

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br Andrés E. Iriarte S. para  
optar al Título de Ingeniero  
Electricista

Caracas, 2009

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Tutor Académico: Ing. Nerio Ojeda  
Prof. Guía: Ing. José Alonso

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br Andrés E. Iriarte S. para  
optar al Título de Ingeniero  
Electricista

Caracas, 2009

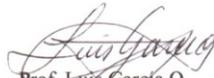
## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 12 de noviembre de 2009

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Andrés E. Iriarte S.:

### “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Electrónica, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

  
Prof. Luis García O.  
Jurado

Prof. José Alonso  
Prof. Guía

  
Prof. Nerio Ojeda  
Prof. Tutor

## **DEDICATORIA**

A mi madre, cuyo esfuerzo apoyo y guía, ha sido fundamental para poder alcanzar mis metas y superar las dificultades.

A mi abuela cuya formación, consejos y valores no voy a olvidar nunca y uno de sus últimos deseos fue verme culminar mi carrera. Esto es para ti, y sé que donde este me estas acompañando y cuidando...

## **RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme vida y salud

Para la realización de este trabajo fue fundamental el apoyo de muchas personas a las cuales quiero hacerle un humilde, pero sincero agradecimiento:

A mi mamá, quien en todo momento me ha apoyado, aconsejado y guiado por el camino correcto para seguir adelante, a pesar de las dificultades.

A mi abuela que siempre me dio sus consejos y cariño hasta el final y siempre estuvo pendiente de todas mis cosas.

A María Antonieta, que me ha acompañado durante todo este trayecto y siempre ha sido incondicional y parte fundamental de este logro.

A la Universidad, especialmente a la escuela de ingeniería eléctrica, que me formaron y me ayudaron a alcanzar el sueño de convertirme en ingeniero.

A los profesores Nerio Ojeda y José Alonso, quienes me apoyaron y asesoraron a lo largo del desarrollo del trabajo.

Al profesor Rafael Rivero, que siempre estuvo atento al desarrollo del trabajo y brindando consejos y recomendaciones

A la empresa CAIVET, que nos permitieron utilizar sus instalaciones para las distintas pruebas, siempre con un trato excelente.

A todos muchísimas gracias

**Andrés E. Iriarte S.**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE LAS  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**Tutor Académico: Nerio Ojeda. Prof. Guía: José Alonso. Tesis. Caracas. U.C.V.  
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista.  
Opción: Electrónica, UCV 2009. 72 pág. +Anexos**

**Palabras Claves:** Descargas atmosféricas; Antena de campo; Sistemas de adquisición de datos; Microcontrolador; Muestreo; Osciloscopio para PC; Software.

**Resumen.** En este trabajo se realiza un estudio del fenómeno de las descargas atmosféricas, su comportamiento y sus sistemas de medición. Se plantea la implementación de un sistema de medición de descargas atmosféricas, basado en antenas de campo, compuesto de dos etapas, una de adquisición de datos y otra de almacenamiento de los datos obtenidos de la etapa anterior. El transductor de este sistema es una antena de placas paralelas, la cual va conectado al acondicionador de la misma, ya que la señal obtenida de la antena debe ser integrada para poder obtener un voltaje proporcional al campo eléctrico vertical, el cual es registrado por un osciloscopio digital para computadoras, que se alimenta y transmite mediante un puerto USB. Este sistema efectúa un registro cada vez que se produce un flanco de bajada de cierta magnitud, determinada de manera experimental, para evitar capturar falsos eventos producto de ruido o interferencias. Las formas de ondas capturadas son transmitidas a un segundo computador vía Wifi donde son almacenados los datos. La forma de onda obtenida depende de la constante de tiempo del integrador, ya que con una constante en el orden de milisegundos se obtiene un mayor detalle del flanco de subida. Las pruebas realizadas mostraron un comportamiento adecuado del equipo, con poco ruido, pero el sistema puede ser vulnerable a registrar perturbaciones según las características de la zona instalada.

# ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
CONSTANCIA DE APROBACIÓN .....	3
DEDICATORIA .....	iv
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS .....	v
RESUMEN .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	3
1. Planteamiento del Problema .....	3
1.1. Objetivos de la Investigación .....	5
1.1.1. Objetivo General .....	5
1.1.2. Objetivos Específicos: .....	5
CAPÍTULO II .....	6
2. Descargas atmosféricas .....	6
2.1.1. Teorías de formación del rayo .....	8
2.1.2. Teoría de Simpson .....	8
2.1.3. Teoría de Elster y Geitel .....	10
2.1.4. Teoría de Wilson .....	11
2.1.5. Tipos de Descargas Atmosféricas .....	15
2.1.6. Efectos Producidos por la Descarga Atmosférica .....	16
2.1.7. Efectos Secundarios de una Descarga Atmosférica .....	16
2.1.8. Parámetros Medibles de un Rayo .....	18
2.1.9. Sistemas de Medición de los Rayos .....	20
2.1.10. Medición del Campo Eléctrico .....	21

CAPÍTULO III.....	30
MARCO METODOLÓGICO .....	30
CAPITULO IV .....	54
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	54
CONCLUSIONES.....	69
RECOMENDACIONES .....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	72
BIBLIOGRAFIA .....	74
[ANEXO N 1].....	76
[Anexo N° 2] .....	78



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
Modelo de Simpson .....	9
Modelo de Elster-Geitel.....	11
Teoría de Wilson.....	12
Fluxómetro electrostático Cilíndrico .....	21
Fluxómetro electrostático con obturador .....	22
Implementación de un Fluxómetro electrostático con obturador .....	23
Antena de campo con seguidor de voltaje .....	23
Antena de campo con Integrador electrónico .....	24
Esquema general de un sistema de adquisición de datos.....	26
Conector BNC instalado en la antena .....	32
Osciloscopio digital NI USB-5132 .....	33
Sistema de adquisición con un convertidor A/D y un microcontrolador.....	34
Relación de ganancia por frecuencia del AD620 .....	36
Relación de rechazo a ruido vs. frecuencia del AD8129.....	37
Ancho de banda del AD8129 con ganancia unitaria .....	37
Encapsulado PDIP .....	38
Planteamiento de procesamiento paralelo .....	39
Arquitectura del PMP incluido en el PIC32 .....	44
Diagrama de flujo para la lectura del PMP.....	45
Configuración de la velocidad de reloj del sistema y de periféricos .....	46
Antena con el conector BNC hembra .....	48
Base para la antena .....	49
Fuente de alimentación del circuito.....	50
Circuito Integrador.....	51

Parte trasera de la carcasa .....	53
Parte delantera de la carcasa .....	53
Generador de impulsos y simulador de líneas de transmisión con parámetros concentrados .....	56
Selector del tiempo de subida y bajada del impulso exponencial .....	56
Señales de prueba del integrador .....	57
Configuración para la prueba de de transmisión de datos .....	58
Generador de Impulsos tipo descargas atmosfericas .....	59
Resultado de la medición con el equipo .....	60
Prueba con la constante de 36ms cercano al generador.....	62
Forma de onda de la señal generada .....	62
Forma de onda del impulso para constante 1s .....	63
Forma de onda con constante de tiempo de 1s .....	64
Forma de onda con la antena retirada de la fuente .....	65
Forma de onda con escala de tiempo ampliada .....	66
Forma de onda producida por la descarga del generador .....	67
Forma de onda medida durante la descarga del generador.....	68

## INTRODUCCIÓN

En la siguiente investigación se realiza un estudio del fenómeno de las descargas atmosféricas, sus características y comportamiento, con la finalidad de diseñar un sistema de medición de descargas atmosféricas, que permita entender más este fenómeno y manejar estadísticas de las ocurrencias de las descargas. Todos estos datos son de gran importancia, ya que permiten diseñar y mejorar sistemas de protección contra estos fenómenos, que a pesar de tener una duración menor a un segundo, por su cantidad de energía produce daños devastadores cuando impacta contra una estructura o edificación-

Para conocer el comportamiento del fenómeno es necesario saber acerca de las teorías de la formación de las descargas atmosféricas, entre las que se encuentra la teoría de Simpson, la Teoría de Elster y Geitel y la teoría de Miller, teorías que se formularon realizando diversas pruebas experimentales. Existen diversas instituciones que han realizado estudios en esta materia, como lo son la Universidad Nacional Experimental Politécnica (UNEXPO) y la Universidad Nacional de Colombia y han implementado sistemas de medición basado en la medición del campo eléctrico con antenas de campo.

Este informe de investigación se presenta en cuatro (4) capítulos que son los siguientes:

**Capítulo I**, en este capítulo se realiza el planteamiento del problema y los objetivos propuestos.

**Capítulo II**, se presenta el marco teórico, en el cual se presenta la reseña histórica del problema, las teorías y comportamiento de las descargas atmosféricas,

los sistemas de medición de descargas atmosféricas y la estructura de los sistemas de adquisición de datos.

**Capítulo III**, corresponde al marco metodológico, donde se explican cada una de las fases del trabajo, como la selección de componentes y los detalles de la construcción del sistema.

**Capítulo IV**, está compuesto por la presentación y análisis de los resultados obtenidos en la prueba de cada una de las etapas y las pruebas de campo realizadas al sistema ampliamente detallado.

Se finaliza el informe con las conclusiones y recomendaciones, así como también la presentación de las referencias bibliográficas que sustentan toda la investigación.

# CAPÍTULO I

## 1. Planteamiento del Problema

Los rayos son unos de los principales causantes de pérdidas humanas y materiales en el mundo. A diferencia de otros fenómenos naturales, su efecto no se caracteriza por ser una catástrofe de gran intensidad en un corto tiempo, sino por la suma de efectos negativos de menores magnitudes con una frecuencia de ocurrencia muy elevada. Su peligrosidad es determinada en función de la probabilidad de ocurrencia de sus parámetros, éstos son estimados mediante modelos matemáticos y mediciones de campo. Por razones de seguridad, confiabilidad y economía es necesario conocer el comportamiento de estos parámetros en el espacio y el tiempo para lograr establecer las medidas de protección para los seres humanos y los medios construidos. Aunque las zonas de Convección Tropical fueron identificadas al principio del siglo pasado como de alta actividad eléctrica atmosférica, hasta hoy la mayoría de la información disponible sobre las características y magnitudes de estos parámetros se basa en estudios llevados a cabo en zonas templadas. Las investigaciones de variación espacial y temporal de los parámetros de los rayos deben ser abordados por grupos de investigación integrados por académicos que orienten las labores en esta área.

Para realizar el estudio de los parámetros de los rayos se deben realizar o construir dispositivos con características particulares, debido a la rapidez del fenómeno. Un sistema de medición de las descargas atmosféricas basado en antenas de campo permite el registro del comportamiento de la descarga atmosférica. Al momento de producirse una descarga atmosférica, existe una variación del campo

eléctrico que es detectado por las antenas de campo, que no es más que una capacitancia, en la cual se induce una carga proporcional a esta variación.

El conocimiento de los parámetros del rayo, en sus diferentes escalas, posee importancia tanto científica como tecnológica. El conocimiento científico facilita entender su comportamiento en el tiempo y en el espacio, y sus relaciones con otros fenómenos naturales, en lo tecnológico, permite el diseño de protecciones adecuadas de seres vivos, infraestructuras y equipos, así como el oportuno mantenimiento para garantizar una operación confiable, económica y segura. En tal sentido siendo Venezuela uno de los países como mayor actividad por rayos en el mundo, un estudio preliminar de los parámetros registrados repercute en múltiples beneficios para la nación.

Por todo lo antes expuesto se plantea la posibilidad de elaborar un sistema de medición de las descargas atmosféricas, en base a antenas de campo que sirvan para la calibración, el registro y de respaldo del sistema existente en Venezuela, el cual permitirá a largo plazo definir las zonas de riesgos significativas para los seres humanos y los medios construidos.

## **1.1. Objetivos de la Investigación**

### **1.1.1. Objetivo General**

Elaborar un sistema de medición de las descargas atmosféricas, en base a antenas de campo que sirvan para la calibración, el registro y de respaldo del sistema existente.

### **1.1.2. Objetivos Específicos:**

- Estudiar el comportamiento de las descargas atmosféricas.
- Documentar los dispositivos de medición utilizados para el estudio de las descargas atmosféricas.
- Analizar el sistema de medición de las descargas atmosféricas, en base a antenas de campo.
- Realizar el diseño de una antena de campo.
- Implementar el dispositivo de medición de descargas atmosféricas.
- Calibrar el dispositivo de medición de descargas atmosféricas.
- Implementar un dispositivo de transmisión remota para almacenamiento de data.
- Realizar pruebas de Campo.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2. Descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas han sido desde los principios de la civilización objeto de estudios, así como también de interés para los monjes, sabios y chamanes, y el fenómeno conocido como rayo incluso ha sido objeto de culto por diversas religiones politeístas. Los análisis desde un punto de vista técnico, comenzaron con Benjamín Franklin, quien en el mes de junio del año 1752 en Filadelfia, efectuó su famoso experimento con la cometa. Ató una cometa con esqueleto de metal a un hilo de seda, en cuyo extremo llevaba una llave también metálica; haciéndola volar un día de tormenta, confirmó que la llave se cargaba de electricidad, demostrando así que las nubes están cargadas de electricidad y los rayos son descargas eléctricas.

El rayo es definido como:

Un fenómeno meteorológico de inestabilidad atmosférica, en el cual turbulencias del aire desarrollan cargas eléctricas en el aire, especialmente en las nubes de tormenta (...). Estas cargas son las responsables de descargas eléctricas violentas durante decimas de segundo, normalmente con base en la nube y ramificado hacia el suelo. [1]

Se conoce como descarga atmosférica, al tipo de rayo que parte del centro de la nube de descarga hacia la tierra, debido a que es el tipo de rayo más peligroso por las diversas pérdidas, tanto de edificaciones y de embarcaciones, como de personas, ha motivado el estudio de todo el fenómenos, con la finalidad de implementar

mecanismos o dispositivos de seguridad con la finalidad de prevenir pérdidas humanas, económicas y sociales.

En la actualidad a través de los estudios con equipos modernos y el manejo de estadísticas, se puede obtener una mejor idea de la magnitud de los fenómenos atmosféricos. Estos datos reflejan que los rayos son una de las principales fuentes de pérdidas humanas, materiales y de incendios a nivel mundial. Algunos datos significativos de las estadísticas de estos eventos recolectadas por Vázquez, Blanco, y Torres [2], se muestran a continuación:

- Típicamente más de 2.000 tormentas están activas alrededor del globo terráqueo en un momento dado, produciéndose aproximadamente 100 descargas por segundo, lo que da un total de hasta ocho millones de eventos por día.
- Las temperaturas promedio se encuentran entre los 8.000 °C y los 30.000 °C y registrando tensiones en el orden de los millones de Volt y una intensidad promedio de 31.000 Ampere.
- En los últimos 20 años ha muerto una media de 100 personas por año en los Estados Unidos y el 57% de las causas de fallas en las líneas de transmisión ha sido por causa de los rayos.
- Brasil reporta un promedio de muertes por rayos entre 100 y 150 personas [3], llegando a ocurrir hasta 167 muertes para el año 1996, y pérdidas económicas de más de \$200.000.000 por causa de las descargas atmosféricas.
- En Japón, los rayos causaron entre el 60% y 70% de las salidas de las líneas de transmisión entre los años 1966 y 1988.
- En Venezuela hasta el año 1998 no se tenía registro de pérdidas humanas por esta causa, recientemente el pelotero Geremi González fue víctima de un rayo en la ciudad de Maracaibo. Pero el año 1998 se contabilizaron más de 110.000\$ por causa de reparación y reposición de equipos de las líneas de distribución de energía eléctrica en la ciudad de Barquisimeto.

Por razones de seguridad, confiabilidad y economía resulta necesario conocer la peligrosidad y el comportamiento de las descargas atmosféricas para lograr la protección de vidas humanas y poder diseñar y mantener sistemas de protección efectivos.

Para diseñar estos sistemas es necesario conocer cuáles son los parámetros que definen el comportamiento de los rayos. Después que Benjamín Franklin demostró que este fenómeno estaba relacionado con la electricidad atmosférica comenzaron estudios interesantes en esta área. Estos estudios han conducido a la postulación de varias teorías, que comparten algunos aspectos de interés y se pueden resumir de la siguiente manera:

La nube de tormenta denota una constitución bipolar, en la cual la carga negativa se encuentra espacialmente por debajo de la carga positiva. Acerca de la forma en que se lleva a cabo tal distribución de cargas en la nube, no existe coincidencia de opiniones. Numerosos experimentos con globos sonda han verificado dicha distribución...[4]

#### **2.1.1. Teorías de formación del rayo**

Existen tres (3) teorías que tratan de explicar el fenómeno de la formación del rayo, la teoría de Simpson, la teoría de Elster y Geitel y la teoría de Wilson, cada una de ellas será comentada a continuación:

#### **2.1.2. Teoría de Simpson**

La teoría de Simpson posee una amplia aceptación práctica, ya que ésta se fundamenta en una gran cantidad de experimentos que se han llevado a cabo en laboratorios, y la misma establece lo siguiente:

Cuando se desintegran gotas de lluvia por acción de una fuerte corriente de aire, las partículas así formadas denotan una carga positiva, y el aire, a su vez, acusa la presencia de una gran cantidad de cargas negativas de muy poca masa, y por consiguiente gran movilidad. [4]



**Figura 1. Modelo de Simpson**

En la naturaleza este proceso de desintegración de las gotas, ocurre en el momento en que la corriente de aire alcanza velocidades suficientes para desintegrar las gotas de lluvia. La corriente de aire transporta entonces a los iones negativos a la parte superior de la nube, donde se reúnen con las partículas de agua. Las gotas positivas que han sido fraccionadas por acción de la corriente de aire también son movilizadas a la parte superior de la nube, cuando el viento cesa a determinada altura, estas gotas se unen entre ellas para formar gotas grandes y caer de nuevo, al llegar a la zona de vientos se desintegran otra vez, aumentando la carga positiva.

