

Diseño de un Dispositivo para la Medición de Corrientes de Rayos en una Estructura Elevada
en el Departamento de Santander

Ana Milena Caballero Cárdenas

Tesis de Grado en la Modalidad de Investigación para Optar
al Título de Ingeniera Electricista

Oscar Mauricio Moncada Olaya

Tesis de Grado en la Modalidad de Investigación para Optar
al Título de Ingeniero Electricista

Director:

Dr. Edison Andrés Soto Ríos

Línea automática, Compatibilidad Electromagnética

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y

Telecomunicaciones

2018

Dedicatoria

A mis padres: Luis A. Caballero y Olga Cárdenas,

por su comprensión y apoyo incondicional.

A mis hermanos por ser mi inspiración

y ejemplo de constancia.

Dedicatoria

*Gracias a Dios por haberme permitido llegar
hasta este punto, con salud y sabiduría.*

*A mis padres: Rosa I. Olaya y Publio Moncada, que, por su apoyo incondicional y ejemplo de
moral, tranquilizaban
mi espíritu y me llenaban de fortaleza.*

*A mis hermanos por confortarme en los momentos más
difíciles mediante su experiencia y consejos.*

*A mis amigos que compartieron conmigo en los buenos
y malos momentos y que siempre me
transmiten ánimo y alegría*

Agradecimientos

A los profesores que acompañaron nuestro proceso de formación por compartir sus enseñanzas y experiencias de vida profesional, a nuestro director Edison Andrés Soto Ríos por sus aportes y enseñanzas transmitidas durante las reuniones realizadas, a los compañeros y amigos de la comunidad E3t con los que compartimos valiosas experiencias y momentos agradables durante la carrera.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Descripción del Proyecto.....	17
1.1. Objetivo General	17
1.2. Objetivos Específicos.....	17
1.3. Alcance.....	17
1.4. Justificación.....	17
1.5. Planteamiento de Problema.....	19
1.6. Metodología	19
2. Antecedentes y Estado del Arte.....	21
2.1. Formación del Rayo	21
2.2. Parámetros del Rayo.....	25
2.2.1. Nivel Cerámico (NC).....	25
2.2.2. Densidad de Descargas a Tierra (DDT).....	25
2.2.3. Corriente de Retorno (CR).....	27
2.2.4. Polaridad.	27
2.2.5. Multiplicidad.....	28
2.2.6. Gradiente de Corriente di/dt	28
2.2.7. Forma de Onda Normalizada.	28
2.3. Clasificación de los Rayos	30
2.4. Detectores de Rayos	31
2.5. Torres Instrumentadas en otros Países	32
2.6. Experiencia en Colombia	34

3.	Receptor de la Señal	35
3.1.	Criterios de Selección.....	36
3.1.1.	Ancho de Banda.....	36
3.1.2.	Gradiente di/dt	36
3.1.3.	Tensión de salida.....	36
3.2.	Especificaciones Requeridas	37
3.3.	Tipos de Receptores	37
3.3.1.	Resistencia Shunt.....	37
3.3.2.	Sensor de Efecto Hall.....	38
3.3.3.	Transformador de corriente (TC).....	38
3.3.4.	Bobina Rogowski.....	39
3.4.	Preselección del Tipo de Sensor.....	40
3.4.1.	Bobina Rogowski y TC Pearson.	41
3.4.1.1.	TC Pearson.....	41
3.4.1.2.	Bobina CWT.	42
3.5.	Comparativo TC Pearson y Bobina CWT.....	44
3.5.1.	Análisis de los TC Pearson.	45
3.5.2.	Análisis de las Bobinas CWT.	45
4.	Acondicionamiento de la Señal	46
4.1.	Tipos de Integración.....	47
4.2.	Bloque de Acondicionamiento	50
5.	Adquisición de Datos	51
5.1.	Osciloscopio.....	51

5.1.1. Criterios de Selección	51
5.1.1.1. Ancho de Banda	52
5.1.1.2. Velocidad de Muestreo.	52
5.1.1.3. Profundidad de Memoria.	53
5.1.1.4. Resolución.....	54
5.1.2. Serie 3000.	55
5.1.3. Serie 4000.	56
5.1.4. Serie 5000.	57
5.1.4.1. Ancho de Banda y Velocidad de Muestreo.....	57
5.1.4.2. Resolución.....	57
5.1.4.3. Portabilidad.	57
5.2. Ordenador.....	59
5.2.1. Criterios de Selección.	59
5.2.1.1. Procesador.....	59
5.2.1.2. Memoria RAM.....	59
5.2.1.3. Disco Duro.	60
5.2.1.4. Sistema Operativo.....	60
5.2.1.5. Consumo.	60
5.2.2. Fit PC4 PRO.	60
6. Transmisión de Datos	61
6.1. Línea de Comunicación Digital.....	63
6.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	63
7. Protección del Dispositivo.....	65

7.1. Protección Externa	66
7.2. Protección Interna	68
7.2.1. Armario Eléctrico.....	69
7.2.2. Protección para Cables.....	70
8. Resultados.....	71
9. Conclusiones.....	75
Referencias Bibliográficas	77
Apéndices.....	81

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Diagrama de bloques del dispositivo de medida.	20
<i>Figura 2.</i> Nube de tormenta.....	22
<i>Figura 3.</i> Alteración del campo eléctrico.	23
<i>Figura 4.</i> Formación de la descarga atmosférica.....	24
<i>Figura 5.</i> Curva normalizada 8/20 μ s.	29
<i>Figura 6.</i> Curva normalizada 10/350 μ s.....	29
<i>Figura 7.</i> Estación de medida grupo Ilyapa.....	34
<i>Figura 8.</i> Señal de corriente medida por el grupo Ilyapa.	35
<i>Figura 9.</i> Modelo de una resistencia Shunt.	37
<i>Figura 10.</i> Efecto Hall en una lámina.....	38
<i>Figura 11.</i> Representación de la bobina Rogowski.	40
<i>Figura 12.</i> Permeabilidad del aire y del hierro.	40
<i>Figura 13.</i> Representación del TC Pearson.	42
<i>Figura 14.</i> Modelo de la bobina Rogowski CWT con Integrador.	43
<i>Figura 15.</i> Ganancia vs frecuencia de la bobina Rogowski.	44
<i>Figura 16.</i> Circuito integrador pasivo de la bobina Rogowski.....	47
<i>Figura 17.</i> Circuito integrador activo de la bobina Rogowski.	48
<i>Figura 18.</i> Relación ganancia frecuencia del integrador de la bobina Rogowski.	49
<i>Figura 19.</i> Circuito autointegrador de la bobina Rogowski.	49
<i>Figura 20.</i> Circuito de la bobina e integrador Rogowski utilizando OP-AMP no invertido.....	51
<i>Figura 21.</i> Acoplamiento capacitivo.	61
<i>Figura 22.</i> Acoplamiento inductivo.....	62

<i>Figura 23.</i> Esquema de conexión del GPS 17x HVS a puerto USB.	64
<i>Figura 24.</i> Esquema sistema integral de protección contra rayos	66
<i>Figura 25.</i> Sistema de protección externa.	66
<i>Figura 26.</i> Representación de la instalación del dispositivo.	73
<i>Figura 27.</i> Esquema interconexión de equipos.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Densidad de descargas atmosféricas por medio de contadores RSA-10 Hz.</i>	26
Tabla 2. <i>Densidad de descargas atmosféricas por medio de la ecuación empírica.</i>	27
Tabla 3. <i>Parámetros característicos de cuatro tipos de rayos tipificados.</i>	31
Tabla 4. <i>Valores en las curvas de corriente obtenidas por Berger.</i>	33
Tabla 5. <i>Comparativo de sensores de corriente.</i>	41
Tabla 6. <i>Especificaciones de TC Pearson y bobina CWT.</i>	44
Tabla 7. <i>Error asociado a la resolución.</i>	55
Tabla 8. <i>Especificaciones técnicas serie 3000.</i>	55
Tabla 9. <i>Especificaciones técnicas serie 4000.</i>	56
Tabla 10. <i>Especificaciones técnicas serie 5000.</i>	58
Tabla 11. <i>Parámetros señal esperada.</i>	59
Tabla 12. <i>Especificaciones técnicas computador.</i>	61
Tabla 13. <i>Características GPS 17x HVS.</i>	64
Tabla 14. <i>Especificaciones normativas del armario eléctrico.</i>	69
Tabla 15. <i>Características principales generales de equipos y elementos seleccionados.</i>	71
Tabla 16. <i>Software requerido por equipo.</i>	72

Lista de Apéndices

Apéndice A. Especificaciones técnicas bobina CWT1500.....	81
Apéndice B. Especificaciones técnicas osciloscopios serie 5000.....	82
Apéndice C. Especificaciones técnicas y componentes físicas computador FIT-PC4 PRO.	86

Introducción

En Colombia se están presentando múltiples cambios energéticos a diario como entrada de fuentes, aumento de la demanda, salida de líneas de transmisión y quema de transformadores lo que exige que la calidad de la energía eléctrica sea a su vez la más eficiente posible evitando fallas y perturbaciones debidas a factores externos como malas maniobras, orden público, cambios ambientales, entre otras. El rayo, es una de las manifestaciones ambientales al cual se le atribuye gran parte de los problemas, se estima que la calidad de energía se ve afectada alrededor del 70 al 80% principalmente por rayos (CREG, 2013), y cerca de un 60 al 70% de fallas en líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica (Gómez y Morcos, 2002). El rayo es un fenómeno natural de interferencia electromagnética significativo en países de zona tropical, en el caso de Colombia se puede alcanzar densidades de rayos a tierra hasta de $60 \text{ rayos/km}^2\text{-año}$ (Torres, 2002), además al ser un país con alta actividad de tormentas eléctricas es necesario precisar los parámetros del rayo. La medición directa es una buena alternativa para obtener resultados más precisos de corriente de rayos mejorando su caracterización y aportando en el diseño de los sistemas de protección contra rayos y de localización. Con este proyecto se pretende hacer un aporte adicional a la caracterización del rayo en Colombia, realizando una adecuada selección de equipos para conformar un dispositivo de medición directa de corriente para zona tropical, incentivando futuros desarrollos para la implementación de estructuras elevadas en el país.

1. Descripción del Proyecto

1.1. Objetivo General

Seleccionar los equipos para conformar un dispositivo de medida directa de corrientes de rayos en una estructura elevada.

1.2. Objetivos Específicos

- Especificar el sensor de corriente a utilizar en el dispositivo de medida.
- Especificar el acondicionamiento de la señal analógica entregada por el sensor.
- Seleccionar la transmisión y el almacenamiento de la señal registrada.
- Establecer los criterios del sistema de protección contra sobretensiones del dispositivo.
- Presentar la implementación de los equipos del dispositivo de medida.

1.3. Alcance

En este trabajo de grado se presentará el esquema de un dispositivo de medición de corriente de rayo basado en la experiencia internacional, el cual permitirá a futuro la construcción e instalación del mismo en una estructura elevada, haciendo un aporte a la investigación de las descargas atmosféricas en países de zona tropical.

1.4. Justificación

El rayo es un poderoso fenómeno natural con longitudes promedio de 1500 metros y puede alcanzar una velocidad de 100 km/s hasta 1400 km/s (Thomson, Uman y Beasley, 1985). La descarga eléctrica de mayor longitud registrada recorrió 190 km (Cervený, Randall, Lawrimore, Edwards, y Landsea, 2007). Sobre la tierra se presentan en promedio 100 rayos cada segundo causando impactos sobre aerolíneas comerciales en promedio una vez al año (Torres, 2002), fallas en líneas de transmisión de 100 km de longitud y 35 m de altura que son impactadas hasta

300 veces por año en la Florida, 100 veces por año en la zona central de USA y 10 veces por año en California (Torres, 2012).

El costo promedio anual de reposición de transformadores de distribución en Colombia, por impactos de rayo, se estima en US\$7 millones. Los rayos producen al menos el 50% de los sags (caídas de tensión) en una red de distribución. (EPRI, USA) La tasa de fallas anuales en líneas de transmisión por causa de rayos varía entre 30 y 60% (Torres, 2002).

Cooper (2005) afirma: “...En general, las muertes y lesiones por rayos dependen del sistema económico y el mejoramiento en la construcción de las viviendas. En las áreas tropicales y subtropicales del mundo, donde la actividad de rayos es más común, el número total de muertes por rayos se estima en 24000 y cerca de 240000 lesionados anualmente...”

En los países de zona templada, el rayo se caracteriza por medio de medidas realizadas con sensores de corriente instalados en estructuras elevadas, la ubicación de las torres se estudia previamente eligiendo el lugar con mayor probabilidad de descargas obteniendo medidas precisas en tiempo real, lo cual es una ventaja evidente respecto a países de zona tropical donde la información obtenida del rayo proviene de medidas indirectas.

En Colombia puesto que las curvas de distribución actualmente se realizan por medio de sistemas localizadores, se genera la necesidad de implementarlas mediante información obtenida por medidas directas, ya que los parámetros del rayo tales como la corriente pico, la frecuencia, di/dt , entre otros, pueden variar según la altitud y latitud de la zona. Mejorar el diseño de los sistemas de protección contra-rayos exige parámetros precisos del mismo, lo que permite un óptimo apantallamiento de líneas de transmisión y distribución, evitando fallas en transformadores,

sobre costos en mantenimiento y reposición de equipos, haciendo el sistema eléctrico más estable y reformando la calidad de la energía eléctrica del país.

1.5. Planteamiento de Problema

En Colombia debido a su ubicación geográfica se presenta un gran número de descargas atmosféricas las cuales son la principal causa de transitorios, fallas y cortes en el sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica. Estudios realizados estiman que el 50% de las perturbaciones electromagnéticas en los sistemas de distribución y entre el 70 al 80% de todos los eventos que afectan la calidad de energía eléctrica, se atribuyen a los rayos (Gómez y Morcos, 2002). Adicionalmente, centros de investigación muestran que un gran número de las fallas de transformadores principalmente en zonas rurales de Colombia provienen de los rayos (Rodríguez, 1999). Por esto es necesario caracterizar con mayor detalle los parámetros del rayo generando un aporte adicional al diseño de los sistemas de protección contra rayos.

Entre los parámetros del rayo, caracterizados actualmente en Colombia, se encuentra la corriente pico la cual es importante para el diseño de sistemas de protección y apantallamiento. La estimación de estos parámetros se realiza mediante sistemas localizadores de rayos. Dichos sistemas determinan en tiempo real la ubicación del rayo, además pueden estimar la polaridad, diferencias entre rayos nube, tierra o intranube y la corriente pico del rayo a través de fórmulas, sin embargo, hay incertidumbre de esta medida.

1.6. Metodología

Para elegir los elementos de un dispositivo de medida de corriente de rayo inicialmente se establecen los componentes presentes en todo instrumento de medida, figura 1, en la que se comprende la presencia del fenómeno físico como la descarga atmosférica, la captación, el acondicionamiento y finalmente la adquisición y muestra de datos.

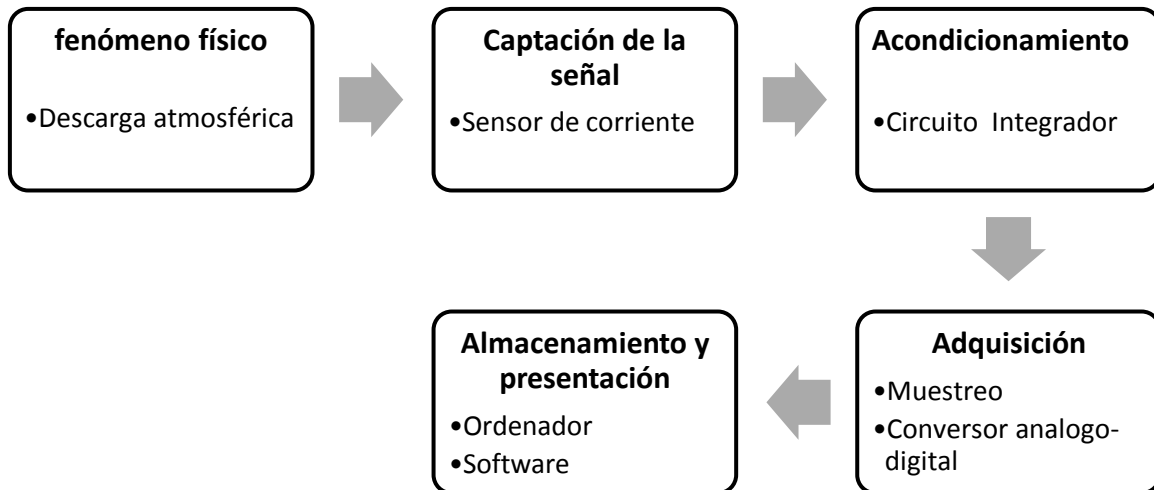


Figura 1. Diagrama de bloques del dispositivo de medida.

Se realiza una revisión de artículos, tesis, publicaciones existentes, normas de acuerdo con ANSI/IEEE y demás información relacionada con los parámetros del rayo y mediciones realizadas en diferentes partes del mundo incluyendo la experiencia nacional.

De esta manera se selecciona un modelo adecuado de la descarga del rayo, tiempos, magnitudes, frecuencias, entre otros parámetros que lo caracterizan, y que permiten a su vez la selección del dispositivo principal que toma la señal analógica.

Una vez seleccionado el sensor, se inicia el acondicionamiento de la señal en el cual se realiza un proceso de integración, de manera que se obtenga una señal en tensión con magnitudes proporcionales a las variaciones de la corriente del rayo.

Para la etapa de adquisición se especifican las características mínimas del osciloscopio, donde se busca un enlace práctico con la salida del integrador, rapidez en captación de la señal, almacenamiento y demás aspectos que brinden calidad para una representación de la onda lo más exacta posible.

Se procede a la selección del computador el cual será utilizado para el almacenamiento de los eventos. Ya que la medición de rayos podría realizarse en lugares lejanos, se debe garantizar que el computador guarde suficientes eventos y que estos puedan ser transmitidos a un computador principal donde se realizarán los análisis. También se busca tener un rendimiento óptimo con un eficiente consumo de energía.

El registro preciso de la hora del evento es de importancia ya que cada evento podría ser comparado con otros instrumentos de medición indirecta, para lo cual se necesitaría la hora exacta en orden de los microsegundos, de modo que se considera la instalación de un GPS.

Finalmente se define el tipo de protección recomendable contra los efectos electromagnéticos y posibles corrientes de retorno en la fuente de alimentación de los equipos, con el fin de evitar alteraciones en la medida y posibles daños a personas como al dispositivo.

