. Una impedancia de gran magnitud entre los terminales de la bobina asegura que la señal de salida sea equivalente a la señal inducida, sin existir desfase ni atenuación.

4.1.4.5 Número de vueltas: siempre se debe tener precaución con la relación entre el número de vueltas y la inductancia propia, considerando que se debe construir el mayor número de vueltas posible manteniendo uniforme el espacio entre espiras para tener buenas mediciones. Éste es el parámetro más importante ya que representa la sensibilidad misma del sistema. Cuando se tuvo el resto de los parámetros decididos, se simuló la frecuencia de corte para un número de vueltas equivalente al largo total de la bobina y se llegó a la conclusión que 1650 vueltas cumplían con las especificaciones, llegando a 3[MHz] como frecuencia de corte.

Los parámetros eléctricos teóricos se calcularon con el software Matlab (Anexo 7.1) y se compararon con los parámetros eléctricos medidos en la Tabla 10. Los parámetros reales de la bobina (R , L y C) se midieron con un medidor de impedancia perteneciente al laboratorio de alta tensión. La inductancia mutua (M) se determinó contrastando el impulso de corriente y la señal a los terminales de la bobina con una función aproximada del impulso de corriente y su derivada multiplicada por un factor M , correspondiente al valor de la inductancia mutua. Luego de múltiples mediciones, el valor M se determinó como el promedio de los factores de multiplicación para distintos valores de corriente.

Parámetro Eléctrico	Valor Teórico	Valor Medido
Resistencia	3.74 [Ohm]	6.83 [Ohm]
Inductancia	1.016×10^{-4} [H]	1.16710^{-4} [H]
Capacitancia	6.24×10^{-13} [F]	7.28×10^{-12} [F]
Inductancia Mutua	7.967×10^{-8} [H]	8.693×10^{-7} [H]
Frecuencia de Corte	3.084×10^6 [Hz]	--

Tabla 10 Tabla de comparación entre valor teórico y práctico.

Los parámetros que más cambiaron respecto a los valores teóricos son la inductancia mutua y la resistencia. Esto se debe a que las características de los materiales usados para la construcción del sensor fueron diferentes a las planteadas en el diseño.

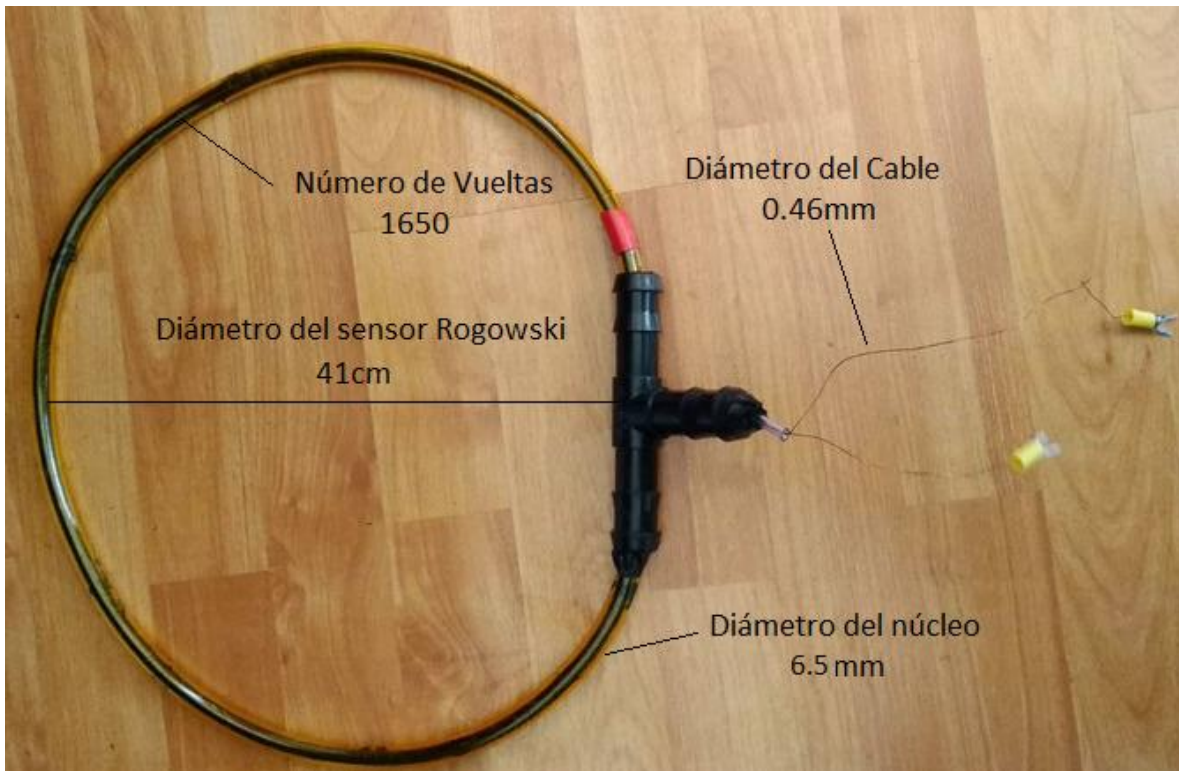


Figura 45 Bobina Rogowski construida y sus características.

La sensibilidad del sensor corresponde a $0.86 \text{ } [\mu\text{Vs/A}]$.

4.2 Lector

Para el lector se decidió usar el hardware libre Arduino, una placa de circuitos impresos que utilizan microcontroladores para realizar proyectos multidisciplinarios, cuyas licencias son de “código abierto”. Otorga el beneficio de usar y tener libertad de acceso a los códigos de

programación de proyectos antiguos e investigaciones que usen esta plataforma. Para la realización de este trabajo de memoria se utilizaron distintos modelos de placas Arduino.

4.2.1 Arduino/Genuino

Arduino es una empresa de desarrollo de software que se especializó en la comercialización de su hardware y software, como se mencionó antes, de código abierto. La empresa se inició como un proyecto de investigación por Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino y David Mellis en el *Interaction Desing Institute* de Ivrea, a comienzos del año 2000 [64].

Su primer tablero fue introducido en el año 2005 para estudiantes de diseño. Desde entonces goza de popularidad a nivel mundial.

Arduino/Genuino ha establecido una amplia librería de códigos para uso diverso, como también foros de discusión para mejorar su software, incorporando tutoriales con el propósito de enseñar a su comunidad cómo realizar distintos tipos de trabajos.

Además de tener una biblioteca variada ha ido incorporando nuevas tarjetas, dos de ellas se usaron para la realización del presente trabajo.

4.2.2 Lectura de datos

Para la lectura de datos se decidió usar dos Arduinos conectados en serie. El primero de ellos encargado de la constante recepción de señales que transmite los datos leídos al segundo, que los transforma, muestra y almacena.

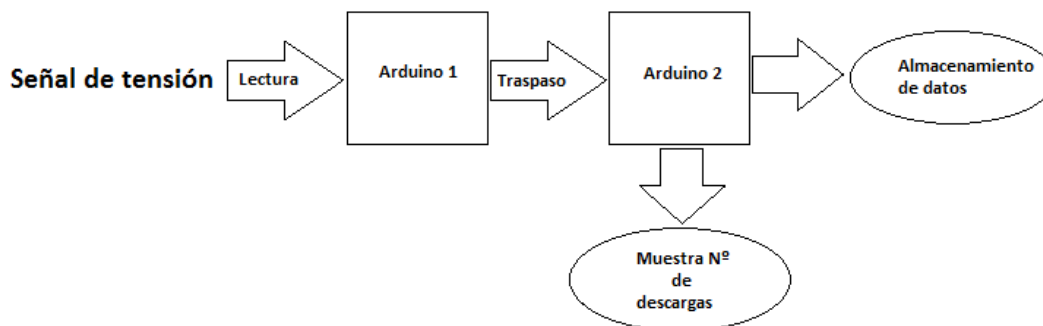


Figura 46 Diagrama de bloques del sistema lector.

4.2.2.1 Arduino 1

El sistema de lectura de la señal de ingreso funciona a través de los pines analógico-digitales del Arduino. Éste capta señales de tensión en sus terminales de medición. El Arduino Lector es un Arduino Due que funciona con el microcontrolador ATMEL-SAM3X8E Cortex-M3 CPU [65].

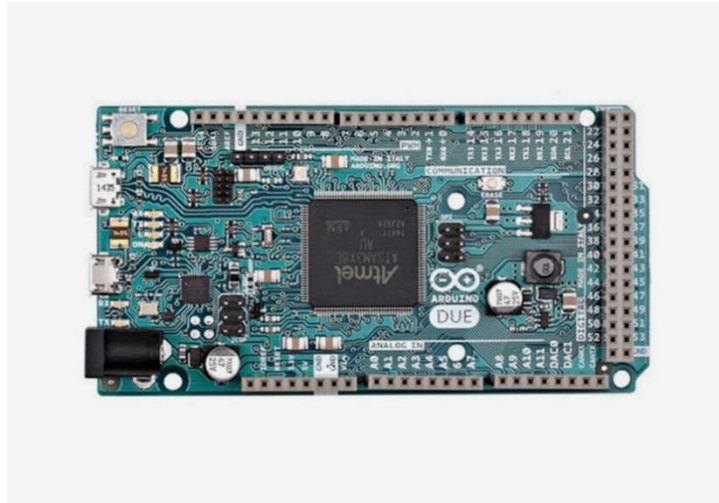


Figura 47 Arduino DUE [66].

Su principal atributo es la alta velocidad del reloj interno, de 84[MHz]. Se utilizaron sus periféricos para medir constantemente a un intervalo de medición de 1 [μs] sin acceder al loop. Si se utiliza el loop en el Arduino Due, su tiempo entre medición aumenta a 4[μs] y se pierden mediciones. Se establecieron restricciones para el almacenamiento de datos, por lo que si se supera el mínimo de 100[mV], inicia un almacenamiento de 32 datos en otro periférico cada 1 microsegundo entre los pines A0 y GND. Otra restricción, para eliminar ruidos de pocos microsegundos provocados por el ambiente, consiste en comparar el promedio de las sumas de las mediciones totales con el valor Offset. Si éstas superan su valor absoluto se considera válida la medición.

Los tiempos de las descargas atmosféricas se dividen entre el primer *stroke* y los que vienen a continuación, con menor intensidad de corriente. El primer stroke suele durar entre 3 a 13 microsegundos y si es que existe una alta presencia de strokes consecutivos pueden alargar la duración del rayo. Inicialmente se trabajó con el Arduino UNO, pero el tiempo que demora en iniciar su Loop de almacenamiento de datos es muy amplio, lo que se traduce en tiempos muertos de hasta 10 segundos para la recepción de nuevos datos. Se cambió por un Arduino MEGA, lo que redujo el tiempo muerto a 0.5[s] luego de captar la señal.

Luego de almacenar los datos, el Arduino Due determina si los datos son reales o si corresponden a ruido ambiental. Usa un criterio de valor mínimo correspondiente a la corriente de un rayo de 7 [kA]. Luego matemáticamente calcula el valor de la integral de la corriente y envía el valor máximo al Arduino MEGA para su almacenamiento.

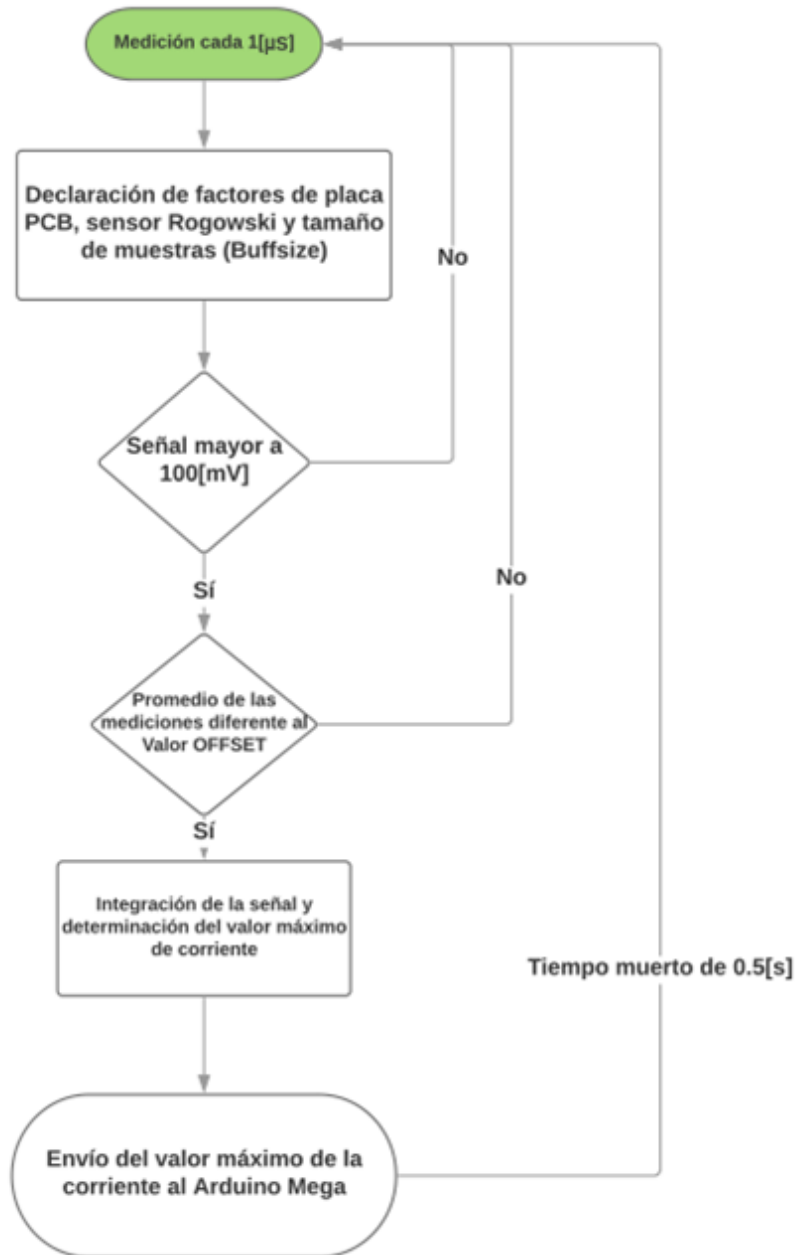


Figura 48 Diagrama de funcionamiento del Arduino Due.

4.2.2.2 Conexión entre Arduinos

La conexión entre Arduinos en serie se puede lograr de forma alámbrica o inalámbrica. Se optó por la opción alámbrica. Para la transmisión de datos entre Arduinos se debe considerar que existe un Arduino emisor y otro receptor. Definiendo al Arduino Due como Emisor y al Arduino MEGA como receptor la conexión para envío de datos se muestra en la figura 49 [67]:

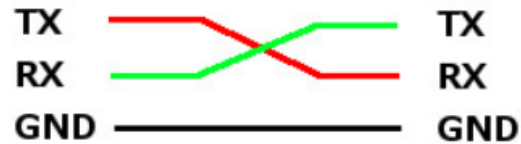


Figura 49 Conexión serial de comunicación entre pines de Arduinos.

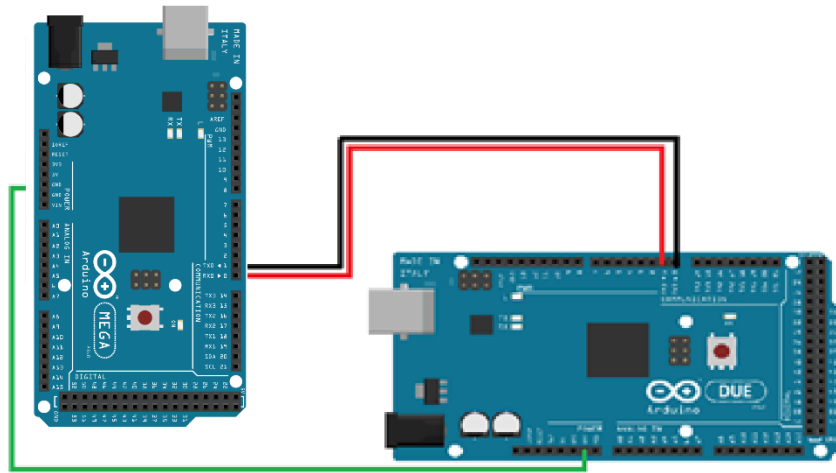


Figura 50 Conexión física entre ambos Arduinos.

La conexión RX-TX (ver figura 50) se conoce como esclavo-maestro y es la que hace necesario el tiempo muerto, ya que luego que el maestro envía una señal, el esclavo emite una respuesta que se interpreta como una descarga. El tiempo muerto cumple dos funciones principales, evitar que un stroke se considere como una descarga independiente y descartar el error producido por la respuesta del esclavo al recibir una señal.

4.2.2.3 Arduino 2

El Arduino 2 se encarga de almacenar y mostrar la información, recibida del Arduino 1. El Arduino MEGA recibe la información en forma de “String” y une todos los caracteres que envió el Arduino 1 para formar el valor de intensidad máxima de la corriente [66]:

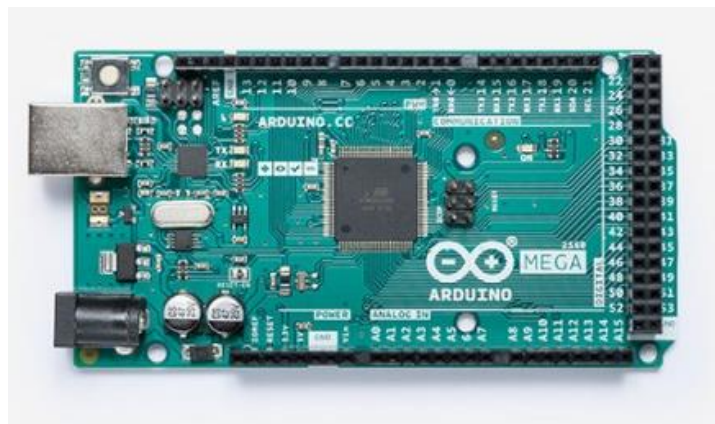


Figura 51 Arduino MEGA [66].

El Arduino receptor (Arduino MEGA) es el encargado de almacenar la información, ésta se guarda en una tarjeta SD usando las bibliotecas que tiene el software. Para almacenar se realiza la conexión que se muestra en la Figura 53 y se definen los pines en la programación. La tarjeta SD funciona a 3.3 *Volts* alimentados desde el mismo Arduino por lo que no necesita alimentación externa. El Arduino MEGA crea un archivo de texto con el nombre designado por el código de programación, escribe y almacena en el archivo el conteo de rayos y el valor máximo de la intensidad de corriente.

