



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“DESARROLLO DE UNA ANTENA CAPACITIVA Y  
APLICACIÓN A LA DETECCIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS  
AMBIENTALES Y DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”**

**Tesis Previa a la Obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico**

**Autor:**

Gabriel Napoleón Pesáñez Palacios

**Director:**

Hernando Efraín Merchán Manzano

**Cuenca – Ecuador**

**2013**



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Resumen

El presente trabajo está orientado al desarrollo de un sistema para detectar y almacenar descargas atmosféricas, con el fin de estudiar el comportamiento de las mismas, a continuación, se detalla cada capítulo

En el capítulo 1 se explica el problema de la atmósfera como conductor eléctrico, lo que son las nubes de tormenta, sus cualidades físicas, la variación eléctrica que causan en el medio en donde aparecen, también se presenta una breve introducción a las características físicas del rayo. Muestra también los peligros tanto para objetos, como para seres vivos. Finalmente se da una explicación de lo que es el nivel Isoceráunico

En el Capítulo 2 presenta modelos matemáticos para la corriente que se produce en la contra descarga del rayo, y el campo eléctrico generado, además de las características y funcionamiento de la antena capacitiva.

En el Capítulo 3 se describe el circuito que se utilizará en la toma de datos, en el almacenamiento y el programa desarrollado en la computadora para ese fin.

En el Capítulo 4 trata sobre las pruebas realizadas en el laboratorio con el fin de poder solucionar posibles errores que existan a más de realizar la calibración correspondiente, en esta parte también se describe el laboratorio, las facilidades que brinda para realizar las pruebas, el circuito de generación de tensiones de impulsos, y las medidas de seguridad

### Palabras Clave:

-Antena Capacitiva -Rayos –Campo eléctrico –Modelado de una descarga atmosférica- Dspic –INA114 – Max232



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Abstract

This work is aimed to developing a system to detect and store lightning in order to study the corresponding behavior. The description of each chapter is detailed below.

Chapter 1 explains the problem of the atmosphere as an electrical conductor, what the storm clouds are, their physical properties, the electrical variations that they cause in the medium in which they appear, also a brief introduction to the physical characteristics of the lightning is showed. Furthermore the chapter shows hazards against people and objects. Finally an explanation about ceraunic levels is given.

Chapter 2 provides mathematical models for current produced in discharges against lightning, and the electric field generated, in addition features and operation of the capacitive antenna.

Chapter 3 describes the circuit to be used in data acquisition, storage and computer software developed for that purpose.

Chapter 4 discusses tests performed in laboratory in order to resolve errors and make calibrations, this part also describes the laboratory, facilities offered for testing on it, the impulse voltage generator circuit, and security issues.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## INDICE

AGRADECIMIENTO.....	11
DEDICATORIA.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
PLANTEAMIENTO DE LA TESIS .....	15
OBJETIVOS .....	16
DESCARGAS ELÉCTRICAS –ATMOSFÉRICAS.....	19
1.1 LA ATMÓSFERA COMO CONDUCTOR ESFÉRICO .....	19
1.2 NUBES DE TORMENTA .....	20
1.3 EL RAYO .....	22
1.3.1 Qué es el Rayo.....	22
1.3.2 Variación de la Carga Atmosférica.....	23
1.3.3 Propiedades Eléctricas.....	25
1.3.4 Clasificación .....	26
1.3.5 Génesis del rayo .....	29
1.4 EFECTOS DE LOS RAYOS SOBRE LAS PERSONAS Y LOS BIENES .....	31
1.5 NIVEL ISOCERÁUNICO.....	33
MODELO DE CORRIENTE Y SENSOR CAPACITIVO.....	35
2.1 PRINCIPIOS FÍSICOS.....	35
2.2 CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO .....	41
2.3 POLARIDAD CAMPO ELÉCTRICO .....	44
2.4 RELACIÓN CAMPO ELÉCTRICO CORRIENTE DEL RAYO .....	44
DESARROLLO DEL CIRCUITO .....	46
3.1.- BREVE DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO A REALIZAR .....	46
3.2 HARDWARE UTILIZADO .....	47
3.2.1 INA 114.....	47
3.2.2 TL082 .....	49
3.2.3 dsPIC30F4011.....	50
3.2.4 Max 232 .....	56
3.3 FILTROS .....	57
3.4 CIRCUITOS UTILIZADOS .....	64
3.4.1 Adecuación y filtrado de la señal.....	64
3.4.2 Captura y envío de datos .....	65
3.4.3 Filtro para el micrófono.....	66
PRUEBAS EN EL LABORATORIO DE TENSIÓN.....	67
4.1.- LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN.....	67