2. Antecedentes y Estado del Arte

2.1. Formación del Rayo

El rayo es un fenómeno natural de gran impacto, el inicio de la descarga se presenta por la formación de la nube de tormenta o nube Cumulonimbus, estas nubes se caracterizan por extenderse verticalmente formando una gran columna que gira en forma de espiral. La nube se crea debido a la presencia de corrientes de aire caliente prominentes de la superficie de la tierra y las corrientes de aire frío en altitudes superiores, esta fuerte interacción de flujos de aire ascendentes y descendentes separan las partículas de agua, formando cristales de hielo y granizo en la parte superior de la nube debido a las bajas temperaturas presentes a grandes alturas, en el interior de la nube la colisión entre estas partículas permite la creación de cargas positivas y negativas.

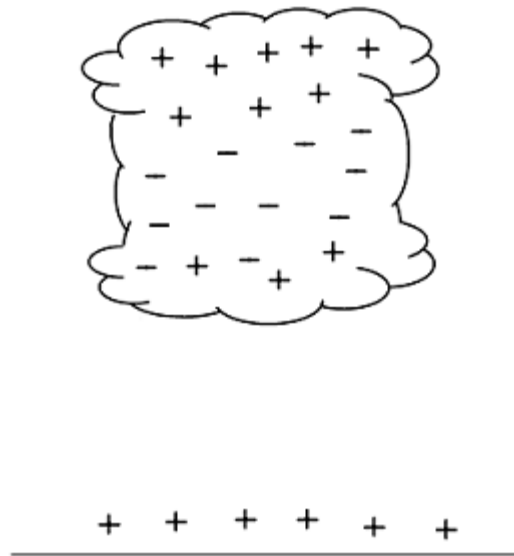


Figura 2. Nube de tormenta.

Las cargas positivas y negativas de la nube se polarizan, las cargas positivas se sitúan en la parte superior de la nube y las cargas negativas en la parte inferior, acompañadas de una pequeña cantidad de cargas positivas, en general la nube de tormenta se comporta como un gran capacitor.

A medida que se crean cargas negativas en la parte inferior de la nube, se inducen cargas positivas en la superficie de la tierra que acompañan el desplazamiento de la nube de tormenta. En localidades con edificaciones, torres o estructuras de gran altura, las cargas positivas inducidas se localizan en los puntos más altos de la estructura ya que el campo eléctrico en estos puntos se amplifica por la irregularidad del terreno, figura 3.

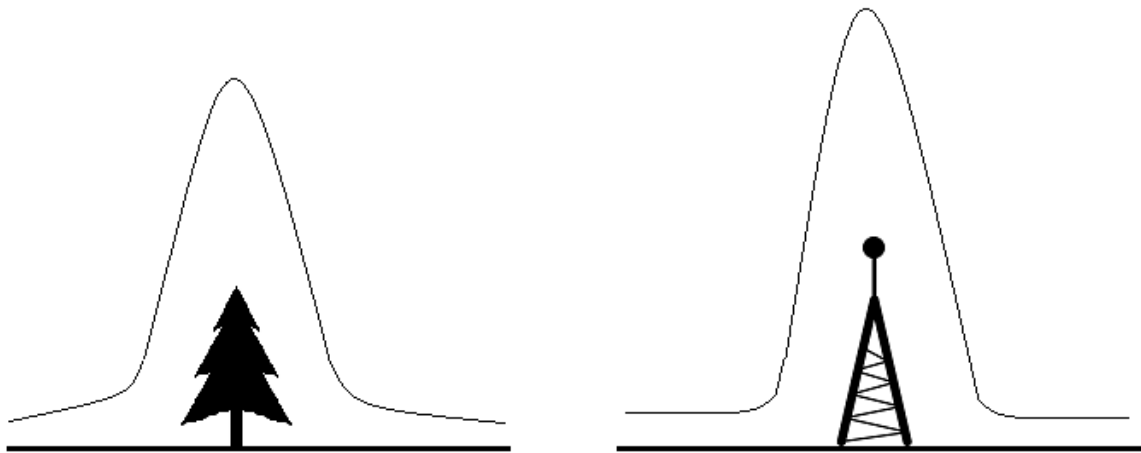


Figura 3. Alteración del campo eléctrico.

La presencia de objetos metálicos en la superficie de las estructuras favorece el proceso de ionización del aire, generando chispas, vibraciones y ruidos en el objeto conductor, este fenómeno recibe el nombre de efecto corona. El aire ionizado crea un canal de excelentes condiciones haciendo inminente la descarga.

La figura 4 muestra el proceso de formación de un rayo. Las primeras chispas se presentan en el interior de la nube desarrollada en fase activa de descarga, presentándose relámpagos en su interior, y a partir de la acumulación de dichas chispas se crea el líder descendente, el cual se abre camino paso a paso por el canal de aire ionizado. Por medio de métodos fotográficos se ha observado que la duración de cada paso es típicamente de $1 \mu\text{s}$ avanzando longitudes de decenas de metros, con pausas de $50 \mu\text{s}$ entre paso y paso (Torres, 2002).

Mientras el líder descendente o líder escalonado busca camino hacia abajo, se crea el líder ascendente desde la superficie de la tierra principalmente en los puntos de mayor altura, tratando de alcanzar el líder descendente, este proceso se conoce como enlace de la descarga, donde el

campo eléctrico presente en los puntos de mayor altura supera el valor de la tensión disruptiva del gas.

Cuando los dos líderes se unen se presenta la descarga de retorno trasportando una carga equivalente a 1020 electrones en menos de un segundo, dejando el canal de aire totalmente ionizado. El fenómeno se manifiesta de manera visible lo que se conoce como relámpago y de forma audible por medio del trueno. La descarga de retorno es la etapa de mayor cantidad de energía transmitida por el rayo alcanzando valores típicos de corriente superiores a 30 kA dependiendo de la región donde se presenta la descarga (Torres, 2002).

A partir de la descarga de retorno que se expande lateralmente, en la nube se presentan los líderes dardos formando descargas subsecuentes siguiendo el canal pre-ionizado hasta que la nube se descargue.

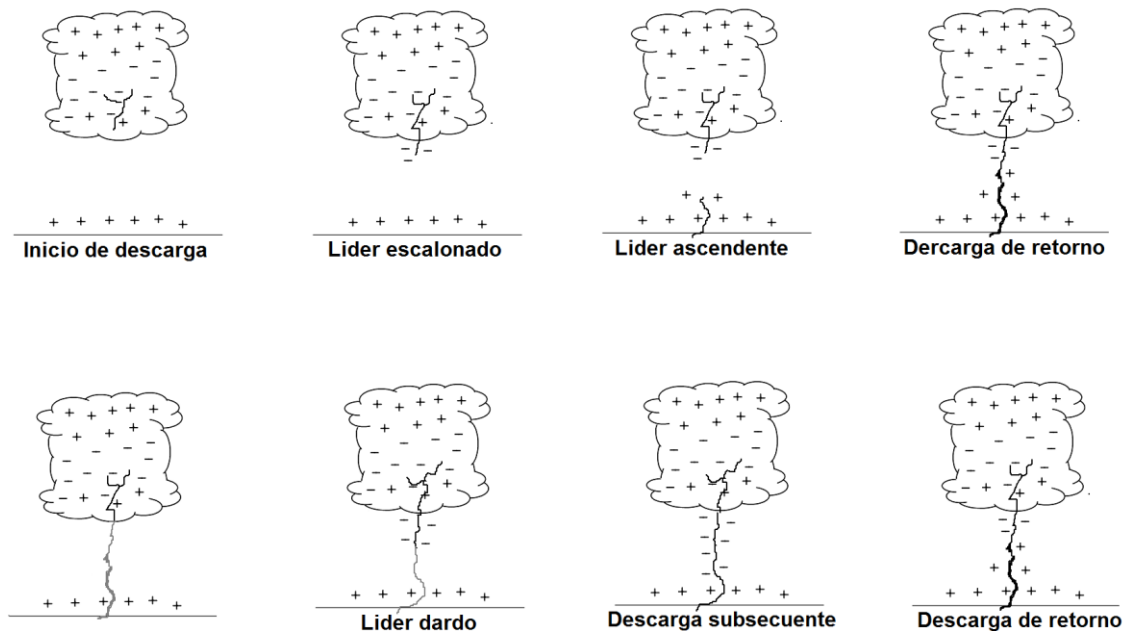


Figura 4. Formación de la descarga atmosférica.

Nota: adaptada de Horacio Torres (2002). El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología.

2.2. Parámetros del Rayo

La magnitud de los parámetros del rayo varía según la región y el tiempo de manera aleatoria, las investigaciones realizadas por C.T.R. Wilson en 1920 y Whipple en 1929 fundamentan actualmente la hipótesis de partida para la caracterización del rayo (Torres, 2002).

De acuerdo a lo mencionado, se describe el rayo como un fenómeno meteorológico de comportamiento aleatorio, teniendo en cuenta que las condiciones geográficas en regiones templadas difieren considerablemente respecto a regiones tropicales como es el caso de Colombia, diseñar sistemas de protección contra rayos de acuerdo a los estudios de probabilidad y estadística realizados en regiones como Europa y Estados Unidos no sería recomendable, por lo tanto para estimar los parámetros importantes en aplicaciones de ingeniería es necesario estudios de probabilidad y estadística realizados en regiones tropicales, dando mayor confiabilidad a los sistemas de protección contra rayos y la calidad de la energía en general.

Se presentan a continuación los principales parámetros del rayo teniendo en cuenta su variación espacio-temporal

2.2.1. Nivel Cerámico (NC). Indica la incidencia de días de tormenta por año presentes en un país o región mediante líneas consideradas con el mismo número de truenos oídos, el Comité Meteorológico Internacional IMC (con sus siglas International Meteorological Committee, en inglés), presenta el “Día con trueno oído” como una unidad donde se considera día de tormenta aquel donde un trueno sea oído y un relámpago observado.

2.2.2. Densidad de Descargas a Tierra (DDT). Este parámetro se define como el número promedio de descargas presentadas durante un año por kilómetro cuadrado y se relaciona con el

nivel cerámico. La densidad de rayos a tierra se puede determinar por medio de contadores de rayos o sistemas localizadores y se rige por medio de la siguiente ecuación (Torres, 2002).

$$DDT = \frac{Y_g * K}{\pi * R_g^2} \quad (1)$$

Donde

Y_g es un factor de corrección de los registros tomados por el contador de descargas

K es número total de descargas registradas por el contador

R_g es el rango efectivo del contador

De la experiencia colombiana en la estimación de la densidad de descargas a tierra realizada por el Doctor Horacio Torres y su equipo de la Universidad Nacional de Colombia en la sabana de Bogotá se obtuvieron valores con la instalación de 5 contadores RSA-10 mostrados en la tabla 1.

Tabla 1.

Densidad de descargas atmosféricas por medio de contadores RSA-10 Hz.

DDT,NC=57 [Descargas/km ² -año] 1995	DDT,NC=68 [Descargas/km ² -año] 1994	DDT,NC=88 [Descargas/km ² -año] 1993
0,6	1,2	2,4

Nota: Horacio Torres (2002). El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología.

Otro método de estimación de la densidad de descargas se realiza por medio de ecuaciones propuestas de forma empírica según el país donde se realiza la investigación. De forma análoga se realizaron estimaciones en Bogotá por medio de este método planteando la siguiente ecuación empírica:

$$DDT = 0,0017 \cdot NC^{1,56} \quad (2)$$

De acuerdo a la ecuación 2 se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 2.

Densidad de descargas atmosféricas por medio de la ecuación empírica.

DDT,NC=57 [Descargas/km ² -año] 1995	DDT,NC=68 [Descargas/km ² -año] 1994	DDT,NC=88 [Descargas/km ² -año] 1993
0,93	1,22	1,83

Nota: Horacio Torres (2002). El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología.

La medición por medio de contadores de descargas ha permitido ajustar las ecuaciones acuerdo al lugar donde se realice el estudio, para lugares con diferentes características climáticas estas ecuaciones difieren y estiman valores que corresponden al comportamiento del rayo local.

2.2.3. Corriente de Retorno (CR). La amplitud de la corriente de retorno de la descarga es considerada el parámetro más importante del rayo, asociado directamente con el fenómeno audible y visible de la descarga y es a este al que se le atribuyen el diseño de sistemas de protección. Estimar este parámetro se puede lograr de dos maneras, por medio de medición de campo eléctrico, campo magnético y la distancia, así como la medición directa por medio de sensores.

2.2.4. Polaridad. Este parámetro indica el tipo de carga presente en la corriente de la descarga, esta puede ser de polaridad positiva o negativa. Los sistemas de protecciones deben considerar el cambio de polaridad de la descarga, dado que las descargas positivas son mayormente peligrosas respecto a las descargas de polaridad negativas.

La variación de la polaridad del rayo depende de la época del año y de la región, los estudios realizados estiman por meses las zonas con mayor frecuencia de descargas negativas y positivas. Considerando la hipótesis de variación espacial y temporal de los parámetros del rayo, en

Colombia los cambios de polaridad son tema importante de investigación donde se incluyen las variaciones de altitudes, condiciones climáticas, entre otras características.

2.2.5. Multiplicidad. Durante el proceso de formación del rayo la energía acumulada en la nube de tormenta es transferida inicialmente por medio de la descarga de retorno, luego la presencia del líder dardo da paso a descargas subsecuentes e incluso a una nueva descarga de retorno, la multiplicidad del rayo es un parámetro que describe el número de descargas subsecuentes presentes en una descarga atmosférica.

2.2.6. Gradiente de Corriente di/dt . Es la variación de corriente respecto al tiempo alcanzada hasta llegar al valor de corriente máxima de la descarga, el valor de di/dt máximo es junto a la corriente máxima de la descarga el parámetro más importante del rayo para el cálculo de protección contra sobre tensiones, y el análisis espectral de la descarga.

2.2.7. Forma de Onda Normalizada. De acuerdo a los parámetros presentados anteriormente La norma ANSI/IEEE C62-41 caracteriza la forma de onda para impactos inducidos, esta curva alcanzaría el 90% de su corriente máxima en 8 μ s y decaería al 50% de la misma en 20 μ s, tomando como corriente máxima 10 kA, sin embargo, la norma considera que estos valores pueden ser superiores en el caso de impactos directos, siendo el extremo la presencia de una corriente máxima de 100 kA, dicha corriente se fraccionaría en el número de conductores en paralelo (Torres, 2002).

En contraste a la norma ANSI/IEEE C62-41, la norma IEC 61312 considera impactos directo nube-tierra con un valor de corriente máxima de 200 kA asumiendo que el 50% de esta irá a tierra y el otro 50% a los conductores paralelos, debido a estas consideraciones la norma presenta

la forma de onda 10/350 μs , en la cual la corriente alcanzaría el 90% de su máximo en 10 μs y decaería hasta el 50% en 350 μs .

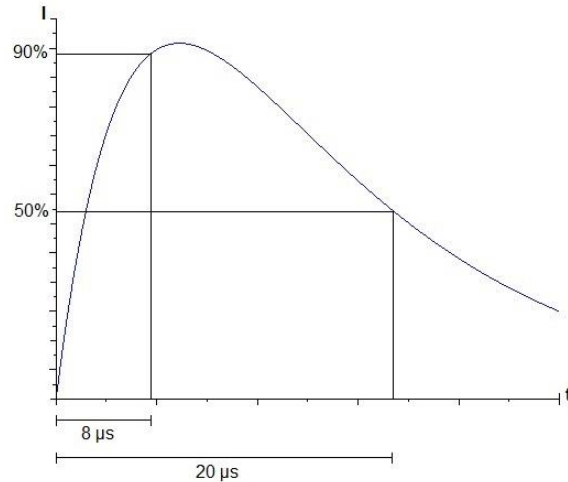


Figura 5. Curva normalizada 8/20 μs .

Nota: adaptada de Horacio Torres (2002). El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología.

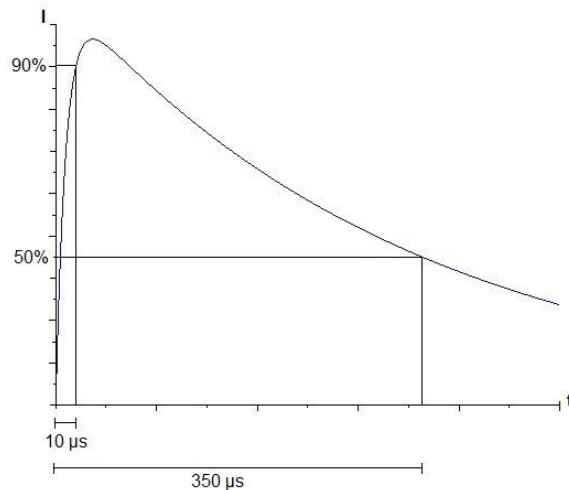


Figura 6. Curva normalizada 10/350 μs .

Nota: adaptada de Horacio Torres (2002). El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología.

De acuerdo a la aplicación planteada en este trabajo y los altos valores de corriente esperados la forma de onda 8/20 μs no sería del todo apropiada teniendo en cuenta el comportamiento del

rayo en zonas tropicales, por lo tanto, para el dispositivo de medida en estudio se esperan descargas de forma similar a la curva normalizada 10/350 μ s (Torres, 2002).

2.3. Clasificación de los Rayos

De acuerdo al planteamiento realizado por Berger (1978) los rayos se clasifican según la polaridad de la nube de tormenta y la dirección hacia donde se dirigen, de acuerdo a esto se puede presentar 4 tipos de descargas atmosféricas.

Rayo positivo ascendente (tierra-nube)

Rayo positivo descendente (nube- tierra)

Rayo negativo ascendente (tierra-nube)

Rayo negativo descendente (nube tierra)

El rayo negativo se presenta cuando la nube de tormenta presenta cargas negativas en su parte inferior, induciendo en la superficie de la tierra cargas positivas, este tipo de descarga es la más frecuente en regiones llanas de clima templado, se estima que aproximadamente el 90% de los rayos son negativos (Schneider Electric, 2009).

Los rayos positivos a su vez se presentan cuando la nube se carga positivamente, induciendo cargas negativas en la superficie de la tierra, este tipo de rayos son considerados poco comunes y peligrosos, durante las investigaciones realizadas en Colombia para caracterizar el rayo espacial (zona central del país) y temporalmente (1992-1993) en el mes de octubre se encontraron que el 100% de las descargas registradas fueron positivos descendentes (Torres, 2002).