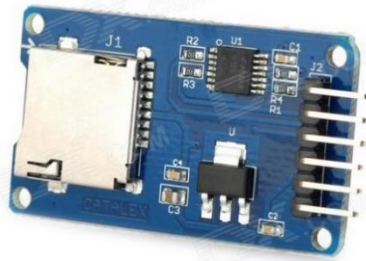


Figura 52 Adaptador de Tarjeta SD [66].

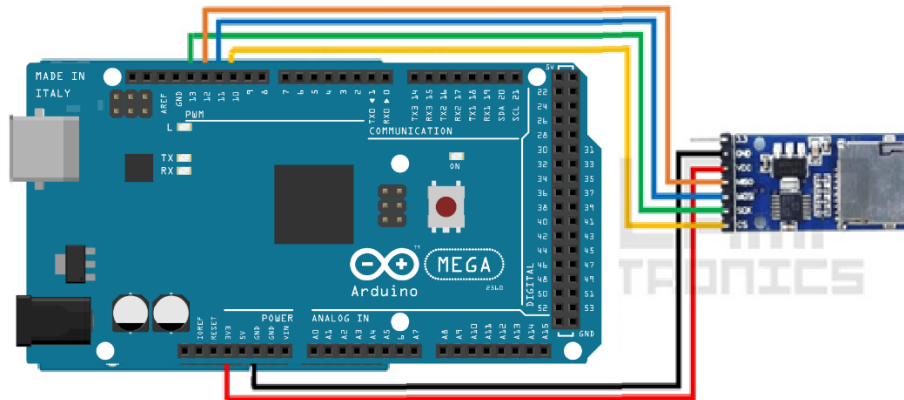


Figura 53 Conexión física entre Arduino MEGA y Tarjeta SD.

El LCD Display visualiza de manera rápida el número de descargas que han impactado a la estructura y da a conocer la corriente máxima de la última descarga.

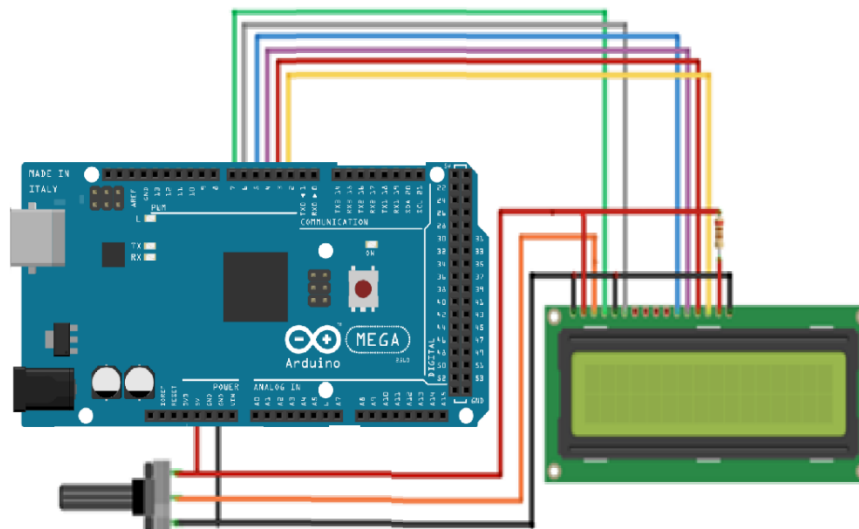


Figura 54 Conexión física entre Arduino MEGA y LCD Display.

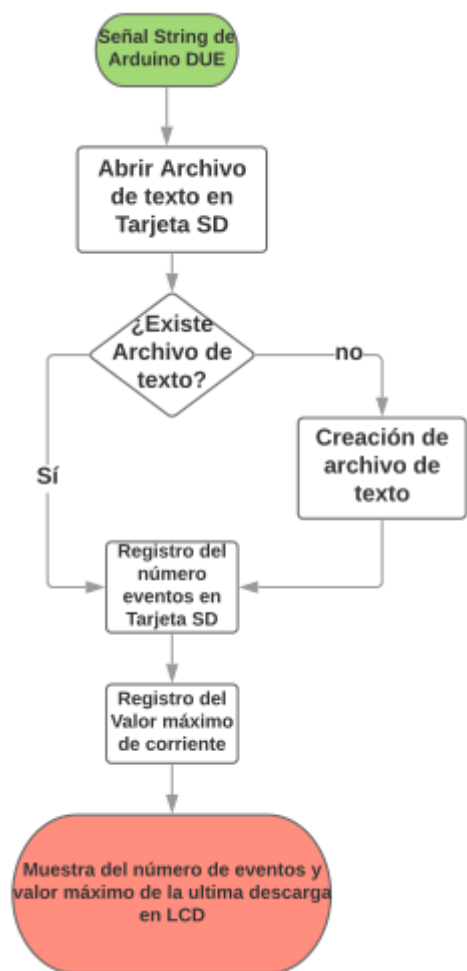


Figura 55 Diagrama de funcionamiento del Arduino MEGA.

4.3 Adaptador

El adaptador es la unión física entre el sensor y el lector, encargado de transformar la tensión inducida por la bobina en una señal apta para que el lector no sufra daños ni exceda sus limitaciones.

El Arduino como lector tiene restricciones. Estas restricciones primarias son: limitación de tensión máxima, hasta 3.3 Volts; la tensión mínima son 0 Voltios, por lo que no se le pueden aplicar tensiones negativas. A la bobina Rogowski, es común colocarle un circuito integrador entre sus terminales para obtener una señal proporcional a la onda de corriente [68].

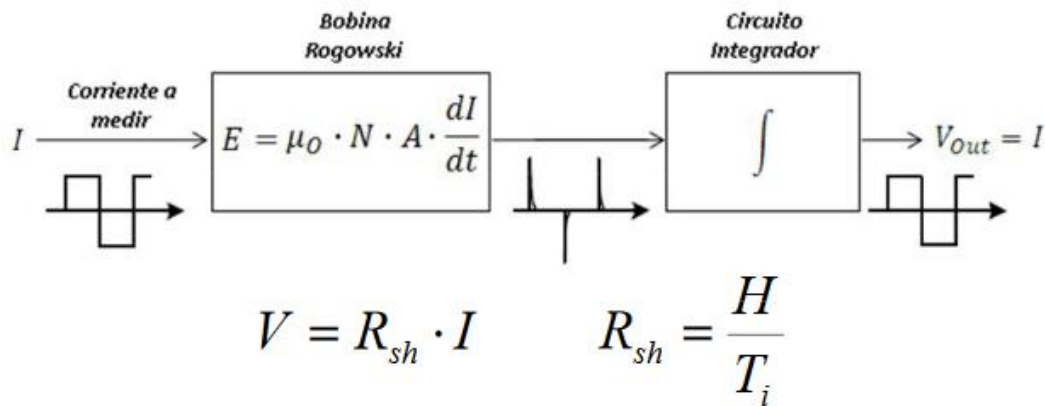


Figura 56 Proceso de transformación de la corriente, donde R_{sh} representa la relación entre la sensibilidad de la bobina H y una constante de integración T_i [68].

Para construir el adaptador, se diseñó un circuito en base a la teoría de funcionamiento de la bobina Rogowski y a las altas frecuencias que pueden llegar a tener estos fenómenos. Es pertinente usar elementos que alcancen y sobrepasen esta velocidad de trabajo.

4.3.1 Fase de diseño

4.3.1.1 Elementos a utilizar

Para el diseño específico se hizo un arreglo de amplificadores operacionales, los cuales cumplen la función de filtrar y reducir la señal de entrada. Se consideró una frecuencia de entrada de 125kHz. El diseño del adaptador considera un divisor de tensión, reductor, filtro de componentes continuas, un filtro pasa-altos y un montaje en una señal continua.

4.3.1.1.1 Circuito Amplificador: el circuito amplificador entrega una señal proporcional a la señal de entrada con un factor de escalamiento consistente en la relación de las resistencias en paralelo y en serie del circuito. Este circuito usa un arreglo como se describe en la figura 57.

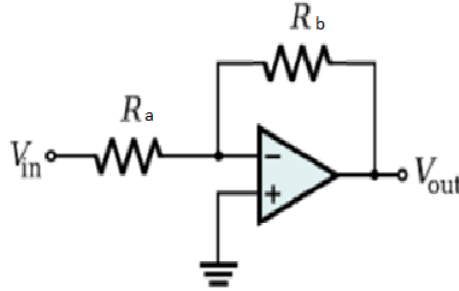


Figura 57 Circuito Amplificador/Reductor con amplificadores operacionales.

$$V(t) = -\frac{R_b}{R_a} * V(t)$$

Ecuación 30 Tensión amplificada o disminuida en relación a las resistencias que componen el arreglo operacional.

4.3.1.1.2 Filtro Pasa-Bajo: los filtros son sistemas que permiten el paso de señales a frecuencias determinadas. Para este caso, se construyó en filtro pasa-bajo Rauch con estructura *Múltiple Feed-back*, de segundo orden, el cual, desde su frecuencia de corte, restringe abruptamente la frecuencia de operación.

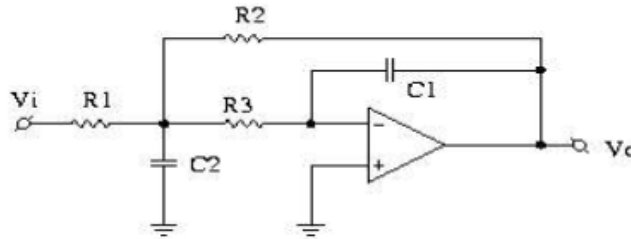


Figura 58 Filtro pasa-bajo con estructura *Múltiple FeedBack*.

El valor de los capacitores se define arbitrariamente, mientras que el valor de las resistencias se determina y acomoda en función de la frecuencia de corte y los valores de las capacitancias [69].

$$R_2 = \frac{a_1 * C_2 - \sqrt{a_1^2 * C_2^2 - 4 * b_1 * C_1 * C_2}}{4 * \pi * f_c * C_1 C_2}$$

$$R_1 = \frac{R_2}{-A_0}$$

$$R_3 = \frac{b_1}{4 * \pi * f_c * f_c * C_1 * C_2 * R_2}$$

$$C_2 \geq C_1 * 4 * b_1 * \frac{(1 - A_0)}{a_1}$$

Ecuación 31 Resistencias y capacitancias necesarias para lograr la frecuencia de corte específica de diseño.

4.3.1.1.3 Circuito amplificador de instrumentación: los amplificadores de instrumentación son un arreglo de amplificadores operacionales, a veces incorporados dentro de una misma pastilla. Éstos funcionan entregando una señal de salida correspondiente a la resta de 2 señales de entrada. Además de obtener una ganancia por el arreglo de resistencias presentes en el circuito.

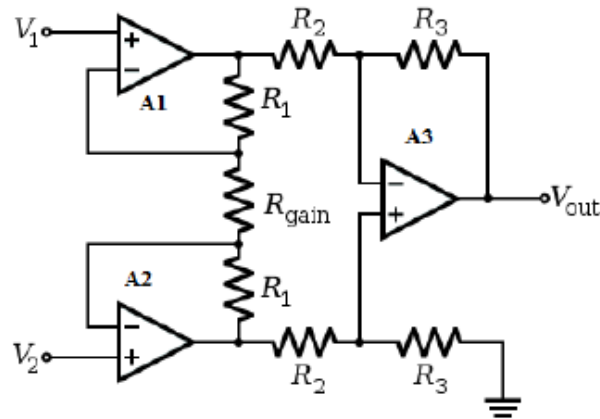


Figura 59 Estructura del circuito operacional de instrumentación.

$$V_{out} = (V_1 - V_2) * \left(1 + 2 * \frac{R_1}{R_{gain}}\right) * \left(\frac{R_2}{R_3}\right)$$

Ecuación 32 Tensión de salida en los terminales de un amplificador de instrumentación.

4.3.1.1.4 Proteus Design Suite: para las simulaciones se trabajó con el programa Proteus Design Suite, el cual es un software de diseño de tarjetas PCB y diseño electrónico. Permite modelar y probar el funcionamiento de los circuitos.

4.3.2 Circuito diseñado

4.3.2.1 Diseño final

El circuito diseñado considera la derivada de la corriente que entrega el sensor Rogowski. Se consideraron los parámetros de la bobina calculados y comprobados experimentalmente. Se colocó en primera instancia un divisor de tensión con alta resistencia para disminuir la corriente de entrada, también con el propósito de proteger los circuitos integrados. Después se construyó un arreglo operacional que disminuye a un tercio su señal de entrada (salida del divisor de tensión). Este sistema fija el valor máximo de la tensión a 12 [V], lo que corresponde a su valor de realimentación, luego va a un amplificador de instrumentación construido con los mismos operacionales AD8022.

El circuito de instrumentación tiene 2 entradas. En la primera se ubica la señal de salida del circuito integrado amplificador. En la otra entrada se ubica un filtro pasa-bajo con frecuencia de corte de 100 [Hz], esto es para filtrar las señales inducidas por la red. El circuito opera con una ganancia de 0.12 por lo que la señal de salida tiene valores entre 1.5[V] y -1.5[V], este factor será llamado " f_{PCB} ". Luego se conecta en serie con una fuente externa que aplica un offset de 1.5[V]. Debido a este arreglo el mínimo valor de entrada al Arduino Due será 0 Voltios, correspondiendo a una descarga positiva de 70[kA]. Una descarga de 70[kA] de polaridad negativa alcanzara el valor de

3[V] o su valor negativo, dependiendo de la orientación de la instalación de la bobina, considerando la forma de onda del pulso de generación con el que se trabajó. El Circuito fue diseñado para trabajar bajo frecuencias de hasta 60MHz.

$$f_{PCB} = 0.12$$

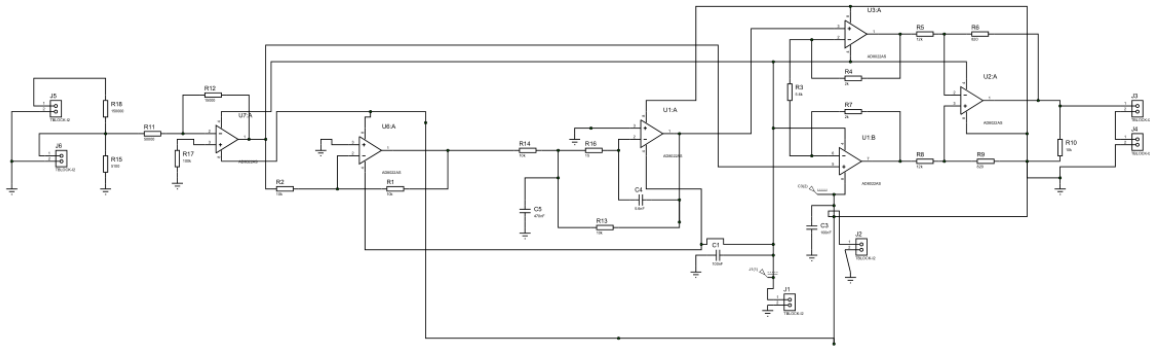


Figura 60 Modelo del circuito de pruebas en Proteus.

Para el circuito de diseño se usó el amplificador operacional modelo AD8022, que cumplía con los requisitos del sistema: funcionamiento a altas frecuencias, baja salida de tensión continua, amplio rango de alimentación, un *Slew Rate* de alta tensión y poco tiempo de respuesta.

4.3.2.2 Diseño de Tarjeta PCB

Para el diseño de la tarjeta PCB se asignó una huella a cada uno de los elementos presentes del circuito de trabajo sin considerar la bobina Rogowski. Este software entrega un diseño propio de la tarjeta PCB el cual queda asignado según la figura 61:

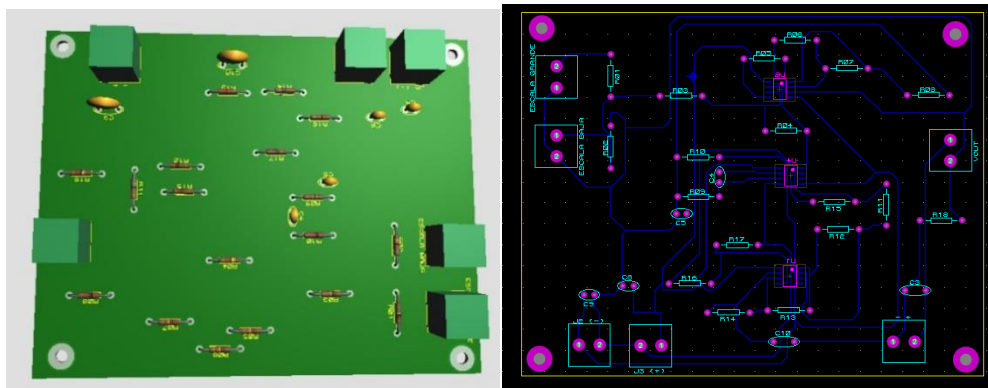


Figura 61 Vista de Placa PCB: diseño 3D y placa de Cobre.

5. Ensayos de Laboratorio

Para simular una descarga atmosférica, se trabajó con un circuito generador de impulsos de corriente (figura 62) que carga un condensador de 23 μF a una tensión continua entre 200 [V] y 500[V] y descarga su energía en la resistencia. Para la resistencia equivalente se hizo un cortocircuito preparado con flejes de cobre con un valor de 0.4 Ω . Entre los elementos del circuito se alcanza una corriente de 1[kA] de intensidad.

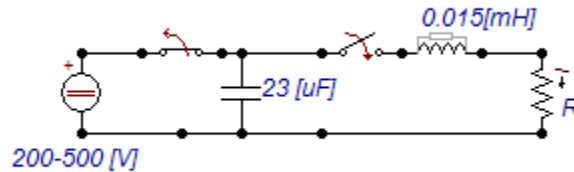


Figura 62 Circuito de impulso de corriente.