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

4.1.1. <i>El Laboratorio de Alta Tensión</i> .....	67
4.1.2. <i>Normas de Seguridad</i> .....	68
4.1.3. <i>Descripción de Equipos existentes</i> .....	70
4.2 CIRCUITO .....	73
4.3 SEÑALES DETECTADAS .....	73
4.4 CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL EQUIPO .....	76
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
6.1 CONCLUSIONES .....	77
6.2 RECOMENDACIONES .....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXOS.....	82
ANEXO 1 RESPUESTA DE LOS CIRCUITOS UTILIZADOS A ALTAS FRECUENCIAS .....	83
ANEXO 2 DISEÑO DEL FILTRO Anti-ALISING UTILIZANDO EL PROGRAMA “FILTERLAB”.....	85
ANEXO 3 RUTEADO DE LA PLACA Y VISTA GENERADA DEL TERMINADO DE LA PLACA .....	89



# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, GABRIEL NAPOLEON PESANTEZ PALACIOS, autor de la tesis "DESARROLLO DE UNA ANTENA CAPACITIVA Y APLICACIÓN A LA DETECCIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS AMBIENTALES Y DESCARGAS ATMOSFÉRICAS", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 8 de Abril de 2013



GABRIEL NAPOLEON PESANTEZ PALACIOS  
0301893889

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



# UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, GABRIEL NAPOLEON PESANTEZ PALACIOS autor de la tesis "DESARROLLO DE UNA ANTENA CAPACITIVA Y APLICACIÓN A LA DETECCIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS AMBIENTALES Y DESCARGAS ATMOSFÉRICAS", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO ELECTRICO. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afectación alguna de mis derechos morales u patrimoniales como autor.

Cuenca, 8 de Abril de 2013

  
GABRIEL NAPOLEON PESANTEZ PALACIOS  
0901893889

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999.

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 3000, Ext.: 1311, 1312, 1313

e-mail: [cdibv@ucaemra.edu.ec](mailto:cdibv@ucaemra.edu.ec) casilla No. 1303

Cuenca - Ecuador



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 MODELO DE LA TIERRA COMO UN CAPACITOR.....	19
FIGURA 2 VARIACIÓN DIARIA PROMEDIO DEL CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO EN UN DÍA DESPEJADO SOBRE LOS OCÉANOS. ....	20
FIGURA 3 DIMENSIONES CUMULONIMBOS.....	22
FIGURA 4 VARIACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO DEBIDO A UN CÚMULO-NIMBUS .....	24
FIGURA 5 VARIACIÓN DE LA CORRIENTE EN UN RAYO .....	26
FIGURA 6 DESCARGA INTRA – NUBE .....	27
FIGURA 7 DESCARGA NUBE - NUBE .....	28
FIGURA 8 DESCARGA NUBE - TIERRA.....	28
FIGURA 9 DESCARGA TIERRA - NUBE .....	29
FIGURA 10 SECUENCIA DE FORMACIÓN DE UN RAYO .....	30
FIGURA 11 MODELO PARA OBTENER EL CAMPO ELÉCTRICO .....	35
FIGURA 12 MODELO DE PROPAGACIÓN DE CORRIENTE.....	37
FIGURA 13 ANTENA CAPACITIVA .....	41
FIGURA 14 MODELO ANTENA CAPACITIVA .....	42
FIGURA 15 DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO.....	46
FIGURA 16 ESKEMA DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL INA114 .....	48
FIGURA 17 ENCAPSULADO TIPO PDIP DEL INA114 .....	49
FIGURA 18 ESKEMA TL 082 .....	50
FIGURA 19 dSPIC 30F4011 ENCAPSULADO PDIP .....	51
FIGURA 20 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ADC DEL DsPIC30F4011 .....	52
FIGURA 21 PARÁMETROS DE CONVERSIÓN DEL ADC.....	54
FIGURA 22 ESKEMA DE TRANSMISIÓN DE DATOS POR EL MODULO UART .....	56
FIGURA 23 MAX 232 .....	57
FIGURA 24 FILTRO BUTTERWORTH DE PRIMER ORDEN .....	59
FIGURA 25 FILTRO BUTTERWORTH DE QUINTO ORDEN .....	59
FIGURA 26 FILTRO CHEBYSHEV DE SEGUNDO ORDEN .....	60
FIGURA 27 FILTRO CHEBYSHEV DE OCTAVO ORDEN.....	60
FIGURA 28 FILTRO PASA BAJO.....	61
FIGURA 29 FILTRO PASA ALTO .....	62
FIGURA 30 FILTRO PASA BANDA .....	62
FIGURA 31 FILTRO ELIMINA BANDA .....	63
FIGURA 32 CIRCUITO DE ADQUISICIÓN Y FILTRADO DE LA SEÑAL.....	65
FIGURA 33 ESKEMA DE ALMACENAMIENTO Y ENVÍO DE DATOS .....	66
FIGURA 34 ESKEMA DEL FILTRO PASA BAJO .....	67
FIGURA 35 CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO .....	67
FIGURA 36 SISTEMA DE AVISO VISUAL PARA LA SEGURIDAD DEL OPERADOR .....	69
FIGURA 37 ESKEMA DE CONEXIÓN DEL TRANSFORMADOR.....	70
FIGURA 38 RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA PARA ALTOS VOLTAJES .....	71