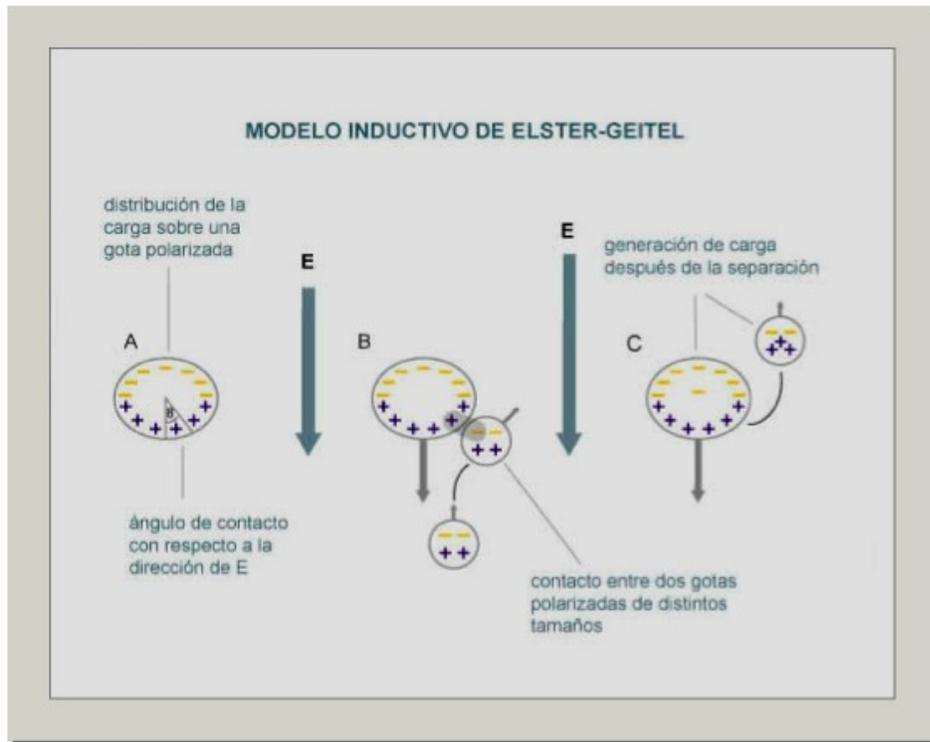
Esta teoría ha sido constatada utilizando globos sonda, y con estas prácticas se ha obtenido detalles interesantes, en la parte inferior de la nube existe una temperatura promedio de  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la parte superior de la nube puede alcanzar temperaturas de hasta  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ , estos gradientes térmicos desempeñan un papel importante para la formación de la descarga, ya que de acuerdo con la ley de Paschen favorecen a la descarga con orientación terrestre. La principal ventaja de esta teoría es que puede ser simulada en los laboratorios, pero se tiene que manejar unas

velocidades del viento superiores a los 8 m/s, ya que si no se alcanza la velocidad crítica para la desintegración de las gotas, no se podrá formar la distribución espacial de las cargas, dificultándose la precipitación.

Simpson concluye que las primeras gotas de lluvia de una tormenta denotan un comportamiento electropositivo, según se puede verificar con la ayuda de pluviómetros, y estas proceden del foco de tormenta. Las gotas siguientes tienen un carácter electronegativo y solo en los estados avanzados de la tormenta vuelven a observarse gotas electropositivas. Se supone que estas provienen de los estratos superiores de la nube.

### 2.1.3. Teoría de Elster y Geitel

La teoría de Elster y Geitel también es conocida como la teoría de influencia eléctrica. En la nube se encuentran gotas con diferentes dimensiones, las más grandes se precipitan y las más pequeñas son elevadas por acción del viento. Las gotas son polarizadas por el efecto del campo eléctrico existente, esto conduce a la formación de cargas positivas en la parte inferior de la gota y cargas negativas en la parte superior de la misma. El roce de una gota grande con una de menor tamaño produce un intercambio de cargas. En la gota pequeña predomina la carga positiva y en la grande la negativa. Ambas gotas se desplazan en sentido opuesto. En la nube, por consiguiente, se acumula poco a poco cargas positivas en su parte superior y cargas negativas en la parte inferior. El campo eléctrico que se forma favorece a la separación de cargas por influencia.



**Figura 2. Modelo de Elster-Geitel**

Según se puede apreciar en la figura después de la colisión descendería la gota grande con un exceso de carga negativa ascendería (o descendería más lentamente) la gota más pequeña con un exceso de carga positiva. Por lo tanto el campo  $E$  se vería reforzado con este mecanismo. En comparación con la teoría anterior, la formación de la nube se parece, pero se diferencia en la distribución y separación de cargas, ya que el roce entre gotas juega un papel muy importante. Con estudios más recientes se le ha restado importancia a esta teoría, ya que el roce parece ser importante solo en la formación de la lluvia y no en la distribución espacial de las cargas eléctricas.

#### 2.1.4. Teoría de Wilson

Esta teoría también es conocida como la ionización de la gota de lluvia, asume igual que la teoría de Elster y Geitel, una influencia del campo eléctrico en la formación de la gota. Wilson reemplaza a la acción de la gota pequeña de la teoría de

Elster y Geitel, por la acción de los iones, simplificándose así el fenómeno de intercambio de cargas entre gotas.

En la gota que cae se separan las cargas eléctricas por la acción del campo eléctrico de por sí existente. La parte superior de la gota acusa entonces carga negativa y la inferior carga positiva. El viento a su vez, arrastra los iones hacia la nube, donde los negativos son atraídos por la carga positiva de la parte inferior de la gota. Los iones positivos son repelidos al mismo tiempo y transportados por el aire hacia la parte superior de la gota, la cual continúa su caída, solo con carga negativa. La nube denota carga positiva en su mitad superior y una negativa en la inferior.

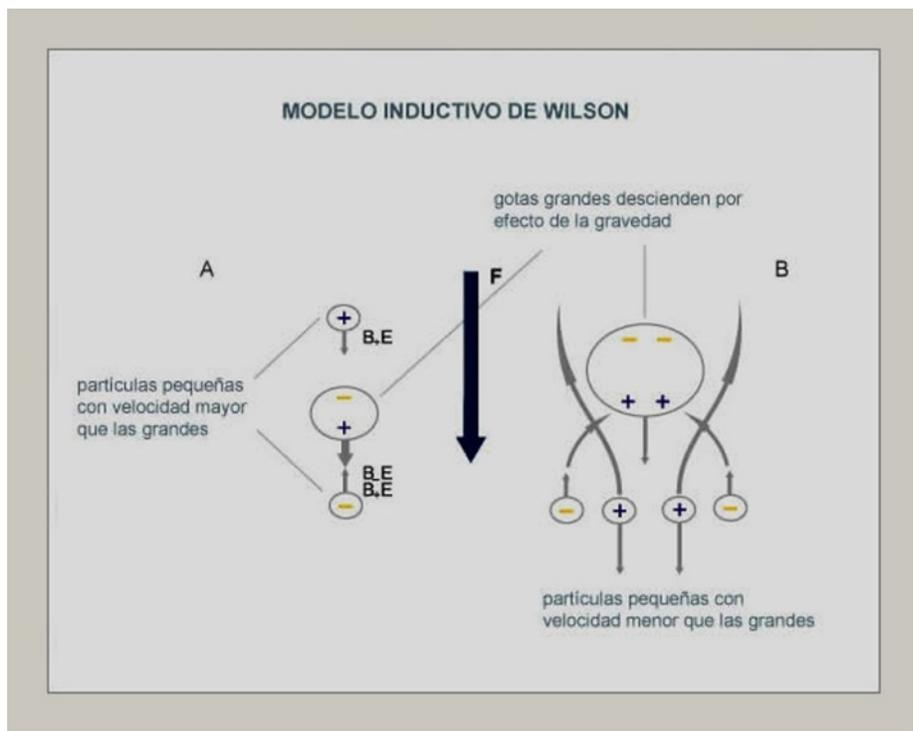


Figura 3. Teoría de Wilson

La teoría de Wilson posee algunas dificultades para su observación práctica. Así, por ejemplo, el tiempo medio de formación de una carga eléctrica de  $1\text{Cb}/\text{km}^3$ , por la acción de un gradiente eléctrico de  $1\text{kV}/\text{cm}$ , asciende a los 170 minutos. Para la formación de una tormenta atmosférica esta carga resulta muy pequeña y con un

tiempo de formación muy largo. Estos motivos le restan importancia a esta teoría, aunque sirve para explicar la distribución de las cargas en la nube.

Todas las teorías sobre las tormentas eléctricas coinciden en que la descarga atmosférica procede de la concentración de cargas negativas, cuando la parte superior de la nube llega a los  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en la parte inferior se registran temperaturas superiores a los  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esta afirmación se ve verificada en la práctica por un sencillo pero relevante hecho; las primeras descargas eléctricas hacia la tierra denotan comportamiento electronegativo. En estas circunstancias se puede resumir al ciclo de una tormenta eléctrica de la siguiente manera:

- Durante el crecimiento de la nube se observa la presencia de fuertes vientos ascendentes. Esto sucede aproximadamente de 10 a 15 minutos antes de la formación de las primeras gotas de agua.
- Una vez constituida la nube se observan vientos descendentes, en especial de su parte inferior, así como descargas atmosféricas y precipitación. Esta fase intermedia dura entre 15 a 30 minutos.
- Durante el desmoronamiento de la nube, con un tiempo de duración aproximado de 30 minutos, se observan leves vientos descendientes a través de todo el volumen ocupado por la nube, al igual que una ligera atenuación de las descargas atmosféricas y de la precipitación.
- El tiempo total de duración de la nube de tormenta es, por consiguiente, de aproximadamente una hora, pudiéndose extender temporalmente al formarse nuevos focos de tormenta.

La nube de tormenta es el punto de partida de la descarga atmosférica, denominada rayo, se produce porque las cargas no se encuentran distribuidas de manera uniforme. Esto ocasiona que las cargas desiguales de la nube, principalmente en la zona inferior, comienzan a ocurrir pequeñas descargas eléctricas. Esto sucede una vez que el gradiente eléctrico alcanza valores superiores a  $5\text{kV/cm}$ . Así, y como consecuencia de la ionización por choque, se va formando una gran cantidad de

cargas eléctricas, las cuales disminuyen apreciablemente la rigidez dieléctrica de la zona afectada.

Estas cargas comienzan entonces a crecer en forma de avalancha, formando una especie de cono llamado descarga piloto, el cual por la acción de las gotas de agua y corriente de aire, crece en ambas direcciones. La intensidad de corriente que acompaña a la descarga piloto es tan leve (solo algunos Amperes) que no puede registrar una cámara fotográfica. La velocidad de la propagación de esta descarga si es considerable (1/20 de la velocidad de la luz, unos 15.000 km/s.). En su avance la descarga piloto se ve acompañado por una serie de descargas escalonadas, las cuales tienen una velocidad de propagación superior a la de la descarga piloto (1/6 de la velocidad de la luz, unos 50.000 km/s.), con un recorrido o existencia promedio de solo 50 metros. La tortuosa y accidentada trayectoria de dichas descargas le confiere el aspecto característico al rayo.

Una vez que la descarga piloto llega a la Tierra, queda trazado en el espacio interelectrónico (nube-tierra) un canal o sendero plasmático, donde el aire ha sido fuertemente ionizado y por el cual pasaran las descargas sucesivas. El tiempo que duran estas se produce un súbito calentamiento del aire, y se supone que el trueno se debe a la brusca dilatación que este calentamiento trae consigo. En todo este proceso también se producen fenómenos de luminiscencia, comúnmente conocidos como relámpagos, los cuales se deben a la explosión de un compuesto muy inestable (la materia cerámica o fulminante) de los elementos de la atmósfera.

En el momento en el que el rayo piloto se va acercando a la tierra, aumenta considerablemente el gradiente eléctrico, favoreciendo la formación de un canal de recepción, éste, partiendo de la superficie de la tierra, crece en sentido opuesto, cuando ambos se encuentran comienza a fluir o circular la intensidad de corriente de descarga. Este fenómeno se ha verificado con la utilización de cámaras ultrarrápidas, entre ellas la cámara de Boys. En las placas se puede observar una solución de continuidad del canal plasmático en intervalos de 30 a 90  $\mu$ s. Se cree que esto

obedece a ionizaciones por choque, las cuales van preparando la próxima descarga, mientras que las ramificaciones se atribuyen a la acción del viento, estas no siempre llegan al electrodo opuesto, ya que la intermitencia en forma de canal les resta energía.

Cuando se ha formado el canal de la descarga principal la gran cantidad de cargas eléctricas negativas concentradas en la nube comienzan a abandonarla, y para tratar de neutralizar la carga eléctrica de la nube, una gran cantidad de cargas positivas abandonan la tierra. En la mayoría de los casos el choque es tan fuerte, que como consecuencia del exceso de carga, en la nube se produce una segunda descarga hacia la tierra a través del mismo canal, y así sucesivamente. La velocidad de propagación de esta última es mucho más lenta (3% de la velocidad de la luz), pero el número de ellas puede llegar en algunos casos hasta 54 descargas.

#### 2.1.5. Tipos de Descargas Atmosféricas

Según López & García [5] existen tres tipos de descargas atmosféricas, las cuales serán explicadas a continuación:

1. *Rayo intra nube*: Es el tipo más común en la descarga. Ocurre entre los centros de carga opuestos dentro de la misma nube de tormenta.
2. *Rayo entre nubes*: Ocurre entre centros de carga en dos diferentes nubes con la descarga recorriendo el espacio que hay entre ellas. Pueden alcanzar hasta 20 km.
3. *Rayo nube-tierra*: Es el más dañino y peligroso aunque, no es el más común. La mayoría se originan cerca del centro de carga negativa de la nube de tormenta y liberan carga negativa hacia la tierra. Será en este tipo en el que nos centraremos.

### 2.1.6. Efectos Producidos por la Descarga Atmosférica

Al caer un rayo en una instalación siempre buscara el camino a tierra de más baja impedancia y por él circulará hasta la tierra. Si el conductor tiene algún equipo eléctrico conectado y es atravesado por esa corriente, muy probablemente será destruido. Si bien la caída directa del rayo es la más devastadora, también es la más improbable, no obstante cuando un rayo impacta de manera directa produce destrucción por la gran cantidad de energía asociada al fenómeno. En caso de impactar con una instalación donde hay materiales combustibles, que puedan estar expuestas al rayo, al canal del rayo o al efecto de calentamiento del rayo, pueden producirse importantes incendios.

### 2.1.7. Efectos Secundarios de una Descarga Atmosférica

Además de lo expuesto en el párrafo anterior, también existen efectos secundarios de un impacto directo o cercano a una instalación, entre ellos se tienen los siguientes:

1. *Carga electrostática.* La célula de tormenta induce una carga estática en cualquier estructura inmersa en la tormenta, esta carga se relaciona con la célula por lo cual se inducirá una diferencia de potencial en la estructura o conductor respecto a tierra siendo esto un posible causante de interferencias. Como consecuencia de la carga electrostática se producen los arcos secundarios que es una de las interferencias más comunes.

2. *Los pulsos electromagnéticos.* Son el resultado de los campos electromagnéticos transitorios que se forman por el flujo de corriente a través del canal de descarga del rayo. Después de que se establece este canal entre la nube y la tierra, llega a formarse un camino tan conductivo como un conductor eléctrico, la corriente de neutralización comienza a fluir rápidamente y produce un campo magnético en relación a la misma. Ya que estas corrientes de descarga crecen rápidamente y alcanzan corrientes pico de cientos de miles de Amperes, los pulsos magnéticos que ellos crean, pueden ser muy significativos. El voltaje inducido

resultante dentro de cualquier grupo donde existen varios cables que corren paralelamente, puede también ser muy significativo.

3. *Los pulsos electrostáticos.* Los transitorios atmosféricos o pulsos electrostáticos, son el resultado directo de la variación del campo electrostático que acompaña a una tormenta eléctrica. Cualquier conductor suspendido sobre la superficie de la tierra, está inmerso dentro de un campo electrostático y será cargado con un potencial en relación con su altura, sobre la superficie de la tierra. Por ejemplo, una línea de distribución o una línea telefónica aérea, a una altura promedio de 10 metros sobre la tierra, en un campo electrostático medio, durante una tormenta eléctrica, se cargara con un potencial entre unos 100 kV y 300 kV con respecto a tierra.

4. *Las corrientes de tierra.* Las corrientes transitorias de tierra es resultado directo del proceso de neutralización que sigue a un impacto de rayo. El proceso de neutralización es consumado por el movimiento de la carga a lo largo o cerca de la superficie de la tierra; desde el punto donde se induce la carga, proveerá un camino más conductivo a partir del punto donde se inicia, al punto donde termina el rayo. Esto induce un voltaje en relación con la carga, que se maneja en esos conductores, lo cual otra vez está relacionado con la cercanía a donde el rayo impactó. A este voltaje inducido se le llama “corriente transitoria de tierra” y aparece en alambres conductores, tuberías y otras formas de conductores. Aunque el proceso de descarga es muy rápido (20 microsegundos), y la relación de crecimiento al pico es tan pequeño como 50 nanosegundos, el voltaje inducido será muy alto.

Por otra parte la terminación de un rayo de retorno en la tierra también puede causar efectos tales como: (a) causar arcos a través de la tierra a tuberías de gas adyacentes, cables o sistemas de tierra y (b) la corriente de sobrecarga puede correr por la tierra, paralelo al sistema de tierras electrónico existente, lo cual originará una distribución de elevación de potencial de tierra no uniforme en el sistema tierra.

Es de vital importancia tomar en cuenta todo este conjunto de efectos producidos por las descargas atmosféricas, pero para poder entenderlos, es necesario conocer ciertos parámetros los cuales facilitaran comprender el comportamiento en espacio y tiempo, así como, sus relaciones con otros fenómenos naturales.

#### 2.1.8. **Parámetros Medibles de un Rayo**

Diversos científicos desarrollaron gran cantidad de investigaciones con respecto al rayo, las cuales en sus inicios establecieron hasta quince parámetros medibles del mismo. No obstante estos parámetros pueden dividirse en cuatro grupos fundamentales: los parámetros de incidencia; la amplitud máxima de la corriente de retorno del rayo; la forma de onda de la corriente del rayo y el ángulo de incidencia del rayo respecto a la vertical.

**Los parámetros de incidencia** del rayo son: la densidad de rayos a tierra; el nivel cerámico; las características de descargas múltiples y la polaridad de la descarga.

*Densidad de rayos a tierra.* La densidad de rayos ( $N_g$ ) de una región representan la cantidad de descargas nube-tierra que impacta en un área de un kilómetro cuadrado en un año, este valor se puede obtener de tres maneras: (a) el uso de contadores; (b) por medio de registros realizados por satélites y (c) por medio de ecuaciones empíricas que lo relaciona con el nivel cerámico ( $T_d$ ), de los cuales el menos exacto es el empírico, pero existen zonas donde no existen otras alternativas.

*Nivel Cerámico.* Indica el número de días por mes y año en que se pueden oír truenos en un área de 10 km, cuyo centro viene siendo el sitio en cuestión. Esta observación o registro del fenómeno se venía haciendo visualmente, lo cual en realidad resultaba ser una apreciación muy subjetiva. Actualmente tienen una amplia utilización un instrumento de registro automático de los rayos conocido como el cigre counter. El cual fue desarrollado por la Universidad Técnica de Darmstadt.

Existe una ecuación propuesta por Anderson y Eriksson en el año de 1980, que relaciona la densidad de rayos a tierra con el nivel cerámico, los resultados obtenidos a través de la misma, están avalados por un periodo de observación de seis años.



#### **Ecuación 1. Densidad de rayos**

La obtención de la densidad de rayos a tierra en forma directa es posible mediante la utilización de los sistemas de detección y localización de rayos, ya que pueden discriminar las descargas nube a nube o de la nube a tierra, permitiendo obtener directamente por medición, la cantidad de rayos a tierra en la región que abarca su radio de cubrimiento.