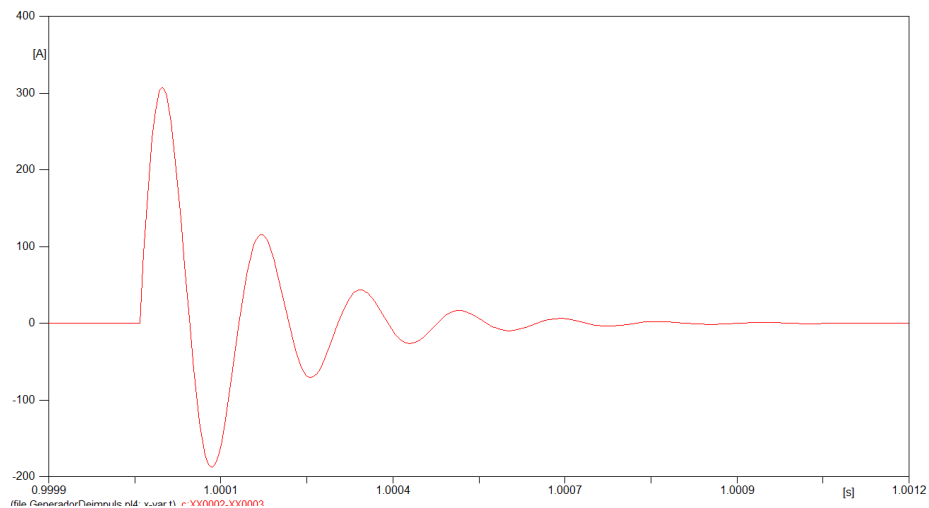


Figura 63 Simulación de un impulso de corriente subamortiguado.

La respuesta del circuito se midió con una punta de corriente de relación de 0.01 [mV] a 1 [A] y con un amperímetro de inducción. El circuito, debido a su inductancia y resistencia, no alcanza a disipar la energía total en un peak, por lo que se obtiene una forma de descarga sub-amortiguada. Al cargar y descargar el capacitor con la misma tensión continua, se obtiene aproximadamente la misma corriente y la misma forma de onda. Ambas dependen directamente del valor de tensión y la impedancia del circuito generador de impulso de corriente. Los tiempos de subida y cola del primer peak se controlan ajustando el número de vueltas de la inductancia en serie al capacitor, alcanzando en el primer peak de corriente unos tiempos similares a una señal 8/20 μs . Cuando existen pulsos de alta velocidad, la punta de corriente atenúa las mediciones mayores a 200[A] por lo que previamente a las mediciones de alta corriente se comprobó la relación entre corriente medida y la simulación a valores inferiores.

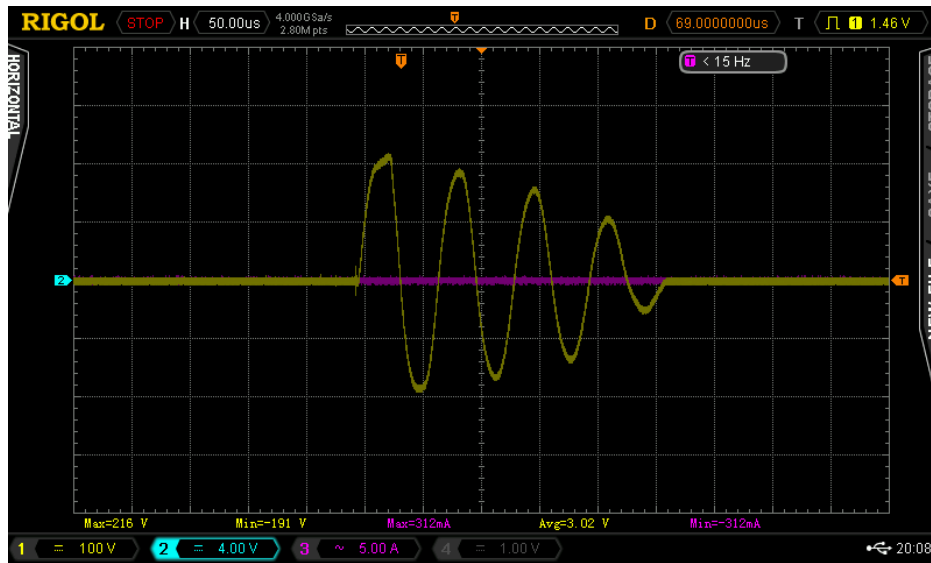


Figura 64 Señal de corriente del impulso generado.

Al incorporar la bobina, en los terminales se ve la derivada de la corriente multiplicada por un factor M de inductancia mutua. Se calculó una expresión matemática aproximada para la señal del impulso de corriente. La inductancia mutua se calculó con la relación que existe entre la derivada de esta señal y la señal entre los terminales de la bobina.

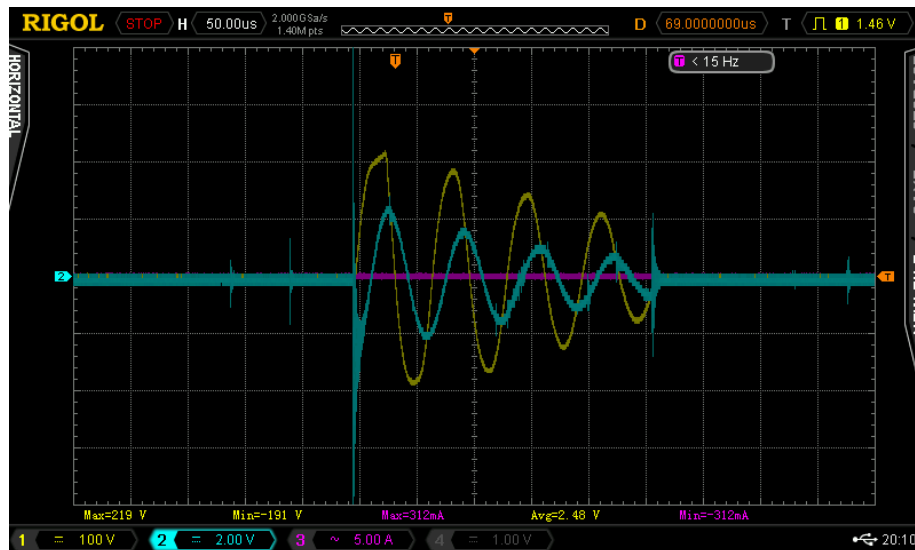


Figura 65 Respuesta de la bobina Rogowski (azul) construida a un impulso de corriente subamortiguado (amarillo).

El objetivo del circuito adaptador es llevar la señal inducida por la bobina hacia el Arduino, para esto se debe tener especial cuidado con la función de transferencia del circuito adaptador, limitado por las capacitancias parásitas e inductancias propias del circuito. En caso de existir un mal diseño previo de ésta, se provoca un desfase, resonancia o atenuación de la señal de entrada.

Entre los terminales de alimentación de los circuitos integrados operacionales es necesario incluir capacitores para eliminar el cambio de tensión que provoca una señal de 20[MHz], producido

por la conmutación de la alimentación. El tamaño de éstos debe ser pequeño (<100nF) debido a que capacitores de mayor tamaño incluye comportamiento resistivo e inductivo.

La alimentación de los amplificadores por medio de baterías no incluye la conmutación de alta frecuencia producida por el generador DC, pero igual tiene pequeños peaks de tensión y después de un tiempo se descarga.

En los resultados se aprecia un pequeño desfase debido a los filtros propios del sistema, aún así, la respuesta no presenta atenuación y es lo suficientemente rápida para seguir el impulso.

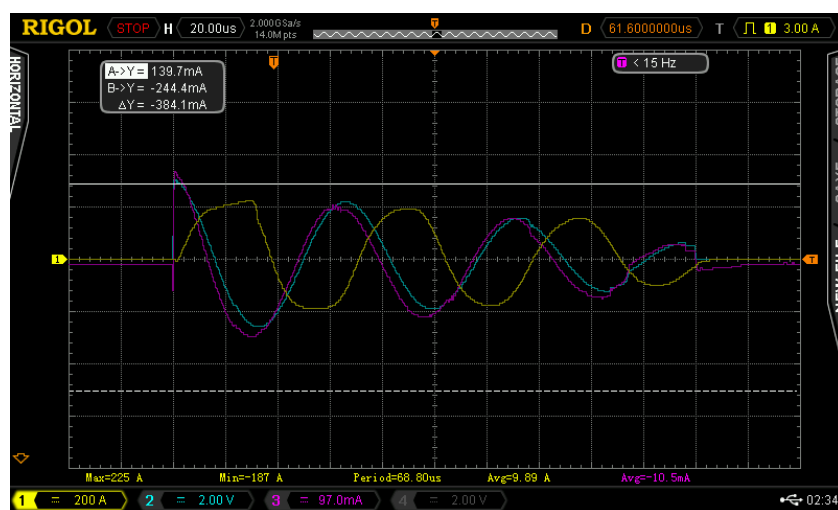


Figura 66 Respuesta de la bobina construida (morado) y del circuito adaptador (azul) al impulso de 200[A] (amarillo).

Conociendo la forma de la señal inducida en los terminales de la bobina, se probó el Arduino Due con un generador de señales acoplado a la placa PCB. Ésta se monta sobre un offset externo de 1.5[V]. La señal de lectura tiene 12 bit análogo-digital de precisión (*bits resolution*) y ésta se mide entre 0 y 4095 números enteros. Cada número entero representa 8[mV] con un rango de operación entre 0 y 3,3[V]. El valor de 1.5[V] corresponde a una alimentación externa por lo que necesita calibración previa en el laboratorio. La calibración se logra midiendo el nivel de tensión entre los terminales de una pila con un voltímetro y luego realizando la conversión a bytes entre 4095 y 0.

$$OFFSET = V_{voltmetro} * \frac{4095}{3.3}$$

Ecuación 33 Calibración del OFFSET en el Arduino Due.

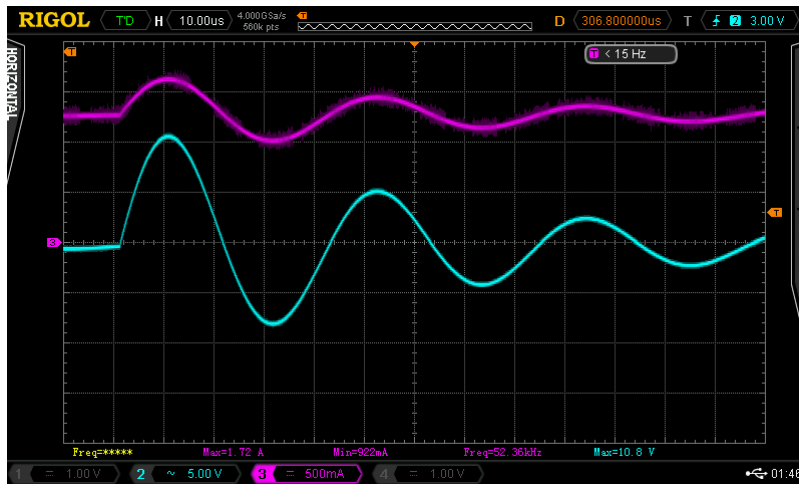


Figura 67 Señal en los terminales de la placa PCB y montado sobre Offset Externo (morado) y pulso de tensión del generador de señales (azul).

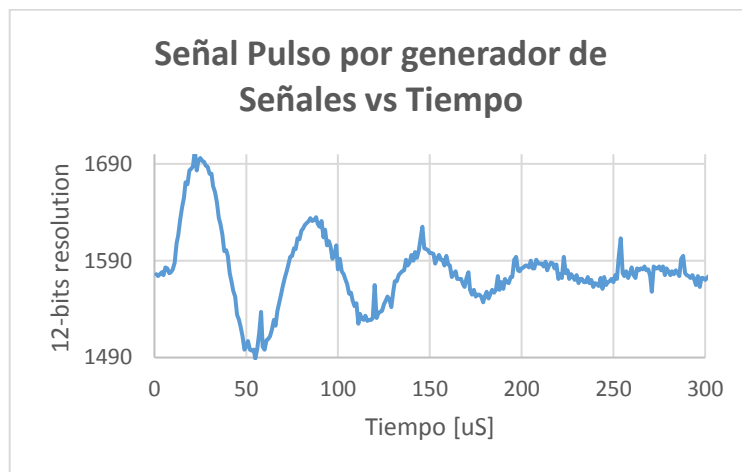


Figura 68 Medición en Arduino Due del impulso de Tensión en bits.



Figura 69 Medición en Arduino Due del impulso de tensión en Volts.

La integración de la señal de entrada tiene un error causado por el offset externo de protección, que se debe eliminar digitalmente para obtener las mediciones. Es necesario calibrar el offset de manera que el error acumulado sea el menor posible. Debido a la oscilación propia de la

fuentes externa, es prácticamente imposible eliminarlo completamente, por lo que se buscó el valor que disminuyera al máximo el error. El valor de error de offset, provocado por la eliminación digital, fluctúa entre 1 y -1 [12-bits resolution], lo que se traduce en error de offset entre 8 y -8 [mV].

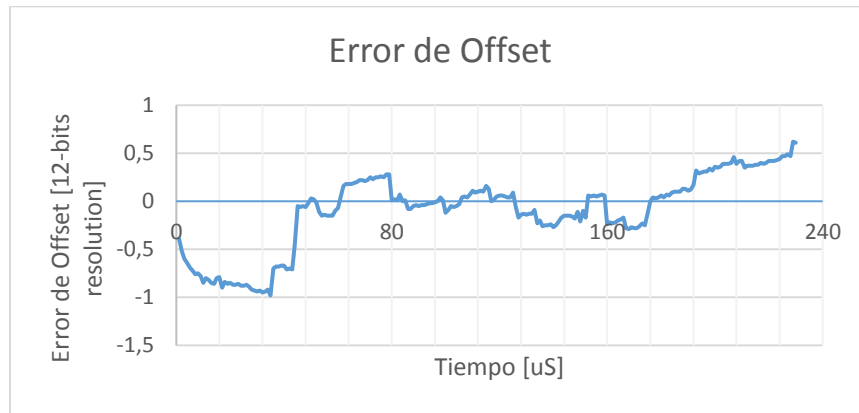


Figura 70 Error de Offset.

Registrado el valor de Offset, es posible llevar a cabo la integración de la señal de entrada. Se hizo matemáticamente con los datos muestreados, considerando el tiempo entre mediciones ($t_{muestreo}$) de 1[μs].

$$V_{f+1} = t_{muestreo} * (M_f) + V_f$$

Ecuación 34 Integración numérica de la señal de entrada.

Donde se define V_{f+1} como el valor integrado correspondiente a la suma del valor integrado anterior (V_f), con condición inicial de valor 0, y la multiplicación del tiempo de muestreo y el valor de medición obtenido. De los datos obtenidos de la integral, el valor máximo corresponde a un proporcional del valor real de la corriente, por lo que es necesario amplificar este valor considerando todos los procesos previos a la entrega de datos.

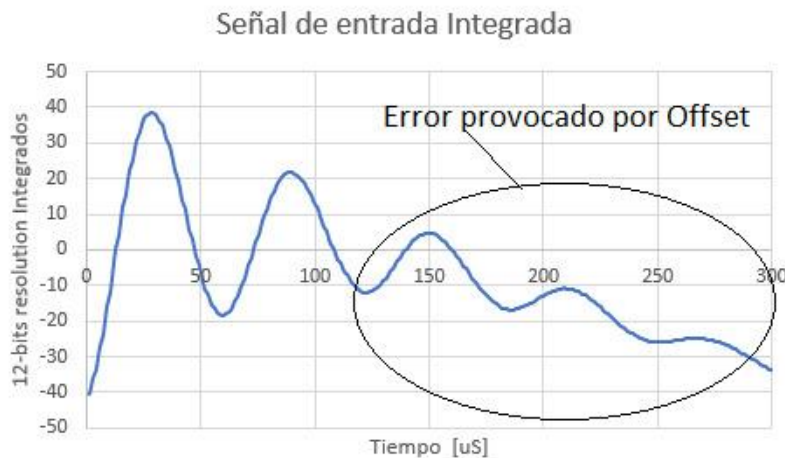


Figura 71 Señal de entrada integrada e impacto del error provocado por OFFSET.

De esta integral en el tiempo, se toma solamente el valor máximo que es enviado hasta el otro Arduino. Este valor es recibido y multiplicado por todos los factores causados por los elementos mencionados. Para tiempos superiores a 100[μ S] se empieza a notar el efecto del error de OFFSET (ver figura 71) acumulado en la integración, correspondiente a un valor que empieza a desplazar la señal en el eje Y, por lo que se trabaja con tiempos menores de integración hasta los 32[μ S], tiempo en el cual se alcanza a localizar el primer stroke del rayo y a su vez, el valor de corriente máxima. Tiempos superiores a los 32[μ S], se eliminan de la medición y se espera un tiempo de 0.5[s] para evitar leer los strokes consecutivos como si fueran descargas independientes.

$$Byte_{Max} = M * f_{Rgski} * f_{pcb} * f_{byte-volt} * I_{Max}$$

Ecuación 35 Valor de corriente final considerando los factores del sistema.

Donde M es la inductancia mutua de la bobina; f_{Rgski} es el factor de salida en los terminales de la bobina que para este caso es aproximadamente 1, obtenido de los parámetros eléctricos propios de ésta; f_{pcb} es el valor del factor de atenuación en la placa PCB; $f_{byte-volt}$ es la conversión de 12-bit resolution a volts y $Byte_{Max}$ es el valor de la integral hasta alcanzarse un valor máximo por el Arduino Due. Este valor se almacena en un archivo de texto y es mostrado por el LCD.

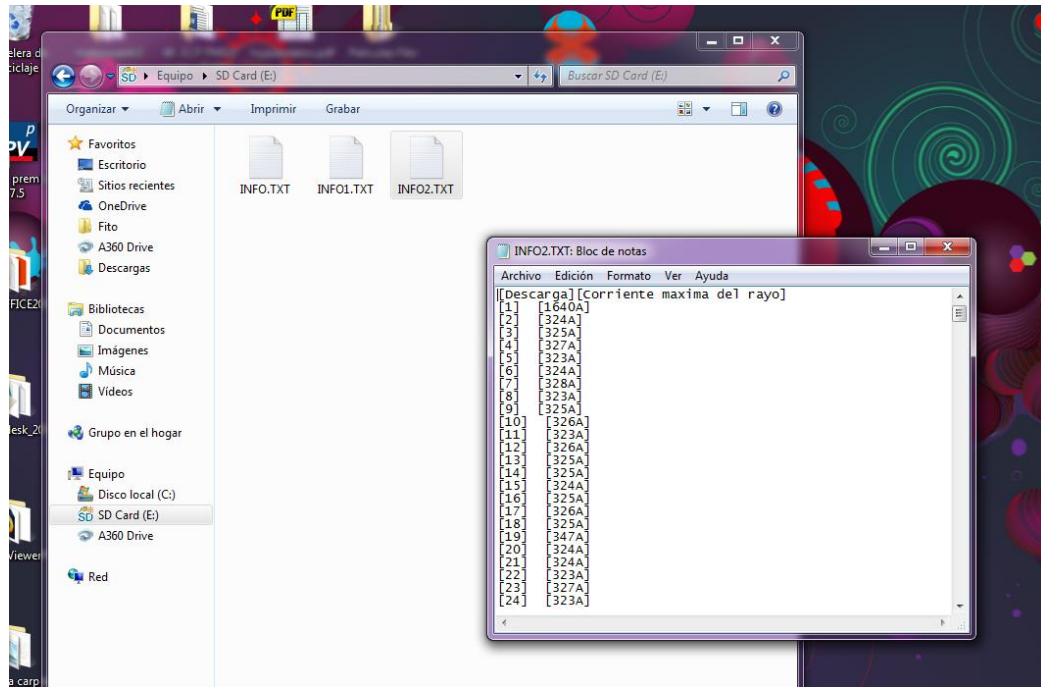


Figura 72 Datos almacenados en tarjeta SD correspondientes al número de eventos y al valor máximo de la descarga.