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

FIGURA 39 CAPACITOR PARA ALTOS VOLTAJES .....	71
FIGURA 40 RESISTOR PARA ALTO VOLTAJE .....	72
FIGURA 41 ESFERAS ESPINTEROMÉTRICAS .....	72
FIGURA 42 AISLADOR Y UNIONES .....	72
FIGURA 43 CIRCUITO GENERADOR DE VOLTAJES DE IMPULSO .....	73
FIGURA 44 SEÑAL DE SALIDA DE LA ANTENA .....	74
FIGURA 45 SEÑAL DETECTADA Y ACONDICIONADA .....	75
FIGURA 46 ONDA CAPTURADA .....	75
FIGURA 47 SEÑAL DE PRUEBA UTILIZADA .....	83
FIGURA 48 RESPUESTA DE LA SEÑAL EN LA ENTRADA NO INVERSORA DEL INA114 .....	83
FIGURA 49 RESPUESTA DE LA SEÑAL EN LA ENTRADA INVERSORA DEL INA114 .....	84
FIGURA 50 DATOS RECOGIDOS POR EL DSPIC Y MOSTRADOS EN EL COMPUTADOR .....	84
FIGURA 51 MANUAL FILTERLAB - ELECCIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD .....	86
FIGURA 52 MANUAL FILTERLAB - ELECCIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO .....	86
FIGURA 53 MANUAL FILTERLAB - ELECCIÓN DE LA RESOLUCIÓN DEL ADC .....	87
FIGURA 54 MANUAL FILTERLAB - RUIDO TOLERABLE .....	87
FIGURA 55 MANUAL FILTERLAB - DISEÑO DEL FILTRO .....	87
FIGURA 56 MANUAL FILTERLAB - DIAGRAMA FINAL A IMPLEMENTAR .....	88
FIGURA 57 MANUAL FILTERLAB - GRAFICA DE CARACTERÍSTICAS .....	88



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 MODELOS DE PROPAGACIÓN DE CORRIENTE .....	38
TABLA 2 MODOS DE OSCILACIÓN DEL DsPic30F4011 .....	55



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## AGRADECIMIENTO

La presente tesis es un esfuerzo en el cual participaron varias personas de manera directa o indirecta, ya sea opinando corrigiendo o alentando de alguna manera mi trabajo.

A todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Cuenca quienes supieron brindar de mejor forma sus conocimientos para formarme como un profesional y como una mejor persona.

Quiero agradecer a mi director de tesis Ing. Hernando Merchán Manzano el cual me encaminó en esta tarea y me ayudó en los momentos de dificultad, además de brindarme las facilidades para realizar la misma y permitirme el acceso completo al laboratorio de alta tensión sin lo cual no podría haber realizado este trabajo.

Al Ing. Remigio Guevara, el mismo que de varias formas me ayudó con enseñanzas y material para diseñar el equipo, de igual manera al laboratorista y amigo Francisco Sánchez que siempre me facilitó el ingreso y uso de equipos.