*Características de descargas múltiples.* Los rayos a tierra frecuentemente incluyen un proceso de descargas múltiples las cuales pueden darse de dos maneras:

- Originadas por el camino aun ionizado de la descarga y se suceden desde otras regiones cargadas de la misma nube, una o más descargas a tierra que en cualquier caso (descarga principal ascendente o descendente) se desarrollan de la nube a la tierra para golpear el mismo punto en el que incide la descarga principal. Esta forma ocupa alrededor del 90% de las descargas múltiples

- Originadas por ramificaciones al final del campo ionizado que conducen a la descarga principal y tienen diferentes puntos de terminación a la descarga de retorno. En la Tierra ocurre en varios puntos (rayos de raíces ramificadas) o pueden involucrar una serie de descargas espacialmente separadas, que ocurren a intervalos comparables a los descritos anteriormente. Sólo el 10% de las descargas múltiples corresponden con esta forma

El conocimiento de las características de las descargas sucesivas es importante para la operación de los sistemas eléctricos porque ellos pueden someterse

a un grupo de descargas en un tiempo muy corto, pero sus sistemas de protección deben estar diseñados para estas contingencias.

*Polaridad de la descarga.* La polaridad de las descargas puede ser positiva o negativa, aunque alrededor del 90% de las descargas son rayos con líderes descendientes con polaridad negativa.

La forma teórica del impulso de corriente de una descarga atmosférica, está basado en un modelo el cual puede ser utilizado de simulador para sacar conclusiones y adoptar medidas que permitan aprovechar las buenas consecuencias del fenómeno y evitar o atenuar las malas consecuencias. La expresión matemática propuesta por Pando, [6] en función del tiempo es la siguiente:

$$I = \frac{(I_{\max} / \eta)(\tau / T)^{10}}{[1 + (\tau / T)^{10}]e^{-\tau/T}}$$

**Ecuación 2. Expresión matemática de la corriente del rayo**

#### 2.1.9. **Sistemas de Medición de los Rayos**

Debido a la cantidad de cambios que se producen en la atmósfera, al momento de producirse una descarga atmosférica, existen diversos métodos que permiten medir dichas descargas. En algunos casos, estos métodos pueden ser complementarios, ya que dependiendo de la medición se pueden obtener distintos parámetros del mismo evento. Los métodos experimentales para la medición de las descargas se dividen en (a) Medición del campo eléctrico; (b) Medición del campo electromagnético; (c) Medición Fotoeléctrica; Utilización de la cámara de Boys y (e) Uso de Espectrómetros.

### 2.1.10. Medición del Campo Eléctrico.

Por la naturaleza del objetivo del presente trabajo, basado en la medición del campo eléctrico de las descargas atmosféricas sólo se procederá a explicar los diversos sensores que se involucran en este aspecto, los cuales son el fluxómetro o Fluxómetro electrostático y las antenas de campo eléctrico, también conocido como Electrómetro.

**Fluxómetro electrostático.** Este es un dispositivo que se basa en la inducción electrostática, consiste en uno o dos electrodos, los cuales pueden rotar en un campo eléctrico, o estar expuestos periódicamente a dicho campo controlado por medio de un obturador. El primer caso, los electrodos giran en el campo corresponde al modelo cilíndrico, el cual está ilustrado en la siguiente gráfica:

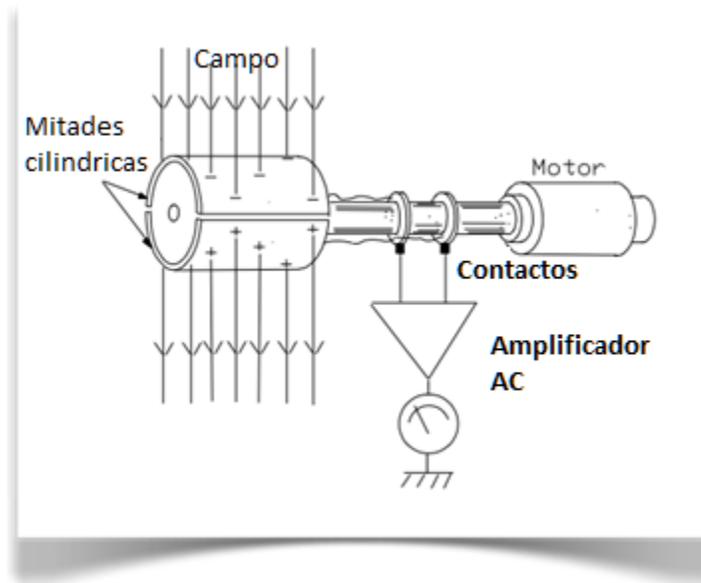
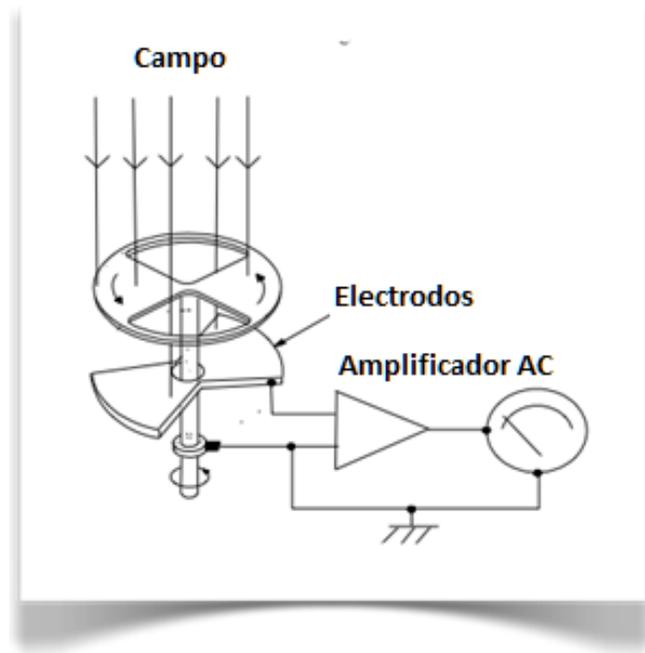


Figura 4. Fluxómetro electrostático Cilíndrico

Este fluxómetro comprende su parte cilíndrica por dos mitades, las cuales están aisladas entre sí, un motor eléctrico rota las dos mitades en el campo eléctrico que desea medir, de esta manera estas mitades son expuestas alternando, tanto a la dirección positiva, como a la negativa de dicho campo. El resultado es una señal

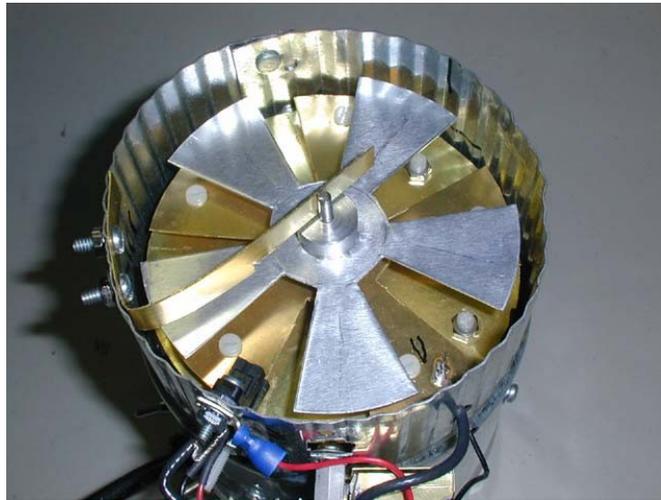
alterna generada entre las dos mitades (electrodos) que puede ser fácilmente amplificable. Luego a la salida del amplificador se conecta el medidor.

La otra configuración mostrada en la figura 5, está basada en el mismo principio, pero depende de un obturador (shutter), en este caso los electrodos se encuentran estáticos, y son expuestos periódicamente por el obturador.



**Figura 5. Fluxómetro electrostático con obturador**

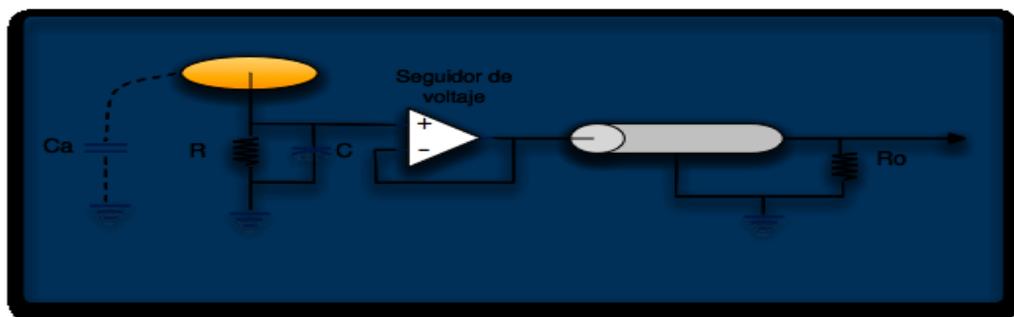
Aunque no es de uso común, el Fluxómetro electrostático cilíndrico tiene la ventaja de que cuando se monta en una posición fija, también puede indicar la dirección del campo, esto se logra mediante la medición del desplazamiento de fase de la señal de corriente alterna en relación con la orientación del campo eléctrico. El obturador rotatorio debe ser alineado con la fuente del campo para poder obtener la máxima lectura. Esta característica es útil cuando se buscan cargas electrostáticas que puedan causar problemas en laboratorios o en plantas industriales.



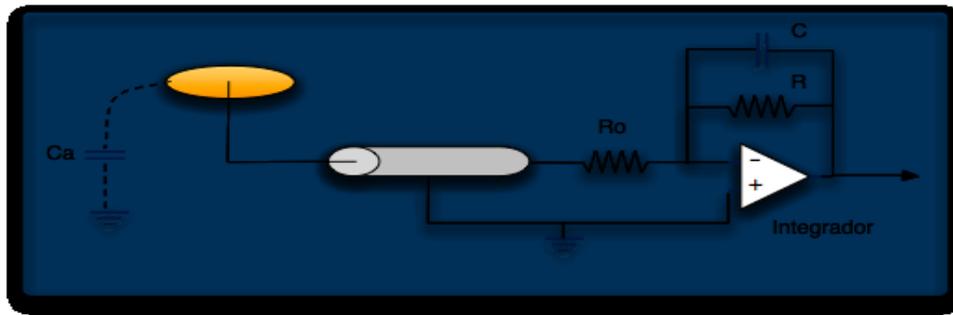
**Figura 6. Implementación de un Fluxómetro electrostático con obturador**

### **Antenas de campo eléctrico o Electrómetro**

Este sensor está formado por una superficie metálica, puede ser una placa, una esfera o un cable vertical (látigo). Este último no se utiliza para medir campos cerca de las tormentas, ya que estas podrían atraer una de las descargas. En este tipo de sensores, la superficie metálica forma una capacitancia respecto a tierra, que debido a la variación del campo eléctrico, se induce una carga  $Q(t)$ , que alimenta al circuito electrónico y puede estar dispuesto de cualquiera de las siguientes formas:



**Figura 7. Antena de campo con seguidor de voltaje**



**Figura 8. Antena de campo con Integrador electrónico**

En el diagrama se muestran dos sistemas de antenas de campo, La electrónica integra la corriente de la placa entregando a su salida un voltaje proporcional al campo eléctrico de la atmósfera, en la figura 7 la integración se debe al condensador formado entre la placa y tierra, en la figura 8, existe un integrador electrónico y  $R_o$  es una resistencia que corresponde con la impedancia característica del cable coaxial, para evitar las reflexiones de onda, en este caso se recomienda una resistencia relativamente grande para descargar el condensador del integrador, de esta manera el voltaje decae con una constante de tiempo RC.

Al implementar las placas paralelas lo que se busca es formar una capacitancia, ya que al producirse una variación en el campo eléctrico, como la que se produce por una descarga atmosférica, se induce un diferencial de carga entre las placas, esta variación de carga debe ser registrada por la etapa electrónica siguiente. Para que tenga sentido implementar este tipo de solución es necesario saber cuál es la constante de proporcionalidad entre las magnitudes de la variación que se está midiendo y la descarga, así como también estudiar el comportamiento del campo eléctrico de un condensador (placas paralelas).

El campo eléctrico entre placas paralelas de área finita cargadas opuestamente se define mediante la siguiente ecuación:



**Ecuación 3. Campo eléctrico entre placas paralelas**

Donde:

E: Campo eléctrico normal a la superficie de las placas [V/m]

Q: Carga eléctrica entre las placas [C]

$\sigma$ : Densidad de carga superficial [C/m<sup>2</sup>]

$\epsilon$ : Permisividad del dieléctrico [F/m]

Cabe destacar, que esta ecuación se utiliza para modelar los condensadores ideales, que son aquellos, que entre otras características, poseen una separación entre placas muy pequeña cuando se compara con las dimensiones de la placa. Hay otra ecuación que permite relacionar el voltaje con la carga eléctrica (concepto de capacitancia), y es la siguiente:



**Ecuación 45 Tensión en función de la carga y la capacitancia**

Donde

C es la capacitancia de las placas [F]

V la tensión a la salida [Volt].

Sustituyendo la ecuación 3 en la ecuación 4, queda la siguiente ecuación:



**Ecuación 5. Constante de proporcionalidad entre el campo eléctrico y la tensión**

Con la expresión numero 5, se ha obtenido la constante de proporcionalidad, que relaciona la tensión con el campo eléctrico. Dicha constante depende exclusivamente de las características de la antena, como son el área de sus placas, el material dieléctrico entre las mismas, y la capacitancia total de la antena.

**Sistemas de Adquisición de Datos.** Es la interfaz entre el mundo analógico real y el mundo digital de los computadores digitales, permitiendo tomar señales del entorno y convertirlas en datos que posteriormente se pueden procesar y mostrar. El sistema de adquisición es comúnmente utilizado en los sistemas de control, ya que al ser procesada la información recibida se obtienen una serie de señales de control. Además de ser de gran utilidad debido a las características y ventajas tales como: (a) Bajo costo; (b) Alta confiabilidad; (c) Facilidad de implementación; (d) Gran exactitud si se desea y (e) Invariabilidad en el tiempo

**Estructura de un sistema de adquisición de datos.** En la figura 8, se puede observar la estructura general de los bloques que componen un sistema de adquisición de datos. En el diagrama existen tres bloques fundamentales: el transductor, el acondicionador de la señal y el convertidor analógico-digital.

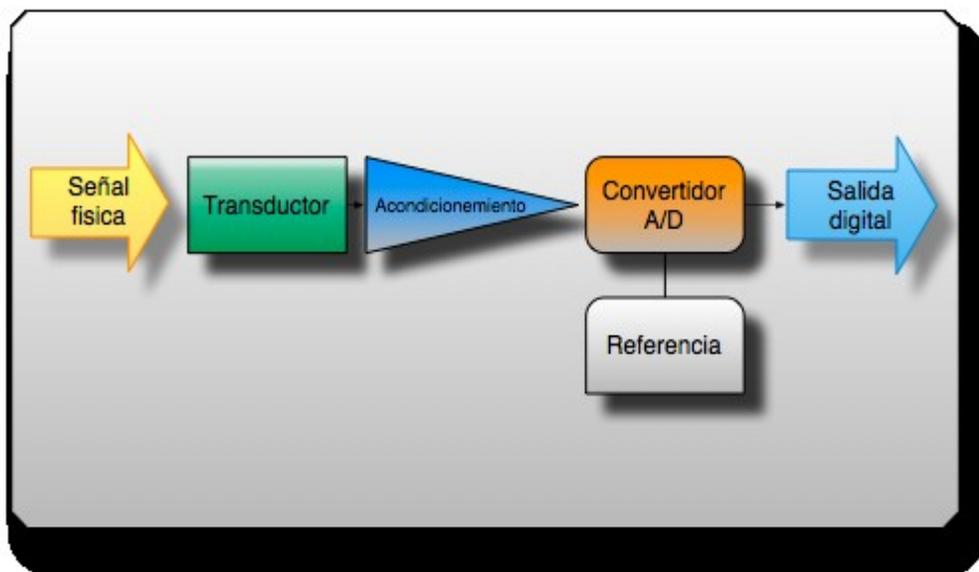


Figura 9. Esquema general de un sistema de adquisición de datos

**El Transductor.** Es un elemento que convierte la magnitud física que se va a medir en una señal de salida, (la cual típicamente es tensión o corriente), que puede ser procesada por el sistema planteado. En general puede decirse que un transductor es un elemento que convierte energía de un tipo en otro. Por lo tanto el transductor

debe tomar poca energía del sistema bajo observación, para que la medición no altere el sistema.

***El acondicionamiento de la señal.*** Es la etapa encargada de filtrar y adaptar la señal proveniente del transductor y entregarla a la entrada del convertidor analógico-digital. En este proceso de acondicionamiento la señal debe adaptarse, el rango de salida del transductor, con el rango de entrada del convertidor. Adicionalmente es necesario acoplar la impedancia de salida de uno, con la impedancia de entrada del otro. La adaptación entre rangos de salida del transductor y el de entrada del convertidor, tiene como objetivo el aprovechar el margen dinámico del convertidor, de modo que la máxima señal de entrada debe coincidir con la máxima del convertidor, (guardando el respectivo margen de protección). La adaptación de impedancia es fundamental, ya que los transductores poseen una salida de alta impedancia, que normalmente no pueden excitar la entrada de un convertidor.

En esta etapa, se puede encontrar diversas sub-etapas, pero a diferencia de las etapas anteriores, la presencia de ellas va a depender de la aplicación, estas son: (a) Amplificación; (b) Excitación; (c) Filtrado; (d) Multiplexado; (e) Aislamiento y (f) Linealización

***Amplificación.*** Es el tipo más común de acondicionamiento. Para conseguir la mayor precisión posible la señal de entrada debe ser amplificada de modo que su máximo nivel coincida con la máxima tensión que el convertidor pueda leer.

***Aislamiento.*** Otra aplicación habitual en el acondicionamiento de la señal es el aislamiento eléctrico entre el transductor y el computador, para proteger al mismo de los transitorios de alta tensión que puedan dañarlo. Un motivo adicional para usar el aislamiento es garantizar que las lecturas del convertidor no son afectadas por las diferencias en el potencial de masa o por tensiones en modo común. Cuando el sistema de adquisición y la señal a medir están ambas referidas a masa pueden aparecer problemas si hay una diferencia de potencial entre ambas masas, apareciendo un “bucle de masa”, que puede devolver resultados erróneos.

*Multiplexado.* El multiplexado es la conmutación de las entradas del convertidor, de modo que con un solo convertidor se pueda medir los datos de diferentes canales de entrada. Puesto que el mismo convertidor está midiendo diferentes canales, su frecuencia máxima de conversión será la original dividida por el número de canales muestreados.

*Filtrado.* La finalidad de utilizar filtros es eliminar las señales no deseadas de la señal que se está observando. Por ejemplo en señales de muy baja frecuencia (como la temperatura), se usa un filtro de ruido de unos 4 Hz, que eliminara interferencias, incluidos los de 60 Hz de la red eléctrica.

*Excitación.* La etapa de acondicionamiento de la señal a veces genera excitación para algunos transductores, como por ejemplo las galgas extensiométricas, que necesitan por su constitución interna o por la configuración como se conectan.

*Linealización.* Muchos transductores, como los termopares, presentan una respuesta no lineal ante cambios lineales en los parámetros que están siendo medidos, Aunque la linealización puede realizarse mediante métodos numéricos en el sistema de adquisición de datos, suele ser una buena idea hacer esta corrección mediante circuitería externa.