Los rayos de tipo descendentes son los que se transmiten desde la nube hasta la tierra este tipo de descarga son más frecuentes en terrenos llanos. Los rayos de tipo ascendentes son los que propagan la energía de la descarga desde la superficie de la tierra hasta la nube.

Para introducir un poco los valores típicos y parámetros característicos se establecen diferentes tipos de rayos con un porcentaje de incidencia en la tabla 3, de acuerdo a la compañía europea Schneider Electric. Los valores de intensidad de descarga varían de acuerdo a terrenos llanos o montañosos, siendo estos últimos donde se registran valores más altos.

Tabla 3.

Parámetros característicos de cuatro tipos de rayos tipificados.

Parámetro	90% (bajo)	50% (típico)	10% (alto)	Máximo observado (extremo)
Corriente de pico	2 a 8 kA	10 a 25 kA	40 a 60 kA	230 kA
Velocidad de ascenso (di/dt)	2 kA/μs	8 kA/μs	25 kA/μs	50 kA/μs
Duración total del rayo	0,01 a 0,1 s	0,1 a 0,3 s	0,5 a 0,7 s	1,5 s
Duración de un simple pulso o descarga	0,1 a 0,6 ms	0,5 a 3 ms	20 a 100 ms	400 ms
Intervalo de tiempo entre impulsos	5 a 10 ms	30 a 40 ms	80 a 130 ms	500 ms
Intervalo de tiempo entre el principio y la mitad del valor de pico en el lado de caída	10 a 25 μs	28 a 42 μs	52 a 100 μs	Más de 120 μs
Tiempo hasta el valor de pico	0,3 a 2 μs	1 a 4 μs	5 a 7 μs	10 μs
Numero de impulsos o descargas en un rayo individual	1 a 2	2 a 4	5 a 11	34

Nota: Schneider Electric 2009. Protección contra Sobretensiones Transitorias Baja Tensión.

2.4. Detectores de Rayos

Los detectores de rayos son dispositivos de sensado instalados en antenas o torres instrumentadas de gran altura en puntos estratégicos donde con mayor probabilidad se captará la descarga. Características como la magnitud de corriente y la forma de captación en estos dispositivos dependen del país, de acuerdo a la literatura se encuentra que los detectores de rayos en países de zona templada son en su mayoría de medición directa, compuestos principalmente

por estructuras aisladas con una punta captadora, bobinas Rogowski, resistencias tipo Shunt y transformadores de corriente como respaldo de medida.

El principio de los detectores de corriente consiste en sensar la corriente eléctrica que pasa a través de un hilo conductor y convertir esta señal en una tensión reducida para luego ser acondicionada y facilitar la medición, así cuando una corriente fluye en un cable o en un circuito, se tiene una caída de tensión y a su vez se genera un campo magnético, lo que permite tener una medición directa e indirecta. De esta forma la medición directa se basa en la magnitud de corriente que pasa a través de un conductor y la medición indirecta en el campo magnético que es creado por este.

De acuerdo a los detectores de corriente más comunes en la medición de rayos se encuentra la bobina Rogowski, entre sus principales aplicaciones se encuentran las mediciones de AC y transitorios, especialmente en corrientes de alta frecuencia como corriente de descarga de gas, corriente de plasma y altas corrientes de rayo (Pelinen, et al, 1980).

2.5. Torres Instrumentadas en otros Países

De la experiencia internacional las mediciones realizadas por Berger en Suiza presentan resultados actualmente considerados, sus investigaciones caracterizaron el rayo según, la polaridad y dirección en que se presentaron. Berger instaló resistencias Shunt en la base de dos torres de 55 m de altura en el monte de San Salvatore en Lugano obteniendo los valores mostrados en la tabla 4.

Tabla 4.*Valores en las curvas de corriente obtenidas por Berger.*

Numero de descargas	Parámetro	unidades	Porcentaje de casos que sobrepasan el valor indicado		
			95%	50%	5%
Corriente máxima					
101	Primera descarga de retorno	kA	14	30	80
135	Descarga subsecuente	kA	4,6	12	30
di/dt máximo					
92	Primera descarga de retorno	kA/ μ s	5,5	12	32
122	Descarga subsecuente	kA/ μ s	12	40	120
Tiempo ascendente (2 kA-pico)					
89	Primera descarga de retorno	μ s	1,8	5,5	18
118	Descarga subsecuente	μ s	0,22	1,1	4,5
Duración del impulso (2 kA-amplitud media)					
90	Primera descarga de retorno	μ s	30	75	200
115	Descarga subsecuente	μ s	6,5	32	140

Nota: Bermúdez (2000). Medida de corriente de descargas atmosféricas mediante torres instrumentadas.

La opción de utilizar bobinas Rogowski o transformadores de corriente es más frecuente al momento de medir corrientes de rayo, por ejemplo, en la torre de telecomunicaciones Santis en Suiza, se utilizó una bobina PEM CWT600. La torre situada en el Morro do Cachimbo ha dado grandes aportes en cuanto al comportamiento de los rayos en zona tropical, los sensores utilizados son dos TC Pearson para medir las corrientes que fluyen a través del mástil y tiene un rango de 20 A a 200 kA. En la torre Eagle Nest en España utilizan el TC Pearson 1130 para medir corrientes hasta de 100 kA, por otra parte, las bobinas instaladas en la torre de radio en Tokio se caracterizaban por rangos de frecuencia de (0,5 – 250 kHz) y (1,5 kHz – 5 MHz) de esta manera se espera que las formas de onda de la corriente del rayo se puedan caracterizar con frecuencias muy bajas, y la amplitud máxima y frente de onda di/dt con frecuencias en orden de los MHz (WG C4.410, 2015).

Sin embargo, para la selección de las bobinas se debe tener en cuenta la magnitud de las corrientes de acuerdo a su zona geográfica, siendo corrientes muy altas en zona tropical.

2.6. Experiencia en Colombia

La experiencia de medición directa de corriente de rayos en Colombia se limita principalmente al estudio realizado por el Doctor Horacio Torres y su equipo en la torre de Samaná, construida en el año 1998 la cual consistió en una torre de 30 m de altura, a 1000 m sobre el nivel del mar, equipada con una bobina Rogowski diferencial, una bobina Rogowski autointegradora, una resistencia tipo Shunt y un transformador de corriente instalados en la base de la torre, como se puede evidenciar en la figura 7 (Torres, et al, 1999).

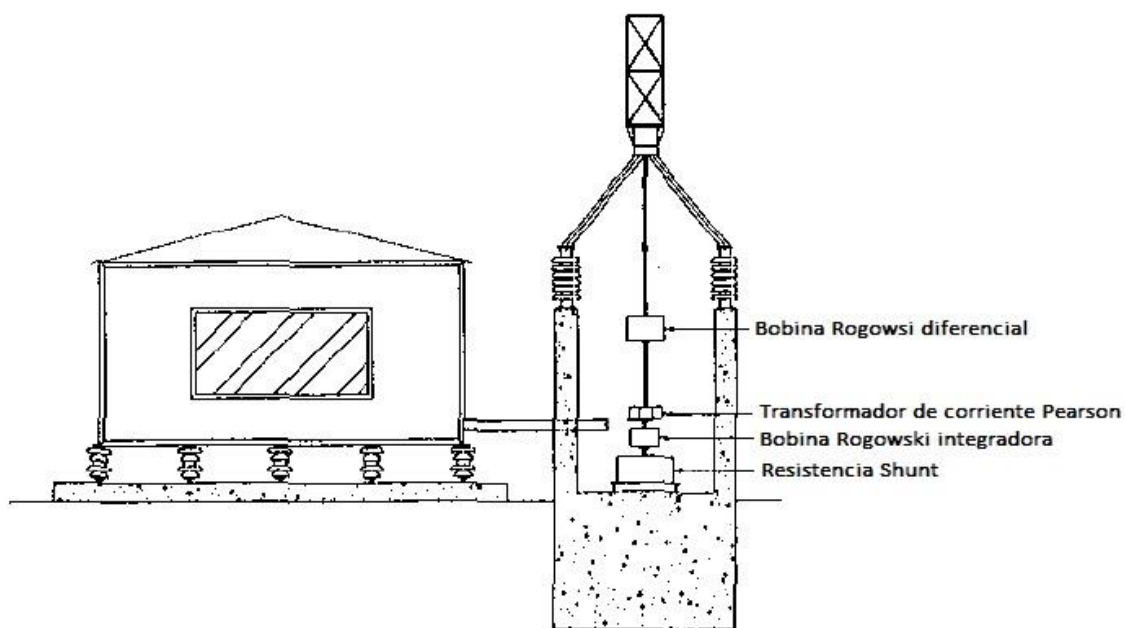


Figura 7. Estación de medida grupo Ilyapa.

Nota: adaptada de Horacio Torres (1999). Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone.

De esta instalación se realizó una única medida obteniendo una curva de corriente mostrada en la figura 8, donde se alcanzó una corriente pico de aproximadamente 130 kA en 31 μ s.

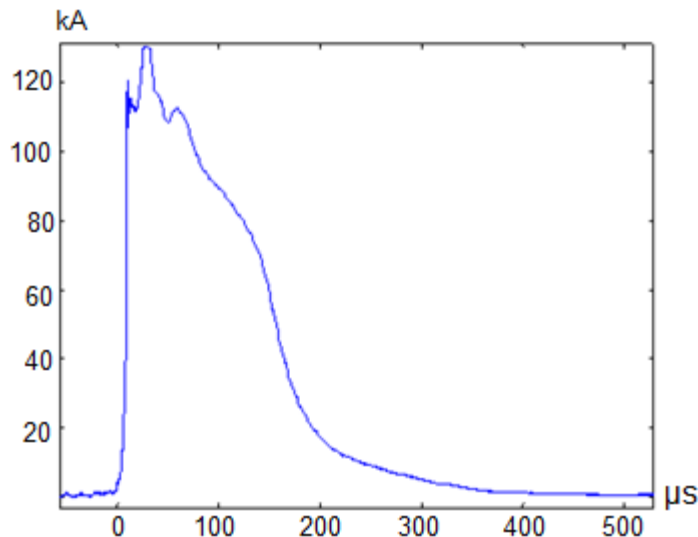


Figura 8. Señal de corriente medida por el grupo Ilyapa.

Nota: adaptada de Horacio Torres (2012). Transformador de Distribución Nuevo Diseño para Zona Tropical.

3. Receptor de la Señal

En general, un sistema de medición directa de corriente del rayo en una estructura se compone de las siguientes etapas: captura, acondicionamiento, conversión, transmisión y el almacenamiento de datos. Para el elemento captador se selecciona un sensor con características que permita entregar una señal analógica similar a la de entrada, en este caso las principales especificaciones a tener en cuenta son el ancho de banda, el gradiente di/dt y la tensión de salida del sensor, de esta forma se espera tener una señal con el mayor contenido de frecuencias, un comportamiento más exacto en los picos de la onda y facilidad en las adecuaciones para la medición de la señal.

3.1. Criterios de Selección

3.1.1. Ancho de Banda. Se debe tener en cuenta que el rayo tiene un ancho de banda muy amplio, donde se encuentra mayor intensidad en bajas frecuencias LF (3-300 kHz) para las descargas de retorno, y frecuencias muy altas VHF (30-300 MHz) en los líderes escalonados (Cadavid, 2014).

Ya que el objetivo es determinar la corriente máxima de la onda tipo rayo se debe tener en cuenta un sensor con la capacidad de medir la señal a las frecuencias más bajas, y ya que las frecuencias típicas para las corrientes de rayo son buenas en un rango de 2 kHz a 2 MHz un ancho de banda de 200 Hz a 10 MHz sería suficiente para el sensor de medida (Li, Zhang, Zhang, liu y Tan, 2011).

3.1.2. Gradiente di/dt . Esta característica define el comportamiento de la pendiente del frente de onda y es relevante a la hora de escoger un dispositivo capaz de soportar impulsos muy rápidos para evitar daños en el dispositivo.

La pendiente di/dt de la forma de onda de un rayo puede variar desde 2,5 a 40 kA/ μ s (Torres, 2002), este último valor para casos extremos, en este caso el sensor debe manejar dichos cambios de intensidad.

3.1.3. Tensión de salida. Este requerimiento se tiene en cuenta de acuerdo al dispositivo a utilizar y su enlace con la etapa de acondicionamiento, ya que la tensión de salida puede variar desde unos cuantos voltios hasta unos cientos de voltios, de manera que para cada rango de tensión se define un acondicionamiento de la señal, así, para una tensión de salida alta como 400 V sería conveniente un divisor de tensión, de modo que pueda ser ajustada por un circuito integrador.

3.2. Especificaciones Requeridas

- Ancho de banda: 200 Hz a 2 MHz
- Gradiente di/dt : 2,5 a 40 kA/ μ s
- Capacidad de corriente: 200 kA

3.3. Tipos de Receptores

Existen varios tipos de sensores en el mercado utilizados de acuerdo a las características del sistema, y nuevas tecnologías que se implementan a diario para medidas más exigentes, entre los principales sensores se tienen: el sensor Efecto Hall, Transformador, Resistencia Shunt y Bobina Rogowski.

3.3.1. Resistencia Shunt. Se encuentra entre los métodos más sencillos para la medición de corriente, su modelo es una resistencia R por la cual pasa la corriente I que se quiere medir, esta intensidad crea una diferencia de tensión V en los bornes de esta resistencia cuya magnitud es proporcional a la corriente que circula por ella, además se debe considerar la inductancia parásita L debido al campo magnético y eléctrico creado por el paso de la corriente (Koon, s.f).

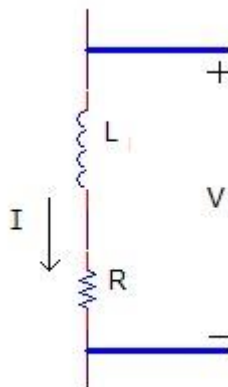


Figura 9. Modelo de una resistencia Shunt.

Nota: adaptada de William Koon. Current sensing for energy metering.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, para mediciones de alta frecuencia, la impedancia parásita de esta resistencia se puede ver alterada. Así un desfase de $0,1^\circ$ puede causar un error de 0,3% con un factor de potencia de 0,5 (Koon, s.f).

3.3.2. Sensor de Efecto Hall. Consiste en una barra plana por la cual circula una corriente I , a esta barra es aplicado un campo magnético uniforme B , lo cual hace que los electrones que viajan con una velocidad v se desvíen perpendicularmente hacia un extremo de la lámina debido a la fuerza F creada por la presencia del campo. De esta manera se cargan las orillas positiva y negativamente creando una diferencia de potencial, a esto se conoce como efecto Hall.

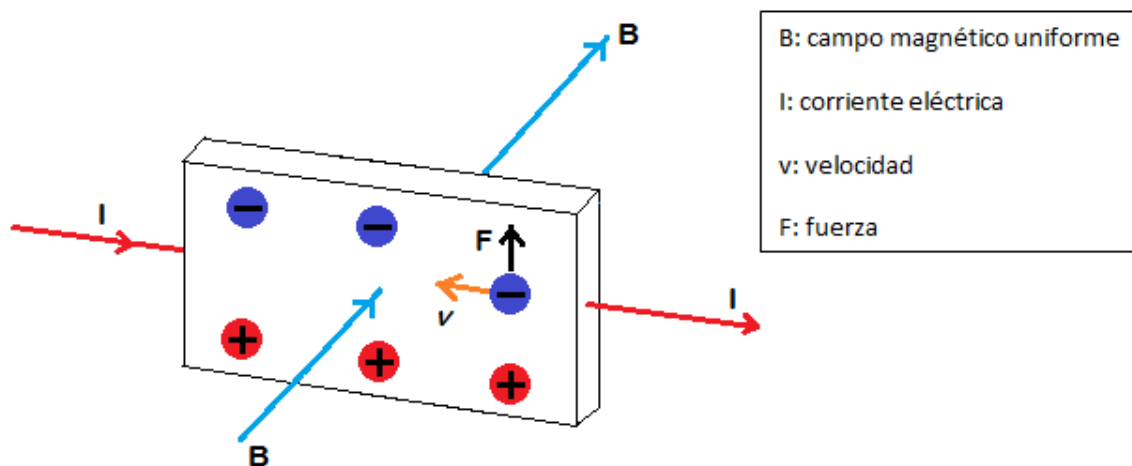


Figura 10. Efecto Hall en una lámina.

El sensor efecto Hall tiene buena respuesta en frecuencia y puede medir corrientes muy altas, sin embargo, para su buen funcionamiento este sensor necesita dispositivos externos de control que pueden ser costosos, además tiene alta deriva por temperatura (Koon, s.f).

3.3.3. Transformador de corriente (TC). El transformador de corriente convierte una intensidad muy alta a una pequeña para su fácil medición, donde el primario del transformador debe estar conectado al conductor por donde transite la corriente y el secundario al dispositivo de

medición. Se debe tener en cuenta que el transformador puede presentar saturación para altos niveles de corriente e histéresis debido al material ferrítico (Koon, s.f).

3.3.4. Bobina Rogowski. La Bobina Rogowski es uno de los sensores más utilizados para medir altas intensidades de corriente ya que aprovecha el campo magnético creado por la corriente que se va a medir, está compuesto por una bobina en forma de toroide con núcleo de aire, lo que hace que su respuesta sea lineal, este sensor se ubica alrededor del conductor que transporta la corriente I que se desea medir, esta corriente crea un campo magnético que es captado por la bobina generando una tensión V_l en sus terminales representada por la fórmula:

$$V_1 = H \cdot \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Donde H es la sensibilidad de la bobina y se representa por:

$$H = \mu_0 \cdot N \cdot A \quad (4)$$

Donde

μ_0 es la permeabilidad magnética del aire

N es el número de vueltas

A es el área de una vuelta [m^2]

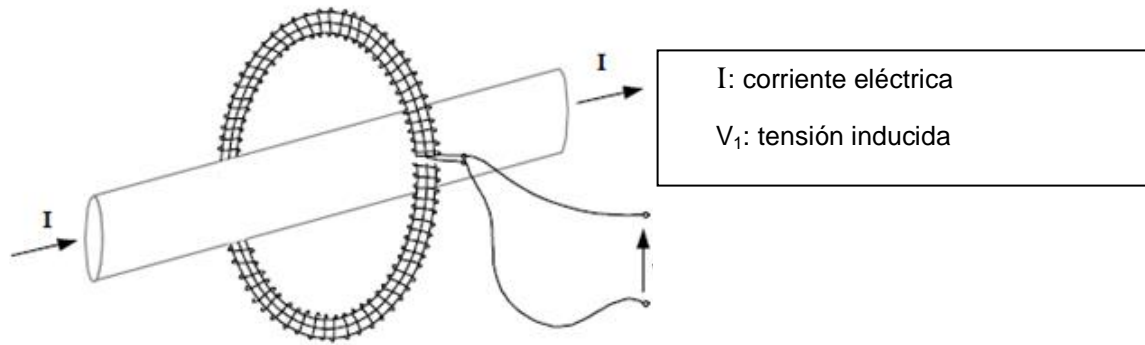


Figura 11. Representación de la bobina Rogowski.