A mi hermano que siempre me brindó su apoyo incondicional ayudándome en algunas cosas y sobre todo a mis padres que soportaron mi mal genio, escucharon mis problemas y me alentaron para seguir adelante.

A mis amigos y compañeros que hicieron de esta etapa de la vida algo de recordar y en donde he formado buenas amistades.

A mi enamorada Lourdes quien en la etapa final de mi vida universitaria como estudiante llegó para alegrar mis días y apoyarme a seguir adelante.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres Fanny y Jaime mi hermano Antonio quienes siempre me apoyan a lo largo de esta carrera aunque pienso que dudaron muchas veces que terminara, es comprensible pues de la misma forma yo mismo tenía mis dudas, pero siempre estuvieron ahí y me brindaron las facilidades para estudiar y el apoyo moral para continuar adelante.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Introducción

Desde el principio de los tiempos y hasta hace unos pocos siglos atrás, el hombre atribuía los fenómenos naturales a sucesos relacionados a capricho de dioses como una forma de explicarlos.

El fenómeno eléctrico producto de la descarga atmosférica no fue la excepción, así pues dependiendo de la cultura, este fenómeno era el creador de alguna divinidad, por ejemplo los Griegos creían que el rayo era el arma utilizada por Zeus, los Nórdicos y Germanos lo relacionaban con Thor, este dios creaba los rayos al cruzar por el cielo su espada mientras peleaba con otros dioses para proteger una tierra mítica denominada Midgard.

No fue hasta el siglo XVII que Benjamín Franklin pudo demostrar que las nubes de tormenta estaban cargadas eléctricamente y que el popularmente llamado rayo era una descarga eléctrica, esto lo consiguió luego de varios experimentos entre los cuales destaca el conocido experimento en el cual hizo volar una cometa con una llave sujetada en la parte superior de la misma, la cual al producirse las condiciones necesarias, debido al campo eléctrico y la descarga atmosférica producía chispas, comprobando de esta forma que se trataba de un fenómeno eléctrico. Se realizaron estudios similares en otras partes de mundo, algunos de los cuales tenían consecuencias fatales ya que al intentar capturar el rayo para demostrar que se trataba de un fenómeno eléctrico, el mismo terminaba por matar a los investigadores pues no tomaban las normas de seguridad respectivas debido a la falta de conocimiento.

La descarga atmosférica comúnmente se da en cuestión de décimas de microsegundos, por lo cual es un fenómeno muy difícil de estudiar, además presenta una alta energía en un muy corto tiempo. Los voltajes necesarios para que se produzca este fenómeno son de unas cuantas decenas de kV.

En la actualidad con el crecimiento de la población, la evolución de la tecnología y la posibilidad de daños tanto materiales como de vidas nos obligan a tomar medidas de seguridad y a estudiar de una mejor forma el fenómeno conocido como rayo, por esta razón existe incluso una materia que se encarga de estudiar los sistemas de protección de los rayos, en esta tesis no se hablará sobre ellos



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

pues está enfocada de manera más directa al modelado y sobre todo a la captura y estudio de la forma de onda que presenta la corriente rayo, esto mediante la detección del Campo Eléctrico.

La presente tesis de grado constituye la creación de un sistema para detectar los fenómenos naturales conocidos como rayos, se pretende construir un equipo para este fin, se da una explicación sobre el proceso para la formación de una descarga atmosférica, las diferentes clases que existen, además se explica brevemente los modelos matemáticos que se pueden adoptar para explicar este fenómeno, se obtendrá un modelo de la antena capacitiva usada para este fin.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Planteamiento de la Tesis

El actual estado de abandono de la antena capacitiva existente en el laboratorio de alta tensión a más del interés por investigar los parámetros de una descarga atmosférica y obtener un mejor entendimiento de la misma, me ha llevado a la realización del desarrollo de este tema de tesis, por éstas y otras razones se llevará a cabo esta investigación, con el fin de lograr esto se deberá tener un entendimiento del funcionamiento del sensor, para lo cual se plantea obtener un modelo matemático del campo eléctrico, de la corriente de contra-descarga en el rayo y finalmente un modelo matemático de la antena capacitiva. Mediante éstos se pretende construir un equipo para la detección de este fenómeno, usando la antena capacitiva como un sensor, lo cual podrá ser utilizado en un futuro para posteriores investigaciones.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Objetivos

### Objetivo General:

- Mejorar la antena capacitiva que existe en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad de Cuenca, al incluirle un sistema para la recopilación y almacenamiento de información, con el fin de crear una base de datos que se podría utilizar en futuras referencias.