Las mediciones en el contador de descargas construido se compararon con el valor teórico de la corriente y se llegó a errores de hasta +17%, en los valores máximos de la corriente de descarga.



Figura 73 Contador de descargas atmosféricas construido.

6. Conclusiones

Para abordar el desarrollo de esta memoria de titulación, fue necesario primero realizar un estudio bibliográfico de las aplicaciones que tienen los contadores de descargas atmosféricas, quiénes se benefician con su utilización y los estándares normativos de operación que éstos poseen.

Conociendo las especificaciones mínimas en que los contadores de descargas deben operar, establecidas por la Norma IEC 62561-6, se concluye que éstos no logran operar para el 100% de los rayos, ya que su requisito mínimo de operación es para rayos de 10[kA] con impulsos tipo 8/20[μ s] y un gran porcentaje de ellos tiene tiempos de velocidad de retorno del rayo menores al tiempo exigido. Aún así, los contadores de descargas tienen un amplio rango de funcionamiento en Intensidad de corriente llegando hasta los 100 [kA].

En relación a los métodos de medición de corriente y conteo de las descargas atmosféricas, se concluye que sólo cuatro métodos de medición son aptos para medir la corriente máxima de las descargas atmosféricas. Los criterios de selección entre los métodos existentes fueron intensidad de medición y velocidad de respuesta. Entre los métodos de medición de corriente directa, el tipo Shunt es el único capaz de medir corrientes hasta los kiloamperios en frecuencias de hasta Mega Hertz. Entre los métodos indirectos de medición tres cumplen con los requisitos necesarios para tomar mediciones: los transformadores de corriente, la bobina Rogowski y los sistemas de medición de fibra óptica. La principal ventaja de la bobina Rogowski, es que se puede ubicar en lugares ya contruidos y es más sencilla de construir.

En la fase de diseño del sensor Rogowski, la principal restricción fue el rango de frecuencia de operación. Cuando se diseña, no existe un valor correcto de construcción, si no que existen varias posibilidades para la construcción de un mismo sensor. Los parámetros geométricos más importantes de la bobina son el número de vueltas y el diámetro del núcleo de la bobina, ya que ambos repercuten considerablemente en la inductancia propia. Es mejor usar un diámetro de núcleo pequeño para maximizar el número de vueltas, así se ajusta la sensibilidad y se disminuye el error de construcción provocado por el espacio irregular entre vueltas.

La inductancia es el parámetro eléctrico que más importancia tiene en el sensor, ya que determina la sensibilidad y el ancho de banda de éste. Aunque la capacitancia también tiene un impacto en la frecuencia de corte, su valor no aumenta lo suficiente en comparación a la inductancia con el cambio de los parámetros geométricos. La baja resistividad del material de construcción no es determinante, es por esto que la resistencia es el parámetro menos relevante.

En la etapa de construcción de la bobina se determinó que usar sensores Rogowski más pequeños, disminuye el error entre vueltas y ayuda a eliminar los campos magnéticos externos, lo que facilita su construcción. Si se llegase a extrapolar el experimento para estructuras metálicas más grandes, es recomendable usar precisión tecnológica para el embobinado del sensor y núcleos no flexibles.

El error causado por los campos magnéticos externos, hace necesario incluir un arreglo de amplificadores operacionales que funcione como filtro pasa-altos en la placa PCB con el objetivo de atenuar el campo magnético inducido por la red en el sensor. Agregar una masa de tierra externa

en la placa PCB, causa un blindaje en las pistas lo que atenúa el ruido. Es necesario que una jaula de Faraday envuelva al arduino y placa PCB, con el objetivo de protegerlos de tensiones inducidas y disminuir el ruido ambiental. Esto se logra diseñando una jaula con orificios 20 veces más pequeños que la longitud de onda de las señales de las cuales se quiere aislar el sistema.

Incluso con resistencias de tolerancia de 10%, los valores de tensión máxima de las señales obtenidos en los terminales de la placa PCB fueron similares a los obtenidos en la simulación de Proteus, con diferencias despreciables.

Por otra parte, es necesario colocar capacitores entre los terminales de la fuente de generación DC que alimenta los circuitos integrados para suavizar la conmutación propia y para evitar que a la salida de los amplificadores aparezca una señal producto de esta conmutación. Los capacitores de gran tamaño se comportan de manera resistiva por lo que se sugiere usar de hasta 100[nF].

Para maximizar el uso de los elementos tecnológicos presentes en los Arduinos, es necesaria la programación de los periféricos con funcionamiento independiente, lo que facilita y mejora el almacenamiento de datos y respuesta de éstos.

Los Arduinos vienen con un reloj interno programado, se puede ajustar el factor pre-escalar que define los tiempos de medición. En el caso del Arduino MEGA, este factor se puede disminuir desde 128 hasta alcanzar una velocidad de muestreo de 250 [kHz] - un pre-escalar de valor 64- sin afectar la medición. Los valores menores 32, 16, 8, 4 ó 2 - no son recomendables ya que disminuye su precisión con error de hasta el 50%. El Arduino Due, que tiene un reloj mucho más rápido, puede alcanzar las mediciones de hasta 1 [Mhz], sin alterar su precisión.

Si se quisiera reproducir la construcción de este dispositivo para medir la corriente de retorno del rayo en estructuras de mayor tamaño, se sigue recomendando un sensor Rogowski, pero se sugiere cambiar los Arduinos por una FPGA, debido a que en situaciones extremas y poco frecuentes en los rayos como una alta velocidad de retorno (menor a 4[μs]) o descargas de alta intensidad (sobre 100[kA]) inducen tensiones de mayor valor en los terminales de la bobina, lo cual causa daños permanentes en los equipos. Además, una FPGA posee más accesorios para solucionar problemas de alimentación negativa y mejorar la velocidad de medición a tiempos menores que 1[μs] sin provocar error de precisión.

En relación al funcionamiento global del dispositivo de descargas atmosféricas, se concluye que el presente diseño y codificación del sistema de arreglos de Arduinos, permite registrar tanto un valor aproximado de la corriente máxima de las descargas atmosféricas como un conteo de los eventos a los cuales la estructura metálica ha sido impactada. Condiciones que superen la Norma IEC 62561-6 pueden causar daños al dispositivo.

Finalmente, el presente trabajo sirve como base para nuevos estudios orientados a medir los parámetros característicos de las descargas atmosféricas, que permitan la caracterización de las mismas en el territorio chileno, para mejorar el diseño de los métodos de protección de personas e instalaciones y así evitar salidas de operación y daños.

Referencias

- [1] H. Channel, «<https://cl.tuhistory.com>,» 2009. [En línea]. Available: <https://cl.tuhistory.com/hoy-en-la-historia/benjamin-franklin-invento-el-pararrayos>.
- [2] E. Educa, «Franklin: del rayo a la electricidad,» Endesa Educa, 31 Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://blog.endesaeduca.com/franklin-rayo-electricidad/#more-139>. [Último acceso: 4 Agosto 2017].
- [3] Anonimo, «History of Lightning,» 2006. [En línea]. Available: <http://web.uvic.ca/~mroth/438/LIGHTENING/Web%20Page/history.html>. [Último acceso: 07 Agosto 2017].
- [4] C. Martony, «Protección de Edificios y Estructuras de las descargas atmosféricas,» 13 02 2015. [En línea]. Available: <https://estrucplan.com.ar/producciones/contenido-tecnico/p-seguridad-industrial/proteccion-de-edificios-y-estructuras-de-las-descargas-electricas-atmosfericas-parte-2/>.
- [5] F. Lillo, « Estudio del diseño actual del apantallamiento ante rayos de líneas aéreas de Alta tensión para Transelec,» Universidad Federico Santa María, Valparaíso, 2017.
- [6] A. e. d. N. y. Certificación, «NORMA: UNE 21186,» 1996. [En línea]. Available: <http://www.pararrayosupresores.com.mx/pdf/normatividad/norma-une-21186.pdf>.
- [7] J. A. L. Trujillo, «Metodología para predicción de tormentas eléctricas a partir de mediciones de campo electrostatico Ambiental y sistemas de locacion de rayos en zonas montañosas,» 26 11 2011. [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwihOJKkIKrhAhUOILkGHYPXBB4QFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fbdigital.unal.edu.co%2F6213%2F1%2F300119.2011.pdf&usg=AOvVaw3TFueeknuD6Utby6HEJfzR>.
- [8] Anónimo, «kitesurfingmallorca,» Kite Surfin, 01 04 2018. [En línea]. Available: <https://kitesurfingmallorca.com/tormentas-electricas-y-el-kitesurf/>. [Último acceso: 29 03 2019].
- [9] V. A. Rakov, The Physics of Lightning, Florida: Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013.
- [10] C. F. S. Gatica, «Determinación de la resistencia de puesta a tierra en torres de alta tensión en función del arco inverso,» Universidad de Chile, Santiago, 2012.
- [11] K. L. Cummins, M. J. Murphy y J. V. Tuel, «Lightning detection methods and meteorological applications,» International Symposium on Military Meteorology, Malbork, 2000.

- [12] D. Robinson, «stormhighway,» 2010. [En línea]. Available: <http://stormhighway.com/types.php>. [Último acceso: 4 Agosto 2017].
- [13] F. G. Molina, «Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo.,» Universidad politécnica de Cataluña, Cataluña, 2001.
- [14] D. R. Muñoz, «Contribuciones a los sistemas de protección contra los rayos,» Valencia, 2015.
- [15] Anonimo, «frro.utn.edu.ar,» Universidad Técnica Nacional de Argentina, - - -. [En línea]. Available: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/5_anio/transmision_distribucion_energia_electrica/files/Protecciones%20contra%20sobretensiones%20-%20Descargas%20atmosf%C3%A9ricas_rev.1%20\(1\).pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/5_anio/transmision_distribucion_energia_electrica/files/Protecciones%20contra%20sobretensiones%20-%20Descargas%20atmosf%C3%A9ricas_rev.1%20(1).pdf). [Último acceso: 29 03 2019].
- [16] C. Rojo, F. J. y A. Vergara, «Metodología para la construcción de un generador de impulsos de corrientes 8/20uS,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2013.
- [17] Anónimo, «catedra.ing.unlp.edu.ar,» [En línea]. Available: <https://catedra.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/sispot/Libros%202007/libros/cme/vol-01/2capit1/cm-01a.htm>. [Último acceso: 15 Enero 2018].
- [18] R. Nave, «hyperphysics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/lightning2.html>.
- [19] S. Visacro, A. Soares, M. A. O. Schroeder y L. C. Chegiglia, «Statistical Analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station,» Journal of Geophysical Research, Belo Horizonte, 2004.
- [20] R. Pando, «Aspectos Básicos de las descargas Atmosféricas,» Tucumán, Argentina, 2006.
- [21] N. M. C. Vallejo, «Diseño y apantallamiento contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión con ayuda computacional,» 20 09 2011. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4094>.
- [22] Anonimo, *U.S. Army Training and Doctrine Command*, United States, 2002.
- [23] I. d. sistemas, «Slideshare.net,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/cisec/20140218-cisecem-cinaeronautics>.
- [24] Imagery, «Two Types of Lightning- Positive Negative,» Weatherimagery, 27 Enero 2007. [En línea]. Available: <http://www.weatherimagery.com/blog/positive-negative-lightning/>. [Último acceso: 2017 08 05].
- [25] V. A. Rakov, «Positive and Bipolar Lightning discharges: A review,» American Meteorological Society, Gainsville Florida, 2003.

- [26] V. A. Rakov, «Lightning parameters of engineering,» Department of Electrical and Computer Engineering, Gainesville, 2012.
- [27] Vaisala, «<http://www.vaisala.com>,» Vaisala, 2015. [En línea]. Available: http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/MET-G-NLDN-Brochure-B210412EN-E_Low.pdf.
- [28] K. L. Cummins, «Deriving Value from Lightning Data,» Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.tdworld.com/transmission/deriving-value-lightning-data>.
- [29] K. L. Cummins y a. J. Murphy, «An Overview of Lightning Locating Systems:History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN,» *IEEE Transactions on Electromagnetic Compability* , vol. 51, nº 3, pp. 499-518, 2009.
- [30] H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, W. J. Koshak, S. J. Goodman y D. M. Mach, «Science data validation plan for the lightning imaging sensor (LIS),» 01 01 2000. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/267259038_Science_data_validation_plan_for_the_Lightning_Imaging_Sensor_LIS_Rep.
- [31] J. Blumenfield, «earthdata.nasa.gov,» Nasa, 15 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://earthdata.nasa.gov/lis-on-iss>. [Último acceso: 12 Marzo 2019].
- [32] B. Holzworth, «[wwlln](http://wwlln.net),» World Wide Lightning Locacion Network, [En línea]. Available: <http://wwlln.net/>.
- [33] M. Bonnet, «Status of Lightning detection, Performances an limitations of existing systems,» Cigre, Lyon, 2015.
- [34] A. Rosshaupter, «Now Cast- The Nº 1 in lightning detection,» 15 Marzo 2019. [En línea]. Available: <http://www.loerke-pr.com/lib/files/nowcast-company-portrait.pdf>. [Último acceso: 20 Marzo 2019].
- [35] K. S. H.D. Betz, «Cell-Tracking with Lightning data from LINET,» *Advances in Geosciences*, nº 17, pp. 55-61, 2008.
- [36] N. S. Mahovic, «Map of Linet Sensors,» 06- 2018. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Map-of-LINET-sensors-magenta-source_fig7_258772666.
- [37] D. R.Poelman, «On the science of Lightning,» L'institut Royal Meteorologique, Bruselas, 2010.
- [38] R. Silveria, «OPERATIONAL USE OF LIGHTNING DETECTION METHODS,» Geneva, 2005.

- [39] Anonimo, «atmo.arizona,» 18 Abril 2013. [En línea]. Available: http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/lecture_notes/apr18/apr18.html. [Último acceso: 07 Agosto 2017].
- [40] R. Silveira, «Operational use of Lightning detection methods,» Instituto Nacional de Meteorologia, Brasilia, 2005.
- [41] F. Jiang, «<https://www.lightning-measurement.com>,» Lightning measurement, 2013. [En línea]. Available: <https://www.lightning-measurement.com/3-7.html>. [Último acceso: 14 Marzo 2019].
- [42] A. Nag y M. J. Murphy, «Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques,» Agu Publications, Arizona, USA, 2015.
- [43] R. Kithil, «Overview of Lightning detection,» National Lightning Safety Institute, Agosto, 2015.
- [44] C. Price, «ELF Electromagnetic Waves: The Schumann Resonance,» Atmosphere- Open Acces Journal, 2016.
- [45] B. Yarborough, «Components and Methods for Current Measurement,» 15 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.vishay.com/docs/30304/currentmeasurement.pdf>. [Último acceso: 07 Agosto 2017].
- [46] B. Yarborough, «Components and Methods for Current Measurement,» 2006 Enero 2012. [En línea]. Available: <http://www.powerselectronics.com/power-electronics-systems/components-and-methods-current-measurement>. [Último acceso: 07 Agosto 2017].
- [47] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H.-C. Lu y L. J. Borle, «Current Sensing Techniques: A Review,» *IEEE Sensor Journal*, vol. IX, nº 4, 2009.
- [48] Siemens, «Basics of Current and Voltage Transformers,» *PTD SE PTI-Siemens*, vol. 1, nº 1, pp. 241-267, 2008.
- [49] W. Hays, «Exploring Current Transformer Applications,» Power Electronics, 2002. [En línea]. Available: <https://www.powerselectronics.com/content/exploring-current-transformer-applications>.
- [50] G. F. Amador, «Sensores Magneticos e inductivos,» 01 Octubre 2005. [En línea]. Available: <https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Sensores%20magneticos.pdf>.
- [51] A. Pathirana y A. Rajapake, «Detecting fault generated surges in DC line of VSC HVDC schemes for traveling wave based fault location,» de *Cigre Canada Conference*, Quebec, Montreal, Canada, 2012.

- [52] M. Teresa, T. L. Sileo y M. D. Vittorio, «Magnetic Field Sensors Based on Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology,» InTech, Lecce, Italia, 2012.
- [53] Y. Wang, «Split Core closed Loop Hall Effect Current Sensors and Applications,» de *PCIM EUROPE International Exhibition and Conference for Power Electronics*, Nuremberg, Alemania, 2012.
- [54] M. Wender, «New DC current measurement technology with fiber optic sensor,» *Energize*, nº Jan, pp. 46-47, 2005.
- [55] D. Ward, «Using a rogowski Coil for transient Current Measurements,» *Engineering Science and Education Journal*, vol. 2, nº 3, pp. 105-113, 1993.
- [56] R. Nave, «hyperphysics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/amplaw.html>.
- [57] R. Nave, «hyperphysics,» [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html>.
- [58] A. Mahari y M. H. Samimi, «The Rogowski coil Principle and applications :a review,» *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, nº 2, pp. 651-658, 2014.
- [59] J. Gonzalez, «Smart Couple- Diseño optimo de enchufes acopladores tripolares de 8 y 15 kV para tendidos moviles en mineria,» Viña del mar, 2017.
- [60] J. Navarrete, «Estudio de modelos para el diagnostico de generadores AT por seguimiento de descargas parciales,» Valparaiso, Chile, 2010.
- [61] M. Shafiq, «Effect of Geometrical Parameter on high frequency performance of Rogowski coil for partial discharge Measurements,» *elsevier, Measurement*, vol. 1, nº 49, pp. 126-137, 2013.
- [62] P. Fubin, «Effects of geometrical parameters on the rogowski coil for Current measuring,» de *Asia-Pacific*, Nanjing China, 2006.
- [63] E. Himmatti, «Investigation on Rogowski Coil performance for Structuring its Desing Methodology,» *IET Science Measurements*, vol. 7, nº 6, pp. 306-314, 2013.
- [64] «www.arduino.cc,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>.
- [65] Arduino, «<https://store.arduino.cc>,» Arduino, 2017. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-due>. [Último acceso: 07 Agosto 2017].
- [66] Arduino, «<https://store.arduino.cc>,» Arduino, 2017. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. [Último acceso: Lunes Agosto 2017].