Nota: adaptada de Application notes (2002). Power Electronic Measurements Ltd.

De acuerdo a las características de los materiales se pueden encontrar diferentes comportamientos de respuesta al campo magnético, en la figura 12 se puede ver una comparación donde la curva de respuesta del aire tiene menor permeabilidad a diferencia del hierro, pero no se satura a altas intensidades de corriente.

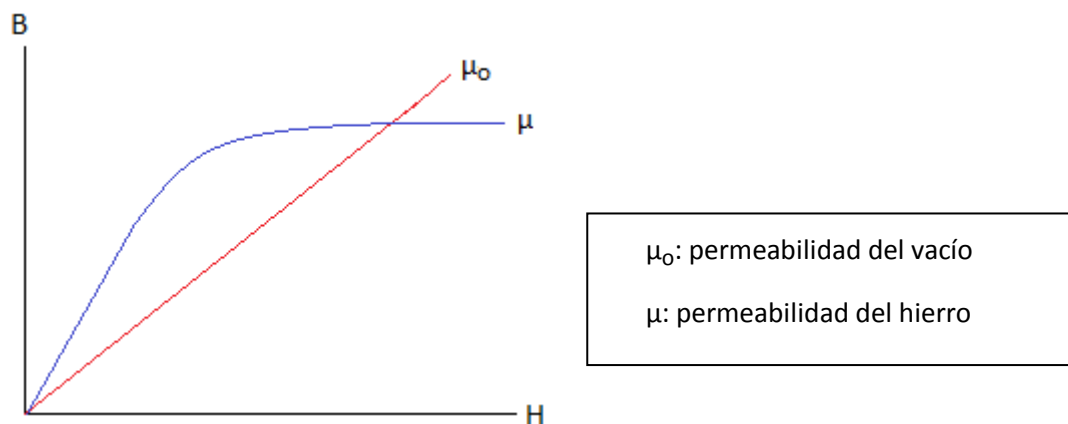


Figura 12. Permeabilidad del aire y del hierro.

3.4. Preselección del Tipo de Sensor

Según el comparativo de la tabla 5 se pueden considerar el transformador de corriente y la bobina Rogowski como las mejores opciones para la medición de corrientes, debido a cualidades como la linealidad, saturación y la capacidad de medir altas corrientes, entre otras.

Tabla 5.*Comparativo de sensores de corriente.*

Tecnología del sensor	Shunt de	Transformador	Sensor de	Bobina
Costo	Muy bajo	Medio	Alto	Bajo
linealidad en el rango de	Muy	Buena	Pobre	Muy
Capacidad de medición	Muy	Buena	Buena	Muy
Consumo de potencia	Alto	Bajo	Medio	Bajo
Problemas de saturación	No	Si	Si	No
Problema de saturación e	No	Si	Si	No
Variación de la salida	Medio	Bajo	Alto	Muy Bajo
Problemas offset de DC	Si	No	Si	No

Nota: William Koon. Nuevos desarrollos en sensores de corriente en medidores de estado

sólido.

3.4.1. Bobina Rogowski y TC Pearson. De acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior se determina según sus características principales y la aplicación en estudio el sensor apropiado para el dispositivo de medida, para esto se analiza el TC Pearson debido a su frecuente utilización en torres instrumentadas a nivel internacional, y la bobina CWT de la empresa PEM por su practicidad y fiabilidad en la medida de altas corrientes.

3.4.1.1. TC Pearson. Estos transformadores de corriente son normalmente utilizados para la medición de corrientes de impulsos, transitorios y señales periódicas del rango de los Hz hasta unos pocos MHz, ofreciendo buena respuesta en amplitud y frecuencia. Ya que su núcleo es de material ferromagnético el pulso no debe exceder su valor determinado de corriente, de lo contrario se podría saturar magnéticamente, este parámetro se da por la relación $\frac{I}{F_{max}}$, donde I es la corriente a medir y F_{max} es la frecuencia máxima de la bobina. Esto podría reducir su capacidad en frecuencia y flujo de campo magnético, sin embargo, estos problemas pueden ser

minimizados por un proceso de polarización el cual restablece el flujo del núcleo a su valor actual.

El primario de este transformador es el mismo conductor que transporta la corriente, y en el bobinado secundario se tiene un alambre alrededor del núcleo magnético (figura 13), las bobinas del secundario se configuran de modo que se obtenga un valor específico teniendo en cuenta la magnitud de la corriente a medir.

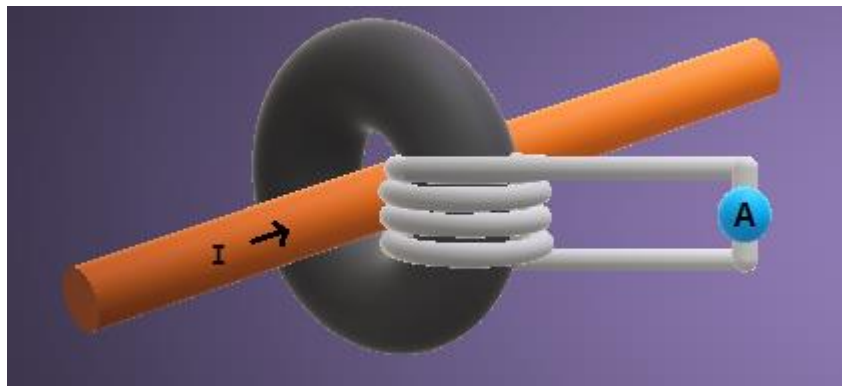


Figura 13. Representación del TC Pearson.

3.4.1.2. Bobina CWT. Una de las características de las bobinas CWT es la tensión inducida en sus terminales que es la derivada de la corriente del bucle de la bobina, por lo que es necesario un integrador para convertir la tensión a una magnitud proporcional a la corriente. Cuenta con un amplio ancho de banda hasta los 17 MHz lo que permite definir la forma de onda de manera precisa cuando se tienen corrientes en kA en un corto intervalo de tiempo del orden de los μs , pudiendo medir cambios de corriente hasta de $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

La bobina consta de un arrollamiento de N vueltas/m, en un núcleo no magnético y con una sección transversal A en mm^2 , ver figura 14. Así la tensión inducida en la bobina está dada por:

$$V_1 = \mu_o \cdot N \cdot A \cdot \frac{di}{dt} = H \cdot \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Donde H [Vs/A] es la sensibilidad de la bobina, i es la corriente que pasa por el bucle.

De manera que para representar el comportamiento de la corriente a través de la tensión se debe integrar de la forma:

$$V_2 = \frac{1}{T_i} \cdot \int e \cdot dt = R_{SH} \cdot I \quad (6)$$

Donde $T_i = R_o C_1$ y $R_{SH} = H/T_i$, es la sensibilidad del transductor [mV/A] (Power Electronic Measurements Ltd, 2002).

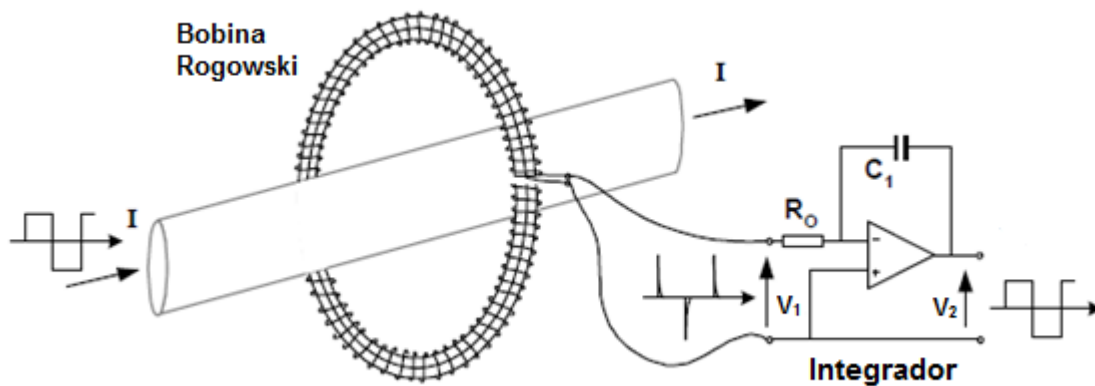


Figura 14. Modelo de la bobina Rogowski CWT con Integrador.

Nota: adaptada de Application notes (2002). Power Electronic Measurements Ltd.

A raíz del comportamiento propio, la bobina Rogowski no puede sensar la componente DC de la corriente medida. Existe por lo tanto una frecuencia por debajo en la cual la ganancia disminuye (F_L), además también existe un límite superior donde la ganancia disminuye (F_H), estos límites de medición están dentro del rango de 3dB como se puede observar en la figura 15.

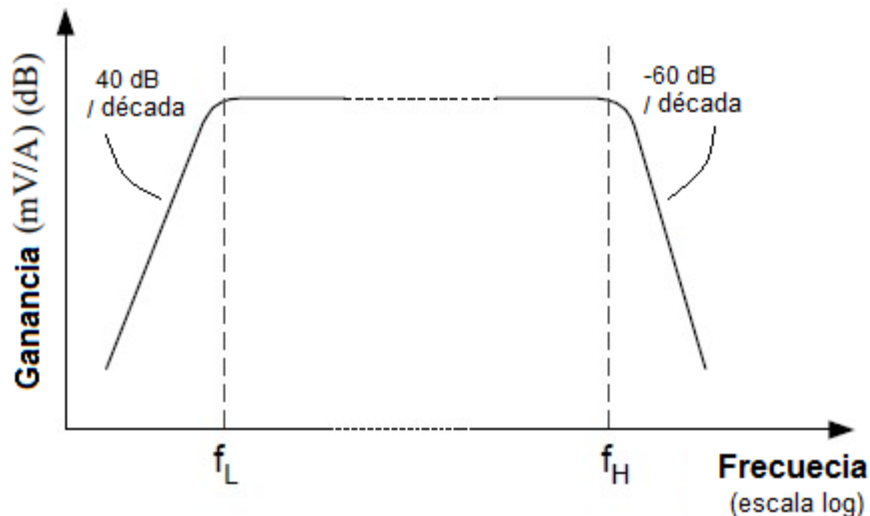


Figura 15. Ganancia vs frecuencia de la bobina Rogowski.

Nota: adaptada de Application notes (2002). Power Electronic Measurements Ltd.

3.5. Comparativo TC Pearson y Bobina CWT

En este análisis se tuvo en cuenta algunos transformadores de corriente Pearson utilizados en las torres de medición antes mencionadas, y bobinas Rogowski CWT por la capacidad amperimétrica de medición y rango de frecuencia aceptable para la medición de corriente, en la tabla 6 se presentan especificaciones más detalladas según su referencia.

Tabla 6.

Especificaciones de TC Pearson y bobina CWT.

Referencia	Pearson 1330	Pearson 1080	Pearson 4418	PEM CWT1500	PEM CWT150 OLF
Sensibilidad [mV/A]	5	5	1	0,02	0,02
Resistencia de salida [Ω]	50	50	50	50	50
Corriente máxima [kA]	100	200	200	300	300
Tensión de salida [V]	500	1000	200	6	6
Pico di/dt [kA/ μ s]	-	-	-	40	11
Corriente máxima rms [A]	1400	750	400	-	-
Droop [%/ms]	1	2	0,05	0,035	0,007

Tiempo de subida util [μ s]	0,25	0,25	0,2	-	-
Producto de corriente-tiempo [A-s]	65	25	6	-	-
Ruido max [mVpp]	-	-	-	3	4
F_L corte 3dB [Hz]	0,9	3	0,7	0,03	0,008
F_H corte 3dB [MHz]	1,5	1,5	2	10*-16**	5*-10**
Fase de cable a 50Hz [deg]	-	-	-	0,06	0,012
I/F figure [A/Hz]	400p	150p	40p	-	-
Conector de salida	UHF (so-239)	Tipo N	BNC (UG- 290A/U)	-	-
Blindaje	Doble	Doble	Sencillo	Galvanico	Galvanico
Temperatura de operación °C]	0-65	0-65	0-65	0-100	-
Peso [Kg]	8,03	7,85	0,6237	-	-

Nota: * Para longitud de bobina de 300 mm.

** Para longitud de bobina de 700 mm.

Especificaciones PEM CWT y Pearson Electronics.

3.5.1. Análisis de los TC Pearson. Estos transformadores presentan una buena respuesta para formas de onda 8/20 μ s, cuentan con un rango de frecuencia aceptable para caracterizar el comportamiento de la señal, pero no la suficiente para admitir cambios elevados de di/dt en detalle, también requieren de circuitos externos para llevar la señal al osciloscopio ya que presentan valores altos de tensión en sus terminales, por otra parte el TC Pearson 1330 no es adecuado para la magnitud de corriente que podría presentarse, pues, aunque la corriente media se encuentra alrededor de los 40 kA, se han registrado corrientes de hasta 130 kA.

3.5.2. Análisis de las Bobinas CWT. Las bobinas CWT presentan características prácticas para un adecuado acondicionamiento, ya que cuenta con salidas de tensión adecuados para medida e interconexión con osciloscopios, también cuentan con gran ancho de banda lo que permite observar la intensidad en los picos de onda cuando se presentan en tiempos muy cortos, para este caso se tienen en cuenta las bobinas de baja frecuencia (L_F) y alta frecuencia (H_F), la

bobina CWT1500LF tiene una frecuencia baja extendida que puede limitar distorsiones para pulsos duraderos, sin embargo también presenta un gradiente di/dt muy bajo ($11 \text{ kA}/\mu\text{s}$), cuando una descarga de rayo podría variar desde $2,5$ a $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$ (Torres, 2002), de esta manera se considera favorable la elección de la bobina CWT1500 ya que cuenta con un di/dt de hasta $40 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

La Bobina Rogowski ofrece mejor desempeño para la medición de alta intensidad de corriente sin problemas de saturación, además cuenta con anchos de banda muy amplios para caracterizar la señal con más detalle, entre otras ventajas respecto a los diferentes sensores dando mayor confiabilidad en la medida.

Considerando los anteriores argumentos se selecciona la bobina Rogowski CWT1500 con las siguientes especificaciones:

- Ancho de banda $0,03 \text{ Hz} - 10 \text{ MHz}$
- Corriente pico máxima 300 kA
- Gradiente $di/dt = 40 \text{ kA}/\mu\text{s}$
- Tensión de salida = 6 V
- Sensibilidad = $0,02 \text{ mV/A}$
- Longitud de circunferencia = 700 mm
- Cable coaxial de 4 metros de longitud

4. Acondicionamiento de la Señal

Como se trató anteriormente, la tensión inducida en los terminales de la bobina es proporcional a la derivada de la corriente, lo que implica un circuito integrador de manera que se

represente una forma de onda de tensión proporcional a la forma de onda de la corriente que se desea medir.

4.1. Tipos de Integración

Existen diferentes arreglos que se pueden utilizar al momento de integrar la señal:

Circuito integrador pasivo

Está constituido por una serie de resistencias y condensadores, que son determinados de acuerdo a los valores de capacitancia e inductancia propios de la bobina, para adecuar el ancho de banda requerido para la medición (Ray y Hewson, 2000).

Este acondicionamiento es aplicable para mediciones con frecuencias mayores a 100 kHz o para pulsos de corta duración ($<5 \mu\text{s}$).

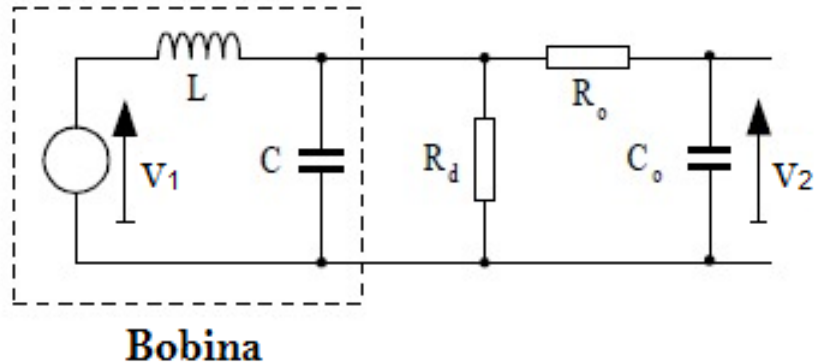


Figura 16. Circuito integrador pasivo de la bobina Rogowski.

Nota: adaptada de Power Electronic Measurements Ltd (2000). High Performance Rogowski Current Transducers.

Donde C y L son la capacitancia y la inductancia que representan la bobina, R_d la resistencia de salida, R_o y C_o son las resistencias y el capacitor para la integración de la señal y V_2 es la salida de tensión del integrador.

Circuito integrador activo

Esta implementado principalmente por amplificadores operacionales (OPAM), que realizan la misma función que los circuitos RLC, pero pueden operar en un rango más ancho en frecuencia. Normalmente para conseguir una respuesta en baja frecuencia (50 Hz) se necesitaría una bobina muy grande, pero sería más complicado su arreglo, de tal manera que un integrador de esta clase puede ser buena elección ya que cuenta con una configuración de tal modo que a bajas frecuencias aumenta la ganancia, sin embargo, también aumenta el ruido en baja frecuencia.

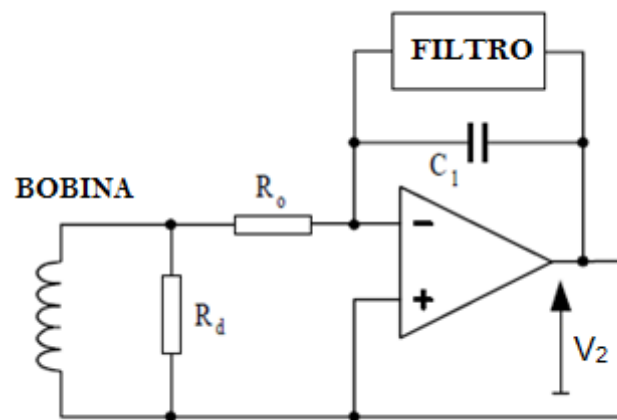


Figura 17. Circuito integrador activo de la bobina Rogowski.

Nota: adaptada de Application notes (2002). Power Electronic Measurements Ltd.