### Objetivos Específicos:

- Lograr un mejor entendimiento del fenómeno físico por el cual se da el rayo.
- Investigar los modelos matemáticos para la caída de un Rayo.
- Obtener un modelo matemático de la antena lo más real posible.
- Obtener y manejar de mejor manera los sistemas del laboratorio de alta tensión con el fin de realizar las pruebas de manera correcta.
- Construir un sistema electrónico para censar la caída de los rayos.
- Recopilar de manera correcta la caída de un rayo en una determinada área.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Estructura de la Tesis

Esta tesis se estructura en 6 capítulos, en los cuales se trata los temas necesarios para realizar esta investigación.

A continuación, se da una breve explicación de cada tema:

### **Capítulo I:**

Se encarga de explicar el problema de la atmósfera como conductor eléctrico, lo que son las nubes de tormenta, sus cualidades físicas, la variación eléctrica que causan en el medio en donde aparecen, también se intenta tener una introducción breve a las características físicas del rayo, diferenciar el tipo de descarga atmosférica que existe, además de explicar la formación del rayo y pretende realizar una breve modelación de la corriente que se da en la contra-descarga del mismo.

Muestra también en el mismo los peligros que representa la caída de un rayo tanto para vienes físicos, como para la vida de los seres vivos.

Finalmente muestra una explicación de lo que es el nivel Isoceráunico y se presenta dos formas un tanto empíricas, que se basan más en una forma estadística para calcular el número total de rayos que caen en un área determinada.

### **Capítulo II:**

Presenta modelos matemáticos para la modelación de la corriente que se produce en la contradescarga del rayo, y el campo eléctrico que se produce, lo cual es de mayor importancia. Presenta las características y funcionamiento de la antena capacitiva, a más de un modelo matemático que relaciona el voltaje detectado con otros parámetros a fin de obtener una correcta medición de los valores detectados.

### **Capítulo III:**

Describe el circuito que se utilizará en la toma de datos, en el almacenamiento y el programa desarrollado en la computadora para el almacenamiento de dichos datos. También se detallan los equipos utilizados y los problemas resueltos para obtener el mismo



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## **Capítulo IV:**

Se realizará pruebas del equipo en el laboratorio con el fin de poder solucionar posibles errores que existan a más de calibrarlo de la mejor forma posible para su posterior puesta en operación en campo.

En esta parte también se describirá el laboratorio, las facilidades que brinda para realizar las pruebas, los circuitos de elevación de voltaje, al igual que los de medida se describirán de manera detallada ya que constituyen un punto muy importante en el desarrollo de esta tesis, pues sin ellos no sería posible realizar las pruebas adecuadamente.

También se tomará en cuenta la seguridad que se debe tener en el laboratorio para evitar posibles accidentes o daños en los equipos.

## **Capítulo V:**

Se da a conocer las conclusiones y recomendaciones que se dan luego del desarrollo de esta tesis.



## CAPITULO I

### Descargas Eléctricas –Atmosféricas

#### 1.1 La Atmósfera como conductor esférico

*“La atmósfera terrestre puede ser considerada como un gran condensador, cuyas placas están constituidas por la superficie del suelo y por una capa ionizada de Heaviside. Esta capa tiene una altura promedio de 100km y una capacidad aproximada de 46mF”.<sup>1</sup> Además de que entre esta capa y la tierra se tiene un campo eléctrico normal máximo de  $E= 120V/m$ .*