- [67] M. d. C. García, «<http://miarduinounotieneunblog.blogspot.cl>,» 04 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://miarduinounotieneunblog.blogspot.cl/2016/03/comunicacion-serie-entre-dos-arduinos.html>. [Último acceso: 07 Agosto 2017].
- [68] S. A. C. Montiel, R. D. C. L. Padilla y A. G. Parada, «www.cenam.gob.mx,» 19 Noviembre 2009. [En línea]. Available: http://www.cenam.gob.mx/dme/pdf/pre_t1-jue-2.pdf. [Último acceso: 7 Agosto 2017].
- [69] J. A. Peña, «Filtros Activos,» [En línea]. Available: <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29861/filtros.pdf>.
- [70] Anonimo, «Upper-atmospheric_lightning,» Wikipedia, 31 Julio 2017. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Upper-atmospheric_lightning. [Último acceso: 2017 Agosto 05].

Anexos

1. **Otros tipos de rayos:** Algunos rayos nube-tierra y nube-nube cumplen ciertas características que les permite agruparse como se muestra a continuación [12], [70], [37].

-*Rayo perla:* se trata de un tipo de rayo nube-tierra que tiene una duración un poco más larga en tiempo y presenta un canal con una serie de intersecciones que son más brillantes, la característica más importante es el amplio ancho del canal de descarga.

-*Rayo bifurcado:* un tipo de rayo nube-tierra que presenta una bifurcación de gran magnitud en su camino a la tierra, además de tener una duración de tiempo mayor.

-*Rayo cinta* (Ribbon lightning): es un rayo en el cual se pueden apreciar visiblemente los Strokes, con la particularidad que estos están adyacentes al principal. Más común durante grandes vientos.

-*Rayo ramificado o staccato:* un rayo que presenta una gran cantidad de ramificaciones, parecido a un árbol.

-*Rayo difuso:* se presenta como un resplandor en el cielo donde sólo se ve una luz intensa que opaca las chispas de los rayos.

-*Rayo de bola:* al caer el rayo se forma una bola en el cielo. Al ocurrir este fenómeno se produce un estruendo o un estallido. Puede durar minutos a segundos.

-*Cazador de yunque:* un rayo entre nubes de movimiento muy despacio. Es apreciable al ojo humano y generalmente recorre grandes distancias en el cielo.

-*Blue jets:* los blue jets son descargas atmosféricas que rara vez ocurren. Se producen en la estratósfera (entre 40 y 50 Km sobre el suelo), son de un intenso color azul y poseen forma de cono. Se dice que estas descargas ocurren en la parte superior del cumulonimbos.

-*Sprites:* son descargas atmosféricas de gran escala que se producen a una altura muy elevada desde la tierra, en la ionósfera, ésta va desde los 50 a los 90 kilómetros del suelo. Su color es entre naranja y rojizo, distinto al que vemos normalmente. Se han clasificado en 3 tipos dependiendo de su apariencia: Jellyfish Sprite, Carrot Sprite y Column Sprite.

-*Elves:* son descargas atmosféricas parecidas en color a los sprites sin embargo, estas ocurren a distancias mucho mayores del suelo, suelen ocurrir sobre los 100 Km de distancia (en la ionósfera) y tienen una forma de disco que irradia luz. Ver figura 74.

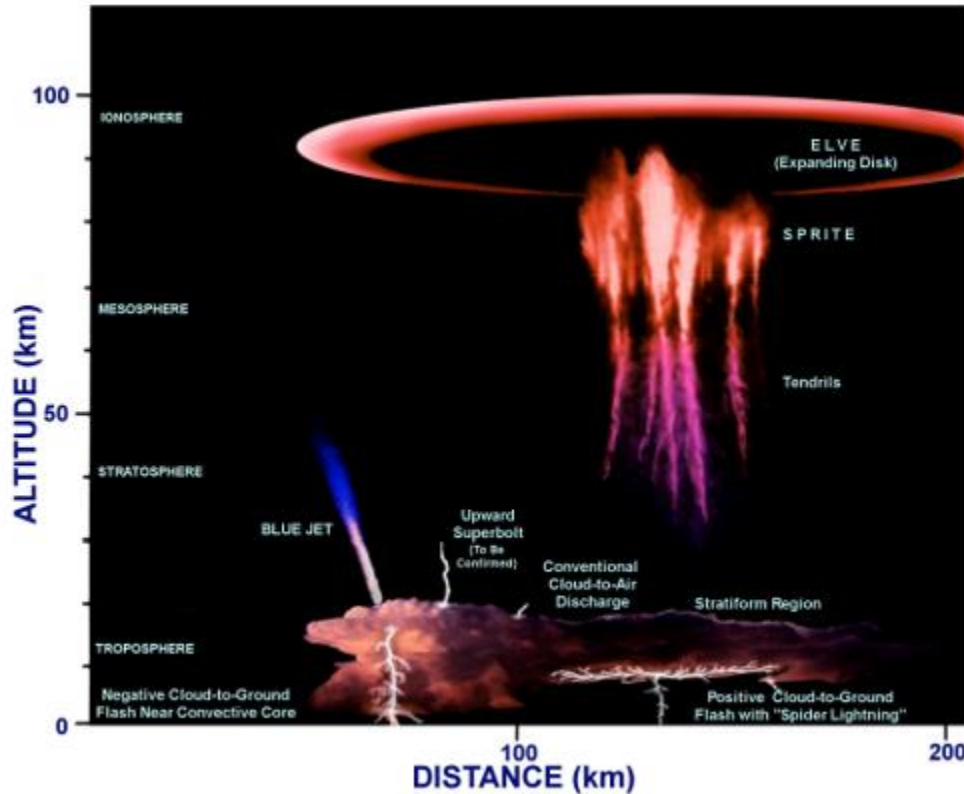


Figura 74 Denominación de los rayos según altura y distancia.

2. Otros sistemas de localización de rayos

Existen otros sistemas de localización de rayos locales a nivel país, entre los cuales se encuentran los siguientes [37]:

-**AEMET**: sistemas de localización de rayos español, que usa sensores Vaisala para la captación de datos usando métodos tanto de Mediana Frecuencia (MDF) como TOA en 20 sensores a lo largo del país.

-**ALDIS**: sistema austriaco de detección de rayos que en conjunto con Siemens y Ver bund busca obtener datos de todo centro Europa usando la misma tecnología que España, además puede determinar la polaridad de los eventos registrados filtrando sólo los rayos nube-tierra.

-**ATDNET**: este sistema cubre parte del Reino Unido, la totalidad de Europa, la parte norte de África, el Atlántico Norte y gran parte de América del Sur. Opera a VLF y entrega la información de todos los rayos nube-tierra que ocurren en Europa. Actualmente cuenta con 14 sensores. Pretende expandirse a 30 sensores para poder mapear el globo completo en tiempo real.

-**BLDN**: sistema de localización de rayos manejado por Siemens desde 1999. Consta de 6 sensores posicionados entre Bélgica, Holanda y Francia.

-**BLIDS**: sistema de localización de rayos operado por Siemens desde 1992. Funciona en Alemania. Distingue los rayos nube-nube de los nube-tierra, polaridad de los rayos y la localización de éstos.

-*CELDN*: manejado por Siemens y Vaisala. Se creó combinando ALDIS y BLIDS, además de agregar sensores en República Checa, Polonia, Eslovaquia y Hungría.

-*CESI-SIRF*: sistema de localización de rayos italiano que consta de 16 sensores. Está ubicado en Milán, cubriendo el rango de toda Italia más las islas anexas a ésta.

-*CLDN*: sistema de localización de rayos de Canadá, que se enfoca en tener un sistema de alta precisión y eficiencia. Consiste en 73 sensores Vaisala.

-*DHMZ*: sistema de localización de rayos de Croacia. Contiene 5 sensores de Linet.

-*DMI*: sistema que cubre parte de Dinamarca. Funciona desde el año 2000. Monitorea el país a través de 6 sensores que detectan, pero no discriminan entre eventos ya sean nube-nube o nube- tierra.

-*EIMV/SCALAR*: sistema de Eslovenia que opera desde 1997. Consta de 2 sensores, pero además está unido al sistema ALDIS para incrementar su rango de mapeo.

-*EUCLID*: sistema de cooperación en Europa, en el cual la mayoría de los países se unieron para tener una base conjunta de las descargas que ocurren en el continente. Consta de 137 sensores que operan desde VLF hasta VHF. Los sistemas que ofrecen datos a EUCLID son el ALDIS, BLDN, CELDN, CESI-SIRF, EIMV, METEORAGE y NORDLIS, en el cual se cubren 18 Países (Austria, Bélgica, República Checa, Finlandia, Francia, Alemania, Hungría, Italia, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Polonia, Portugal, Eslovenia, España, Suecia y Suiza).

-*FMI*: sistema finlandés, el cual consta de 8 sensores. Detecta tanto rayos nube-nube como nube-tierra.

-*HNMS*: sistema de localización de Grecia. Consta de 8 sensores a lo largo del país los cuales toman datos en tiempo real desde el año 2008.

-*KMNI*: el sistema consta de 3 estaciones de datos en tiempo real desde Bélgica con sensores entre VHF y LF, con los cuales detecta rayos nube-nube y tierra-nube.

-*LAMPINET*: sistema exclusivo de la fuerza aérea de Italia el cual detecta fuertes tormentas eléctricas además de actividad dentro de la misma. Busca proveer de seguridad a los aviones propios. Este sistema consta de 15 sensores distribuidos tanto en la península como en las islas de Italia.

-*METEOCAT/SMC*: sistema catalán de localización de rayos, el cual consta de 3 sensores Vaisala cubriendo la región catalana de España a través de localización por medio de VHF e Interferometría.

-*METEORAGE*: sistema francés que funciona desde 1996 a través de un conjunto de sensores Vaisala ubicados en Francia, Suiza, Austria, Italia y España.

-*NORDLIS*: es un sistema de localización de descargas de 4 países (Finlandia, Noruega, Suecia y Estonia). Opera con sensores Vaisala y detecta rayos tipo nube-tierra.

-*OMSZ*: sistema de localización de rayos húngaro que mapea tanto Hungría como Eslovaquia a través de 7 sensores, 5 ubicados en el primer país y el resto en el segundo.

-*SHMU*: sistema eslovaco que se une al sistema húngaro de localización de rayos. Distinto al OMSZ ya que el SHMU se enfoca en Eslovenia y el OMSZ en Hungría. Es parte del sistema hidrometeorológico nacional.

-*SLDN*: sistema de localización de rayos español. Funciona desde 1992 con más de 30 sensores de baja frecuencia (LF) a lo largo del país.

-*ZEUS*: opera a través de 6 sensores de VLF ubicados por Europa. Detecta tanto rayos nube-nube como nube-tierra, aun así, este sistema ofrece poca precisión de localización y poca eficiencia de registro de eventos, aunque bastante rango de alcance.

3. Características/Data sheet de los Arduinos

El Arduino Due consta con las siguientes características:

Información	
Microcontrolador	AT91SAM3X8E
Tensión de operación	3.3V
Tensión de entrada	7-12v
Tensión de salida	6-16v
Pines digitales	54
Pines de entrada Analógica	12
Pines de salida Analógica	2
Corriente de salida total	130 mA
Corriente DC para pines de 3.3 V	800mA
Corriente DC para pines de 5V	800mA
Memoria Flash	512 KB
SRAM	96 KB
Velocidad del reloj interno	84 MHz

Tabla 11 Información técnica Arduino DUE.

El Arduino MEGA consta con las siguientes características:

Información	
Microcontrolador	Atmega2560
Tensión de operación	5V
Tensión de entrada	7-12v
Tensión de salida	6-20V
Pines digitales	14
Pines de entrada Analógica	16
Pines de salida Analógica	0
Corriente de salida total	435mA
Corriente DC para pines de 3.3 V	40mA
Corriente DC para pines de 5V	50mA
Memoria Flash	256
SRAM	8
Velocidad del reloj interno	16MHz

Tabla 12 Información técnica Arduino MEGA.

4. Circuito modelado en Proteus y Placa PCB correspondiente

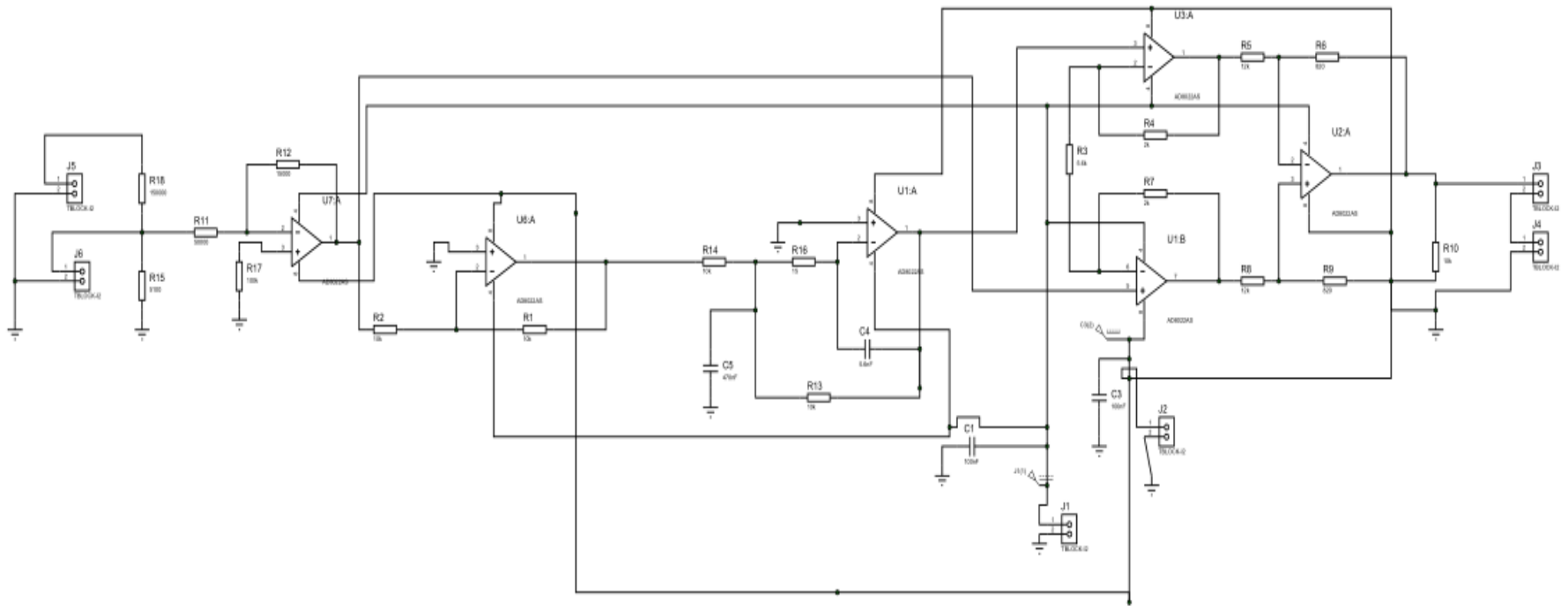


Figura 75 Circuito Adaptador.

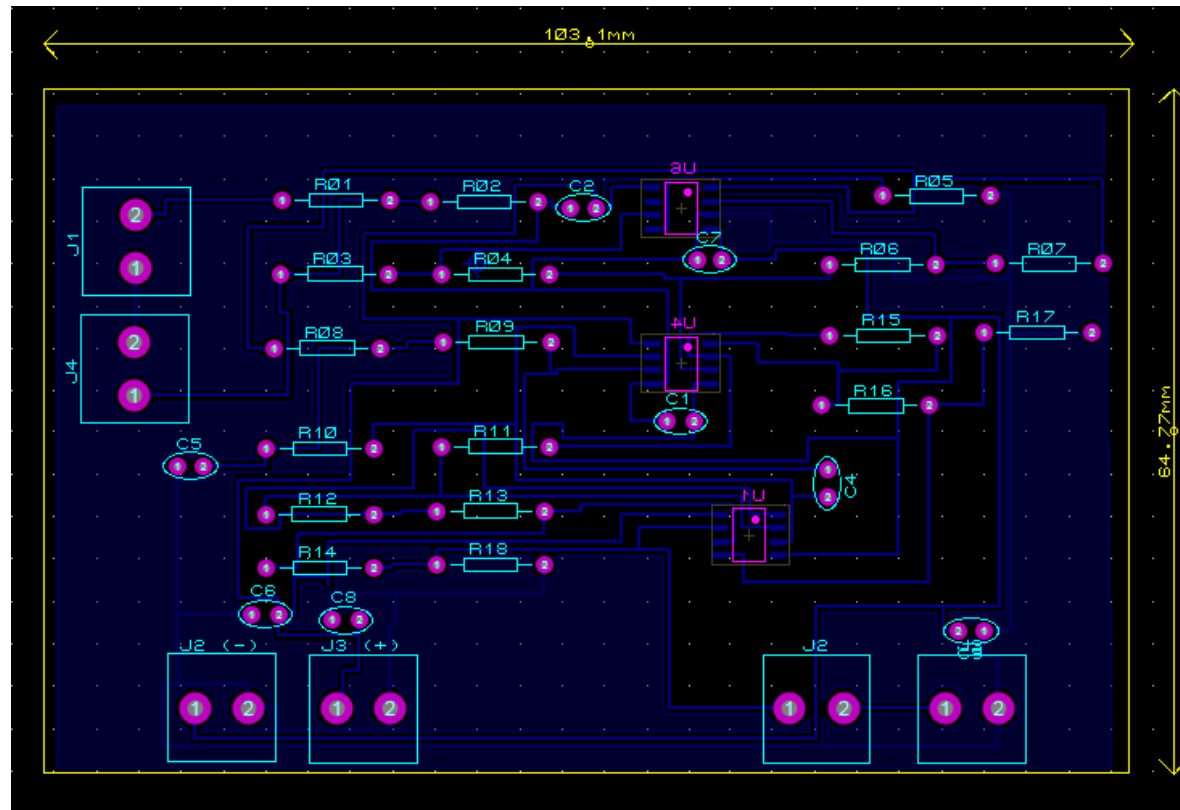


Figura 76 Circuito para placa PCB.