El comportamiento de ganancia-frecuencia es inversamente proporcional y está dado por la fórmula:

$$\frac{V_2}{I} = \frac{R_{SH}}{(1 - j \frac{f1}{f})^2} \quad (7)$$

Donde R_{SH} es la sensibilidad nominal, I es la corriente, $f1 = \frac{F_L}{1,55}$ y f es la gama de frecuencias. Ya que, para frecuencias muy bajas, la ganancia es muy grande, es necesario reducir

la ganancia del integrador conectando un filtro pasa bajas en paralelo con la capacitancia integradora C_I , además en estas frecuencias no se ve afectada la precisión. De manera que la ganancia del integrador se puede representar como la figura 18 (Ray y Hewson, 2000).

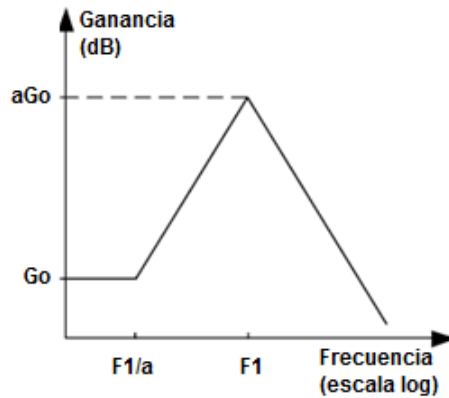


Figura 18. Relación ganancia frecuencia del integrador de la bobina Rogowski.
Nota: adaptada de Application notes (2002). Power Electronic Measurements Ltd.

Circuito auto integrador

Este circuito, figura 19, aprovecha la inductancia de la bobina que, en diferentes adecuaciones con resistencias y capacitores, permite realizar las medidas con frecuencias bajas hasta los MHz, y cuenta con la ventaja de no utilizar circuito integrador externo.

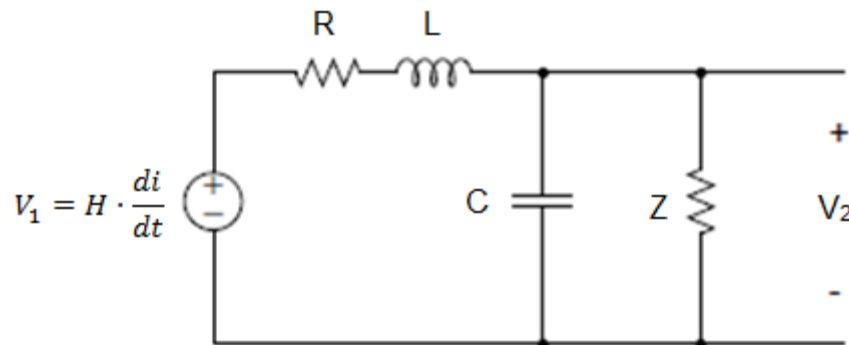


Figura 19. Circuito autointegrador de la bobina Rogowski.
Nota: modificado de Martha Argüeso Montero (2005). Estudio de una bobina de Rogowski como sonda detectora de pulsos de alta frecuencia.

Donde R es la resistencia de la bobina, L es la inductancia, C la capacidad parásita, Z es la impedancia de integración y V_2 es la tensión de salida. Dependiendo las características de la bobina se podría despreciar la R .

4.2. Bloque de Acondicionamiento

El circuito integrador adecuado para el acondicionamiento de la señal, es el integrador activo CWT, ya que presenta mejor respuesta en baja y alta frecuencia con una bobina de poca inductancia y con mayor sensibilidad sin la necesidad de utilizar una bobina muy grande. También presenta otras ventajas al tener una bobina lo más pequeña posible pues también disminuye el ruido en la medida, por la capacitancia y resistencia de dicha bobina.

El circuito integrador utilizado es el mostrado en la figura 20, donde se utiliza un op-amp no invertido ya que tiene la ventaja de eliminar la capacitancia vista desde la salida, cuenta con un integrador pasivo pasa baja compuesto por R_o y C_o , ya que $\frac{1}{\omega C_o} \gg R_o$ en baja frecuencia aportando una ganancia unitaria hacia el amplificador operacional. También, cuenta con un circuito que limita la ganancia a bajas frecuencias para la salida del integrador (circuito pasa baja en paralelo con C_l) y aporta una ganancia unitaria para altas frecuencias debido a que $\frac{1}{\omega C_1} \ll R_1$.

El integrador CWT cuenta con un conector 2,1/2,5 mm para una fuente de alimentación de 12 V para tener funcionamiento continuo, la cual desconecta las baterías 4xAA de NiHM recargables al estar conectada al integrador. Además, el integrador cuenta con un conector tipo BNC para la conexión de un cable tipo coaxial con terminales BNC-BNC de 0,5 m.

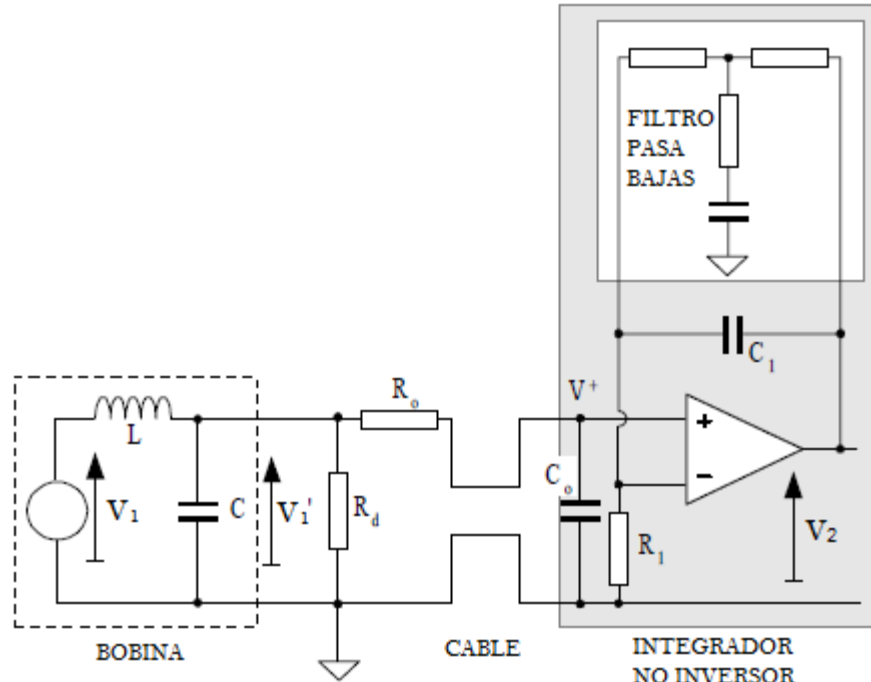


Figura 20. Circuito de la bobina e integrador Rogowski utilizando OP-AMP no invertido.
Nota: adaptada de Application notes (2002). Power Electronic Measurements Ltd.

5. Adquisición de Datos

5.1. Osciloscopio

Seleccionar el equipo de adquisición de datos, al igual que el sensor es de vital cuidado ya que de lo contrario el dispositivo de medida estaría por si solo distorsionando la señal receptada en la primera etapa, para esto se debe tener establecido qué características tiene la señal que se desea registrar, en este caso una señal tipo rayo de hasta 130 kA, frecuencia máxima de 10 MHz, duración de 0,5 segundos (posibles descargas consecutivas).

5.1.1. Criterios de Selección. La finalidad del dispositivo de medida es obtener la señal del rayo, es decir, la curva corriente vs tiempo sensada en la etapa inicial, por lo cual se requiere un

equipo capaz de registrarla y convertirla a una señal digital con una tasa de muestreo apropiada sin alterar de manera significativa las características principales de la señal.

Con este fin se selecciona un osciloscopio digital de la empresa Pico Technology especializada en equipos de alta precisión iniciando con tres criterios de selección, ancho de banda, velocidad de muestreo y profundidad de memoria para finalmente hacer un comparativo entre las opciones que más se ajustan al requerimiento.

5.1.1.1. Ancho de Banda. El primer y más importante criterio a considerar es el ancho de banda, este valor indica cual es el valor máximo de frecuencia aceptado por los amplificadores de frente del osciloscopio, este debe ser considerablemente mayor al valor máximo de frecuencia de la señal tipo rayo en tiempo real.

Del análisis previo se define que la señal tiene una frecuencia máxima de 10 MHz, por regla general Picoscope aconseja un ancho de banda nominal 5 veces mayor a la frecuencia máxima de la señal.

$$BW = 5 * Fmax \quad (8)$$

$$BW = 5 * 10 \text{ MHz} = 50 \text{ MHz} \quad (9)$$

De acuerdo a la aplicación del dispositivo se tiene una señal no periódica con componentes armónicos de alta frecuencia, por lo tanto, es un requisito importante seleccionar el ancho de banda del osciloscopio según la estimación realizada.

5.1.1.2. Velocidad de Muestreo. El segundo criterio a tener en cuenta es la velocidad de muestreo, el equipo de adquisición de datos debe ser capaz de digitalizar la señal en un tiempo apropiado, es ahí donde se pueden presentar mayores problemas y registrar una señal

distorsionada, el rayo es una señal transitoria de muy corta duración y exige que la velocidad de muestreo sea lo suficientemente alta para recrearla. Según el criterio de Nyquist la velocidad de muestreo debe ser 2 veces la frecuencia máxima de la señal.

$$SR = 2 * Fmax \quad (10)$$

$$SR = 2 * 10 \text{ MHz} = 20 \text{ MS/s} \quad (11)$$

Este valor da un acercamiento al valor requerido para la aplicación, aunque no sea el más apropiado. Existe normativa para instrumentos de medida de impulsos tipo rayo como la IEC-61083 e IEEE-1122 en las que se establece que la velocidad de muestreo debe ser 4 veces la frecuencia máxima de la señal.

$$SR = 4 * Fmax \quad (12)$$

$$SR = 4 * 10 \text{ MHz} = 40 \text{ MS/s} \quad (13)$$

Por otro lado, Picoscope fracciona la velocidad de muestreo en el número de canales en uso, para la aplicación un solo canal es necesario por lo tanto la velocidad de muestreo nominal estaría siendo utilizada en totalidad por el único canal.

5.1.1.3. Profundidad de Memoria. La profundidad de memoria es un criterio enlazado con la velocidad de muestreo dado que, a mayor número de muestras por segundo, mayor deberá ser la capacidad de memoria del osciloscopio. La importancia de elegir de manera correcta este parámetro radica en que limita la velocidad de muestreo a valores muy bajos mostrando un aparente registro favorable de la señal.

Si se desea registrar una señal de 500 μ s segundos de duración con un osciloscopio de 100 MS/s de velocidad de muestreo y 1,5 kS de profundidad de memoria, la memoria me limita la

velocidad a 3 MS/s a pesar de que el valor nominal es de 100 MS/s. Ahora si se registra la misma señal con un osciloscopio de 100 MS/s de velocidad de muestreo y 10 kS de profundidad de memoria la velocidad de muestreo mínima requerida sería de 200 MS/s razón por la cual no podría realizar este registro.

Para estimar la profundidad de memoria se debe establecer el tiempo de duración de la señal (t_s) y la velocidad de muestreo, para registrar una señal impulso de 10 MHz por 0,5 segundos a una velocidad de muestreo de 40 MS/s.

$$MD = SR * t_s \quad (14)$$

$$MD = \frac{40 \text{ MS}}{s} * 0,5 \text{ s} = 20 \text{ MS} \quad (15)$$

Se establece que la memoria mínima del osciloscopio debe ser de 20 MS.

5.1.1.4. Resolución. Teniendo en cuenta que el osciloscopio recibe en su entrada una señal analógica la cual convierte por medio de un módulo interno análogo-digital y la almacena temporalmente hasta ser transmitida al equipo de almacenamiento final, La resolución del osciloscopio es un parámetro de mayor relevancia según sea la aplicación. Para señales donde un cambio del 0,1% es significativo se debe considerar el número de bits que proporcione una codificación más precisa.

Al número de bits se le atribuye los niveles, y a su vez el porcentaje de error como se describe en la tabla 7:

Tabla 7.*Error asociado a la resolución.*

Resolución	Niveles	Ancho del paso [mV] con $V = \pm 6$ V	Ancho del paso [A] con $I_{max} = \pm 300$ kA	Error % [ancho de paso/ I_{max}]*100
8 bits	256	46,875	2343	0,3906
12 bits	4096	2,9297	146,4844	0,0244
14 bits	16384	0,7324	36,6211	0,0061
15 bits	32768	0,3662	18,3105	0,0031
16 bits	65536	0,1831	9,1553	0,0015

Para instrumentos de señales tipo rayo las normas IEC-61083 e IEEE-1122 establecen que la resolución del convertidor análogo-digital debe ser igual o mayor a 9 bits (Cadavid, 2014).

5.1.2. Serie 3000. Picoscope ofrece osciloscopios serie 3000, con valores hasta 200 MHz de ancho de banda, 512 MS de profundidad de memoria, 2 o 4 canales, 1 GS/s de velocidad de muestreo en tiempo real, ofrecen disparo avanzado y analizador de espectro entre sus funciones principales.

De acuerdo a los criterios seleccionados anteriormente se pre-seleccionan las referencias cuyas especificaciones técnicas se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8.*Especificaciones técnicas serie 3000.*

SERIE 3000	3203D	3204D	3205D	3206D
VERTICAL				
Número de canales	2	2	2	2
Ancho de banda	50 MHz	70 MHz	100 MHz	200 MHz
Resolución	8 bits			
HORIZONTAL				
Máxima velocidad de muestreo (Tiempo real)				
1 canal				1 GS/s
2 canales				500 MS/s
Máxima velocidad de muestreo (Tiempo				

equivalente)			2,5 GS/s	
1 canal			2,5 GS/s	
2 canales			10 MS/s dividida entre canales activos	
Máxima velocidad de muestreo (Transmisión USB)			125 MS/s dividida entre canales activos	
Memoria buffer	64 MS	128 MS	256 MS	512 MS

Nota: adaptada de Oscilloscope, Pico Technology (2017). Pico Technology.

Dado que la señal a registrar no es una señal periódica se debe usar el modo en tiempo real con 1 GS/s de velocidad de muestreo para todas las referencias, teniendo en cuenta que el tiempo de duración de la señal es de 0,5 segundos todas las referencias estarían registrando la señal con una velocidad de muestreo de 128 MS/s, 256 MS/s, 512 MS/s y 1,024 GS/s respectivamente. Aparentemente solo la referencia 3206D sobrepasa el valor nominal de velocidad de muestreo sin embargo no es la única razón para considerar descartarla, junto con las demás referencias. La resolución de los osciloscopios serie 3000 es de 8 bits por lo cual se debe considerar que dada la aplicación no es favorable, en el caso de montajes donde el presupuesto es limitado quizás este valor de resolución pueda ajustarse al diseño.

5.1.3. Serie 4000. Los osciloscopios de la serie 4000 de Picoscope incluyen alimentación por USB 2.0 por lo que no es necesaria una fuente de alimentación externa, además de transferir los datos al PC a gran velocidad. Las especificaciones técnicas de estos osciloscopios se listan en la tabla 9:

Tabla 9.
Especificaciones técnicas serie 4000.

SERIE 4000	4424	4224
	VERTICAL	
	10 MHz en rango ± 50 mV	
Número de canales	4	2
Ancho de banda	20 Mhz	
Resolución	12 bits (hasta 16 bits con mejora de la resolución)	
	HORIZONTAL	

Máxima velocidad de muestreo		
1 canal y 2 canales	80 MS/s	80 MS/s
3 y 4 canales	20 MS/s	
Memoria buffer	32 MS compartidas entre canales	

Nota: adaptada de Oscilloscope, Pico Technology (2017). Pico Technology.

De lo anterior se puede evidenciar que esta serie tiene una mayor resolución la cual sería apropiada pero el ancho de banda es muy bajo, al no cumplir el primer criterio de selección esta serie no sería recomendable para registrar la señal tipo rayo esperada.

5.1.4. Serie 5000. La siguiente serie presentada por Picoscope es la serie 5000 combina la velocidad de muestreo de la serie 3000 con la resolución de la serie 4000 creando una serie de osciloscopios con resolución flexible, gran capacidad de memoria, extenso ancho de banda y alta velocidad de muestreo para gran rango de aplicaciones.

5.1.4.1. Ancho de Banda y Velocidad de Muestreo. El ancho de banda de estos equipos es de hasta 200 MHz con una velocidad máxima de muestreo de 1 GS/s en tiempo real (señales no periódicas o pulsos) y hasta 10 GS/s en tiempo equivalente (señales periódicas).

5.1.4.2. Resolución. La resolución de un osciloscopio digital consiste en la configuración del convertidor análogo-digital CAD la mayoría de las referencias de Picoscope usan convertidores de 8 bits intercalados, la serie 5000 Picoscope implementa una nueva configuración de los CAD para aumentar la resolución sin afectar el rendimiento de los equipos, incorporando núcleos individuales de CAD de alta resolución conectados en serie o en combinaciones en paralelo para diferentes canales en uso y número de bits.

5.1.4.3. Portabilidad. Los osciloscopios Picoscope 5000 son portables y ligeros, su conexión a PC vía USB 2.0 permite alimentarse directamente del PC sin necesidad de fuentes externas esto facilita la autonomía de la instalación importante en la aplicación dicha.

De acuerdo a las tablas 10 y 11 las referencias 5242B y 5442B no serían apropiadas ya que la memoria es inferior a 20 MS para la configuración de 12 bits en adelante, y dado que solo se tiene un canal en uso no se requiere adquirir un equipo de 4 canales analógicos, por lo que las referencias 5443A y 5443B se excluyen, ahora sí se analiza la referencia 5243B se encuentra que la velocidad de memoria mínima requerida para registrar una señal de 0,5 segundos es de 128 MS/s con lo cual sólo sería posible configurar el osciloscopio en 12 bits, a diferencia de la referencia 5243A donde con la misma duración la velocidad de memoria mínima es de 64 MS/s haciendo posibles las configuraciones de 12, 14 y 15 bits, además en términos de costo es la opción más favorable.

A continuación, se listan las principales características de los equipos, ver más en apéndice B.

Tabla 10.

Especificaciones técnicas serie 5000.