***El convertidor analógico-digital.*** Es un circuito electrónico que convierte una señal analógica en digital. Se utiliza en equipos electrónicos como computadoras, grabadores digitales de sonido y de vídeo, equipos de comunicación y equipos de instrumentación electrónica. La señal analógica, que varía de forma continua en el tiempo, se conecta a la entrada del dispositivo y se somete a un muestreo (cuantificación discreta, o asignación de un valor numérico a una determinada intensidad de la señal) a una velocidad fija, obteniéndose una señal digital a la salida del mismo. Esta señal se puede volver a convertir en analógica mediante un convertidor digital-analógico.

Un convertidor analógico digital (ADC, por sus siglas en inglés), muestrea una señal analógica y la convierte en un valor digital de “N” bits. Usualmente será

necesario acondicionar la señal de entrada del ADC, bien sea para atenuarla o para amplificarla. Es un sistema que presenta en su salida una señal digital a partir de una señal analógica de entrada, realizando las funciones de muestreo cuantificación y codificación.

*El muestreo de la señal.* El muestreo o discretización es el proceso mediante el cual se extrae la magnitud de una señal en un proceso determinado. Este puede ser periódico o no, pero usualmente se realiza de manera periódica para simplificar la matemática involucrada. Implica pérdida de información respecto a la señal de entrada, ya que de un número infinito de valores posibles para la entrada sólo se tiene un valor finito de valores posibles para la salida, por lo tanto es fundamental saber cuántas muestras se han de tomar. Para poder determinar la cantidad de muestras es necesario conocer el error medio admisible, el medio de reconstrucción y el uso final de los datos de la conversión. Independientemente del uso final, el error total de más muestras será igual al error total del sistema de adquisición y conversión más los errores añadidos por el sistema digital. La precisión media de los datos muestreados puede mejorarse por estos métodos:

- Aumentar el número de muestras por ciclo
- Filtrado previo al multiplexado
- Filtrar la salida del convertidor analógico-digital

*Teorema de Nyquist o teorema de muestreo.* El objetivo fundamental de la adquisición es poder reconstruir la señal muestreada de una manera fiel. Este teorema dice que la frecuencia mínima de muestreo para poder reconstruir la señal ha de ser el doble de la frecuencia de la señal a medir, pero para que la reconstrucción sea fiable es necesario muestrear a una velocidad mucho mayor que la establecida por este muestreo.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

Para cumplir con los objetivos planteados, se diseñó una metodología que permitió llevar un orden secuencialmente lógico para obtener los resultados requeridos. El criterio utilizado para este fin, consiste en diversas fases, que se definen a continuación.

#### **PRIMERA FASE. Investigación y Documentación.**

Se realizó una investigación acerca del comportamiento de las descargas atmosféricas, que fue documentado en el marco teórico, a fin de poder comprender los sistemas de medición de dichos eventos. Debido a que el sistema de medición requerido por el proyecto, está basado en antenas de campo eléctrico, fue necesario buscar antecedentes con este sistema de medición. En la Universidad Nacional de Colombia, se realizó un trabajo, el cual lleva por nombre “Modelos de la corriente de retorno del rayo a partir del campo eléctrico vertical”. Dicho trabajo está basado en la medición mediante antenas de campo con placas paralelas.

También fue necesario revisar las normativas existentes para este tipo de mediciones. La norma de la IEEE para medición es de señales impulsivas (IEEE Std 1122-1998) establece que la velocidad de muestreo mínima debe ser 25 millones de muestras por segundo. Una vez revisada la documentación existente comenzó el

planteamiento de posibles soluciones para la implementación del sistema y el análisis de los requerimientos del proyecto.

## **SEGUNDA FASE. Análisis de los requerimientos del Sistema de Adquisición de Datos**

En esta etapa se realizó un análisis de los requerimientos del proyecto, para poder plantear diversas opciones, que luego de pruebas pertinentes, se escogieron las que mejor se adaptaron al proyecto. Comenzando con el transductor, (la antena de placas paralelas), lo primero fue escoger el material para construirla, que debe ser un conductor de superficie regular, debido a la disponibilidad, la opción más sencilla resultó construirla con placas de cobre. Una vez definido el material conductor, el siguiente paso fue definir el material dieléctrico para separar las placas. En primer lugar el aire, que posee un factor  $k=1,0006$ , pero al utilizar un material con una constante dieléctrica más alta, se obtiene una capacitancia mayor, ya que esta es proporcional a dicha constante. Hoyo, [7] Muestra en su página web un resumen de las constantes dieléctricas de diversos materiales, dichas constantes se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1. Constante dieléctrica de algunos materiales**

<b>Material</b>	<b><math>\epsilon_r</math></b>
Aceite	2,24
Agua a 20 °C	80
Aire	1,0006
Baquelita	4,9
Mica	5,4
Neopreno	6,9
Papel	3,7
Parafina	2,3
Plexiglás	3,4
Porcelana	7
Vidrio pyrex	5,6

Revisando estas constantes, resaltó la baquelita, ya que al construir una antena con este material se obtiene una capacitancia total unas cinco veces mayor, que utilizando el aire como dieléctrico. Adicionalmente, al utilizar una baquelita de doble cara, la separación entre placas es bastante uniforme, que garantiza una mayor uniformidad del material de la antena. El material escogido fue baquelita, por los motivos expuestos y por la disponibilidad en el mercado local.

El tipo de cable que conecta la antena con el circuito del tipo coaxial, ya que este posee un mayor ancho de banda y permiten alcanzar mayores distancias que cables de par trenzado, el conector utilizado fue el BNC hembra de chasis, mostrado en la figura 10.



**Figura 10. Conector BNC instalado en la antena**

Debido al comportamiento de la antena, ésta entrega es un diferencial de carga, que es necesario integrar esta corriente para obtener la carga en el condensador, que a su vez permite obtener un voltaje proporcional al campo eléctrico ortogonal a la placa. Para implementar este integrador se consultó diversas fuentes para obtener las consideraciones necesarias para un óptimo funcionamiento del mismo. Horowitz, [8] En un análisis de esta topología, destaca que debe utilizarse con amplificadores operacionales con entrada FET, ya que estos tienden a producir desviaciones en la salida producto del offset y a las corrientes de polarización, así como utilizar valores altos de resistencia y condensadores. Adicionalmente resalta la

importancia del tipo de condensador a utilizar, el cual debe ser de teflón, poliestireno o polipropileno. Entre las ventajas que poseen estos materiales Machut, [9] menciona: pérdidas muy bajas, soportan altas tensiones y corrientes y buena respuesta en alta frecuencia, motivo por el cual son ampliamente utilizados en circuitos integradores, temporizadores y en equipos de comunicaciones.

### **TERCERA FASE. Construcción del Sistema de Adquisición de Datos**

La siguiente etapa corresponde con el sistema de adquisición de datos, para esta etapa se plantearon diversas opciones antes de implementar la solución definitiva. La primera opción considerada fue utilizar una de los sistemas de adquisición de datos que ofrece el fabricante National Instruments, quienes poseen una amplia gama de sistemas que cumplen con el requerimiento en cuanto a velocidad, pero esta solución presento como desventajas el costo y la disponibilidad local. El sistema de adquisición más económico (NI USB-5132, mostrado en la Figura 11) cuesta US\$900, con una velocidad de muestreo de hasta 50MSPS y un ancho de banda de hasta 50MHz. Siendo este equipo el más sencillo de la gama, con el resto podemos alcanzar velocidades de hasta 200 MSPS y manejar resoluciones de 8, 12, 16 y hasta 32 bits



**Figura 11. Osciloscopio digital NI USB-5132**

Esta alternativa cumple con los requerimientos en cuanto a la velocidad de muestreo, pero fue necesario consultar otras opciones más económicas que facilitarían su implementación. Para esto se propuso utilizar una combinación entre un convertidor analógico digital y un microcontrolador, esta solución se muestra en la Figura 12, en la cual el microcontrolador se encarga de leer el dato digital del convertidor analógico-digital y transmitirlo, para posteriormente ser almacenado en un computador.

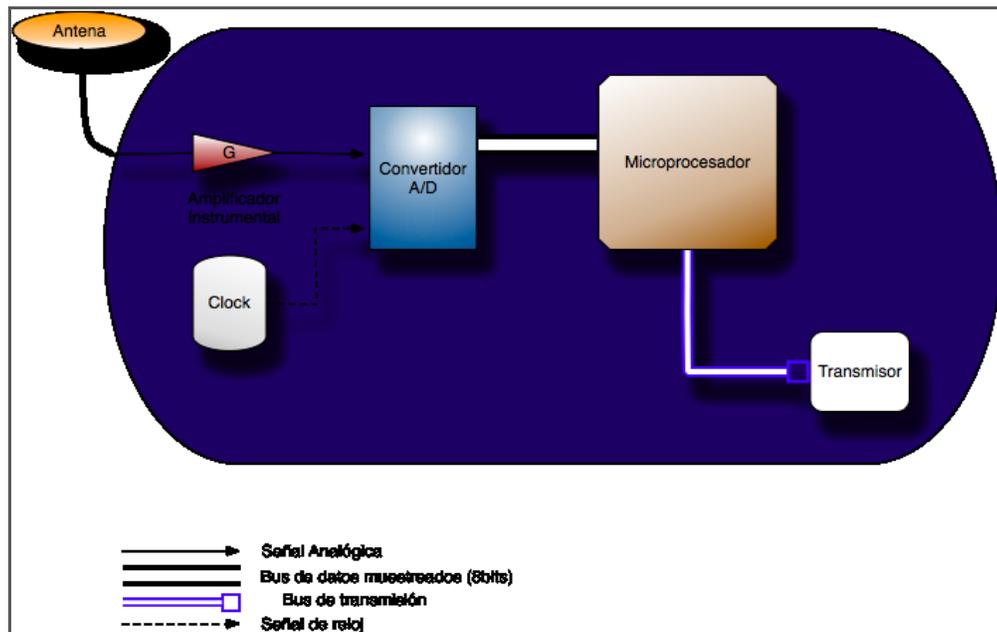
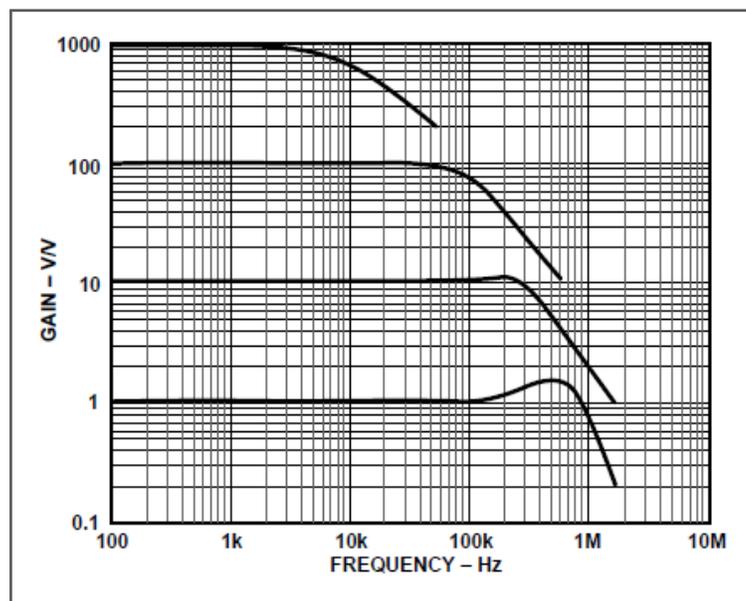


Figura 12. Sistema de adquisición con un convertidor A/D y un microcontrolador

El amplificador utilizado debe poseer una serie de características, que garanticen que la medición se ajusta al valor real medido. Una de las características principales, debe ser el tiempo de respuesta, ya que al ser la entrada un impulso de muy corta duración, el amplificador debe responder suficientemente rápido, para poder seguir la señal. Otra característica importante es el rechazo al ruido en modo común, ya que si el dispositivo genera un buen rechazo al ruido la medición será menos inmune a éste. En cuanto al convertidor analógico-digital se requiere de al menos 25MSPS (millones de muestras por segundo), la resolución depende en mayor

medida de la capacidad de almacenamiento del microcontrolador, ya que de acuerdo a la memoria interna se establecerá el tiempo total de muestreo. El microcontrolador debe ser capaz de leer cada uno de los datos del convertidor sin perder ningún dato, también debe poseer puertos de entrada y salida que permitan la comunicación con un computador por cualquiera de los estándares existentes, (USB, RS-232, entre otros).

Debido a que la señal posee un ancho de banda en el orden de los Megahertz, el amplificador debe poseer características superiores a los amplificadores instrumentales de uso común, éste además de poseer una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, su rechazo de señal en modo común debe ser alto, incluso en alta frecuencia. Bajo estas premisas comenzó la búsqueda del amplificador que cumpliera las mismas, varios modelos fueron tomados en cuenta como lo fueron el AD624, AD620 y algunos otros del fabricante Analog Devices, ellos tienen una limitación en cuanto al factor Ganancia por Ancho de banda (mostrado en la Figura 13), que en algunos casos pueden resultar para ganancias bajas, pero como inicialmente no se conocía la magnitud del voltaje entregado por la antena, se quiso elaborar un diseño que pudiera ofrecer cierta flexibilidad en caso que fuese necesario obtener más ganancia.



Un dispositivo que cumple con las premisas establecidas es el AD8129 de Analog Devices, con un costo de US\$ 1,6 y según su fabricante es capaz de manejar 200 MHz y tiene una velocidad respuesta de  $1060 \text{ V}/\mu\text{s}$ , adicionalmente posee una relación de rechazo en modo común (CMRR) de 80 dB mínimo @ 2 MHz, además de poseer una respuesta a frecuencias media bastante plana, tal y como se muestra en la figura 15.

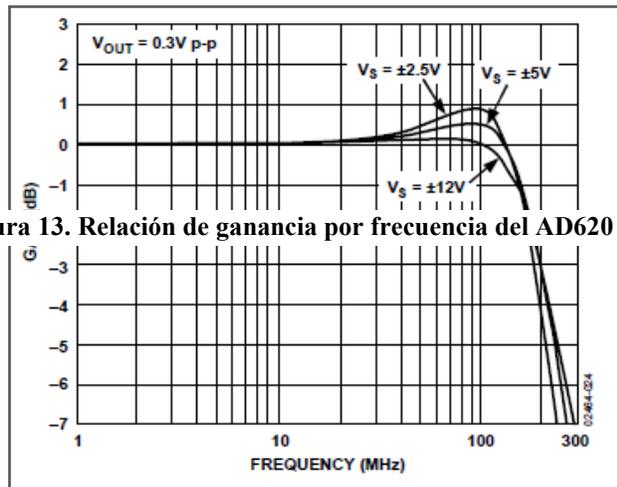
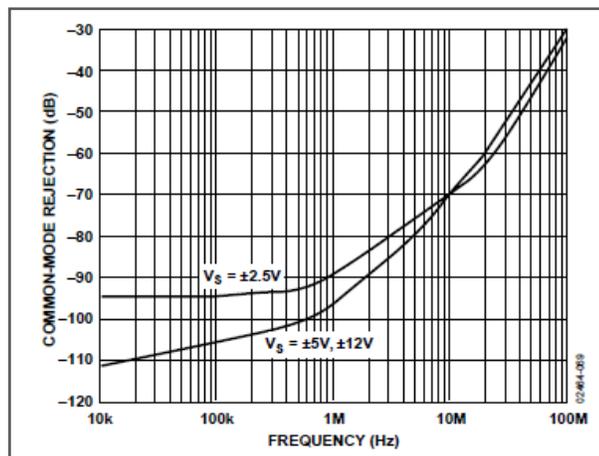


Figura 13. Relación de ganancia por frecuencia del AD620

Este amplificador es recomendado por el fabricante para aplicaciones de instrumentación de alta velocidad por las características mencionadas anteriormente.

El microprocesador debe cumplir con los exigentes requisitos de velocidad, por esto fue necesario buscar los modelos de mayor eficiencia y velocidad del mercado, también fue importante las experiencias previas en el manejo de dichos microprocesadores por tal motivo la búsqueda comenzó por la familia de la

**Figura 15. Relación de rechazo a ruido vs. frecuencia del AD8129**



**Figura 14. Ancho de banda del AD8129 con ganancia unitaria**

Microchip, el cual ofrece una gama alta con la familia 18 y la familia 24, estos controladores son capaces de ejecutar hasta 40 millones de instrucciones por segundo (40MIPS @ 40 MHz). Entre las principales ventajas de estas familias es que vienen en encapsulado tipo PDIP (dimensiones mostradas en la figura 16), encapsulado que resulta fácil de trabajar, ya que por su tamaño se pueden realizar las tarjetas y el montaje de manera manual. Otra de las ventajas es que por la arquitectura de estos procesadores pueden ejecutar una instrucción en un solo ciclo de reloj, lo que los hace muy eficientes.

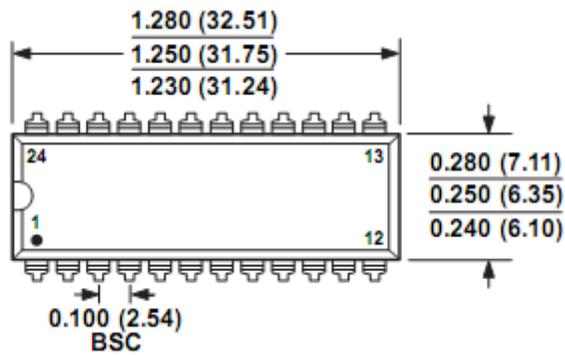
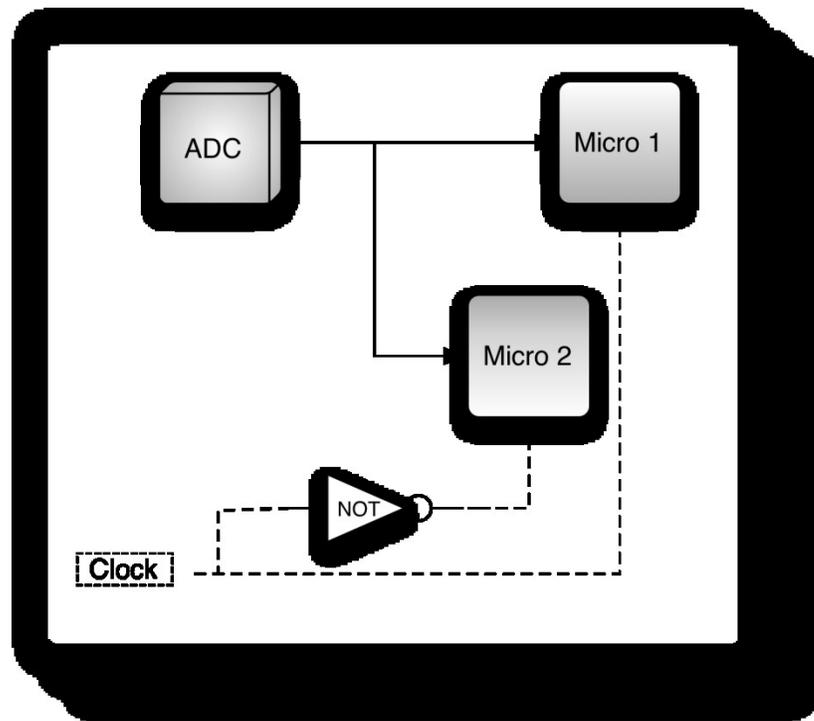


Figura 16. Encapsulado PDIP

El problema de emplear cualquiera de estos chips, es que la velocidad máxima de muestreo era 20MSPS, a pesar de que el microcontrolador puede manejar 40MIPS, el proceso de adquisición de los datos requiere de al menos dos instrucciones distintas, una de movimiento de la data y otra de incremento del puntero de la data. También es importante que la frecuencia de muestreo debería ser múltiplo de la frecuencia de operación del microcontrolador, para garantizar poder tomar la muestra cuando el valor ya este estable.