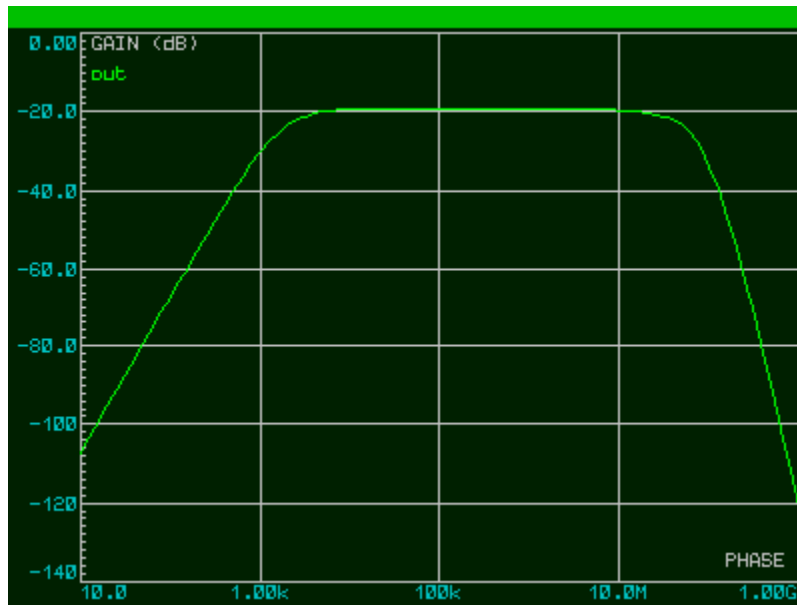


Figura 77 Respuesta en Frecuencia Circuito Adaptador.

5. Elementos del Circuito de medición:



Figura 78 Capacitor 22[uF]



Figura 79 Relé Interruptor de Laboratorio.



Figura 80 Transformador de alimentación DC del circuito.

6. Construcción de una bobina y medición de su respuesta



Figura 81 Toma de muestras de varias bobinas construidas.



Figura 82 Comienzo de la construcción de una bobina.



Figura 83 Mitad de la construcción de una bobina.



Figura 84 Bobina Rogowski 16000 vueltas terminada.



Figura 85 Respuesta de frecuencia de diferentes bobinas con distinto número de vueltas.

7. Códigos de trabajo MATLAB.

7.1 Código cálculo de parámetros de bobina Rogowski

```

clear all
clc
clf
q=1651;
i=0;
k=1;
%Matriz= zeros(q,2);
%Parametros Geometricos de rogowski
%for i=0:0.005:2.5

lb=112/100%m
r=lb/(2*pi)
Drc=(0.65)/100 %m
Do=2*r %m
Di=Do-2*Drc%m
Dm=(Do+Di)/2/100;%m
N=1650; %vuelatas
pw= lb/N; %m
p=1/56;% ohm*mm^2/m

wd=0.46/1000;%m
Aw=0.25*(wd*1000)^2*pi; %mm^2
x=0.95;
acosd(x);
%Resistencia propia

lc=(N)*sqrt((pi*Drc)^2+pw^2)+lb;
R=p*lc/Aw;

%Inductancia Propia (circular)
u0=4*pi*10^-7; %N/A^2
ur=1.003;
L0=ur*u0*N^2*(pi*((Drc)/2)^2)/lb;
M=((u0*N*Drc)/(2*pi))*(log(Do/Di));

% Capacitancia
%Capacitancia al Cable interior
E0=8.8541878176*10^-12;%C^2 / Nm^2
Er=1;
Cc=4*pi^2*E0^2*Er^2*(Do+Di)/(log10((Do+Di)/(Do-Di)));
Ct=pi*E0*(lc)/((N-1)*log((pw/wd)+sqrt((pw/wd)^2-1)));
C=Cc+Ct;

%Diagrama Bode y Ancho de Banda
banda=tf([1],[L0*C R*C 1]);
bode([1],[L0*C R*C 1],'b');
BandaHz=bandwidth(banda,-0.1)/(2*pi);

```

7.2 Impacto del número de vueltas en la frecuencia de corte

```

clear all
clc
clf
q=2000;
i=1000;
k=1;
Matriz= zeros(q-1,4);
%Parametros Geometricos de rogowski
for i=2:1:q
lb=112/100;%m
r=lb/(2*pi);%m
Drc=(0.65)/100 ;%m
Do=2*r; %m
Di=Do-2*Drc;%m
Dm=(Do+Di)/2/100;%m
N=i; %vueltas
pw= lb/N; %m
p=1/56;% ohm*mm^2/m

wd=0.4/1000;%m
Aw=0.25*(wd*1000)^2*pi; %mm^2
x=0.95;
acosd(x);
%Resistencia propia
lc=(N)*sqrt((pi*Drc)^2+pw^2)+lb;
R=p*lc/Aw;
%Inductancia Propia (circular)
u0=4*pi*10^-7; %N/A^2
ur=1.003;
L0=ur*u0*N^2*(pi*((Drc)/2)^2)/lb;
M=((u0*N*Drc)/(2*pi))*(log(Do/Di));

% Capacitancia
%Capacitancia al Cable interior
E0=8.8541878176*10^-12;%C^2 / Nm^2
Er=1;
Cc=4*pi^2*E0^2*Er^2*(Do+Di)/(log10((Do+Di)/(Do-Di)));
Ct=pi*E0*(lc)/((N-1)*log((pw/wd)+sqrt((pw/wd)^2-1)));
C=Cc+Ct;
R;
L0;
C;
M;
banda=tf([1],[L0*C R*C 1]);
BandaHz=bandwidth(banda,-0.01)/(2*pi);
Matriz(k,1)= N;
Matriz(k,2)= (BandaHz/10000000);
Matriz(k,3)= (BandaHz/1000000);
k=k+1;
end

hold on
grid minor

```

```

ylabel(' [Mhz] ');
xlabel(' [N° Vueltas] ');
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,2),'b')
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,3),'r')

saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\FrecuenciadeCorte
Ambas.png')
clf
ylabel(' [Mhz] ');
xlabel(' [N° Vueltas] ');
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,2),'b')
plot(Matriz(:,1),Matriz(1650,2),'r')
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\FrecuenciadeCorte
AmbasCurvaDiseñada.png')
clf
ylabel(' [Mhz] ');
xlabel(' [N° Vueltas] ');
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,2),'b')
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\FrecuenciadeCorte
AmbasCurvaSeguridad.png')

clf
ylabel(' [Mhz] ');
xlabel(' [N° Vueltas] ');
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,3),'r')
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\FrecuenciadeCorte
CurvaOriginal.png')
hold off

```

7.3 Impacto en la frecuencia de corte al incrementar la inductancia propia

```

clear all
clc
c=[10^-9 10^-6 10^-3 10^0]
for i=c

R0=0.5;
C0=1*10^-11;
L1=10^-5:

% diagrama de bode y transf Fourier
hold on
tf([1],[L1*C0 R0*C0 1]);
if i==10^0
    bode([1],[L1*C0 R0*C0 1],'r');
else
    bode([1],[L1*C0 R0*C0 1],'--');
end
end
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\GraficoInductanci
a.png')
hold off

```

7.4 Impacto en la frecuencia de corte al incrementar la resistencia

```
clear all
clc
c=[10^-12 10^0 10^2 10^6];
for i=c

R0=i;
C0=1*10^-11;
L1=0.01*10^-7;

% diagrama de bode y transf Fourier
hold on
tf([1],[L1*C0 R0*C0 1]);
if i==10^1
    bode([1],[L1*C0 R0*C0 1],'r');
else
    bode([1],[L1*C0 R0*C0 1],'--');
end
end
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\GraficoResistenci
a.png')
hold off
```

7.5 Impacto en la frecuencia de corte al incrementar la capacitancia

```
clear all
clc
c=[10^-12 10^-9 10^-6 10^-3 10^0];
for i=c

R0=0.01;
C0=i;
L1=0.01*10^-7;

% diagrama de bode y transf Fourier
hold on
tf([1],[L1*C0 R0*C0 1]);
if i==10^1
    bode([1],[L1*C0 R0*C0 1],'r');
else
    bode([1],[L1*C0 R0*C0 1],'--');
end
end
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\GraficoCapacitanc
ia.png')
hold off
```

7.6 Análisis de sensibilidad al aumentar el diámetro del núcleo

```
clear all
clc
clf
q=135;
k=1;
Matriz= zeros(q,7);
```

```

%Parametros Geometricos de rogowski
for i=0:0.005:2.5

    r=0.2;%m
    lb=2*pi*r;%m
    Do=r*100*2; %cm
    Di=Do-3+i; %cm
    Dm=(Do+Di)/2/100;%m
    N=110; %vueltas
    Drc=(Do-Di)/100; %m
    pw= lb/N; %m
    p=1/56;% ohm*mm^2/m

    wd=0.6/1000;%mm
    Aw=0.25*(wd*1000)^2*pi; %mm^2
    x=0.95;
    acosd(x);
    %Resistencia propia

    lc=N*sqrt((pi*Drc)^2+pw^2)+lb;
    R=p*lc/Aw;

    %Inductancia Propia (circular)
    u0=4*pi*10^-7; %N/A^2
    ur=1.003;
    L0=ur*u0*N^2*(pi*((Drc)/2)^2)/lb;
    M=((u0*N*Drc)/(2*pi))*(log(Do/Di)) ;

    % Capacitancia
    %Capacitancia al Cable interior
    E0=8.8541878176*10^-12;%C^2 / Nm^2
    Er=2.6;
    Cc=4*pi^2*E0^2*Er^2*(Do+Di)/(log10((Do+Di)/(Do-Di)));
    Ct=pi*E0*(pi*Drc)/((N-1)*log((pw/wd)+sqrt((pw/wd)^2-1)));
    C=Cc+Ct;

    Matriz(k,1)=Drc*100;
    Matriz(k,2)=R;
    Matriz(k,3)=L0;
    Matriz(k,4)=Cc;
    Matriz(k,5)=Ct;
    Matriz(k,6)=C;
    Matriz(k,7)=M;

    k=k+1;
end

u=subplot(2,2,1);
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,2));
ylabel(' [Ohm] ');
xlabel(' [cm] ');
title(u,'Resistencia');
v=subplot(2,2,2);
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,3));
ylabel(' [H] ');

```

```

xlabel(' [cm] ');
title(v, 'Inductancia');
w=subplot(2,2,3);
hold on

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,4));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,5));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,6));
ylabel(' [F] ');
xlabel(' [cm] ');
hold off
title(w, 'Capacitancia');
y=subplot(2,2,4);

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,7));
ylabel(' [H] ');
xlabel(' [cm] ');
title(y, 'Inductancia Mutua');
saveas(gcf, 'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\GraficoImpactoDia
metroNucleo.png')

```

7.7 Análisis de sensibilidad al aumentar el largo de la bobina

```

clear all
clc
clf
q=600;
k=1;
Matriz= zeros(q,4);
%Parametros Geometricos de rogowski
for i=0:0.01:6
r=0.2+i;%m
lb=2*pi*r;%m
Do=r*100*2; %cm
Di=Do-3; %cm
Dm=(Do+Di)/2/100;%m
N=110; %vuelatas
Drc=(Do-Di)/100; %m

pw= lb/N; %m
p=1/56;% ohm*mm^2/m

wd=0.6/1000;%mm
Aw=0.25*(wd*1000)^2*pi; %mm^2

%Resistencia propia
lc=N*sqrt((pi*Drc)^2+pw^2)+lb;
R=p*lc/Aw;

%Inductancia Propia (circular)
u0=4*pi*10^-7; %N/A^2
ur=1.003;
L0=ur*u0*N^2*(pi*((Drc)/2)^2)/lb;
M=((u0*N*Drc)/(2*pi))*(log(Do/Di));

% Capacitancia

```

```

%Capacitancia al Cable interior
E0=8.8541878176*10^-12;%C^2 / Nm^2
Er=1;
Cc=4*pi^2*E0^2*Er^2*(Do+Di)/(log10((Do+Di)/(Do-Di)));
Ct=pi*E0*(pi*lc)/((N-1)*log((pw/wd)+sqrt((pw/wd)^2-1)))
C=Cc+Ct;

Matriz(k,1)=lb;
Matriz(k,2)=R;
Matriz(k,3)=L0;
Matriz(k,4)=Cc;
Matriz(k,5)=Ct;
Matriz(k,6)=C;
Matriz(k,7)=M;
k=k+1;
end

u=subplot(2,2,1);
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,2));
ylabel(' [Ohm] ');
xlabel(' [m] ');
title(u,'Resistencia');
v=subplot(2,2,2);

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,3));
ylabel(' [H] ');
xlabel(' [m] ');
title(v,'Inductancia');
w=subplot(2,2,3);
hold on

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,4));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,5));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,6));
ylabel(' [F] ');
xlabel(' [m] ');
hold off
title(w,'Valor Capacitancia');
y=subplot(2,2,4);

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,7));
ylabel(' [H] ');
xlabel(' [m] ');
title(y,'Inductancia Mutua');
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\GraficoImpactoLar
goBobina.png')

```

7.8 Análisis de sensibilidad al aumentar el diámetro del alambre

```

clear all
clc
clf
q=600;
k=1;
Matriz= zeros(q,4);
%Parametros Geometricos de rogowski

```

```

for i=0:0.001:0.6

r=0.2;%m
lb=2*pi*r;%m
Do=r*100*2; %cm
Di=Do-3; %cm
Dm=(Do+Di)/2/100;%m
N=110; %vuelatas
Drc=(Do-Di)/100; %m
pw= lb/N; %m
p=1/56;% ohm*mm^2/m

wd=(0.4+i)/1000;%mm
Aw=0.25*(wd*1000)^2*pi; %mm^2

%Resistencia propia
lc=N*sqrt((pi*Drc)^2+pw^2)+lb;
R=p*lc/Aw;

%Inductancia Propia (circular)
u0=4*pi*10^-7; %N/A^2
ur=1.003;
L0=ur*u0*N^2*(pi*((Drc)/2)^2)/lb;
M=((u0*N*Drc)/(2*pi))*(log(Do/Di)) ;

% Capacitancia
%Capacitancia al Cable interior
E0=8.8541878176*10^-12;%C^2 / Nm^2
Er=1;
Cc=4*pi^2*E0^2*Er^2*(Do+Di)/(log10((Do+Di)/(Do-Di)));
Ct=pi*E0*(pi*lc)/((N-1)*log((pw/wd)+sqrt((pw/wd)^2-1)))
C=Cc+Ct;

pw/Drc;
Matriz(k,1)=wd;
Matriz(k,2)=R;
Matriz(k,3)=L0;
Matriz(k,4)=Cc;
Matriz(k,5)=Ct;
Matriz(k,6)=C;
Matriz(k,7)=M;
k=k+1;
end

u=subplot(2,2,1);
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,2));
ylabel(' [Ohm] ');
xlabel(' [mm] ');
title(u, 'Resistencia');
v=subplot(2,2,2);

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,3));
ylabel(' [H] ');
xlabel(' [mm] ');
title(v, 'Inductancia');

```

```

w=subplot(2,2,3);
hold on

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,4));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,5));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,6));
ylabel(' [F] ');
xlabel(' [mm] ');
hold off
title(w, 'Capacitancia');
y=subplot(2,2,4);

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,7));
ylabel(' [H] ');
xlabel(' [mm] ');
title(y, 'Inductancia Mutua');
saveas(gcf, 'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\GraficoImpactoDia
metroAlambre.png')

```

7.9 Análisis de sensibilidad al aumentar el número de vueltas

```

clear all
clc
clf
q=600;
k=1;
pw=0;
Matriz= zeros(q,4);
%Parametros Geometricos de rogowski
for i=2:1:2000
    i
    r=0.2;%m
    lb=2*pi*r;%m
    Do=r*100*2; %cm
    Di=Do-3; %cm
    Dm=(Do+Di)/2/100;%m
    N=110+i; %vueltas
    Drc=(Do-Di)/100; %m
    wd=0.6/1000;%m
    wd*N
    pw= lb/N; %m
    if wd*N>lb
        lb=wd*N;
        pw=wd;
    end
    p=1/56;% ohm*mm^2/m

    Aw=0.25*(wd*1000)^2*pi; %mm^2

    %Resistencia propia
    lc=N*sqrt((pi*Drc)^2+pw^2)+lb;
    R=p*lc/Aw;

    %Inductancia Propia (circular)
    u0=4*pi*10^-7; %N/A^2

```

```

ur=1.003;
L0=ur*u0*N^2*(pi*((Drc)/2)^2)/lb;
M=((u0*N*Drc)/(2*pi))*(log(Do/Di)) ;

% Capacitancia
%Capacitancia al Cable interior
E0=8.8541878176*10^-12;%C^2 / Nm^2
Er=1;

Cc=4*pi^2*E0^2*Er^2*(Do+Di)/(log10((Do+Di)/(Do-Di)));

Ct=pi*E0*(pi*lc)/((N-1)*log((pw/wd)+sqrt((pw/wd)^2-1)))
C=Cc+Ct;

Matriz(k,1)=N;
Matriz(k,2)=R;
Matriz(k,3)=L0;
Matriz(k,4)=Cc;
Matriz(k,5)=Ct;
Matriz(k,6)=C;
Matriz(k,7)=M;
k=k+1;
end

u=subplot(2,2,1);
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,2));
ylabel('[Ohm]');
xlabel('[Numero de Vueltas]');
title(u,'Resistencia');
v=subplot(2,2,2);

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,3));
ylabel('[H]');
xlabel('[Numero de Vueltas]');
title(v,'Inductancia');
w=subplot(2,2,3);
hold on

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,4));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,5));
plot(Matriz(:,1),Matriz(:,6));
ylabel('[F]');
xlabel('[Numero de Vueltas]');
hold off
title(w,'Capacitancia');
y=subplot(2,2,4);

plot(Matriz(:,1),Matriz(:,7));
ylabel('[H]');
xlabel('[Numero de Vueltas]');
title(y,'Inductancia Mutua');
saveas(gcf,'C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\graficos\GraficoImpactoume
rodeVueltas.png')