SERIE 5000	5242B	5442B	5243A	5443A	5243B	5443B
VERTICAL						
Número de canales	2	4	2	4	2	4
Ancho de banda	60 MHz	60 MHz	100 MHz*	100 MHz*	100 MHz*	100 MHz*
Resolución	8, 12, 14, 15 y 16 bits					
HORIZONTAL						
Máxima velocidad de muestreo		8 bits 1 GS/s	12 bits 500	14 bits 125	15 bits 125	16 bits 62,5
1 canal		500 MS/s	MS/s	MS/s	MS/s	MS/s
2 canales		MS/s	250	125	125	-
3 y 4 canales		250 MS/s	MS/s	MS/s	MS/s	-
			125 MS/s	125 MS/s	-	
Memoria buffer 8 bits	32 MS	32 MS	64 MS	64 MS	128 MS	128 MS
Memoria buffer \geq 12 bits	16 MS	16 MS	32 MS	32 MS	64 MS	64 MS
Precio (US\$)	1315	1805	1485	2055	1645	2305

Nota: *para 16 bits 60 MHz.

Adaptada de Oscilloscope, Pico Technology (2017). Pico Technology.

Los principales criterios de la señal a registrar se muestran en la tabla 11

Tabla 11.

Parámetros señal esperada.

Principales criterios de	
Ancho de banda	50
Velocidad de	40
Profundidad de	20
Duración de la señal	0,5 s
Resolución	≥ 9
Número de canales	1

5.2. Ordenador

Una vez registrada la señal es necesario un computador capaz de almacenar definitivamente la señal y a su vez que su consumo sea el más bajo posible al ser instalado para un funcionamiento continuo.

5.2.1. Criterios de Selección. Existen variedad de tipos, marcas y diferentes características de computadores disponibles, sin embargo, estas deben seleccionarse de acuerdo a su aplicación y necesidades.

5.2.1.1. Procesador. El procesador del PC deberá ser de alto rendimiento y bajo consumo, entre los disponibles en el mercado están los procesadores Intel y AMD quienes ofrecen gran variedad de opciones para diferentes aplicaciones y presupuestos.

5.2.1.2. Memoria RAM. La memoria RAM es la encargada de almacenar los programas y datos de forma temporal, esta memoria permite leer y escribir datos a diferentes velocidades y esta interactúa con el procesador. Esto será de gran importancia para una transmisión rápida de los datos tomados del osciloscopio al computador.

5.2.1.3. Disco Duro. Esta capacidad de memoria se determina de acuerdo a los eventos esperados en determinado periodo, tiempo de duración de la señal y especificaciones del osciloscopio como la resolución y frecuencia de muestreo.

Teniendo en cuenta que la capacidad de almacenamiento del osciloscopio seleccionado es de 32 MS, con una configuración de 12 bits y una duración por evento de 0,5 segundos, se obtiene una velocidad de muestreo de 64 MS/s por lo que se requiere una memoria interna mínima por evento MI de:

$$MI = 32 \text{ MS} * 12 \text{ bits} = 384 \text{ Mbits} = 48 \text{ MB} \quad (16)$$

Para las configuraciones de 14 y 15 bits la memoria requerida por evento sería de 56 MB y 60 MB respectivamente.

5.2.1.4. Sistema Operativo. Se requiere un sistema operativo compatible con los programas y aplicaciones para configurar los equipos, como también la compatibilidad con el procesador, entre los sistemas operativos más comunes se encuentran Linux, Windows, Mac Os entre otros.

5.2.1.5. Consumo. Ya que se puede considerar que el dispositivo de medición se encuentre en un lugar alejado y esté funcionando de manera continua, el consumo de potencia del equipo debe ser el más bajo posible y a su vez óptimo para la aplicación.

5.2.2. Fit PC4 PRO. De acuerdo con los requerimientos técnicos analizados se selecciona el computador FitPC4 PRO el cual es un equipo portátil de alto rendimiento, gran capacidad de memoria y muy bajo consumo. El sistema operativo Windows 7 se considera la mejor opción debido a su compatibilidad con la mayoría de programas. La tabla 12 muestra los principales

criterios previamente enunciados, las demás especificaciones técnicas pueden verse en el apéndice C.

Tabla 12.

Especificaciones técnicas computador.

Procesador	AMD GX-420CA SoC (2 GHz)
Memoria	16 GB
Disco duro	1 TB
Sistema operativo	Windows 7, 32-bits
Consumo	6 W – 24 W

6. Transmisión de Datos

En esta sección se establecerán diferentes características de los conductores utilizados para la transmisión de la señal y de datos, de manera que se garantice la calidad de la señal y protección contra las interferencias electromagnéticas.

Acoplamiento capacitivo

Uno de los problemas que causan los rayos es el acoplamiento capacitivo, en el cual se inducen tensiones creadas por el campo electromagnético por el rayo, en los extremos de los cables de señales y transmisión. Figura 21.

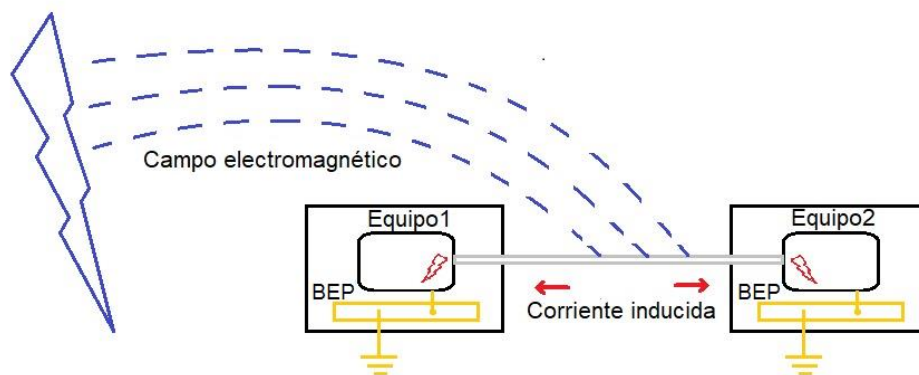


Figura 21. Acoplamiento capacitivo.

Para evitar esta clase de alteraciones se opta por un conductor coaxial, el cual es utilizado para transmitir señales eléctricas de alta frecuencia, además tiene un conductor concéntrico exterior que sirve como referencia de tierra y retorno de corrientes, y un conductor interior que lleva la información.

Acoplamiento inductivo

Este acoplamiento se da al presentarse campo electromagnético de gran intensidad en los terminales de los cables, produciendo tensiones inducidas V_i hasta de 500 kV. Ver figura 22.

Otra de las características a tener en cuenta es el ancho especificado (-3dB), que puede variar debido a la longitud del coaxial, aportando capacitancia e inductancia al modelo planteado.

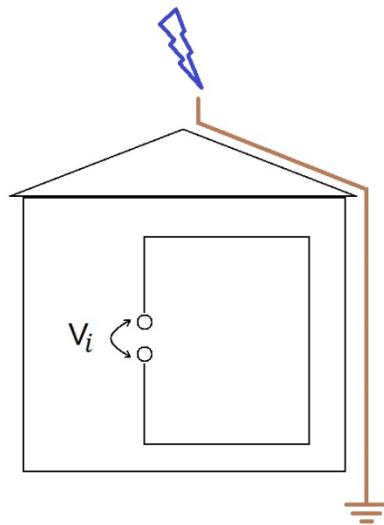


Figura 22. Acoplamiento inductivo.

El conductor seleccionado es el coaxial de PEM que esta acoplado al integrador de la bobina Rogowski, su longitud estándar es de 0,5 metros, sin embargo, se cuenta con pruebas para medición de hasta 25 metros de longitud, sin ninguna diferencia entre señales, aunque con una demora en la medición de 5 ns/m.

El cable del integrador al osciloscopio tiene un conector BNC, muy importante para la seguridad del equipo, de modo que, al ocurrir una falla por ruptura de aislamiento en la bobina, exista una conexión a tierra con dicho conector.

6.1. Línea de Comunicación Digital

Una vez digitalizada la señal analógica en el osciloscopio entregada por el sensor, es necesario transferir estos datos al computador lo más rápido posible, de manera que la memoria del osciloscopio esté disponible para un nuevo evento.

La mayoría de los osciloscopios cuentan con conectores USB 2.0 y 3.0, siendo este último el más rápido con una transmisión de datos de 125 MS/s. Como anteriormente se calculó la velocidad mínima de muestreo para digitalizar la señal es de 40 MS/s, así, la velocidad del conector USB 3.0 es más que suficiente para la capacidad de transmisión necesaria, incluso si se requiere aumentar la frecuencia de muestreo.

6.2. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Al momento de presentarse la descarga, el dispositivo debe ser capaz de registrar el tiempo y la posición exacta de la descarga, la configuración de la fecha y hora del computador por sí sola no será suficiente debido a que se requiere el instante en el que se presenta el evento en el orden de los μ s. Se requiere entonces un equipo adicional con la capacidad de sincronizar la hora exacta de manera que se pueda comparar cada evento con el sistema de localización y detección de tormentas que se realiza mediante antenas.

Se selecciona un GPS GARMIN 17x HVS tipo antena para aplicaciones en exterior, está compuesto por una aleación de plástico impermeable que cumple con la norma IEC 529 IPx7, resistente al agua y tiene protección contra condiciones extremas climatológicas. Cuenta con el

sistema de posicionamiento WAAS que funciona con un sistema de satélite y estaciones terrestres, que hace que el dispositivo sea más rápido. GARMIN 17x HVS cuenta con las siguientes características:

Tabla 13.

Características GPS 17x HVS.

Material de la caja	Aleación de plástico de alto impacto según IEC 529 IPX7
Sensibilidad del receptor	-185 dBW mínimo
Receptor	Sistema de Aumento de Área amplia (WAAS)
Interfaz	Serie diferencial NMEA 0183
Tiempo de adquisición	1 μ s
Alimentación	Batería 12 Vdc

Nota: Garmin (2018). GPS 17x HVS Technical Specifications.

El GPS 17x HVS se conecta a un puerto serie RS232 de una computadora a través de un conector DB9. El computador seleccionado FitPC4 no tiene un puerto RS232 por lo que se debe hacer una adaptación para conexión USB como se muestra en la figura 23.

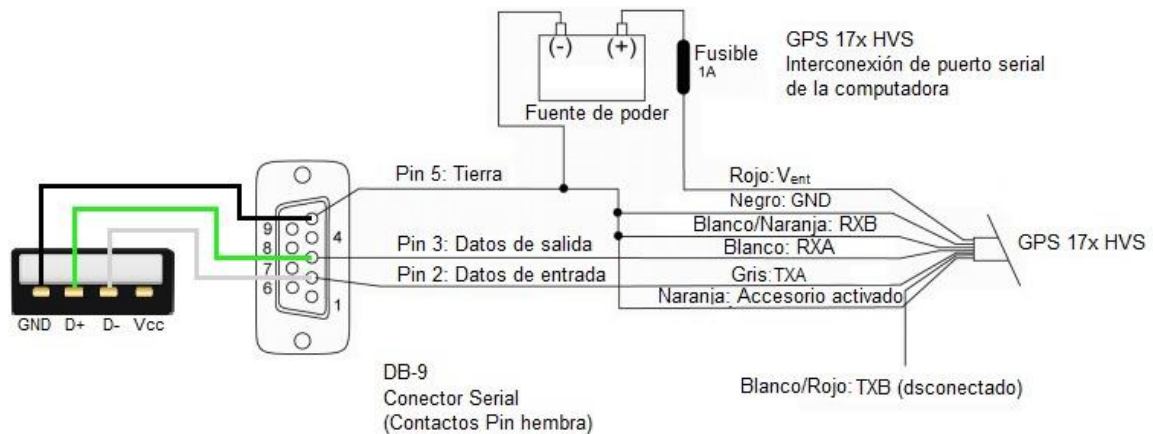


Figura 23. Esquema de conexión del GPS 17x HVS a puerto USB.

Nota: adaptada de Garmin (2018). GPS 17x HVS Technical Specifications.

7. Protección del Dispositivo

La norma NTC 4552 plantea las consideraciones que se deben tener en cuenta para la protección contra rayos en estructuras. El dispositivo de medida estará instalado en una estructura elevada, sensible a impactos tipo rayo, aislada, con suministro eléctrico y con componentes metálicos, por lo tanto, dicha estructura deberá tener el correcto sistema de protecciones.

Es necesario considerar que el sensor de medida está diseñado para soportar la descarga y será instalado directamente en el sistema de pararrayos de la estructura, por el contrario, los equipos de registro, transmisión y almacenamiento del dispositivo no están diseñados por sí mismos para protegerse ante los efectos de la descarga atmosférica, el dispositivo deberá ser capaz de registrar más de un evento sin sufrir daños, con este fin se define un sistema de protección que aísle dichos efectos.

El sistema integral de protección contra rayos, SIPRA, recomendado para la correcta protección contra rayos se presenta en el siguiente esquema.

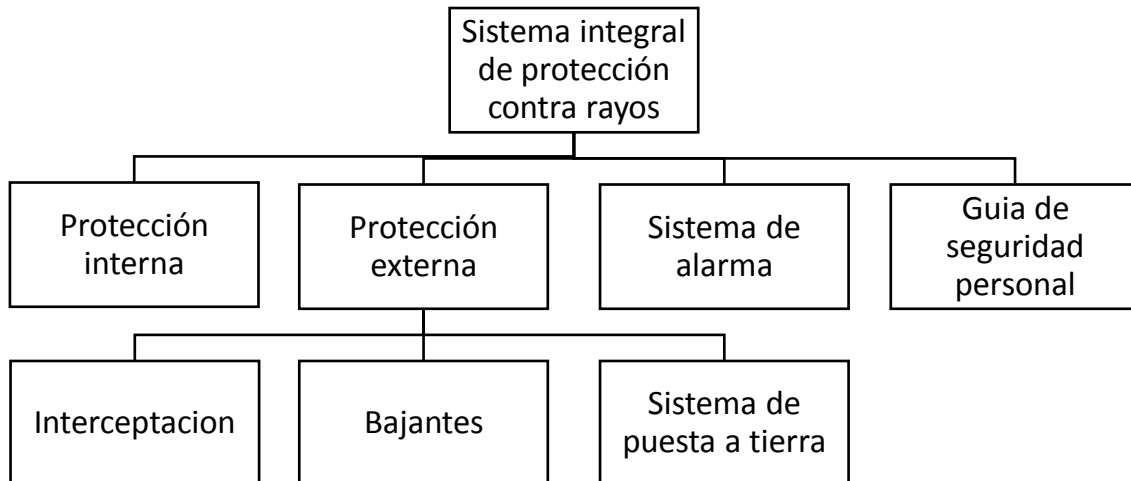


Figura 24. Esquema sistema integral de protección contra rayos

Nota: adaptada de Horacio Torres (2002). El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología.

7.1. Protección Externa

Al iniciarse una descarga atmosférica la corriente buscará el camino más rápido para llegar a tierra. La protección externa se encarga de interceptar y conducir a tierra la corriente de la descarga impidiendo que ésta fluya por los equipos. La figura 25 representa los 3 elementos de la protección externa, la punta captadora, el conductor bajante y el sistema de puesta a tierra.

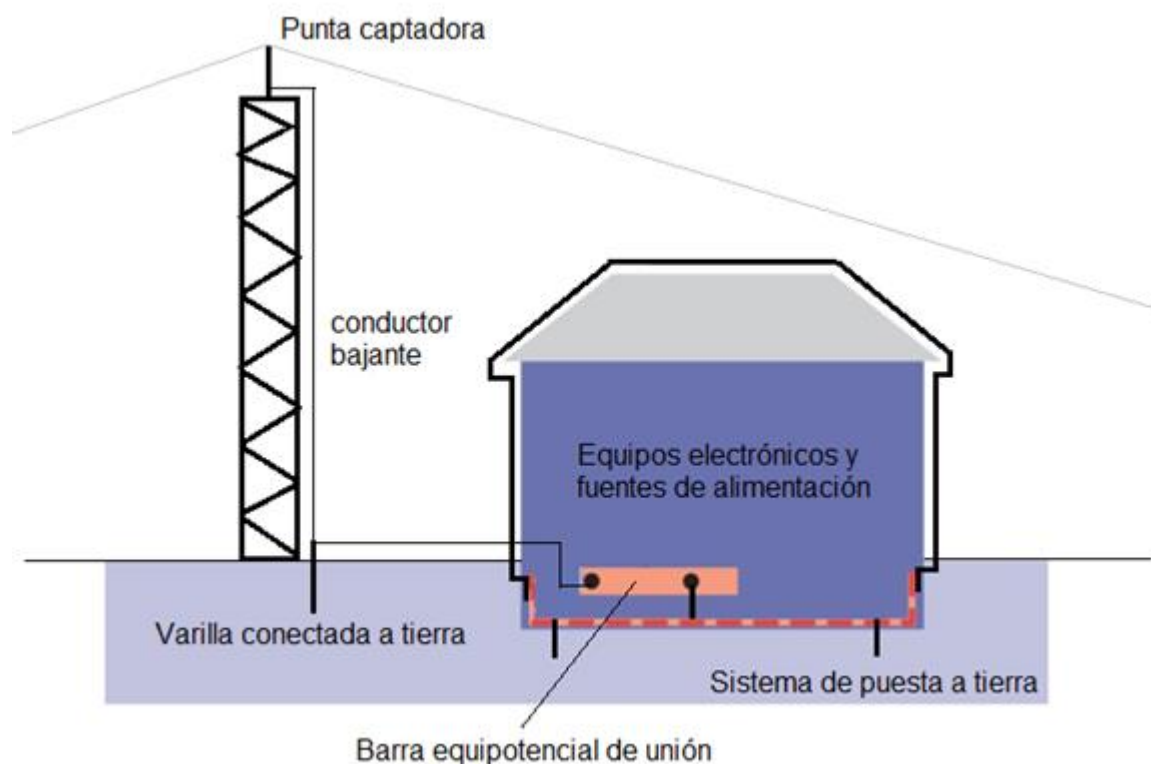


Figura 25. Sistema de protección externa.

El primer componente es el elemento interceptor de la descarga, corresponde a varillas sólidas tubulares en forma de bayoneta, que sobresalen de la parte más alta de la estructura, entre estos elementos se encuentra las puntas tipo Franklin.

El segundo componente son los bajantes o conductores de derivación su función es conducir la corriente del rayo que impacta en las puntas de intercepción y transmitirla al tercer elemento.

El tercer componente es el sistema de puesta a tierra, de este depende la seguridad de los equipos y del personal en sitio encargado, consiste en crear un punto equipotencial a través de varillas o ductos, donde todas las componentes metálicas no energizadas de la estructura se conectan creando un camino de baja impedancia por el cual la corriente de descarga se ve atraída.