Definitivamente con un solo microcontrolador no puede alcanzarse la meta de 25MSPS, por lo cual se replantearon las opciones, una de ellas es el procesamiento paralelo, y se evaluó las posibilidades de implementar este tipo de procesamiento en el sistema planteado. El primer sistema de ellos el muestreo de la señal se realiza de manera compartida, los datos son tomados de manera alterna, en la figura 17 se muestra la disposición de los microcontroladores.



**Figura 17. Planteamiento de procesamiento paralelo**

El sistema de adquisición sería gobernado por un solo reloj, la diferencia es que esta señal va directa a uno de los controladores y al otro la señal de reloj pero negada, como se observa en la figura 17, la idea es que el primer controlador tome un dato y mientras se consume el ciclo de incremento del puntero el otro micro está tomando la siguiente data, con esto se almacenarían velocidades de adquisición de hasta 40MSPS, la desventaja de esta configuración, así como de la siguiente es que al muestrear mucho más rápido la memoria se agota con mayor rapidez, y en este caso donde la velocidad es tan crítica, es difícil conseguir memorias con velocidades de acceso tan bajas.

Adicionalmente la forma de trabajo anterior, genera un pequeño inconveniente adicional, y es que toda la data no se encuentra en un solo dispositivo, es decir que en caso que alguno falle se pierde la mitad de la data. Pensando en esta posibilidad se planteo una segunda solución, basada en el esquema anterior, pero con algunas diferencias, la principal diferencia es que la recolección de las muestras no se

realiza de manera alterna, sino que un procesador toma una muestra completa, y en caso que se produzca otro evento y el primero no ha terminado de transmitir la información recolectada, el segundo comienza a recoger la data. La programación en este caso debe ser a “fuerza bruta”, es decir tendría que ser programada la adquisición de datos sin seguir algún algoritmo, en vez de eso la programación se le indicaría al micro: lleva el dato a la dirección 1, lleva el dato a la dirección 2, y así sucesivamente hasta completar el direccionamiento de la memoria de destino. De esta manera se pueden alcanzar los 40MSPS, pero el problema resulta nuevamente en la memoria para almacenar la cantidad de datos. Las soluciones anteriores pueden ser implementadas con un PIC18 de gama alta o con un PIC24, con ambos microcontroladores se requiere de un grabador, que debe ser comprado al fabricante, ya que los planos de quemadores USB disponibles en el mercado, no funcionan con estos dispositivos correctamente, y esto puede ser un inconveniente al momento de implementar el circuito.

El siguiente planteamiento que se realizó, basándose en un microcontrolador que ha sido introducido al mercado hace sólo algunos meses, también de la familia de Microchip el cual es el PIC32, que es un nuevo controlador de 32 bits y tiene una velocidad de operación de hasta 80MHz, aparte de la velocidad de este micro una ventaja respecto a la solución anterior, es el Kit de desarrollo PIC32, que es de un costo estimado de 50\$, y el mismo ya tiene un programador interno vía USB, posee un controlador que permite realizar simulaciones directamente sobre él chip, adicionalmente también tiene un puerto de expansión que al ser conectado a la tarjeta de expansión de puertos, permite tener acceso a todas la señales del microcontrolador, adicionalmente, posee un conector para alimentación externa al controlador, ya que el kit de desarrollo se alimenta vía USB. Resulta conveniente utilizar este kit, ya que el microcontrolador al trabajar a una velocidad tan elevada, requiere otro tipo de encapsulado (TQFP64), que necesita un proceso más delicado, para la construcción de la tarjeta, ya que cada pista es muy delgada además que cada una de ellas están muy cercanas entre sí.

Aunque se ha explicado primero la escogencia del microcontrolador, en un principio se comenzó buscando los convertidores analógico-digital, pero al comenzar a analizar modelos, se notó que esto no iba a ser un problema, ya que existen chips que pueden tomar muestras hasta 2,5 GSPS y tomando muestras de hasta 24 bits, pero resultó prioritario conseguir un controlador que pudiera manejar tales velocidades de muestreo.

Analizando las diversas opciones y teniendo procesadores de 16 bits, fue natural pensar en un convertidor de 16 bits, el cual ofrece una mejor precisión en la forma de onda, pero también tiene sus desventajas, la primera de ellas el precio, los convertidores de 16 bits resulta mucho más costoso que uno de 8 bits, pero más importante que el precio, es que cada dato necesitaría 2 bytes para ser almacenado, esto ocurre para cualquier convertidor superior a 8 bits, esto significa que hay la necesidad de una mayor cantidad de memoria, para poder almacenar dicho evento. Con un convertidor de 8 bits, cada muestra ocupa un byte, lo cual reduce a la mitad la cantidad de memoria para registrar el mismo evento. Por tal motivo, el tamaño de la muestra escogido fue el de 8 bits, pero el convertidor a utilizar no necesariamente debe ser de 8 bits, de hecho el convertidor planteado es de mayor resolución, pero solamente se utilizan los 8 bits más significativos que entrega dicho convertidor.

Con este proceso se puede obtener una señal menos sensible a las pequeñas variaciones producidas por el ruido, porque al utilizar un convertidor de 12 bits y solamente tomar los 8 bits más significativos, el resultado obtenido es el promedio entre 16 muestras con esto se procesa la señal con la finalidad de que ésta posea la menor cantidad de ruido, permitiéndonos una medición mucho más confiable. Al estudiar los modelos disponibles en el mercado, se observó que para la velocidad planteada inicialmente sólo estaban disponibles encapsulados superficiales de muy pequeña escala, adicionalmente las recomendaciones para implementar este tipo de dispositivo que establecen los fabricantes, resultaron prácticamente determinantes para descartar los mismos, ya que para evitar el ruido ellos proponen que el circuito debe poseer al menos cuatro capas, donde se tendría una capa dedicada para la tierra

y una para la alimentación, ya de manera artesanal requiere de técnicas de precisión que no se encontraron disponibles para poder realizar una placa con tales características, adicionalmente la soldadura de los componentes también resulta complicada por la pequeña escala de dichos componentes.

La alternativa para solventar este problema definitivamente se encontraba en disminuir la velocidad de muestreo. El teorema de Nyquist establece que el muestreo debe ser al menos el doble de la máxima componente de frecuencia, en este caso esta frecuencia esta alrededor de 1 MHz, esto dice que se debería muestrear al menos a 2 MHz, pero también es necesario tener en cuenta la duración del evento, que al estar en el orden de los microsegundos, conviene aumentar la velocidad de muestreo para poder obtener una mejor representación de la señal. La velocidad establecida fue de 10 MSPS, velocidad que permite utilizar componentes que no resultan tan exigentes con el proceso de fabricación ya que trabaja a una frecuencia menor a la planteada inicialmente.

Para cumplir con esta velocidad de muestreo fue seleccionado el convertidor analógico-digital AD9220, fabricado por Analog Devices, de 12 bits a una velocidad de 10 MSPS, el cual tiene una serie de características que resultaron convenientes para la realización del proyecto, el chip posee un consumo de 250 mW, utiliza una sola fuente de alimentación de 5 volt, posee una relación señal a ruido y distorsión de 70 dB. Este chip también cuenta con una tensión de referencia, la cual posee un ruido máximo de 0,09 LSB rms.

**Tabla 2. Comparación de convertidores<sup>1</sup>**

	Resolución (Bits)	Velocidad de muestreo	Alimentación	Disipación de potencia	Encapsulado	Precio
AD9230-11	11	200MSPS	Multi(+1.8Anlg, +1.8Dig), Simple(+1.8)	400mW	CSP	\$36.43
AD9220	12	10MSPS	Simple(+5)	310mW	SOIC, SOP	\$6.12
AD9240	14	10MSPS	Simple(+5)	330mW	QFP	\$18.37
AD9268-125	16	125MSPS	Multi(+1.8Anlg, +1.8Dig), Multi(+1.8Anlg, +3.3Dig), Simple(+1.8)	788mW	CSP	\$136.00

Estos componentes fueron adquiridos en el exterior, debido a que localmente los mismos no se encuentran, y fue necesario esperar que se realizara todo el proceso de importación. Una vez obtenido los componentes, fue necesario conocer la arquitectura del PIC32, así como el programa MPLAB 8. La rutina planteada para la adquisición de datos fue basada en la lectura del Parallel Master Port (PMP mostrado en la figura 18) a la velocidad de 10MSPS, este dato leído sería almacenado en memoria RAM, mientras se produce el evento y una vez finalizado el tiempo de muestreo del evento serían transmitido vía serial, por el protocolo RS-232.

---

<sup>1</sup> Datos obtenidos del catalogo on-line del fabricante Analog Devices

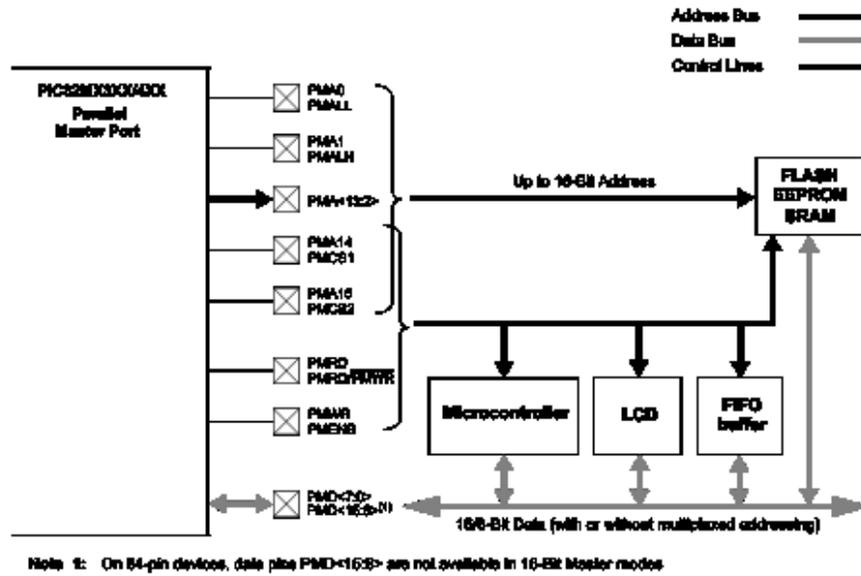


Figura 18. Arquitectura del PMP incluido en el PIC32

Para la programación del sistema se implementó el diagrama de flujo mostrado en la figura 19, tiene dos etapas, las cuales se han diferenciado por colores, para la mejor comprensión del mismo. La etapa identificada con el color verde representa el proceso de adquisición de datos. Debido a las limitaciones de almacenamiento de datos y a la alta frecuencia de muestreo, no resulta práctico estar muestreando y almacenando en todo momento, por lo cual se estableció un umbral, cuando el mismo es alcanzado comienza el muestreo de la señal. Este umbral se calibra a un nivel donde el campo eléctrico ha variado lo suficiente como para considerar que se va a producir una descarga eléctrica.

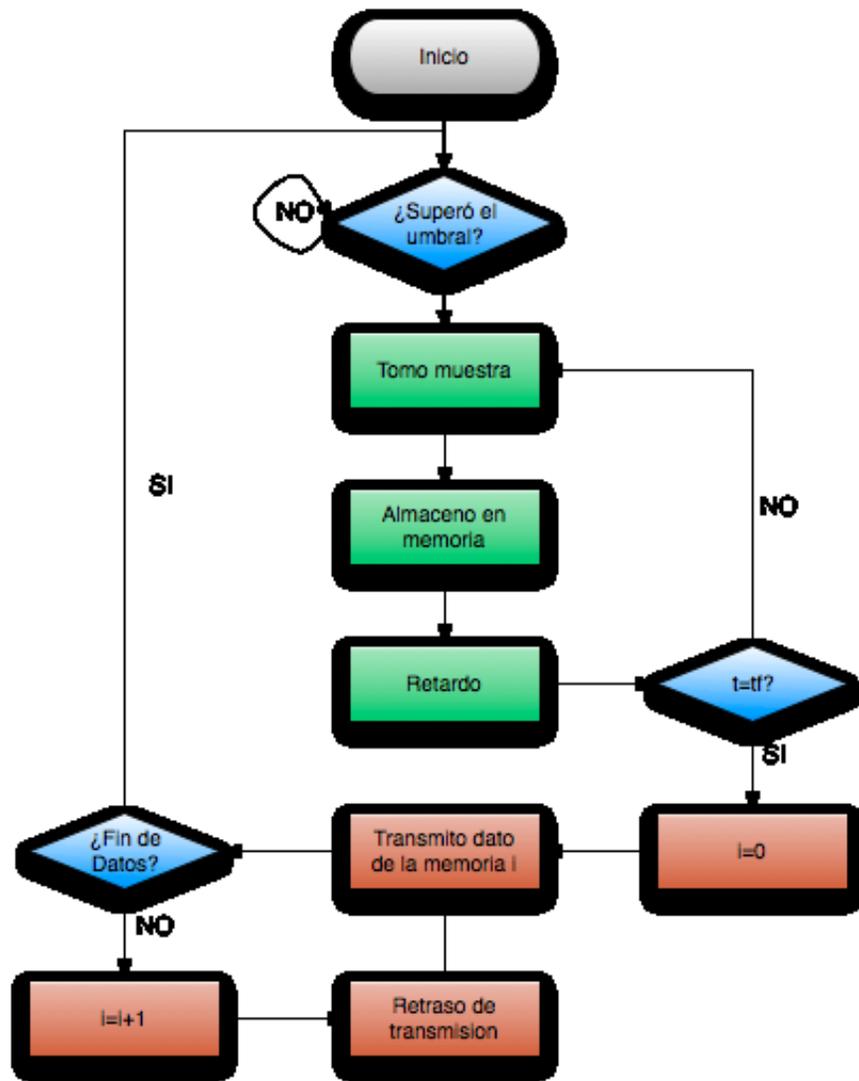
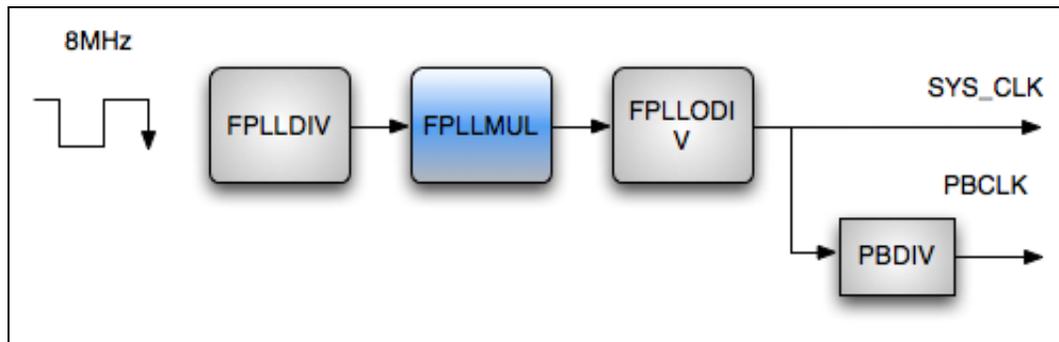


Figura 19. Diagrama de flujo para la lectura del PMP

Una vez comenzado el muestreo, la muestra se almacena en memoria, posteriormente se genera un retardo, con la finalidad de mantener un sincronismo entre el muestreo y el almacenamiento de los datos. Cada vez que se almacena un dato, se chequea que no se haya alcanzado el tiempo total de muestreo, si dicho tiempo no ha sido alcanzado se procede a capturar el próximo dato. Cuando se alcanza el tiempo de muestreo se detiene la adquisición de datos y comienza la segunda etapa, (que está identificada con un color ladrillo) que corresponde con la transmisión de los datos, para este proceso se utilizara un puntero (i), el cual tiene

como función llevar un control de la transmisión, así como comparar para establecer el fin de la transmisión. En esta etapa también es necesario generar una rutina de retardo, esta vez para mantener el sincronismo con la transmisión. Debido a las características de la rutina, el aspecto más importante en la implementación de la misma, es la precisión del retardo, ya que este garantiza el sincronismo entre el convertidor analógico-digital y la lectura del dato. Para lograr esto, resulta imprescindible conocer el manejo del reloj del sistema.

El PIC32 posee un cristal con una frecuencia de 8 MHz, que es multiplicada internamente para obtener frecuencias del reloj principal (SYS\_CLK) de hasta 80MHz, velocidad que puede ser programada utilizando varios parámetros que indican valores de multiplicadores y divisores de frecuencia.



**Figura 20. Configuración de la velocidad de reloj del sistema y de periféricos**

Los periféricos no trabajan necesariamente a la misma frecuencia del sistema central, ya que aunque tienen la misma referencia de 8MHz, poseen parámetros distintos, esto hace que el dispositivo sea más versátil, ya que nos permite ajustar la velocidad de los periféricos según la aplicación. El valor de este reloj (PB\_CLK) también puede alcanzar hasta 80MHz, que fue el valor utilizado para las programación de nuestra rutina. Al realizar la programación y la simulación de la rutina se observó que la rutina tarda un tiempo mayor al tiempo necesario para cumplir con el muestreo de 10MSPS. Luego de hacer varias revisiones del código y de la documentación, el fabricante especifica que la transferencia de datos del puerto a la memoria es de dos ciclos, pero existe una comprobación que realiza el sistema,

para saber si el puerto se encuentra ocupado. La rutina con el almacenamiento, la comprobación del puerto ocupado y la comprobación de fin de muestreo tarda en total 19 ciclos, equivalente a  $0.2375\mu\text{s}$ . Con este tiempo la máxima velocidad de muestreo sería de 4.347.826,08 Muestras por segundo. Con esta velocidad no se puede utilizar el convertidor disponible, ya que la frecuencia mínima de operación de este es de 10MHz, lo que haría necesario adquirir un nuevo dispositivo. Por otro lado, la máxima velocidad de muestreo es baja en comparación con la meta inicial de 25MSPS.