```

7.10 Selección de valores de resistencia para la construcción del amplificador de instrumentación

```

R1=2000;
R2=12000;
R3=820;
Rgain=5600;
Vi=9
2*R1/Rgain;
Vout=Vi*(1+2*R1/Rgain)*R3/R2
Vout/Vi

```

7.11 Programación del generador de señales RIGOL

```

clear all
clc
clf
s_max = 2^14 - 1;
s_zero = 2^14 / 2;
n = 0 : 512;
w = pi / 512;
s = ceil( s_max / 2 * sin( w * n ) );
s( 2049 : 4096 ) = 0;
plot( s );
title( 'Waveform for Rigol DG1022 Function Generator Test' )
xlabel( 'Sample Number' )
ylabel( 'Quantization Level' )
grid on
s_fp = uint16( s );
FRigol = 'FRigol.rdf';
fid = fopen( FRigol , 'w' );
fwrite( fid, s_fp, 'uint16', 'ieee-le' );
fclose( fid );

```

7.12 Determinación práctica de inductancia mutua M

```

load('C:\Users\Fito\Desktop\Fito\memoria\Graficos y Excel
Osciloscopio\Mediciones 22-04\med200.mat')
X=(Newfile200(:,1));
Y=(Newfile200(:,2));
Vout=(Newfile200(:,3));
%parametros Rogowski
R= 7.13;
L= 1.0167*10^-4;
l=1.12;
C=5.24*10^-13;
Z=40000;
m=8.693*10^-7 %parámetro variable
%simulacion funcion
syms x s;
a=227; %para 200
b= 261.9; %para 200
c=102000;%para 200
d=3.948;%para 200
e=1.74;
t=2000*10^-6;

```

```

%tension salida

%bobina autointegradora
%fs=1/l*(Z/(s*L+R));
%bobina modelo simple
fs=1/l*(Z/(Z*s^2*L*C+(L+Z*R*C)*s+R+Z));
% funcion matematica aproximada
g=a*exp(-b*x)*sin(c*x+d)+e;
fc=1;
fplot(x,fc*g,[0,t],'r')
hold on
grid on
h=m*diff(g,x);
% funcion derivada de la entrada
%fplot(x,h,[0,t],'b')
i=laplace(h);
i;
b=i*fs;
fc=1;
%funcion de salida de la bobina
bs=ilaplace(b,s,x);
bs;
%fplot(x,fc*bs,[0,t],'g')
plot(X,Y,'b')
%plot(X,Vout,'y')
hold off

```

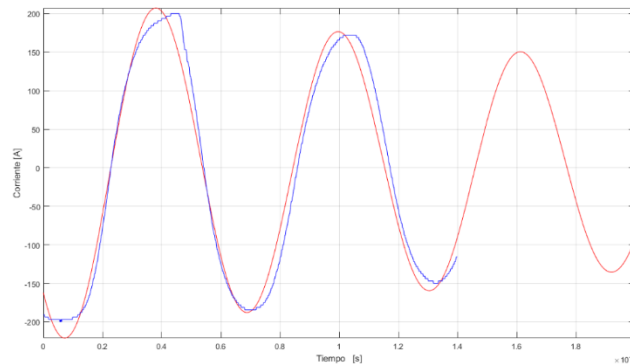


Figura 86 Señal de entrada (azul) y aproximación matemática (roja).

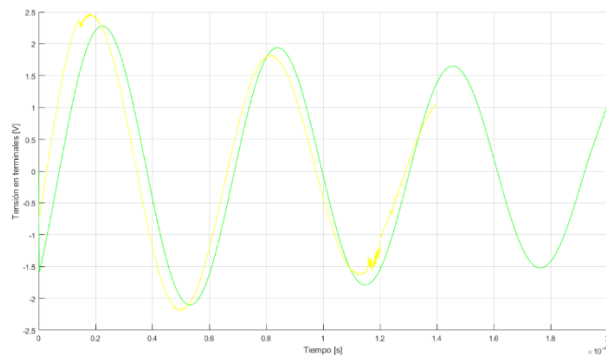


Figura 87 Derivada de la función de entrada y aproximación matemática con Factor M.

8. Códigos de trabajo para Arduinos

8.1 Código de operación Arduino MEGA (Receptor)

```
#include "Arduino.h"
#include <SD.h>
#include <LiquidCrystal.h>
// timeout time
#define RX_TO 100UL
#define buffsize 20U
//file SD
File myfile;
// serial input buffer
byte rxBuffer[buffsize];
int RayosImpactados=0;
int i=0;
float current=0;
long DATA_RECIEVED=0;
int polaridad=0;
int32_t CorrMax;
float CorrMaxfloat;

//offset para la transmision//////////////////////////////////////
const uint32_t offset_transmision=200000;
//////////////////////////////////////

// LCD INIT
LiquidCrystal lcd(9,8,5,4,3,2);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial1.begin(9600);
  pinMode(53, OUTPUT);
  digitalWrite(53,HIGH);

  while (!Serial)
  {
    ;
  }
  Serial.print("Initializing SD card...");

  while (!SD.begin(53))
  {
    Serial.println("initialization failed!");
```

```

}
Serial.println("initialization done.");

//SD
myfile = SD.open("info2.txt", FILE_WRITE);
// myfile.println("[Descarga] [Corriente maxima del rayo] [Polaridad]");
myfile.println("[Descarga][Corriente maxima del rayo]");
delay(10);
myfile.close();

lcd.begin(16, 2);
lcd.print("Cont de Descargas:");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(" By F. Estrada" );
delay(7000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("N de rayos:");
lcd.print('0');
}

void loop()
{
  // index in receive bufffer
  static int index = 0;
  // time when last character was received
  static unsigned long lastRxTime = 0;

  if (Serial1.available())
  {
    // set the last time that a character was received
    lastRxTime = millis();
    // if the buffer is full
    if (index >= buffsize)
    {
      Serial.println("buffer overflow; data discarded");
      index = 0;
      lastRxTime = 0;
    }
    else
    {
      rxBuffer[index++] = Serial1.read();
    }
  }
}

```

```

}

if (lastRxTime != 0 && millis() - lastRxTime >= 3)
{
  Serial.print("timeout, received ");
  Serial.print(index); Serial.println(" characters");
  DATA_RECIEVED=0;

  for(i=0;i<index;i++)
    DATA_RECIEVED=(long)((10*(long)DATA_RECIEVED)+(long)(rxBuffer[i]-'0'));
  DATA_RECIEVED=DATA_RECIEVED-offset_transmision;
  if(DATA_RECIEVED>100000)DATA_RECIEVED=100000;
  if(DATA_RECIEVED<-100000)DATA_RECIEVED=-100000;
  Serial.print(DATA_RECIEVED); Serial.println("DATA_RECIEVED");
  Serial.print(rxBuffer[0]-'0'); Serial.println(" D[0]");
  Serial.print(rxBuffer[1]-'0'); Serial.println(" D[1]");
  Serial.print(rxBuffer[2]-'0'); Serial.println(" D[2]");
  Serial.print(rxBuffer[3]-'0'); Serial.println(" D[3]");
  Serial.print(rxBuffer[4]-'0'); Serial.println(" D[4]");
  Serial.print(rxBuffer[5]-'0'); Serial.println(" D[5]");
  Serial.print(rxBuffer[6]-'0'); Serial.println(" D[6]");
  Serial.print(rxBuffer[7]-'0'); Serial.println(" D[7]");

  index=0;
  lastRxTime=0;

  // analisis datos //////////////////////////////////////

  if(DATA_RECIEVED>offset_transmision)
    polaridad=1;
  else
    polaridad=0;

  CorrMaxfloat=((float)DATA_RECIEVED)*1.009/1000;
  CorrMax=abs(((float)DATA_RECIEVED)*1.009);
  //////////////////////////////////////

  if(CorrMax>=100000){
    CorrMax=0;
  }
  if(CorrMax>150){
    //SD
    RayosImpactados=RayosImpactados+1;
  }
}

```

```

myfile=SD.open("info2.txt",FILE_WRITE);
  myfile.print("[");
  myfile.print(RayosImpactados);
  delay(10);
  myfile.print("] ");
  myfile.print(CorrMax);
  myfile.print("A");
  myfile.println("]");
  myfile.close();

//LCD//////////////////////////////////////////////////////////////////
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("N de rayos:"); //
lcd.print(RayosImpactados);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(abs(CorrMaxfloat));
lcd.print(" kA");
DATA_RECIEVED=0;
//LCD//////////////////////////////////////////////////////////////////

}
else{
  DATA_RECIEVED=0;
}
}
}
}

```

8.2 Código de operación para Arduino DUE (Lector)

```

volatile int bufn,obufn;
const uint16_t bufsize=32;
uint16_t buf[256][bufsize]; //
uint16_t indx0=0xffff;
uint16_t indx1=0xffff;
uint32_t ADC_INT_VECTOR=0;

//contador auxiliar//////////////////////////////////////////////////////////////////
uint32_t i=0;
uint32_t k=0;

//offset bateria//////////////////////////////////////////////////////////////////
const uint32_t offset=1535;//calibracion offset 2048;

```

```

//umbral de insensibilidad////////////////////////////////////
const uint16_t limit_sup=offset+50;
const uint16_t limit_inf=offset-50;

//Parametros bobina////////////////////////////////////
const float MinductMutua=11.5;
const float fpcb=86.63;
const float fcorreccion=1;
const float factor_total=3.3/4096.0*MinductMutua*fpcb;

//offset para la transmision de datos al otro
Arduino////////////////////////////////////
const uint32_t offset_transmision=200000;
////////////////////////////////////

float MAX=0;
float MIN=0;
float MEAN=0;
int32_t SUM=0;

long DATO_A_ENVIAR=0;

void setup()
{

  pinMode(14, OUTPUT);
  pinMode(36, OUTPUT);

  Serial.begin(9600);
  Serial1.begin(9600);

  delay(1000);

  /****** Configure ADC *****/
  PMC->PMC_PCER1 |= PMC_PCER1_PID37;    //

  ADC->ADC_MR = ADC_MR_FREERUN;    //

  ADC->ADC_CHER=ADC_CHER_CH0;    //

  ADC->ADC_EMR = 0x00000003;

  ADC->ADC_CWR=ADC_CWR_HIGHTHRES(limit_sup)|ADC_CWR_LOWTHRES(limit_inf);

```

```

ADC->ADC_IER= ADC_IER_ENDRX|ADC_ISR_COMPE;//

NVIC_EnableIRQ((IRQn_Type)ADC_IRQn);      //

ADC->ADC_RPR=(uint32_t)buf[0];      //
ADC->ADC_RCR=bufsize;
ADC->ADC_RNPR=(uint32_t)buf[1];      //
ADC->ADC_RNCR=bufsize;
bufn=obufn=1;
ADC->ADC_PTCR |= ADC_PTCR_RXTEN;      //
ADC->ADC_CR = ADC_CR_START;
delay(1000);
indx1=0xffff;
ADC_INT_VECTOR=ADC->ADC_ISR;
}

void loop(){

if(indx1!=0xffff)
{
    SUM=0;
    MIN=0xffffffff;
    MAX=0x00000000;

    //integral adimensional////////////////////////////////////
    for(i=0;i<bufsize;i++)
    {
        SUM=SUM+buf[bufn][i]-offset;

        if(SUM>MAX)MAX=SUM;
        if(SUM<MIN)MIN=SUM;
    }
    //promedio////////////////////////////////////
    PROMEDIO=SUM/bufsize;
    if(abs(PROMEDIO)>30)
    {
        //calculo de corriente////////////////////////////////////
        SUM=SUM*factor_total;
        MAX=MAX*factor_total;
        MIN=MIN*factor_total;

        if(MAX>-MIN)
        {

```

```

    DATO_A_ENVIAR=offset_transmision+(int)(MAX);
}
else
{
    DATO_A_ENVIAR=offset_transmision+(int)(MIN);
}
//envio serial////////////////////////////////////
Serial.println(DATO_A_ENVIAR);//computador Tx0
Serial1.print(DATO_A_ENVIAR);//al otro micro Tx1

    indx1=0xffff;
    delay(500);// tiempo muerto
}
REG_PIOD_ODSR=0x00000000;
ADC->ADC_IDR=0x00000000;
}

}

void ADC_Handler(){//
    ADC_INT_VECTOR=ADC->ADC_ISR;

    if((ADC_INT_VECTOR & ADC_ISR_COMPE)==ADC_ISR_COMPE) {
        ADC->ADC_IDR=ADC_IDR_COMPE;
        indx0=bufn;
        indx1=ADC->ADC_RCR;
        REG_PIOD_ODSR=0xffffffff;
    }

    //llenado un buffer seguir con el otro
    if((ADC_INT_VECTOR & ADC_ISR_ENDRX)==ADC_ISR_ENDRX) {
        bufn=(bufn+1)%256;
        ADC->ADC_RNPR=(uint32_t)buf[bufn];
        ADC->ADC_RNCR=bufsize;
        REG_PIOC_ODSR=~REG_PIOC_ODSR;

    }
    ADC->ADC_ISR=0;
}

```

Tensión aplicada [V]	Corriente teórica [A]	Valor Medido [A]	Error Relativo [%]	Error [%]
450	1000	848,7	-15,1	15,13
450	1000	848,7	-15,1	15,13
450	1000	917,5	-8,3	8,25
450	1000	1169,8	17,0	16,97
450	1000	1055,1	5,5	5,51
450	1000	1169,8	17,0	16,97
450	1000	1055,1	5,5	5,51
450	1000	986,3	-1,4	1,37
450	1000	1169,8	17,0	16,97
450	1000	1146,9	14,7	14,68
450	1000	1123,9	12,4	12,39
450	1000	848,7	-15,1	15,13
450	1000	894,5	-10,5	10,54
450	1000	871,6	-12,8	12,83

Tabla 13 Mediciones del contador de descarga y el error asociado

9. Manual de Usuario del Contador de Descargas Atmosféricas

Introducción

El presente manual de operaciones describe ampliamente los pasos de instalación para funcionamiento del contador de descargas atmosféricas (CDA). En él se establecen los procesos de instalación para el funcionamiento óptimo del sensor. También proporciona la información básica y esencial del instrumento, tales como rango de operación, alimentación y calibración.

El siguiente documento requiere leerse antes de la instalación para no causar daños al instrumento.

El propósito del CDA es la recolección de información en estructuras metálicas en las que su base posea un área menor a 125 cm^2 principalmente para torres arriastradas de base triangular o cuadrada. También puede ser usado sólo como contador y ser instalado en bajantes a puesta a tierra.

El CDA, es un instrumento diseñado para la medición de rayos y pulsos de corriente. La detección de descargas está conforme a los criterios que se presentan en la **Norma IEC 62.561-6:2011**.

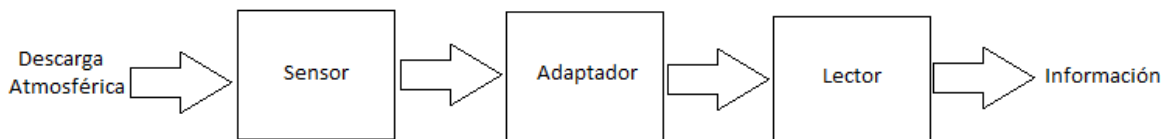
Aplicaciones

El contador de descargas atmosféricas tiene 2 aplicaciones principales:

- 1- La medición del valor máximo de la corriente que impacta la estructura metálica sobre la cual se ha instalado el sensor.
- 2- El conteo de las descargas atmosféricas que golpean la estructura metálica sobre la cual se ha instalado el CDA.

Funcionamiento

Funcionamiento del dispositivo



El equipo CDA consta de 2 partes, una bobina Rogowski y una caja de operación. Ambas son frágiles y requieren cuidado en su transporte e instalación. La bobina Rogowski funciona como sensor y es del tipo flexible, sus datos se presentan a continuación:

Bobina Rogowski	
Longitud [m]	1,3
Número de vueltas	1650

Sensibilidad [$\mu\text{V}\cdot\text{s}/\text{A}$]	0,08
--	------

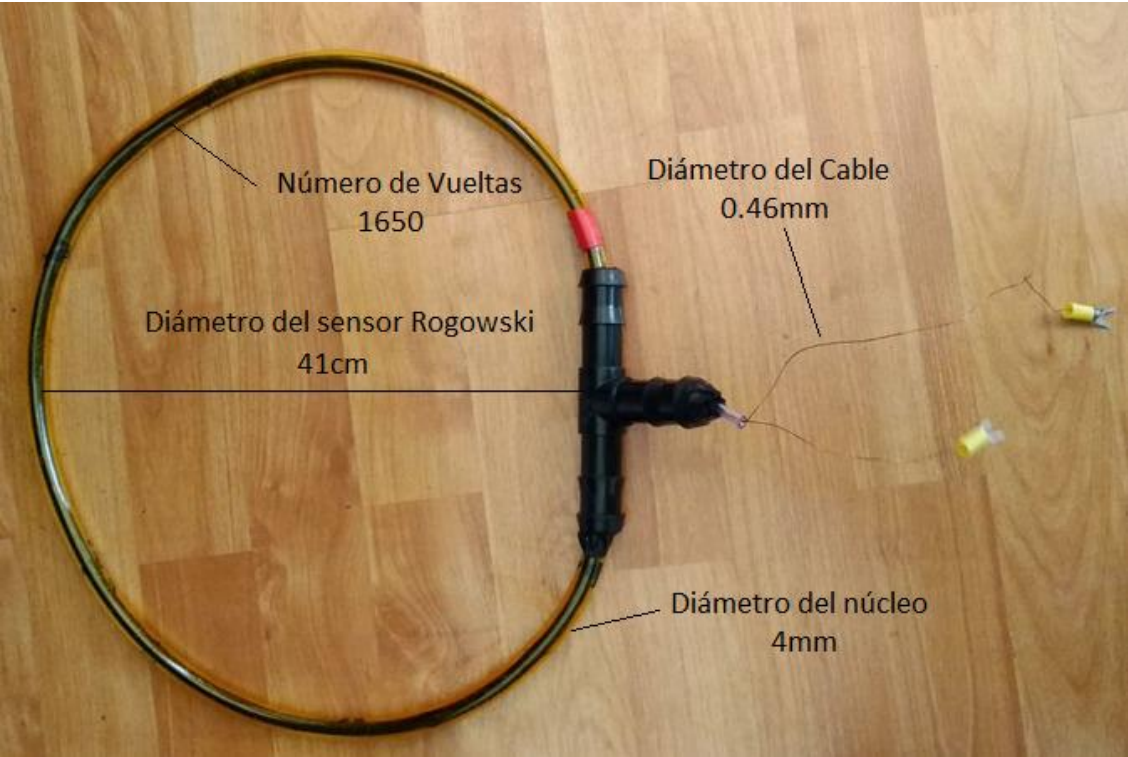
La caja de operación presenta un conjunto de Arduinos que funcionan para interpretar la señal de entrada, creada por la bobina, y transformarla en información. El conjunto de Arduinos lleva a cabo un conteo de descargas que han golpeado la estructura en la cual se instaló, además de medir el valor máximo de la corriente de la descarga.