De acuerdo a lo mencionado para la protección externa del dispositivo de medida se deber considerar que:

- El dispositivo requiere un sistema SIPRA nivel II, debido a que se esperan impactos directos de rayo con corrientes mayores a 120 kA (el nivel II precisa corrientes pico de hasta 150 kA).
- El elemento captador o punta tipo Franklin debe estar ubicada en las esquinas de la estructura con longitud sobresaliente igual o mayor a 25 cm.
- La zona protegida del pararrayos debe corresponder a un radio menor o igual a 40 m (método de la esfera rodante), para una estructura de hasta 55 m de altura.
- La impedancia de puesta a tierra deberá ser en lo posible inferior a 10 Ω .
- Todos los sistemas de puesta a tierra de la estructura deben estar integrados y el bajante no debe estar expuesto.

7.2. Protección Interna

Debido a la variación de corriente que se presenta durante la descarga di/dt , se inducen tensiones que afectan los equipos representando un serio problema, la protección interna consta de los elementos de protección a estas sobretensiones ya que es de vital importancia que los equipos del dispositivo de medida en estudio estén disponibles cuando se presente otra descarga.

La norma ANSI/IEEE C62-41 recomienda una guía práctica para la protección de equipos electrónicos, teniendo en cuenta la magnitud, di/dt , frecuencias y los tiempos de frente y cola de una descarga típica. De igual forma la norma IEC 61024 define las zonas de protección contra rayos donde su finalidad es desviar la energía de la descarga de los equipos sensibles a daños y alteraciones por efectos electromagnéticos (Torres, 2002).

De acuerdo a la norma IEC 61024, el dispositivo de medida estará expuesto a descargas directa de la forma $10/350 \mu s$ por lo cual exige un sistema de protección interna robusto respecto al definido para la forma de onda $8/20 \mu s$ ya que a esta se asocia un inferior valor de energía a disipar.

De acuerdo a lo mencionado para la protección externa del dispositivo de medida se deber considerar:

- Crear un punto equipotencial donde se deben conectar todos los terminales de ductos, conductores no energizados y partes metálicas de la estructura.
- Instalar de dispositivos descargadores de tensión DPS, estos elementos disipan las tensiones inducidas en los terminales de la estructura a su vez los conductores de fase se conectarán por medio de estos al punto equipotencial.

- Instalar protecciones en las entradas de las fuentes de alimentación de los equipos con el fin de protegerlos de corrientes de retorno por estar conectados al mismo sistema de puesta a tierra.
- Realizar aislamiento galvánico de equipos.
- Sistema de apantallamiento.

7.2.1. Armario Eléctrico. Con el objetivo de evitar daños en los equipos de medida, estos se deben resguardar en un lugar seco y a una temperatura de acuerdo a sus especificaciones. Además, hay que garantizar que las medidas no se vean alteradas por interferencias electromagnéticas producidas por el rayo.

Para proteger los dispositivos de medida contra los impulsos electromagnéticos, se ve la necesidad de un gabinete con cubrimiento de metal para dichos efectos. Ya que el gabinete podría situarse a la intemperie debe estar protegido contra lluvia, sol y polvo, para esto el gabinete debe tener una protección mínima IP55 la cual cuenta con protección contra polvo y chorros de agua a una presión de 30 kN/m².

De acuerdo a los criterios mencionados se selecciona el Armario Eléctrico EMC Compacto Tribeca, referencia MVAC166040M, diseñado y probado para condiciones extremas y con protección frente a perturbaciones electromagnéticas, a continuación, se muestran sus características y normas (Delvalle, 2018).

Tabla 14.
Especificaciones normativas del armario eléctrico.

Característica	Norma
Compatibilidad electromagnética	CEE 89/336 Y DIRECTIVA 2001/108/CE
IP66	IEC EN 62208 Y EN 60529
Construcción	CE de baja tensión. 2006/95/CE

Nota: Delvalle (2018). Armario Eléctrico EMC Compacto Tribeca, Serie Tribeca EMC.

Cumple con normativa RoHs, EMC, RFI y EMI

Certificado UL Nema 4x, 12, 3r y 1 bajo petición. N° File E342220

- Dimensiones(m): alto 1 – ancho 0,6 – fondo 0,4
- Cuenta con una placa de montaje aislante de baquelita
- Junta EMC de EPDM conductora recubierta con Cu y Sn
- Tapa inferior pasacables

7.2.2. Protección para Cables. Debido a la existencia de cables fuera del gabinete, especialmente el cable de captación de la bobina, estos deben ser aislados de los efectos medioambientales y electromagnéticos para prevenir deterioro del cable transmisor y fiabilidad en la medida.

Un tubo de acero galvanizado con recubrimiento en PVC, se considera adecuado de modo que el acero galvanizado repele los campos magnéticos, mientras el PVC lo protege para una posible conducción de corriente eléctrica hacia el armario. Estas protecciones brindan un funcionamiento normal al momento de presentarse el evento, entre sus principales características se encuentran:

- Protección IP55
- Resistencia a la corrosión y al impacto
- Resistencia UV
- Rango de temperatura de -10 a 100 °C

Para la bobina se requerirá una protección diferente a la del cable coaxial, de modo que no interfiera con el campo magnético, y a su vez no quede expuesto a condiciones ambientales. En

este caso se debe tener en cuenta un material paramagnético donde su permeabilidad sea cercana a la del vacío, para cumplir estos requerimientos y para conseguir una curvatura que corresponda a la forma de la bobina se selecciona el tubo termoretráctil de PVC, el cual recubre la bobina y se calienta hasta que se ajusta al diámetro adecuado. A continuación, se presentan algunas de sus características.

- Protección mecánica y anti-abrasiva
- Temperatura de trabajo -45 a +105 °C
- Factor de retracción de 3:1
- Retardante a la llama
- Preparado para instalaciones de hasta 35 kV

8. Resultados

Los equipos del dispositivo para la medición de corrientes de rayos y sus principales características se presentan en la tabla 15.

Tabla 15.

Características principales generales de equipos y elementos seleccionados.

Bobina Rogoswki	Bobina AC CWT1500, 0,03 Hz - 10 MHz, 300 kA, 40 kA/ μ s, 0,02 mV/A, 700 mm longitud circunferencia, 8,5 mm de sección transversal
Conexión bobina-integrador	4 m de longitud, cable coaxial acoplado
Integrador	Integrador activo CWT, conector 2,1/2,5 mm para fuente de poder, 4xAA baterías de NiHM recargables
Fuente de poder	Fuente US21U, 120V AC, 12V CC, 300 mA con toma de 2,1/2,5 mm. La energía desconecta la batería cuando está conectada al integrador.
Conexión Integrador-Osciloscopio	0,5 m de longitud, cable coaxial, conector BNC-BNC.
Osciloscopio	Picoscope 5243A, 100 MHz, 2 canales, 8 a 16 bits, 32 MS, 64 MS en 8 bits, 1 GS/s. Configuración: 1 canal, 12 bits, 100 MHz, 500

	MS/s, 32 MS.
Conexión Osciloscopio-PC	0,5 m de longitud, cable USB 3.0, conector USB-USB.
Computador	FitPC4, procesador AMD GX-420CA SoC (2 GHz), 16 GB memoria, 1TB disco duro, 6-24 W de consumo, Windows 7, 32 bits.
GPS	Garmin 17x HVS, Recepción WAAS, 1 μ s de adquisición, Interfaz NMEA 0183, batería 12 V.
Armario eléctrico	Armario MVAC166040M Delvalle, Serie tribeca, Cumple con normativa RoHs, EMC, RFI y EMI.

Los equipos fueron seleccionados considerando la compatibilidad con el sistema operativo Windows 7, el software del osciloscopio está basado en programación C++ por lo tanto el computador requiere un programa que permita ejecutar programas desarrollados en Visual C++.

Tabla 16.

Software requerido por equipo.

Equipo	Programa requerido
Osciloscopio Picoscope 5243A	SDK Software Development Kit de Picotech
Computador FitPC4 PRO	Windows Visual C++ 2010
GPS Garmin 17x HVS	NMEA Time Versión 7

Considerando que el dispositivo de medida se instalará en una edificación elevada en el departamento de Santander, la disposición de los equipos estaría representada en la figura 26, donde la bobina se ubica concéntrica al pararrayos y conduce la señal captada por medio del conductor coaxial al integrador.

El osciloscopio, el pc y demás elementos de interconexión estarán ubicados dentro del gabinete eléctrico el cual soporta condiciones de intemperie.

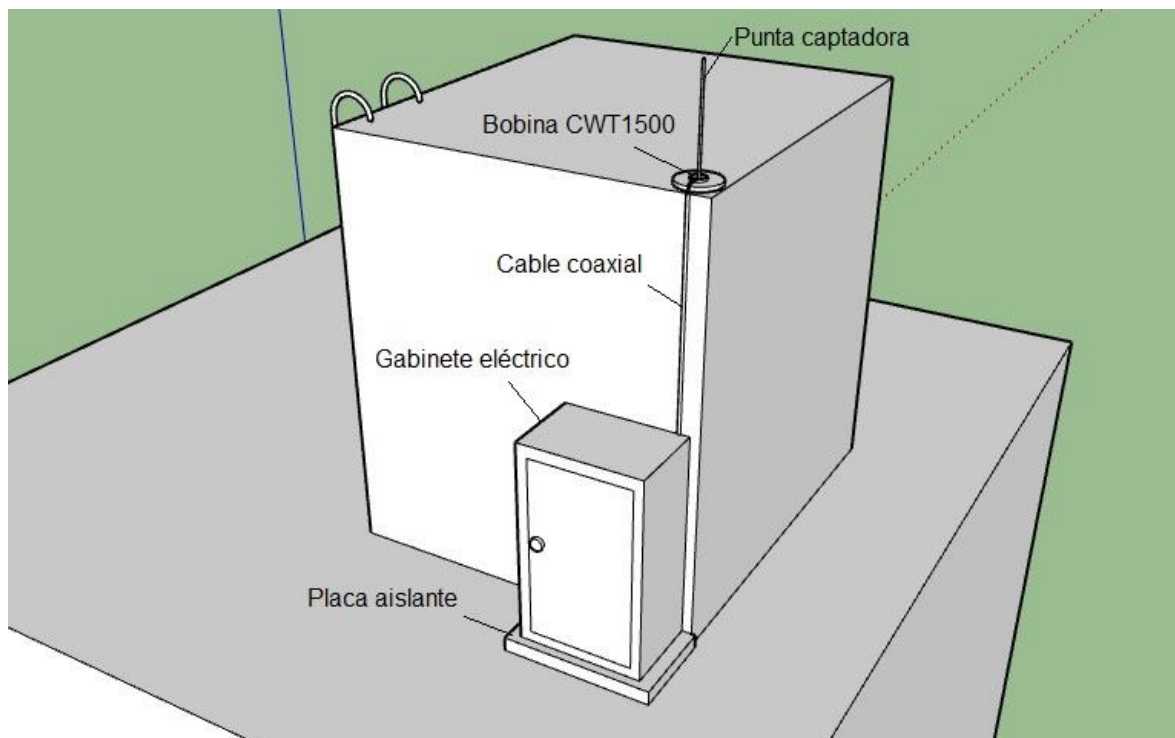


Figura 26. Representación de la instalación del dispositivo.

Los equipos dentro del gabinete se interconectan de la siguiente manera:

Al final del cable coaxial acoplado a la bobina se encuentra el integrador el cual funciona con 4 baterías AA de NiHM, para funcionamiento continuo se requiere una fuente de alimentación de 12 VDC, una vez conectada la fuente las baterías se desconectan automáticamente.

El integrador trasmite la señal al osciloscopio mediante el cable BNC-BNC, la fuente de alimentación de 5 VDC del osciloscopio será necesaria en el caso de usar más de dos canales, por lo tanto, la conexión USB sería suficiente para alimentar el dispositivo ya que solo 1 canal estaría en uso.

Una vez digitalizada la señal, los datos se transmiten por medio de un cable USB 3.0 a un computador de bajo consumo FitPC4, alimentado por una fuente de 12 VDC, tiene

1 puerto HDMI para la instalación de una pantalla y dos puertos Ethernet para conexión local a internet y antenas para conexión inalámbrica.

La instalación en sitio no requerirá la pantalla ya que está solo se usará para la configuración y pruebas iniciales del dispositivo. Finalmente, el GPS estará conectado por medio de un cable USB a un portal USB 2.0 del computador.



Figura 27. Esquema interconexión de equipos.

9. Conclusiones

Entre los diferentes sensores de corriente la bobina PEM CWT1500 presenta mejores condiciones en cuanto a costo, gran capacidad de corriente sin saturación, bajo consumo de potencia y linealidad de la medición, dando las características adecuadas para la aplicación.

El integrador activo PEM seleccionado a diferencia de los sensores pasivos presenta mejor respuesta en baja y alta frecuencia, ofreciendo un amplio ancho de banda de 0,03 Hz a 10 MHz.

El osciloscopio 5243A de Picotechnology reúne las características necesarias para muestrear, cuantificar y codificar la señal entregada por el integrador, cumpliendo los requerimientos mínimos de ancho de banda, velocidad de muestreo, profundidad de memoria y resolución.

Se seleccionó el computador FitPC4 PRO por ser un equipo compacto, portátil, rápido y de bajo consumo, importante al estar en continuo funcionamiento.

Se consideró adecuado el uso de cables coaxiales para la transmisión de datos evitando inconvenientes por acoplamiento capacitivo e inductivo y el conductor tipo USB 3.0 por su mayor transmisión de datos.

Se establecieron diferentes recomendaciones para la protección interna y externa de acuerdo a la norma NTC 4552. Además, se selecciona el gabinete serie Tribeca EMC Delvalle con protección para intemperie (IP66), tubo de acero galvanizado con recubrimiento en PVC para conductores expuestos y una chaqueta termoretráctil para la bobina.

Se presentó el esquema de interconexión de todos los equipos que conforman el dispositivo de medida directa de corrientes de rayo en el departamento de Santander.

Referencias Bibliográficas

APPLICATION NOTES. (2002). [PDF] Power Electronic Measurements Ltd. Disponible en:

<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx> [Accedido 16 Oct. 2017].

Argüeso, M. (2005). *estudio de una bobina de Rogowski como sonda detectora de pulsos de alta frecuencia*. Madrid, España. Departamento de ingeniería Eléctrica.

Bermúdez, J. (2000). *Medida de Corriente de Descargas Atmosféricas Mediante Torres Instrumentadas*. Lausana, Suiza. Energía y computación, Volumen IX, No. 2. Edición No 2.

Cervený, Randall, Lawrimore, Edwards y Landsea (2007). *Extreme Weather Records: Compilation, Adjudication, and Publication*. Arizona, USA. Bulletin of the American Meteorological Society 88 (6): 853–860. doi:10.1175/BAMS-88-6-853.

Comisión de regulación de energía y gas (CREG). (2013). *Identificación de análisis de los niveles de calidad del servicio alcanzables en las redes de distribución de energía eléctrica del SIN*. Colombia.

Delvalle. (2018). Armario Eléctrico EMC Compacto Tribeca, Serie Tribeca EMC. Recuperado de: <https://www.delvallebox.com/es/cajas-armarios-electricos-emc/armario-electrico-emc-compacto-tribeca>. Oyón, España.

- Díaz, C. (2014). *Caracterización espectral del pulso electromagnético radiado por el rayo atmosférico (LEMP) mediante un Detector-Receptor de RF tipo SDR (Software-Defined Radio)*. Manizales, Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Garmin. (2018). GPS 17x HVS TECHNICAL SPECIFICATIONS. Recuperado de:
http://static.garmin.com/pumac/GPS_17x_HVS_Tech_Specs.pdf.
- Gómez y Morcos, (2002). *Voltage Sag and Recovery Time in Recovery Events*, IEEE Trans. Power Deliv., vol. 17, no. 2002, pp. 1037-1043.
- Koon, W.(s.f). *Current sensing for energy metering*, Wilmington, USA. Analog Devices, Inc.
- Koon, W. (s.f). *Nuevos desarrollos en sensores de corriente en medidores de estado sólido*, Wilmington, USA. Applications Engineer, Energy Measurement Group, Analog Devices, Inc.
- LI, Zhang, Zhang, Liu, Tan. (2011). *Design of Rogowski Coil with external integrator for measurement of lightning current up to 400kA*. China. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an.
- Cooper, M. (October 26 de 2005). *Lightning Injuries*. Chicago, USA.

Oscilloscope | Pico Technology. (2017). Pico Technology. Recuperado de:
<https://www.picotech.com/library/application-note/oscilloscope-tutorial>

Pelinen, D. et al. (1980). *Rogowski coil for measuring fast, high-level pulsed currents*. San Leandro, California. Review of Scientific Instruments, vol. 51, pp. 1535-1540, 1980.

Protección contra Sobretensiones Transitorias Baja Tensión. (2008). [PDF]. España: Schneider Electric, 99.3/2 – 3/20.

Ray y Hewson. (2000). *High Performance Rogowski Current Transducers*. Nottingham, Inglaterra. Power Electronic Measurements Ltd. 25 Barratt Lane, Attenborough, Nottingham NG9 6AD, U.K.

Rodríguez, A. (1999). *Costos de reposición de transformadores apropiados para zonas tropicales*. [tesis de maestría], Bogotá, Colombia - Universidad Nacional de Colombia.

Torres, H. (2012). *Transformador de distribución nuevo diseño para zona tropical*, Asunción, Paraguay. Universidad Nacional de Colombia.

Torres, H. (Ed.). (2002). *El rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. Bogotá, Colombia. Editorial Unibiblos.

Thomson, Uman y Beasley, (1985). *Speed and current for lightning stepped leaders near ground as determined from electric field records*. Journal of Geophysical Research 90 (D5): 8136.

Torres, Trujillo, Amórtegui, Herrera, Pinzón, Quintana, González, Rondón, Salgado y Avila. (1999). *Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone*. Colombia. National University of Colombia- Research Program on Acquisition and Analysis of Signals – PAAS.

WG C4.410 (2015). *Lightning Striking Characteristics To Very Structures*. p. 69-106.

Apéndices

Apéndice A. Especificaciones técnicas bobina CWT1500.