Luego de las consideraciones anteriores se decidió cambiar el sistema de adquisición de datos. Con este cambio lo que se busco fue otra alternativa, para el muestreo de los datos. Analizando la opción inicial de utilizar un osciloscopio digital de National Instrument, se consultaron modelos similares, con el fin de encontrar opciones más económicas, pero con desempeño similar. Esta investigación permitió conocer algunos modelos de osciloscopios para PC, con prestaciones similares pero por menos de un tercio de costo de la National Instrument. El modelo seleccionado fue el PicoScope 2203, que posee un ancho de banda de 5MHz y una velocidad máxima de muestreo de 40MSPS, una resolución de 8 bits y una precisión del  $\pm 3\%$ . Además de sus características técnicas, este dispositivo posee un Software permite visualizar y realizar cálculos de la señal en tiempo real, así como almacenar los datos de manera local o transmitirlos a otro equipo conectado en red. Este programa realiza la grabación en formato PLS, que permite tener la información de manera gráfica y como hoja de cálculo, un ejemplo de este formato se encuentra en el anexo N 2

Los requerimientos mínimos, para el manejo de este dispositivo, resulta modesto en comparación con los equipos actuales, estos requerimientos se muestran a continuación:

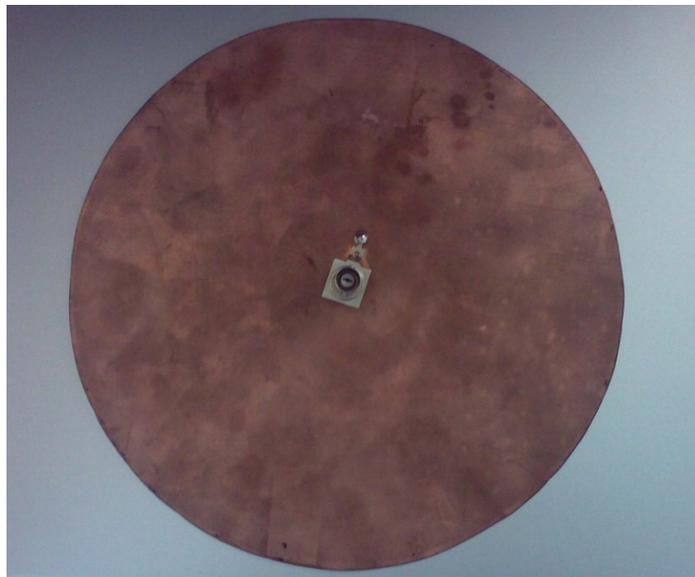
- Procesador Pentium II o equivalente
- 64 MB de RAM para Windows XP, 512 MB para Windows Vista
- Puerto USB 2.0

- 1 GB libre en el disco duro (aunque no es utilizado por el programa se recomienda para un mejor desempeño del sistema operativo)

El consumo de este dispositivo es alimentado vía USB y requiere un voltaje de operación entre 4,6 Volt y 5,25 Volt con un consumo máximo de 500 mA, lo cual equivale a 2,625W máximo. EL resto de las especificaciones técnicas del PicoScope 2203 se encuentran detalladas en el Anexo N 1.

### ***Construcción de la antena***

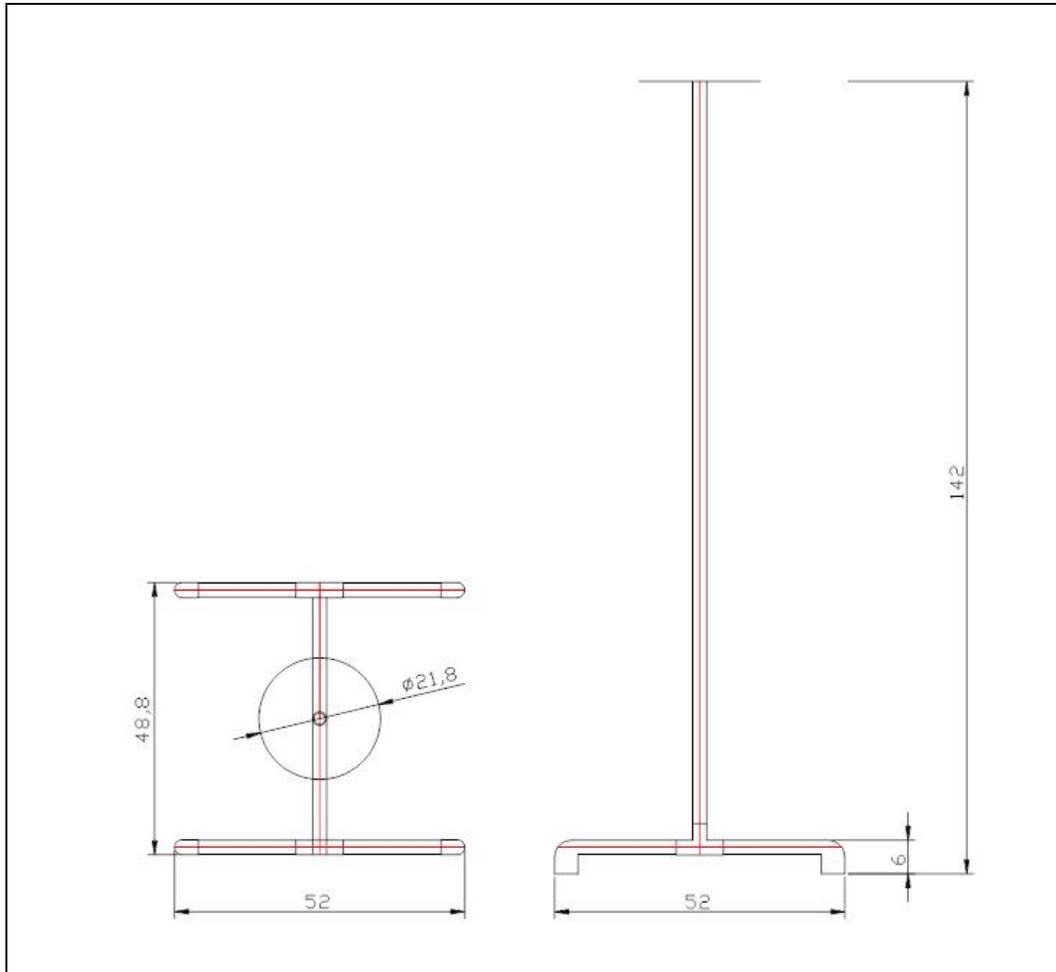
Una vez adquirido las baquelitas de doble cara tamaño carta, se realizaron las medidas de éstas, para determinar el centro y poder aprovechar al máximo el área de la baquelita y obtener discos del mayor diámetro posible. Se dibujó la circunferencia a la placa y posteriormente con la ayuda de pinzas y una fresadora, se realizaron cortes a la placa, en primer lugar cortes tangentes a la circunferencia y una vez teniendo una forma cercana a la deseada, se realizaron cortes más finos hasta alcanzar la forma esperada. Luego de haber eliminado los bordes y detalles se colocó el conector de chasis BNC hembra, que facilitará la conexión al equipo, en la figura 21 se muestra en la antena con su conector ya instalado.



**Figura 21. Antena con el conector BNC hembra**

### ***Construcción del soporte para la antena***

El soporte para la antena fue construido en PVC, de 1" de diámetro. Se escogió este material por ser no conductor, para evitar alterar la capacitancia formada por las placas. La base se realizo con forma de H mostrada en la figura 21. La altura es de 1,20m.



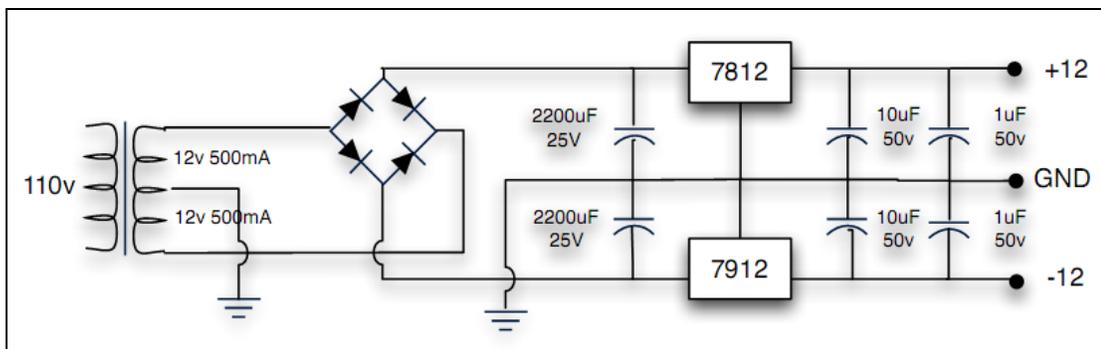
**Figura 22. Base para la antena**

### ***Configuración del software del circuito integrador y la fuente de alimentación.***

Para alimentar el circuito se decidió alimentar el integrador con un voltaje dual de  $\pm 12$  Voltios en la Figura 23, se observan los componentes utilizados. El transformador entrega 500 mili amperes. Esta fuente fue implementada con baquelitas

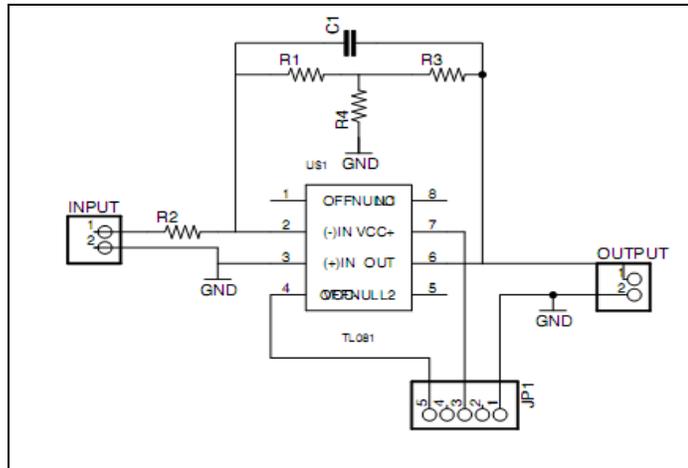
perforadas, ya que por lo sencillo del circuito resulto más práctico, que fabricar todo un circuito impreso. Para el integrador, los elementos utilizados fueron los siguientes:

- Amplificador operacional J-FET TL081
- Resistencias de película de metal
- Condensadores de polipropileno
- Conectores BNC hembra de chasis



**Figura 23. Fuente de alimentación del circuito**

Para implementar el integrador se realizó el circuito impreso con la ayuda de la versión de Eagle para estudiantes, ya que esta etapa debe ser menos sensible al ruido. El amplificador TL081 posee entrada FET, característica importante para evitar las desviaciones de la salida por las corrientes de polarización. Para disminuir el ruido se utilizó resistencias de película de metal, y para poder aumentar la constante de tiempo sin utilizar resistencias superiores a  $1M\Omega$ , se utilizó la topología mostrada a continuación:



**Figura 24. Circuito Integrador**

Donde la resistencia R2, debe coincidir con la impedancia característica del cable proveniente de la antena. La topología de “T” tiene una resistencia efectiva mostrada en la Ecuación 6

$$R = \frac{(R1R3 + R1R4 + R3R4)}{R4}$$

**Ecuación 6. Resistencia efectiva de la topología tipo “T”**

Este circuito al ser alimentado por una fuente dual de 12 Volt, posee un consumo de 0,06W que sumado con la corriente que requiere el osciloscopio que son unos 144μW, suma un consumo total máximo de 60,14mW

### ***Configuración del software del osciloscopio***

El osciloscopio PicoScope 2203 posee dos software distintos, uno para mostrar la forma de onda como un osciloscopio común llamado PicoScope y otro para la grabación y transmisión de datos a otros computadores de la red llamado PicoLog. El primer paso para la prueba del software y el equipo, fue instalar los controladores del osciloscopio así como ambos programas. El programa utilizado para el trabajo fue el PicoLog, ya que su función se adapta al requerimiento de almacenamiento y transmisión. Al utilizar el programa por primera vez, este muestra

un tutorial interactivo, de manera que el usuario se familiarice rápidamente con el programa que va a utilizar. En cuanto a la transmisión el fabricante indica una serie de pasos sencillos para la configuración de la transmisión, un resumen se presenta a continuación:

- Revisar la conexión y transmisión entre los dos equipos
- Instalar el programa PicoLog en ambos equipos servidor y cliente
- En el servidor seleccionar la opción Enable Server en Preferences> IP Socket. Y fijar los parámetros necesarios para la medición
- En el cliente habilitar la opción Enable Client en Preferences> IP Socket y reiniciar el programa.
- Al abrir nuevamente el programa crear unos nuevos ajustes (New settings) y especificar las opciones de muestreo y almacenamiento.
- En la selección de dispositivo seleccionamos Socket y luego el nombre del servidor. Luego conectar al servidor.
- Una vez conectado se selecciona el canal activo en el servidor.

### ***Acondicionamiento de la carcasa***

La carcasa seleccionada solamente tenía un orificio para el cable de alimentación, pero era necesario uno para el cable USB y otro para conectar el cable BNC, estos nuevos orificios se realizaron con un taladro y varios tamaños de mechas, igualmente fue necesario hacer los orificios para fijar los equipos dentro de la carcasa. Una vez finalizado este proceso, se procedió a pintarla con pintura aerosol, de manera de cubrir algunos rayones que se produjeron mientras se realizaban los agujeros.



**Figura 25. Parte trasera de la carcasa**



**Figura 26. Parte delantera de la carcasa**

## CAPITULO IV

### PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los aspectos y resultados de la investigación, así como un análisis de los mismos.

#### *Medición de la capacitancia de la antena y del cable*

Para este proceso se utilizó un puente GenRad 1658 RLC Digibridge, para obtener el valor de la capacitancia total de la antena, se tomó en cuenta la capacitancia del cable, que fue medida con el mismo equipo y el cable totalmente extendido. Se realizaron tres (3) mediciones y se tomo el promedio para el cálculo de la capacitancia de la antena.

Para obtener la capacitancia de la antena se realizó la medición, colocando la antena en una base de madera y se conectó al equipo con un cable coaxial totalmente extendido y se procedió a realizar las mediciones de capacitancia, la capacitancia total de la antena se obtuvo al realizar la resta de las dos mediciones anteriores y los resultados que se muestran en la tabla 3.:

**Tabla 3. Mediciones de la Capacitancia de la antena y el cable**

Columna1	Capacitancia total (nF)	Capacitancia del cable (nF)	Capacitancia de la antena (nF)
Primera medida	1,1768	0,13876	1,03804
Segunda medida	1,1718	0,13636	1,03544
Tercera medida	1,1743	0,13867	1,03563
Promedios	1,1743	0,13793	1,03637

Tomando el valor promedio de la capacitancia, y con las características físicas de la antena se puede determinar la constante dieléctrica relativa, dato necesario para obtener la constante de proporcionalidad entre el voltaje medido y el campo eléctrico normal a la placa.

$$C = \frac{\epsilon_r * A}{d} \quad (1)$$

Si la placa tiene un diámetro de 21 cm, posee un área de  $3,20473 \text{ m}^2$  y una distancia entre placas de 2mm (0,002m), sustituyendo estos valores en la expresión (1) se tiene la constante dieléctrica de la antena:

$$\epsilon_r = \frac{(1,0306 \times 10^{-9} \text{ F}) * (0,02 \text{ m})}{(3,20473 \times 10^2 \text{ m}^2)} = 6,4674914 \times 10^{-11} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

**Ecuación 7, Cálculo de la constante dieléctrica relativa del material**

### ***Prueba de Funcionamiento del Osciloscopio y del Integrador***

Para probar el funcionamiento de este equipo se utilizó un generador de señales, con el cual se produjeron distintos tipos de señales, con frecuencia y amplitudes distintas para comprobar su comportamiento ante las diversas señales. Una vez observado el comportamiento del equipo, que se consideró satisfactorio, por la fidelidad con la que capturó la señal que le fue aplicada en la entrada, fue necesario conocer el comportamiento del osciloscopio ante señales similares a las producidas por una descarga atmosférica, en el laboratorio de maquinas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UCV, se realizaron pruebas con un generador de impulsos mostrado en Figura 27, el cual permite ajustar el tiempo de subida y de decaimiento de la señal exponencial, como se muestra en la Figura 28.



Figura 27. Generador de impulsos y simulador de líneas de transmisión con parámetros concentrados

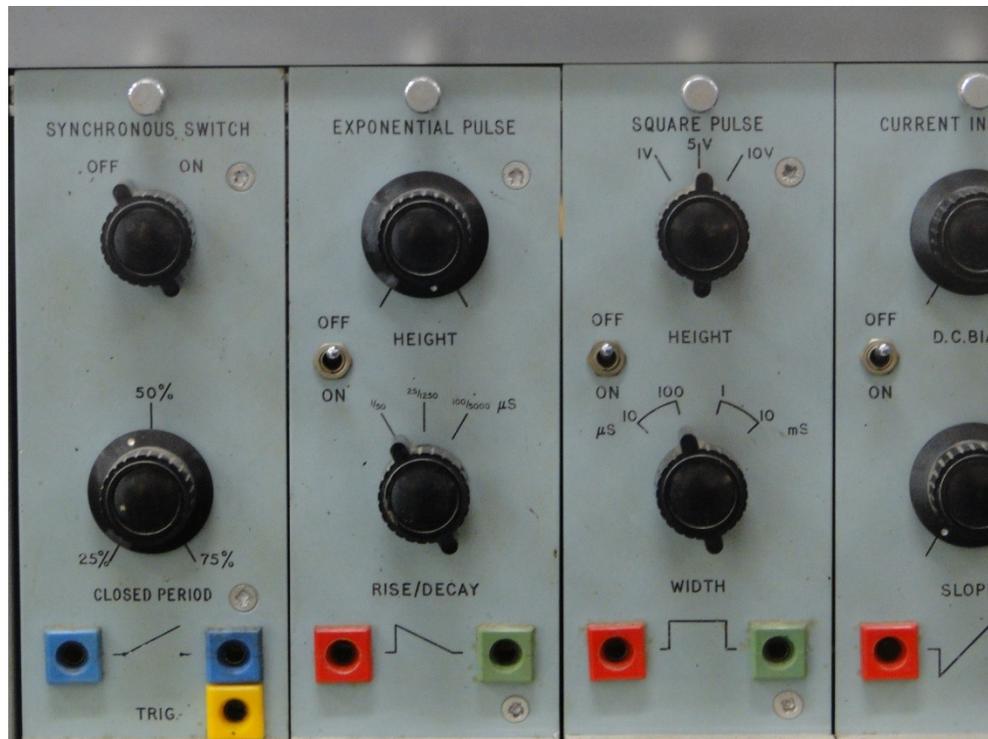


Figura 28. Selector del tiempo de subida y bajada del impulso exponencial

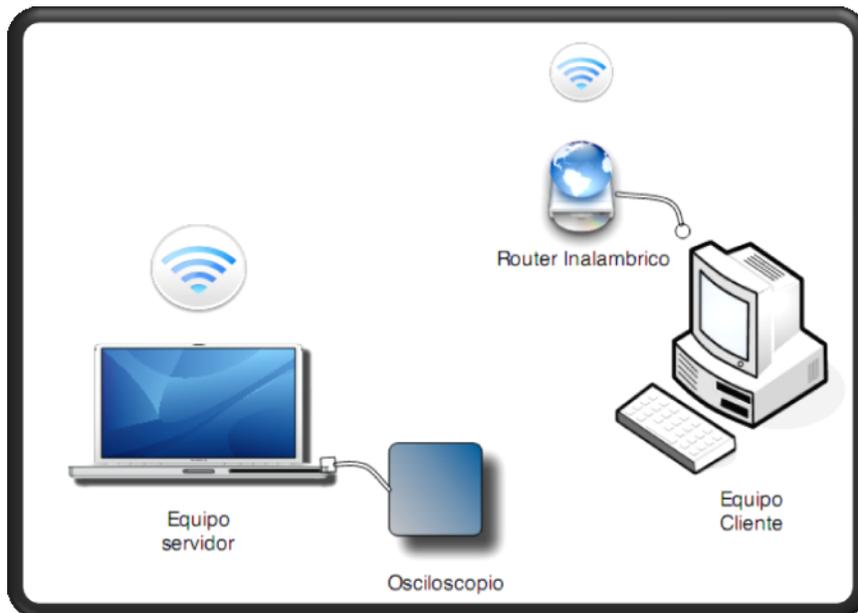
Debido a que el osciloscopio también posee generador de señales, se aprovecho esta característica para probar el funcionamiento del integrador. En la Figura 29. Señales de prueba del integrador se indica el tipo de señal que se aplicó en la entrada y la gráfica muestra la onda resultante a la salida. En el primer caso se le aplicó a la entrada una señal cuadrada, obteniendo una señal triangular a la salida, así se repitió el proceso con una triangular, rampa ascendente y descendente. Obteniendo a la salida respectivamente una senoidal, senoidal rectificada y una senoidal rectificada inversa. Con estas pruebas iniciales se pudo constatar que el circuito integrador funcionaba correctamente.