El conjunto de Arduinos consiste en un Arduino Due y un Arduino Mega. El equipo además tiene 3 códigos de funcionamiento, “1” para Arduino Mega y “2” para Arduino Due. Previo a la instalación del sensor, se debe elegir el rango en el cual se va a medir la corriente. Según la elección se debe compilar el código en el Arduino Due.

La caja debe ser alimentada en sus terminales con hasta 12[V] y mínimo 8[V]. Debe ser aterrizada en sus terminales correspondientes.

Especificaciones

Velocidad de medición	1[μs]
Rango de Escala Baja [8/20]	0.5-7[kA]
Rango de Escala Alta [8/20]	5-70[kA]
Valor máximo de lectura [10/350]	100[kA]
Alimentación	8-12[V]
Tiempo Muerto	0.5[s]
Error	+ - 17%



Observación: una alimentación superior a la indicada puede causar daño en los elementos al interior del dispositivo.

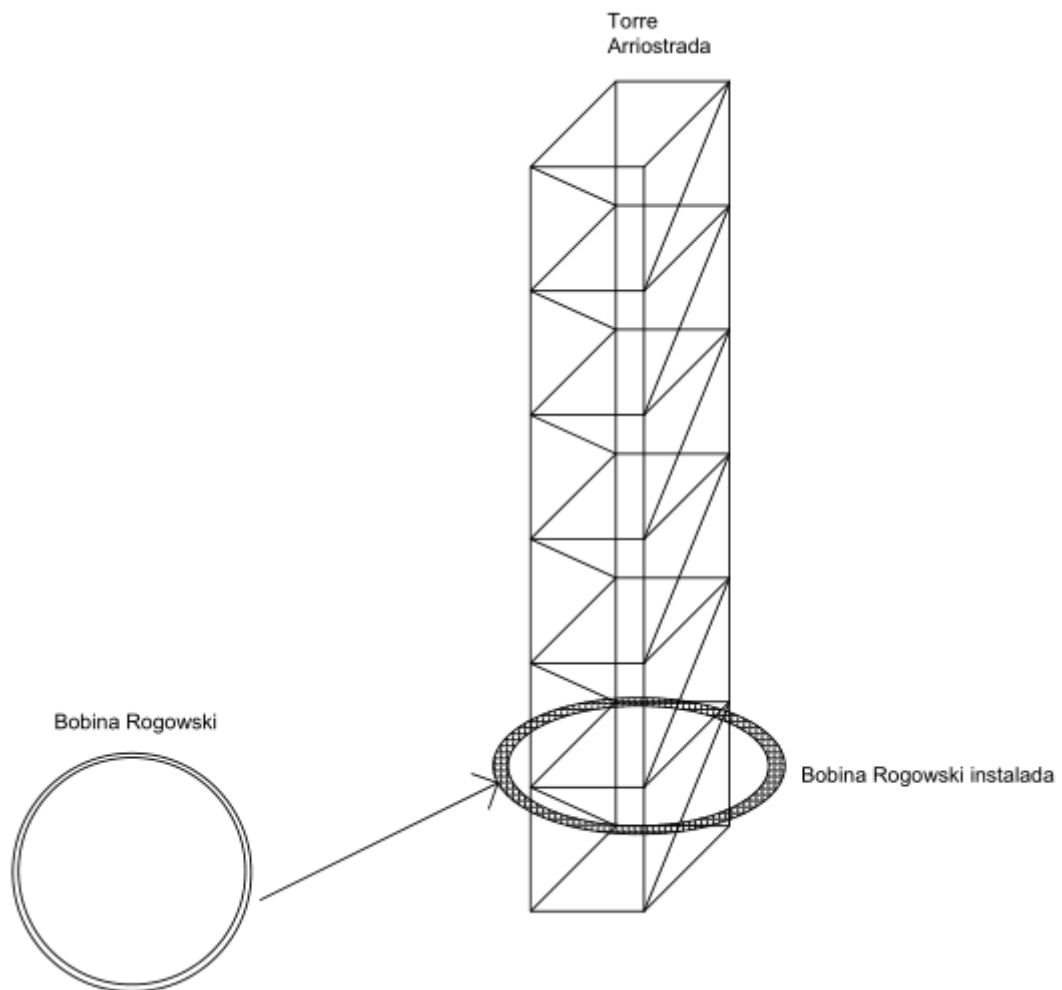
Manual de instalación y operación

El CDA es un instrumento de sencilla instalación y operación. Descargas atmosféricas que superen los valores entre los rangos pueden causar daños permanentes en el dispositivo.

Para la instalación se deben considerar 2 cosas, primero la instalación de la bobina y luego su unión a la caja metálica.

Instalación de la bobina

- Enrollar la bobina sobre la estructura o cable a medir.
- La bobina posee dos terminales que deben ser conectados a la caja metálica. Sus extremos quedan fijos en los orificios insertables. No dejar los extremos de la bobina separados.



- Existen dos códigos de operación, uno para cada rango. Por lo que una vez elegido el rango de operación es necesario correr el código correspondiente en el Arduino Due.

📁 DUE_EscalaAlta

📁 DUE_EscalaBaja

📁 MEGA

- Conectar los terminales de la bobina como se indica en la caja metálica contenedora entre los terminales V_i y O , dependiendo de la escala que se quiera trabajar.
- Aterrizar la caja contenedora a Tierra a través del terminal de color Verde (Ilustración 1).
- Cada Arduino posee su propio transformador.
- Antes de encender el CDA, se debe calibrar el OFFSET de medición:
 - Medir la tensión en los terminales de la pila de alimentación y calibrar en el código (DUE) según la ecuación que se presenta a continuación, a la tensión de medición OFFSET correspondiente. El valor debe ser cercano a 1.5[V]. Para calibrar el Offset se debe usar un voltímetro, leer el valor de tensión DC entre los terminales de la pila y cambiar el valor en el código Arduino DUE para escalas alta y baja.

$$OFFSET = V_{voltmetro} * \frac{4095}{3.3}$$

```
//offset bateria ////////////////////////////////////////  
const uint32_t offset=1535;//2048;
```

- Se recomienda usar como complemento puntas de tensión diferencial, para captar la forma de onda completa de la señal a medir.
- Sólo en caso de no usar puntas de medición diferenciales, agregar una resistencia de 20[MOhm] en los terminales del Arduino.
- Conectar y encender en el orden que se indica a continuación los transformadores y terminales (Verificar polaridad de alimentación DC).
 1. Circuito Adaptador (Alimentación DC de 12 Volts)
 2. Arduino Due
 3. Arduino MEGA
 4. Terminales de la bobina (No importa su polaridad)

Importante: Sólo conectar cuando esté seguro de que las polaridades están correctas, ya que una conexión errónea puede dañar permanentemente el equipo.

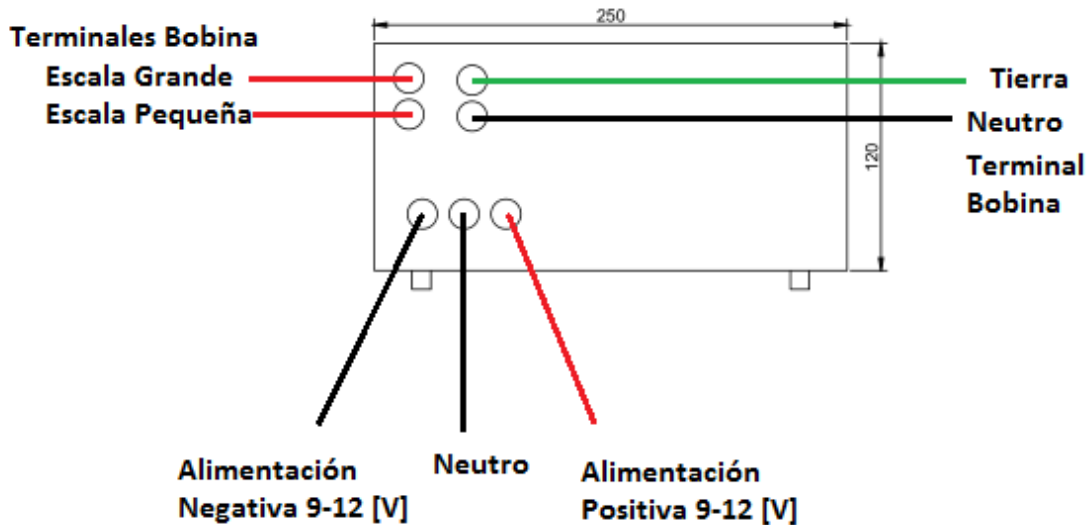


Ilustración 1 Conexiones en la parte posterior de la caja metálica.

- Luego de encendido, sólo en caso de que aparezca "ERROR" en la pantalla LCD se debe realizar lo siguiente:
 - Verificar la presencia y/o reconectar la tarjeta SD. Luego, reiniciar el Arduino Mega, éste mostrará "Ready to start" en la pantalla.
- Presionar el botón de Reinicio en Arduino Due.
- Si es que no aparece Error, esperar "Ready to start".

En caso de que la unidad parta contando sin que haya impacto de rayos, verificar la pila de alimentación y calibrar mediante el código (DUE) a la tensión de medición OFFSET del mismo correspondiente.

$$OFFSET = V_{voltmetro} * \frac{4095}{3.3}$$

```
//offset bateria ////////////////////////////////////////
const uint32_t offset=1535;//2048;
```

- Para la lectura de Datos, se necesita un Adaptador de tarjeta Micro SD.
- El archivo corresponde a un Archivo de texto (.TXT) de nombre "info". Es posible cambiar el nombre a través del código Arduino Mega, pero no puede superar los 8 caracteres.

```
Serial.println("initialization done.");
```

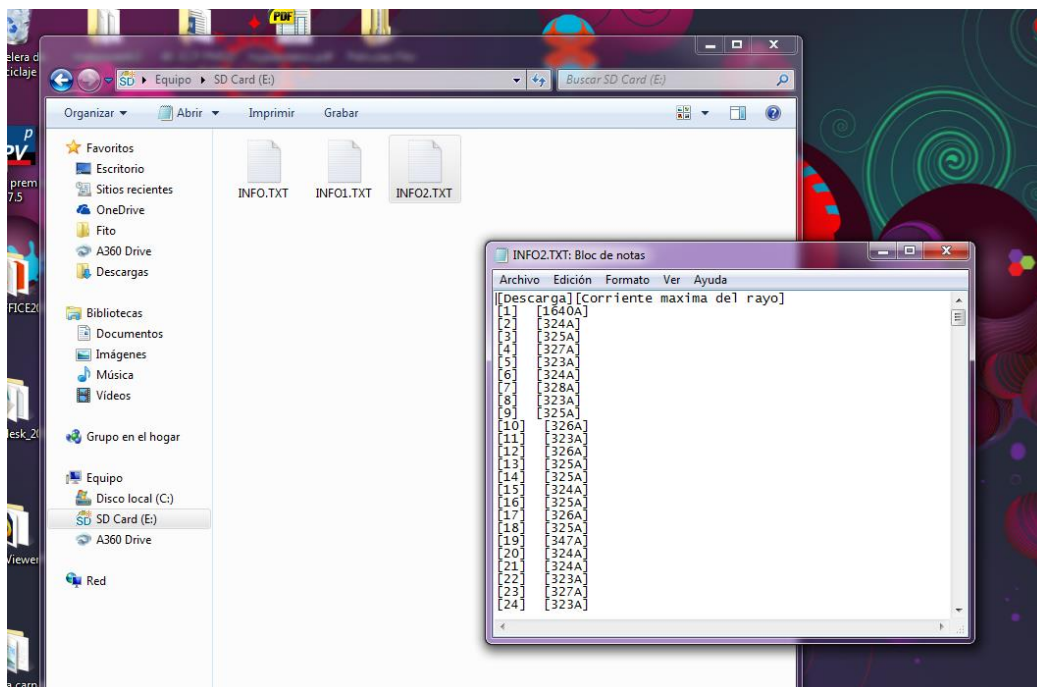
Cambio de nombre

```
//SD
myfile = SD.open("info.txt", FILE_WRITE);

myfile.println("[Descarga][Corriente maxima del rayo]");
delay(10);
myfile.close();
```

- Los datos quedan separados en dos columnas; una correspondiente al número de la descarga y otra al valor máximo de la corriente del rayo. A medida que se van agregando

datos, se van colocando en sus columnas correspondientes, como lo muestra la siguiente imagen.



Observación: Para abrir y cerrar la caja metálica usar la tapa superior(en forma de “L”). Al momento de cerrar, no es necesario agregar seguro o uniones extra.

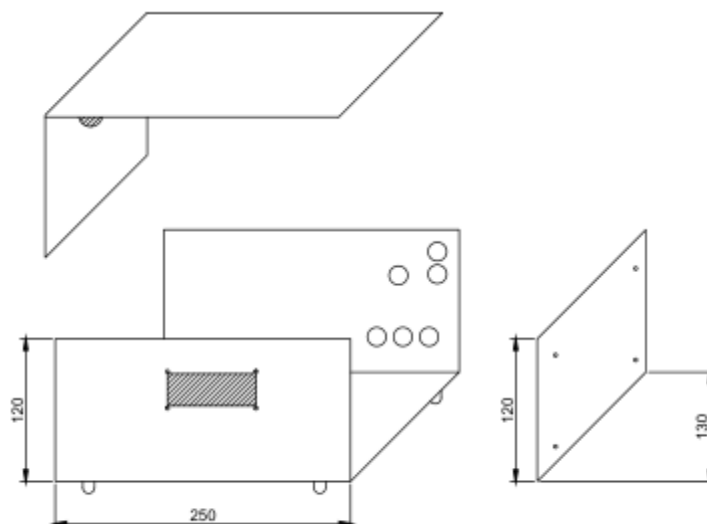
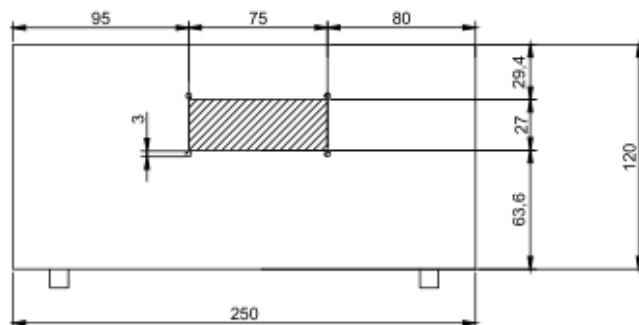


Ilustración 2 Ensamblaje y medidas de la caja contenedora.

Vista Frontal



Vista Posterior

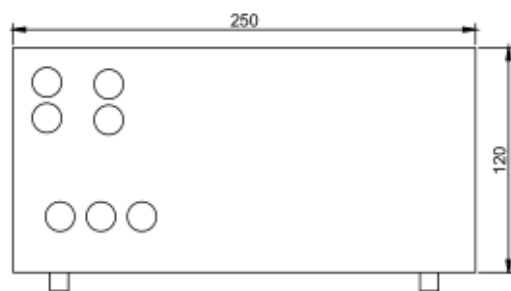


Ilustración 3 Vista frontal y posterior de la caja contenedora.



Ilustración 4 Caja metálica vista de frente.



Ilustración 5 Vista de los terminales de la caja contenedora.

Manual de Prueba del Generador de Impulsos de Corriente

La generación de impulsos de corriente corresponde a la descarga de un capacitor previamente cargado con tensión DC. El valor de la corriente peak se alcanza con la relación existente entre el valor de tensión actual del capacitor y la resistencia, el control de los tiempos de subida y bajada, dependen del inductor conectado en serie con la resistencia.

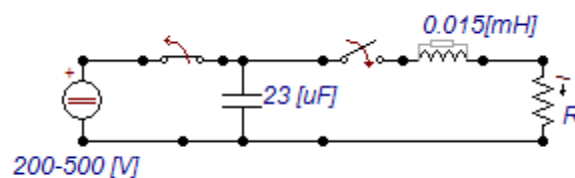


Ilustración 6 Circuito del Generador de impulsos de corriente.

Para la carga del generador de impulsos de corriente, se necesita un generador DC, un capacitor conectado en paralelo y una inductancia en serie con una resistencia. Además, se necesitan dos interruptores para controlar la carga y descarga del capacitor. La conexión es como

se muestra en la ilustración 6. Se sugiere aterrizar el punto de unión entre el capacitor y la resistencia, sin embargo, para lograr valores más altos en corriente, se puede trabajar sin aterrizar (depende del valor de la resistencia de puesta a tierra).

Armado y uso del Generador de pulsos de corriente:

- Conectar los elementos como se muestra en la ilustración 6.
- Verificar el buen apriete de las tuercas del circuito “Impulso de Corriente”, un mal apriete puede causar que se suelten los elementos al momento de descargar e incluso podría ser peligroso para el usuario.
- Comprobar que todos los elementos e interruptores estén bien conectados como muestra el circuito.
- Corroborar la operación de los interruptores y dejarlos todos abiertos (interruptor de carga del capacitor).
- Dar alimentación al generador de Tensión DC, luego cerrar el interruptor de carga del capacitor y llevarlo lentamente hasta la tensión deseada. Se recomienda hasta 400 Volts dependiendo del valor de la resistencia.
- Una vez cargado el capacitor, abrir el interruptor de carga del capacitor y llevar la tensión del generador a cero.
- Verificar que esté abierto el interruptor de carga del capacitor.
- Cerrar el interruptor y comprobar la tensión cero en el voltímetro del capacitor.
- Abrir el interruptor del capacitor.

Observación: Nunca cortocircuitar el capacitor sin antes abrir el interruptor que viene desde el generador. Mientras no se esté utilizando el dispositivo, dejar cortocircuitado el capacitor y abierto el interruptor de carga.