Características de presentación										
Tipo	Sensibilidad (mV/A)	Corriente pico (kA)	Pico di/dt (kA/ μ S)	Ruido máximo ^{*1} (mV _{pk-})	Inclinación typ. (%/ms)	Ancho de banda a LF typ. (Hz) f_L	Fase del cable a 50 Hz typ. (deg)	Ancho de banda HF (3dB) typ. (MHz) f_H ^{*2}	Longitud bobina 700 mm	Longitud bobina 300 mm
CWT 1500	0,02	300,0	40,0	3,0	0,035	0,03	0,06	16	10	
Medición de corriente 15 A										
^{*1} . Distribuido alrededor del ancho de banda de (-3dB) f_L										
^{*2} . Para 2,5 m de longitud de cable. Contacte a PEM para valores de f_H para otra bobina y longitud del cable										
Exactitud típica Calibración trazable a (+ -) 0,2% con el conductor central en el bucle.					Linealidad típica (+/-)0,05%(escala completa)					
Variación con la posición del conductor en el bucle de la bobina típicamente (+ -)1%										
Máximo absoluto	CWT 03, 06		PICO 40,0		RMS 1,2 @70°C		El valor no debe ser excedido			
Valores di/dt (kA/ μ s)	CWT 015, 1 N, 3 N		PICO 40,0		RMS 1,0 @70°C					
El valor no debe ser excedido	Todos los otros CWT'S		PICO 40,0		RMS 1,5 @70°C					
Bobina y cable										
1) Circunferencia de la bobina 700 mm										
2) Sección transversal de la bobina 8,5 mm – (14 mm con enchufe)										
Aislamiento de tensión pico de la bobina 10 kV										
Voltaje de trabajo de pico seguro a tierra. Las bobinas se prueban instantáneamente a 15 kVrms durante 60 segundos. La bobina se suministra con una funda de silicona extraíble que proporciona protección mecánica adicional. Se puede obtener información sobre el uso continuo de las bobinas a alta tensión en PEM										
Rango de temperatura					-20°C a 100°C					
Para desclasificación debido al cambio de temperatura, consulte a PEM										
3) Longitud del cable (de caja a bobina)					2,5 m o 4 m					
Integrador										
4) Fuente de alimentación										
R Batería recargable 4 x AA (baterías recargables NiMH)										

-mas-	
2,1/2,5 mm zócalo para entrada de 12 a 24 V [(+/-)10%]	
tiempo de recarga 40 horas, batería de vida típica 30 horas, se carga cada vez que hay suministro de corriente continua	
5) Dimensiones de la caja de integración	H = 183 mm, W = 93 mm, D = 32 mm
6) Salida del zócalo	BNC (impedancia de salida 50 Ω - Unidad suministrada con cable BNC de 0,5 m - Cable coaxial BNC)
Min. Carga de salida	100k Ω (para precisión nominal)
Rango de temperatura	0°C a 40°C
Pedido	
Si tiene alguna consulta sobre el CWT o necesita especificaciones fuera de nuestros rangos estándar, no dude en contactarnos.	

Apéndice B. Especificaciones técnicas osciloscopios serie 5000.

Vertical	PicoScope 5443A
Número de canales	2
Ancho de banda (-3dB)	Modos de 8 a 15 bits: 100 MHz • modo de 16 bits: 60MHz
Limitación de ancho de banda (-3dB)	20 MHz, conmutable
Tiempo de subida (10% a 90%, calculado)	Modos de 8 a 15 bits: 3,5 ns • Modo de 16 bits: 5,8 ns
Conectores de entrada	BNC en el panel frontal
Resolución *	8 bits, 12 bits, 14 bits, 15 bits,
Resolución vertical mejorada	16 bits Resolución del hardware + 4 bits
Características de la entrada	1 M Ω \pm 1% 13 pF, \pm 1 pF
Acoplamiento de la entrada	CA/CC
Sensibilidad de la entrada	De 2 mV/div a 4 V/div
Rangos de entrada	De \pm 10 mV a \pm 20 V de la escala completa, en 11 rangos
Rango de desviación analógico	\pm 250 mV (rangos de 10, 20, 50, 100, 200 mV), \pm 2.5 V (rangos de 500 mV, 1 V, 2 V), \pm 20 V (rangos de 5, 10, 20 V)
Exactitud de ajuste de desviación	\pm 1% de ajuste de desviación, adicionales a la exactitud de CC
Precisión de CC	Modo de \geq 12 bits: \pm 0,25% típico @ 25 °C (\pm 1% de la escala completa máxima @ 20 - 30 °C) •
De (+/-)50 mV hasta (+/-)20 V	
De (+/-)10 mV hasta rangos de (+/-)20 mV	Modo de 8 bits: \pm 1% típico @ 25

	°C ($\pm 3\%$ de la escala completa máxima @ 20 - 30 °C) Todos los modos: $\pm 2\%$ típico @ 25 °C ($\pm 5\%$ de la escala completa máxima @ 20 - 30 °C)
Protección de sobretensión	± 100 V (CC + CA pico)

* La resolución efectiva máxima está limitada en los rangos de tensión más bajos: ± 10 mV =

8 bits • ± 20 mV = 12 bits. Todos los demás rangos pueden utilizar la resolución completa.

Horizontal					
Máxima velocidad de muestreo	Mod o de 8 bits	Modo de 12 bits	Modo de 14 bits	Modo de 15 bits	Modo de 16 bits
Todo 1 canal	1	500	125	125	62,5 MS/s
Todo 2 canales	GS/s	MS/s	MS/s	MS/s	-
Todo 3 canales	500	250	125	125	-
Cuatro canales	MS/s	MS/s	MS/s	MS/s	-
	250	125	125	-	
	MS/s	MS/s	MS/s	-	
	250	125	125		
	MS/s	MS/s	MS/s		
Máxima velocidad de muestreo (ETS, solo modo de 8 bits)	5 GS/s				
Máxima de muestreo (flujo USB)	10 MS/s en PicoScope 6. >10 MS/s mediante el uso del API suministrado				
Rangos de base de tiempos	De 1 ns/div a 1000 s/div				
Memoria de búfer** (8 bits)	64 MS				
Memoria de búfer** (\geq 12bits)	32 MS				
Memoria de búfer** corriente continua	100 MS en software PicoScope				
Búfer de forma de onda (n.º de segmentos)	10 000 en software PicoScope				
Precisión de base de tiempo (deriva)	± 2 ppm (± 1 ppm/año)				
Oscilación del muestreo	3 ps RMS, típico				
Muestreo ADC	Muestreo simultáneo en todos los canales habilitados				

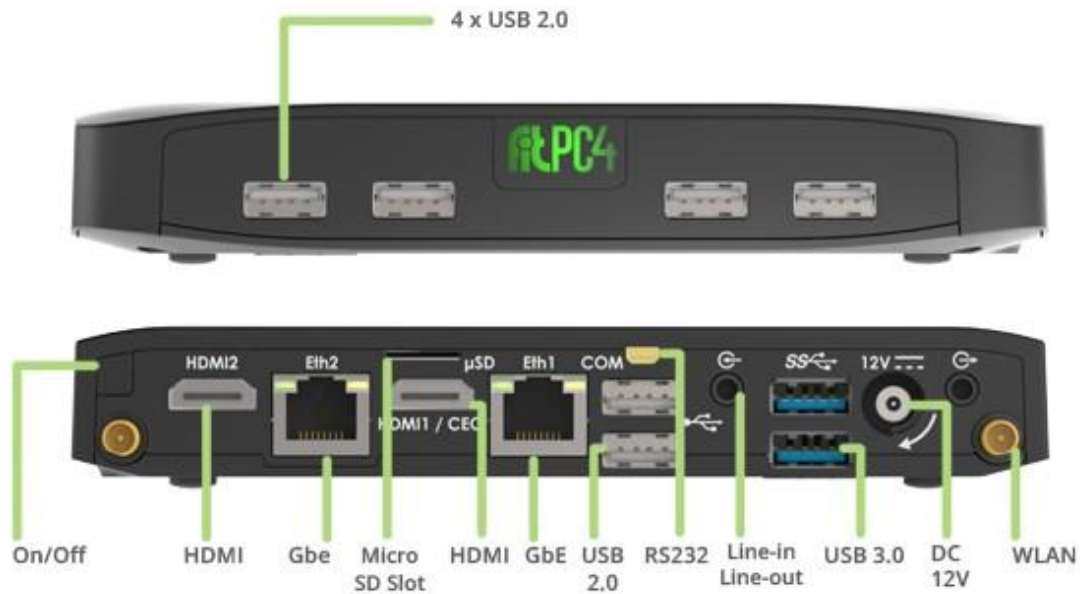
** Compartida entre canales activos

Rendimiento dinámico (típico; canales analógicos)	
Interferencia cruzada	Mejor que 400:1 hasta ancho de banda completo (rangos de tensión iguales)
Distorsión armónica total (THD)	Modo de 8 bits: < -60 dB a 100 kHz entrada de escala completa • \geq Modo de 12 bits: < -70 dB a 100 kHz entrada de escala completa
Rango dinámico libre de espurios	8 y 12 bits: > 60 dB a 100 kHz entrada de escala completa • 14 a 16 bits: > 70 dB a 100 kHz entrada de escala completa
Sonido (en rango de 50mV)	Modo de 8 bits 120 μ V RMS • Modo de 12 bits 110 μ V RMS • Modo de 14 bits 100 μ V RMS • Modo de 15 bits 85 μ V RMS • Modo de 16 bits 70 μ V RMS
Planeidad de ancho de banda	(+0,3 dB, -3 dB) de CC a ancho de banda completo
Disparo	
Fuente	Todos los canales
Modos de disparadores	Ninguno, automático, repetición, único, rápido (memoria segmentada)
Disparos avanzados	Flanco, ventana, anchura de pulso, anchura de pulso de ventana, caída, caída de ventana, intervalo, pulso estrecho, lógico
Tipos de disparador (modo ETS)	De subida, de bajada
Sensibilidad	100% del tamaño de captura
Máxima captura previa al disparo	4000 millones de muestras
Tiempo de rearme del disparo	< 2 μ s en la base de tiempos más rápida
Velocidad de disparo máxima	Hasta 10 000 formas de onda en una ráfaga de 20 ms
Entrada para disparo externo	
Tipos de disparador	Flanco, anchura de pulso, caída, intervalo, lógica
Características de entrada	BNC de panel trasero, 1 M Ω \pm 1% 13 pF \pm 1 pF
Ancho de banda	100 MHz
Rango de tensión	\pm 5 V, acoplado CC
Protección de	\pm 100 V (CC + CA pico)

sobretensión	
Generador de funciones	
Señales de salida estándar	Sinusoidal, cuadrada, triangular, tensión CC
Salida de compensación de sonda	
Características de la salida	600 Ω
Frecuencia de salida	1 kHz
Nivel de salida	3 V pk-pk
Protección de sobretensión	10 V
Analizador de espectro	
Rango de frecuencia	CC a 100 MHz
Modos de visualización	Magnitud, promedio, mantener pico
Funciones de ventana	Rectangular, gaussiana, triangular, Blackman, Blackman-Harris, Hamming, Hann, flat-top
Número de puntos FFT	Seleccionable entre 128 y 1 millón en potencias de 2
Canales matemáticos	
Funciones	$-x$, $x+y$, $x-y$, $x*y$, x/y , x^y , raíz cuadrada, exp, ln, log, abs, norm, señal, sen, cos, tg, arctan, arccos, arcsen, cosh, tanh, frec, derivada, integral, mín, máx, promedio, pico, retardo, ciclo de trabajo, paso alto, paso bajo, paso banda, detención banda
Operandos	A, B, C, D (canales de entrada), T (tiempo), formas de onda de referencia, pi
Mediciones automáticas	
Osciloscopio	Media cuadrática CA, media cuadrática verdadera, promedio CC, tiempo de ciclo, frecuencia, ciclo de servicio, velocidad de descenso, tiempo de descenso, velocidad de aumento, tiempo de aumento, anchura de pulso elevada, anchura de pulso baja, máximo, mínimo, pico a pico
Espectro	Frecuencia de pico, amplitud de pico, promedio de amplitud de pico, potencia total, % THD, THD dB, THD más ruido, SFDR, SINAD, SNR, IMD
Estadísticas	Mínimo, máximo, promedio y desviación estándar
Decodificación en serie	
Protocolos	1-Wire, ARINC 429, CAN, DCC, DMX512, Ethernet 10Base-T y 100Base-TX, FlexRay, I ² C, I ² S, LIN, PS/2, SENT, SPI, UART (RS-232 / RS-422 / RS-485), USB
Prueba de límite de mascarar	
Estadísticas	Correcto/incorrecto, recuento de fallos, recuento total
Visualización	
Interpolación	Lineal o sin (x)/x

Modos de persistencia	Color digital, intensidad analógica, personalizado o ninguno
General	
Conexión a PC	USB 2.0 de alta velocidad (compatible con USB 1.1 y USB 3.0)
Requisitos de alimentación	1 A (2 canales) de 2 puertos USB (cable de dos cabezas suministrado) o 1,5 A a 5 V (hasta 4 canales) del adaptador de CA
Dimensiones	190 × 170 × 40 mm (conectores incluidos)
Peso	< 0,5 kg
Rango de temperatura	Funcionamiento: de 0 °C a 40 °C (20 °C a 30 °C para la precisión indicada). Almacenamiento: -20 °C a 60 °C.
Rango de humedad	Funcionamiento: De 5% HR a 80% HR sin condensación. Almacenamiento: De 5% HR a 95% HR sin condensación.
Entorno	Solo en lugares secos, hasta 2000 m de altitud
Homologaciones de seguridad	Diseñado con arreglo a EN 61010-1:2010
Homologaciones CEM	Probado conforme a EN61326-1:2006 y FCC Parte 15 Subparte B
Homologaciones medioambientales	Conformidad con RoHS y WEEE
Requisitos de software/ordenador	PicoScope 6: Microsoft Windows 7, Windows 8 o Windows 10 SDK y programas de ejemplo: Microsoft Windows 7, Windows 8 o Windows
Accesorios	Cable(s) USB, 2 o 4 sondas en estuche de sonda, adaptador de CA para osciloscopio de 4 canales
Idiomas	Alemán, checo, chino simplificado, coreano, danés, español, finlandés, francés, griego, húngaro, inglés, italiano, japonés, neerlandés, noruego, polaco, portugués, rumano, ruso, sueco y turco

Apéndice C. Especificaciones técnicas y componentes físicas computador FIT-PC4 PRO.



Modelo	
Nombre	fit-PC4 Pro Barebone
Número de pieza	fit-PC4-CG420-WACB-FM4U
Diagrama de bloques	fit-PC4 Diagrama de bloques
Revisión actual de HW	1,2
Disponibilidad a Largo	2020
Plazo	
Procesador	
Tipo	AMD GX-420CA SoC
Núcleos	Núcleo cuádruple de 64 bits
Velocidad de reloj	2 GHz
TDP	25W
Chipset	SoC (CPU y Chipset en el mismo dado)
Memoria	
Soportad	2x SO-DIMM Ranuras de memoria DDR3 SDRAM de 204 clavijas Hasta 16 GB (2 x 8 GB) No ECC DDR3-1600
Instalada	No instalado
Almacenamiento	
Soportado	1x SATA hasta 6 Gbps (SATA 3.0) para HDD / SSD interno de 2,5 " ranura 1x mSATA de hasta 6 Gbps (SATA 3.0)
Instalado	No instalado
Gráficos	

GPU	AMD Radeon HD 8400E Modo de pantalla dual compatible
Interfaz de pantalla 1	HDMI 1.4a hasta 1920 x 1200 @ 60Hz
Interfaz de pantalla 2	HDMI 1.4a hasta 1920 x 1200 @ 60Hz
Interfaz de pantalla 3	N / A
Gráficos discretos	N / A
Audio	
Codec	Codec de audio Realtek ALC888-VC2 HD
Salida de audio	Salida analógica estéreo Digital 7.1 + 2 canales Salida S / PDIF Conector de 3,5 mm
Entrada de audio	Estéreo analógico Entrada de micrófono Entrada digital S / PDIF Conector de 3,5 mm
Redes	
LAN	2x puertos LAN GbE LAN1: Controlador Intel I211 GbE (RJ-45) LAN2: Controlador Intel I211 GbE (RJ-45) LAN3-6: N / A
Inalámbrico	WLAN 802.11ac (2.4 / 5 GHz banda dual Intel 7260 HMW) Bluetooth 4.0
Conectividad	
USB	2x USB 3.0 6x USB 2.0
De serie	1x Puerto de comunicación serie COM1: RS232 mediante mini conector serie
Dakota del Sur	Ranura micro-SD Tarjetas SD / SDHC / SDXC Velocidades de transferencia de hasta 25 MB / s
E / S especial	1x ranura micro SIM (6 pines) ⁴
Expansión	Casquillo mini-PCIe de tamaño medio / tamaño completo Casquillo mini-PCIe / mSATA de tamaño medio / completo ² Módulos FACE
Tecnologías avanzadas	
vPRO	No
AMT	No
Virtualización de CPU	Sí
AES	Sí
Funcionalidad Especial	Auto-On Wake-on-LAN Wake-on-Timer PXE Boot Watchdog
Bootloader	
Vendedor	Fénix

Características	Modo heredado del BIOS Modo UEFI 2.2 Secure Boot
Sistema operativo	
Soportado	Windows 7/8, 32-bit y 64-bit Linux 32-bit y 64-bit Embedded OS
Linux oficial	Linux Mint 18 Cinnamon (64-bit)
Instalado	No instalado
Condiciones de operación	
Voltaje de entrada	Entrada 10 – 15 VDC no regulada ¹
El consumo de energía	6 W – 24 W
Temperatura de funcionamiento	1. Modelos de HDD comerciales : 0 ° C a 50 ° C Modelos SSD: 0 ° C a 70 ° C 2. Sólo modelos SSD ampliados (TE) : -20 ° C a 70 ° C 3. Modelos SSD industriales (TI) solamente : -40 ° C a 70 ° C
Humedad relativa	10% a 90% (funcionamiento) 5% a 95% (almacenamiento)
MTTF	> 100.000 horas
Recinto	
Material	Fundición de aluminio
Enfriamiento	Enfriamiento pasivo Diseño sin ventilador
Dimensiones	19 cm x 16 cm x 4 cm
Peso	1100gr
Paquete	
En el cuadro	1. computadora del ajuste-PC4 2. Fuente de alimentación: entrada 100-240 VAC 50 / 60 Hz, salida 60 W 12 VDC 5 A, enchufe del enchufe de la CC; Cable de la CA de América del Norte 3. Vídeo HDMI a adaptador DVI 4. Audio 3,5 mm al cable RCA 5. Antenas de la banda 2 de WiFi 2,4 GHz (en algunos modelos) 6. Mini-serial al cable adaptador DB9-macho
Garantía	5 años ³
Notas	1. Voltaje de entrada nominal: 12 V 2. Compartido con mSATA 3. Para los productos comprados desde el 1-ene-2013 4. Para usar con el kit de módem celular