**Figura 29. Señales de prueba del integrador**

### ***Pruebas de Transmisión***

Para realizar estas pruebas se conectó el osciloscopio a una computadora portátil conectada a la red de trabajo de manera inalámbrica mediante Wi-Fi bajo el estándar IEEE 802.11n. Se configuró este equipo como servidor y se realizaron los ajustes en el equipo cliente que está conectado a la red con un cable Ethernet. Un esquema de esta configuración se muestra en Figura 30. Los datos son obtenidos por el osciloscopio, luego son transferidos por USB al equipo servidor, el cual transmite los datos al equipo cliente de manera inalámbrica vía Wi-Fi. Los datos en el cliente fueron recibidos y almacenados sin ningún problema, incluso a las más altas velocidades de muestreo.



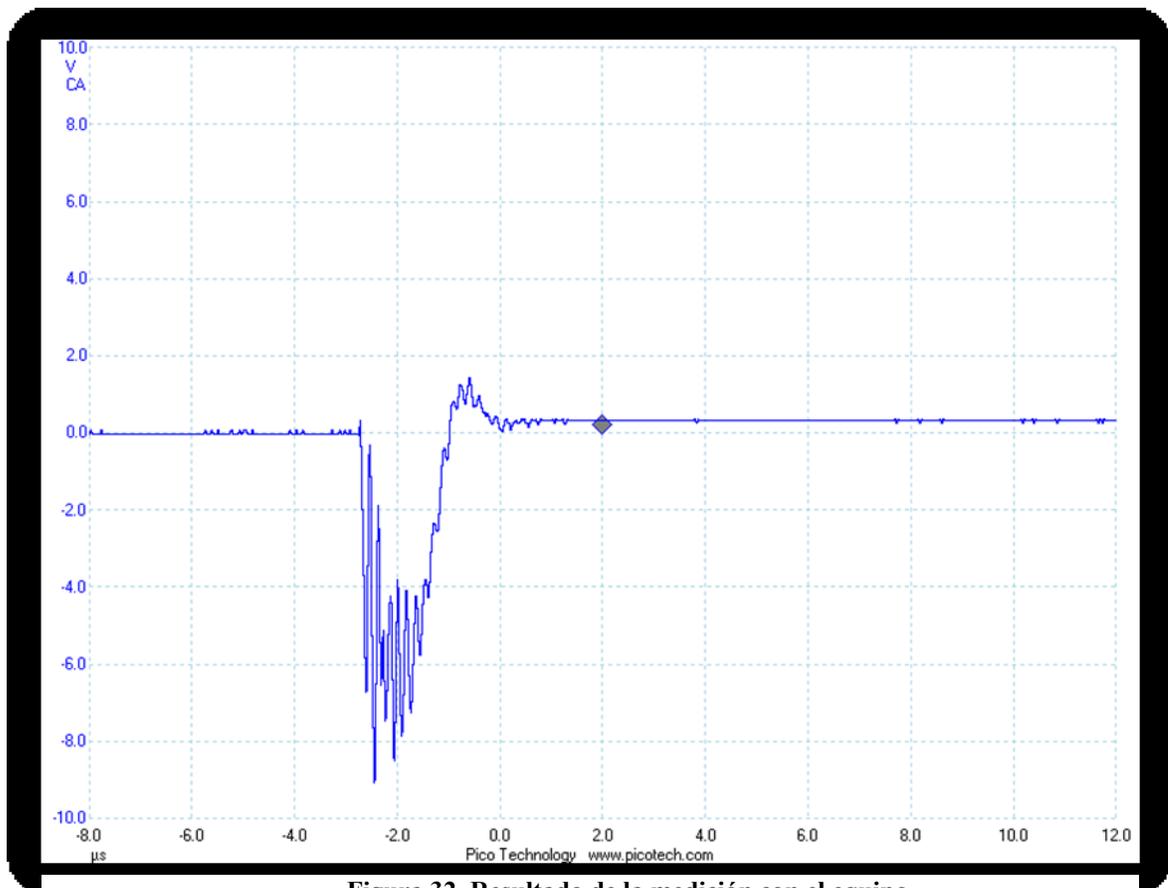
**Figura 30. Configuración para la prueba de de transmisión de datos**

Una vez que se realizaron pruebas individuales a cada una de las etapas y el funcionamiento de cada una de ellas era el adecuado, sólo hacía falta realizar las pruebas del equipo completo. Por tal motivo se procede a hacia las instalaciones de *CAIVET C.A.* Una fábrica de transformadores ubicada en la parroquia Las Adjuntas, sector Macarao, quienes poseen un laboratorio de alta tensión, donde realizan las pruebas de sus equipos. Entre los equipos que tienen en su laboratorio se encuentra

un generador de impulsos, tipo descargas atmosféricas, mostrado en la Figura 31, el cual se configuró de manera que pudiera generar un impulso de 30 kV.



**Figura 31. Generador de Impulsos tipo descargas atmosféricas**



**Figura 32. Resultado de la medición con el equipo**

El resultado de la medición se muestra en la Figura 32, donde se observa como el sistema detecta el evento. Para poder obtener esta forma de onda fue necesario colocar a la entrada un atenuador 1:20, ya que al estar la antena a una distancia menor a 2 metros del generador, el campo eléctrico era muy intenso en esa zona, y como el cable coaxial que se tenía disponible para esta prueba, no permitió alejar más la antena del generador. Las oscilaciones observadas en la cresta de la onda, corresponde a la forma del impulso del generador, ya que este no generó un impulso puro, sino que el impulso posee esas mismas oscilaciones, producto de una conexión floja en el generador. Esto se pudo comprobar, ya que ellos tienen una punta de prueba conectada a un divisor de tensión, que permite conocer la tensión y forma de onda del pulso. Otro aspecto importante es que la señal decae más rápido que otros sistemas similares, la constante de tiempo implementada fue de 36,3ms obtenida con un condensador de 33nF y una resistencia de 1,1MΩ, para ajustar esta

caída fue necesario ajustar la constante de tiempo del circuito integrador, ya que el tiempo de descenso depende es de esta constante. Para poder aumentar esta constante de tiempo determinada por R y C del integrador, es necesario aumentar cualquiera de las dos o incluso ambas, pero debido a que los condensadores de polipropileno no alcanzan valores de capacitancia altos, fue necesario aplicar la topología descrita anteriormente en la Figura 24. Para poder multiplicar el valor de resistencia, sin utilizar resistencias de un valor superior a  $1M\Omega$ .

Una vez implementada la topología explicada anteriormente, se calcularon las resistencias y condensadores para obtener una constante de tiempo de 1 segundo, para poder comparar las diferencias en la señal con cada una de las constantes. Por la escasa disponibilidad de tiempo de la empresa y agilizar el proceso de medición, se realizaron varias tarjetas del circuito integrador con diferentes constantes de tiempo, y cada una de ellas fue probada de manera individual. Para el momento de las pruebas se utilizaron dos constantes: 0,0363s y 1s, inicialmente se probó con la constante de 0,0363s, para observar el comportamiento del sistema con el impulso puro, ya que para este momento ya habían resuelto el problema con la conexión que generaba las oscilaciones observadas en la prueba anterior. La antena fue colocada en el mismo lugar, y en las mismas condiciones que en el ensayo anterior. El resultado de la forma de onda se muestra en la Figura 33, y en la Figura 34 se muestra la forma de onda del impulso generado.

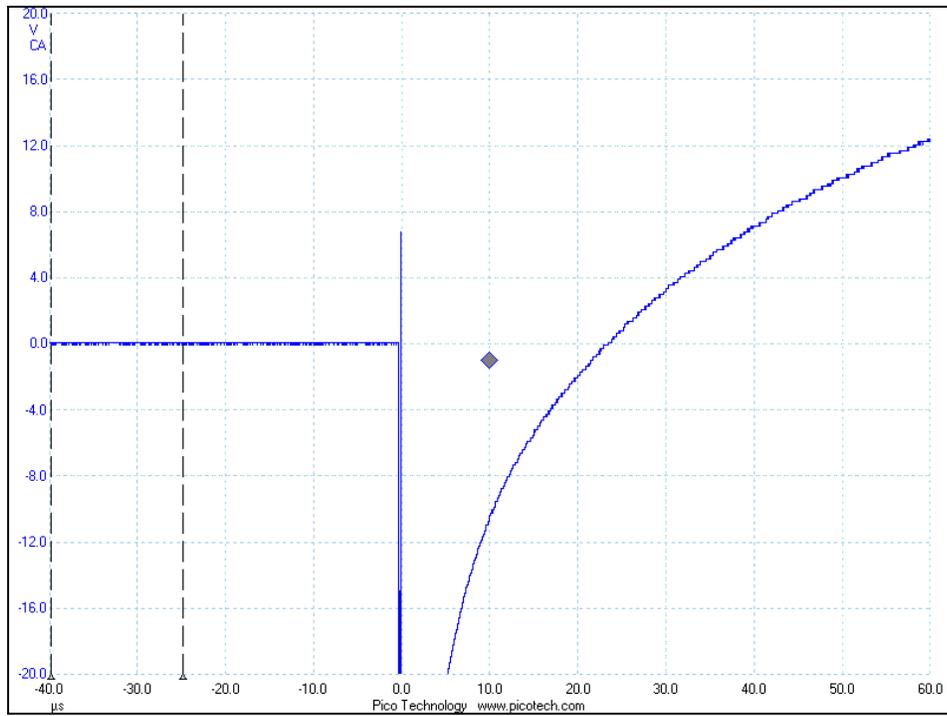


Figura 33. Prueba con la constante de 36ms cercano al generador

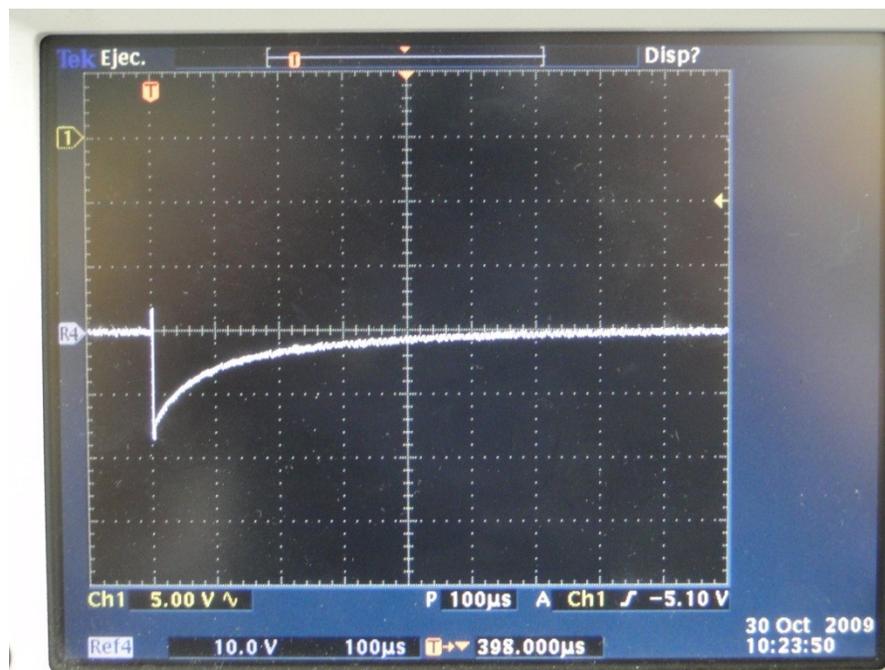
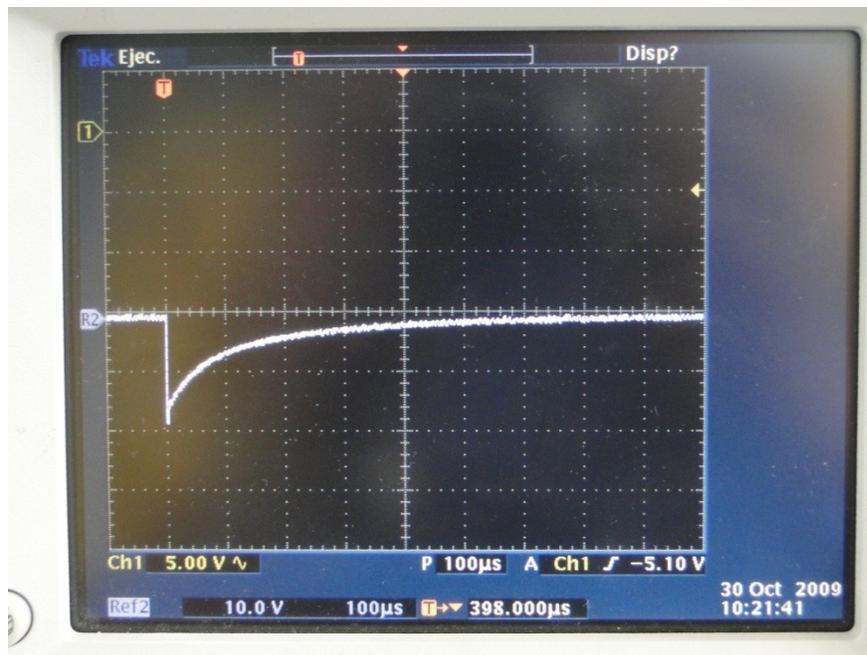


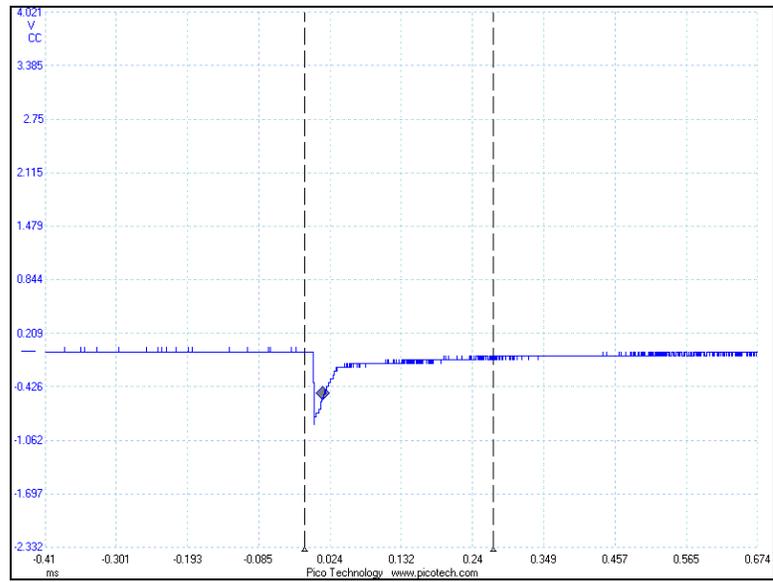
Figura 34. Forma de onda de la señal generada

En este caso se observa que el sistema decae más lento que en la primera prueba y no se observan oscilaciones. La forma de onda observada en la figura 34, presenta un tiempo de decaimiento de aproximadamente  $400\mu\text{s}$ , mientras que el sistema diseñado decae en un tiempo aproximado de  $30\mu\text{s}$ , sin embargo luego de su cruce por cero continua la descarga del integrador. Pero el sistema responde siguiendo el impulso inicial, ya que incluso es capaz de detectar el impulso positivo que se produce al comienzo del evento

Al capturar la forma de onda anterior, se realizó el cambio de integrador, por el de constante de 1s. La forma de onda aplicada se muestra en la figura 35 y el resultado se muestra en la Figura 36, se observa que al ser una constante de tiempo más lenta, el sistema no tiene la velocidad suficiente para seguir completamente el evento, aunque sí pudo detectarlo. Luego de estas pruebas, se procedió a cambiar la antena de lugar, para alejarla del generador, para observar el comportamiento alejando la antena de la fuente de señal.

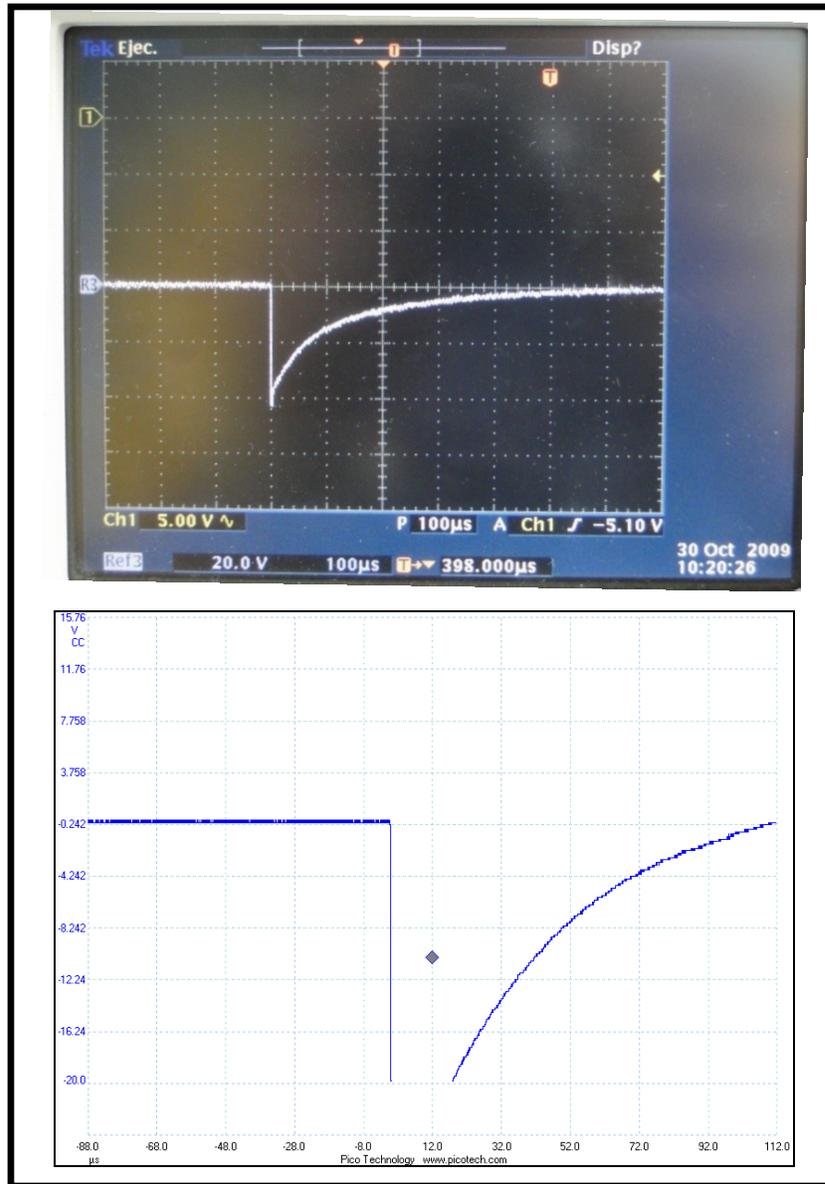


**Figura 35. Forma de onda del impulso para constante 1s**



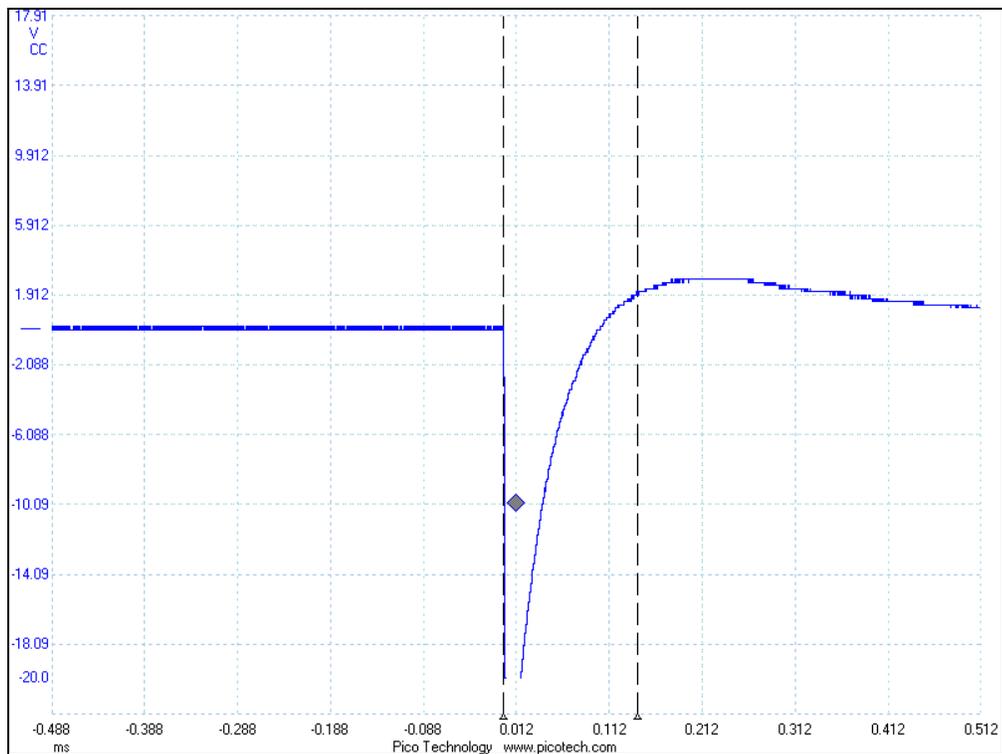
**Figura 36. Forma de onda con constante de tiempo de 1s**

La antena se alejó a una distancia aproximada de 10 metros del generador, para repetir las pruebas anteriores. Al alejarlo de la fuente esto permitió aumentar el voltaje del impulso. La forma de onda obtenida con la constante de 36ms se muestra en la figura 37. En la figura 38 se muestra el resultado de la prueba bajo las mismas condiciones, pero aumentando la escala de tiempo en el sistema, para observar con más detalle la forma de onda.



**Figura 37. Forma de onda con la antena retirada de la fuente**

Bajo estas condiciones el tiempo de descenso medido por nuestro sistema sigue siendo menor al mostrado por el osciloscopio, pero el tiempo de descenso se encuentra aproximadamente en  $120\mu\text{s}$ , esto indica que posiblemente la constante de tiempo no sea suficientemente grande como para poder tener un tiempo de descenso igual a la señal aplicada.



**Figura 38. Forma de onda con escala de tiempo ampliada**

En ambas figuras se observa que el valor máximo de la señal, no puede ser registrado bajo estas condiciones, ya que la amplitud es mucho mayor que la máxima escala de nuestro osciloscopio. Al aumentar la escala de tiempo se observa que el sistema posee un sobrepico, esto se debe a que la salida del amplificador está conectada a la entrada del osciloscopio sin ninguna otra carga y al tener el osciloscopio una impedancia de  $1M\Omega$ , resulta muy pequeña, por lo cual sería conveniente compensar la salida con una resistencia entre  $1k\Omega$  y  $10k\Omega$ , de manera de aumentar la carga, manteniendo los niveles de corriente inferiores a la corriente máxima de salida del amplificador.

Una vez realizado esta prueba, se cambio nuevamente a la otra constante de tiempo, para repetir la experiencia, pero el sistema no fue capaz de detectar ninguno de los distintos impulsos generados, con lo cual se concluye que al tener una constante de tiempo más lenta equivale a tener un sistema con una sensibilidad considerablemente menor. Esto está motivado a que el integrador es un pasa bajo, al

tener una constante en el orden de los segundos la frecuencia de corte es menor a 1Hz, mientras que si la constante esta en el orden de los milisegundos, la frecuencia de corte puede llegar a las decenas de Hertz.

Luego de haber alejado la antena, se generaron dos impulsos que produjeron una saturación del sistema, lo cual impidió capturar estos eventos, esta saturación se produjo aún con el atenuador conectado a la entrada. Al momento de mover la antena, se generó una descarga de menor voltaje el sistema logró capturar la forma de onda de dicha descarga. Esta descarga se muestra en la figura 39 y en la figura 40 se muestra la señal capturada y se observa que al disminuir la energía el sistema captura la forma de onda con una mayor precisión al compararla con el impulso generado. Dato que resulta importante porque cuando el sistema este operativo no se encontrará ante variaciones de campo eléctrico tan intensas como a los que estuvo sometido durante las pruebas.

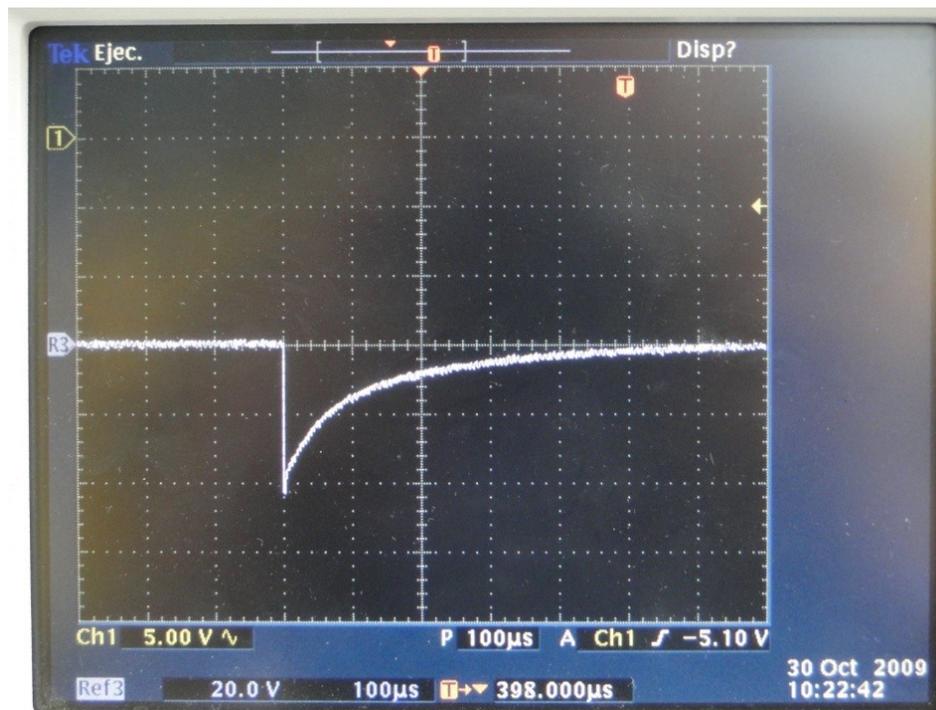
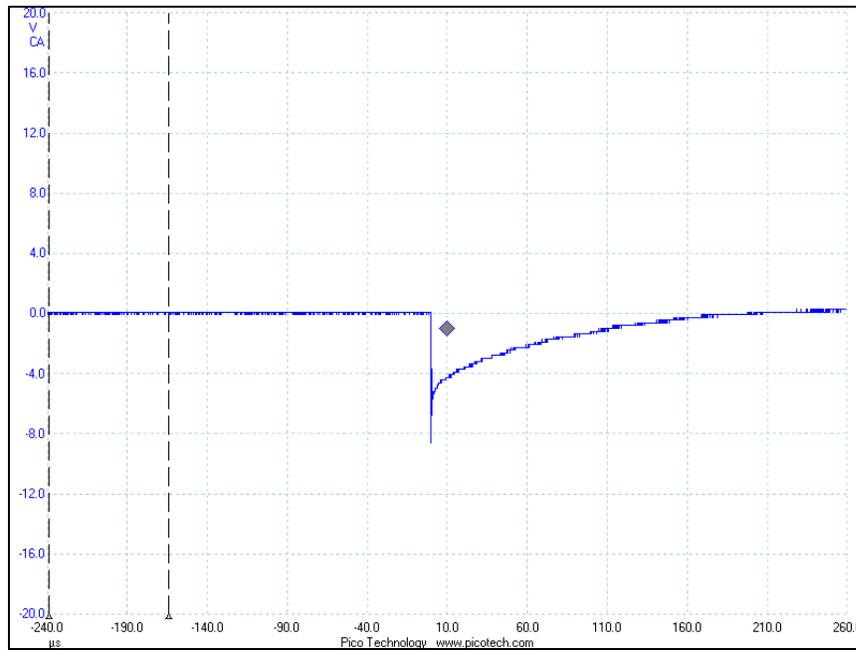


Figura 39. Forma de onda producida por la descarga del generador



**Figura 40. Forma de onda medida durante la descarga del generador**

## CONCLUSIONES

Durante el presente trabajo especial de grado, se realizó un estudio de las descargas atmosféricas sus características y su comportamiento, lo que permitió desarrollar un dispositivo de medición de las descargas atmosféricas, basado en la medición del campo eléctrico vertical. A lo largo del proceso de desarrollo de este sistema, uno de los factores que exigió mayor dedicación fue el manejo del muestreo a alta velocidad, por la corta duración del evento, lo que también trajo como consecuencia, el análisis del almacenamiento de los datos, ya que al estar muestreando a velocidades mayores al millón de muestras por segundo se requiere de un sistema de almacenamiento rápido que permita guardar todas las muestras.

El sistema planteado ofrece la posibilidad de registrar los eventos ocurridos en los alrededores del instrumento y al presentar los datos de manera gráfica permite conocer rápidamente el comportamiento de la descarga y también entrega los datos en formato de hoja de cálculo, que permite procesar los datos obtenidos, así como guardar estadísticas de los eventos ocurridos. También ofrece como ventaja que puedo almacenar los datos en el equipo cliente y servidor al mismo tiempo, lo cual permite tener un respaldo de las mediciones. Debido a que el sistema funciona integrando la corriente proveniente de la antena, el decaimiento de la señal va a depender de la constante de tiempo del integrador. El tiempo de ésta constante debe ser mayor a la duración del evento de interés. Esta constante de tiempo también fija la frecuencia de corte del sistema pasa bajo compuesto por el integrador, si dicha constante es superior al segundo, la frecuencia de corte será menor a 1 Hz lo cual limita considerablemente las componentes que deja pasar, y al ser un evento de alta velocidad, esto no resulta conveniente. Es necesario realizar la calibración del equipo de acuerdo con la zona donde será instalado, ya que durante la realización de las

pruebas se pudo percibir ruidos, que para evitar que fuesen capturados por el sistema fue modificado el umbral de detección del evento.

## RECOMENDACIONES

A fin de mejorar el prototipo realizado, se realizan las siguientes recomendaciones:

- Utilizar una carcasa acondicionada para poder resistir condiciones de intemperie, ya que esto aumentaría la versatilidad del equipo, permitiendo que pueda ser utilizado en lugares abierto expuesto a lluvias y otras condiciones climáticas.
- Implementar un sistema de alimentación alternativo, que permita suministrar energía al equipo, sin depender de la red de suministro eléctrico. Puede ser funcionamiento con baterías o por un sistema de celdas solares.
- Implementar un limitador de señal luego de la salida de la antena, con la finalidad de proteger el integrador y evitar saturaciones.
- Compensar la salida del integrador, para evitar oscilaciones por la pequeña carga que representa la entrada del osciloscopio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. **Bretanion Group.** [En línea] [Citado el: 12 de Octubre de 2009.]  
[http://bretaniongroup.com/web/component/option,com\\_glossary/Itemid,78/catid,45/func,view/term,Rayo/](http://bretaniongroup.com/web/component/option,com_glossary/Itemid,78/catid,45/func,view/term,Rayo/).
- [2]. **Vázquez, Carmen, Blanco, Maria Carolina y Torres, Horacio.**  
Parametros de las descargas atmosfericas en aplicaciones de ingenieria en zonas tropicales. *Propuesta para conformar un grupo de investigación interdisciplinario para la otencion de los parametros de las descargas atmosfericas en aplicaciones de ingenieria en zonas tropicales.* 2004.
- [3]. **Osava, Mario.** Cambio Climatico multiplica rayos y muerte. *Periodico Tierramena.* 2001.
- [4]. **Siegert C., Luis A.** *Alta Tensión y Sistemas de transmisión.* Mexico D.F. : Limusa, 1988.
- [5]. **López, Jesús Cristóbal Tejedor and García, Eduardo.** Laboratorio de Procesado de Imagen. [Online] [Cited: 2009 20-Enero.]  
[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos\\_02\\_03/Proteccion\\_contra\\_descargas\\_atmosfericas/5/5.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/Proteccion_contra_descargas_atmosfericas/5/5.htm).
- [6]. **Pando, Raul.** Revista de Ciencias exactas e Ingenieria. *Universidad Nacional de Tucumán Argentina.* [Online] 2006 28-October.  
<http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/anteriores/Nro28/PDF/N28Inv02.pdf>.
- [7]. **Hoyo, José Quiles.** <http://personales.upv.es/jquiles/>. [Online] 2009 йил 10-Septiembre.

[8]. **Horowitz, Paul.** *The Art of Electronics*. s.l. : Cambridge University Press, 1989.

[9]. **Machut, Jean-François.** *Selección de componentes en electrónica*. s.l. : Marcombo S.A., 2003.

## BIBLIOGRAFIA

### Libros

**Barciela, M. Guadilla.** *Tutorial de EAGLE 4.0 Para Windows y Linux.* s.l. : CadSoft Computer, Inc, 2000.

**Horowitz, Paul.** *The Art of Electronics.* s.l. : Cambridge University Press, 1989.

**Jasio, Lucio Di.** *Programming 32-bit Microcontrollers in C: Exploring the PIC32.* Burlington : Newnes, 2008.

**Machut, Jean-François.** *Selección de componentes en electrónica.* s.l. : Marcombo S.A., 2003.

**Rivero, Rafael.** *Guías de Instrumentación electrónica.* Caracas, Venezuela : s.n., 2005.

**Siegert C., Luis A.** *Alta Tensión y Sistemas de transmisión.* Mexico D.F. : Limusa, 1988.

**Uman A. Martin.** *The Lightning Discharge.* International Geophysics Series 1987

### Internet

**Bretanion Group.** [En línea] [Citado el: 12 de Octubre de 2009.]  
[http://bretaniongroup.com/web/component/option,com\\_glossary/Itemid,78/catid,45/func,view/term,Rayo/](http://bretaniongroup.com/web/component/option,com_glossary/Itemid,78/catid,45/func,view/term,Rayo/).

**Hoyo, José Quiles.** <http://personales.upv.es/jquiles/>. [Online] 2009 йил 10-Septiembre.

**López, Jesús Cristóbal Tejedor and García, Eduardo.** Laboratorio de Procesado de Imagen. [Online] [Cited: 2009 20-Enero.]  
[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos\\_02\\_03/Proteccion\\_contra\\_descargas\\_atmosfericas/5/5.htm](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/Proteccion_contra_descargas_atmosfericas/5/5.htm)

**Pando, Raul.** Revista de Ciencias exactas e Ingenieria. *Universidad Nacional de Tucumán Argentina.* [Online] 2006 28-October.  
<http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/anteriores/Nro28/PDF/N28Inv02.pdf>

## **Normas**

**IEEE Std 1122-1998** IEEE standard for digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests

[ANEXO N 1]

[Especificaciones Técnicas del osciloscopio PicoScope 2203]

Oscilloscope			
Variant	PicoScope 2203	PicoScope 2204	PicoScope 2205
<b>Bandwidth</b>	5 MHz	10 MHz	25 MHz
<b>Channels</b>	2		
<b>Vertical resolution</b>	8 bits		
<b><u>Enhanced vertical resolution</u></b>	12 bits		
<b>Dynamic range</b>	48 dB		
<b>Accuracy</b>	±3%		
<b>Input ranges (full scale)</b>	±50 mV to ±20 V in 9 ranges		
<b>Input characteristics</b>	1 MΩ in parallel with 20 pF or less		
<b>Input type</b>	Single-ended, BNC connector		
<b>Input coupling</b>	Software selectable AC/DC		
<b>Overload protection</b>	±100 V on single input		
<b>Maximum sampling rate (single shot)</b>			
One channel in use	40 MS/s	100 MS/s	200 MS/s
	20 MS/s	50 MS/s	100 MS/s

Oscilloscope			
Two channels in use			
<b>Maximum sampling rate</b> ( <a href="#">continuous streaming mode</a> )	1 MS/s (Record length limited to 2 MS in PicoScope, unlimited when using the supplied API)		
<b>Buffer memory</b> One channel in use Two channels in use	8 kS/channel 4 kS/channel	8 kS/channel 4 kS/channel	16 kS/channel 8 kS/channel
<b>Buffer memory (in streaming mode)</b>	2 M samples per channel		
<a href="#">Waveform buffer</a>	Up to 1000 waveforms		
<b>Timebase ranges</b>	500 ns/div to 200 s/div	100 ns/div to 200 s/div	50 ns/div to 200 s/div
<b>Timebase accuracy</b>	100 ppm with 3 ps jitter		
PC Requirements			
<b>Minimum</b>	<p><b>Processor:</b> Pentium II processor, or equivalent  <b>Memory:</b> 64 MiB (XP) / 512 MiB (Vista) / 1 GiB (Win 7) minimum  <b>Operating system:</b> 32 or 64-bit edition of Microsoft Windows XP SP2, Vista or Windows 7  <b>Ports:</b> USB 2.0 compliant port</p>		
<b>Recommended</b>	<p><b>Processor:</b> 2 GHz Pentium IV processor, or equivalent  <b>Memory:</b> 256 MiB (XP) / 1 GiB (Vista / Win 7)  <b>Operating system:</b> 32 or 64-bit edition of Microsoft Windows</p>		

Oscilloscope	
	XP SP2 (or above), Vista or Windows 7 <b>Ports:</b> USB 2.0 compliant port

**[Anexo N° 2]**  
**[Formato de grabación del PicoLog]**