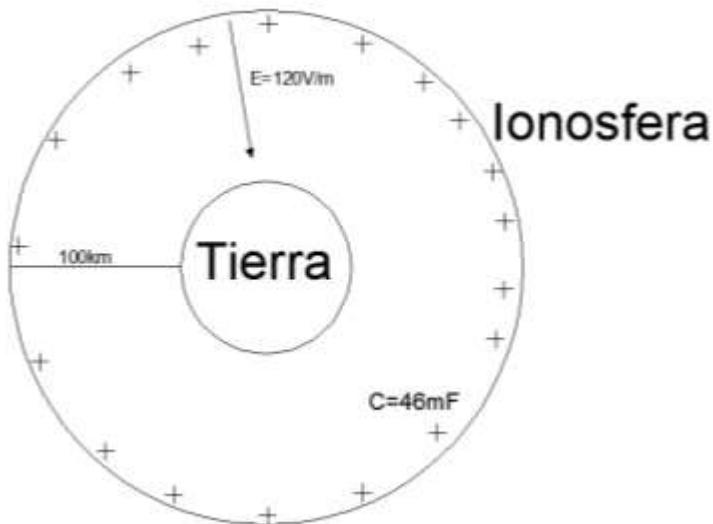


Figura 1 Modelo de la Tierra como un Capacitor

*“La conductividad de la atmósfera se debe a que existen iones que se desplazan en el campo produciendo la corriente”<sup>2</sup>. Por lo tanto la conductividad del aire es variable y como consecuencia también varía el potencial.*

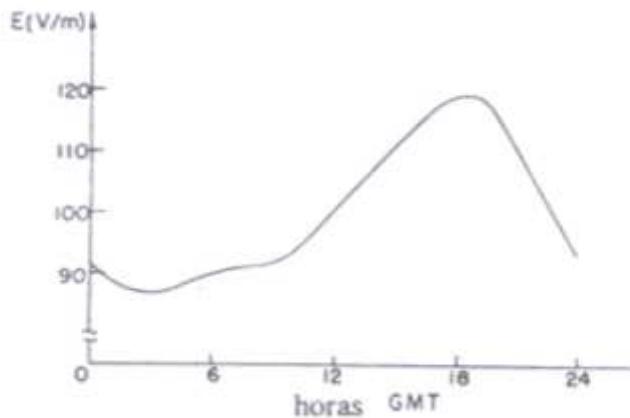
<sup>1</sup> Merchán H. – Mejía A. / Protección contra las descargas Atmosféricas/ Seminario IEEE 2002/ pag. 1

<sup>2</sup> TORMENTAS ELÉCTRICAS, RAYOS Y PARARRAYOS/ Geraldina T. Golup/ 2002/ pág. 3



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Existe una variación de la corriente del  $\pm 15\%$  y es máxima a las 19:00 horas de Greenwich cualquiera sea el lugar del mundo donde se realizan las mediciones. “*Esto indica que hay una conductividad lateral mayor en la parte superior de la atmósfera que evita que la diferencia de potencial varíe localmente*”<sup>3</sup>.



**Figura 2 Variación diaria promedio del Campo Eléctrico Atmosférico en un día despejado sobre los Océanos<sup>4</sup>.**

Por lo dicho anteriormente se puede señalar que, siempre existe electricidad en el medio que nos rodea, así pues se tiene que la superficie de la tierra está cargada negativamente mientras la capa exterior está cargada positivamente y el aire y demás gases existentes en la atmósfera sirven como dieléctrico impidiendo que se den una serie de descargas entre estos dos puntos a diferente potencial, además las continuas descargas que se dan producen un equilibrio en el sistema, manteniéndolo estable e impidiendo que este se descargue completamente, lo cual sería desastroso, se considera que en caso de darse este fenómeno el sistema duraría menos de 5 minutos en quedar en reposo completo.

## 1.2 Nubes de Tormenta

Las nubes de tormenta son enormes acumulaciones de nimbos que presentan una gran cantidad de humedad y se diferencian de las nubes normales de lluvia en que las primeras son mucho más extensas tanto en su altura como en su área, otra diferencia radica en la forma, pues las nubes de tormenta por lo general adquieren una forma de hongo o yunque.

<sup>3</sup> TORMENTAS ELÉCTRICAS, RAYOS Y PARARRAYOS/ Geraldina T. Golup/ 2002/ pág. 3

<sup>4</sup> TORMENTAS ELÉCTRICAS, RAYOS Y PARARRAYOS/ Geraldina T. Golup/ 2002/ pág. 3



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Este tipo de nubes se forma al existir un desequilibrio en la atmósfera es decir cuando la tropósfera está más fría de lo habitual, lo que produce una corriente de aire ascendente. Esto ocurre cuando se da un frente frío, o un cambio de presiones.

Al producirse este fenómeno tenemos la formación de los cúmulo-nimbus o Nubes de Tormenta, las cuales están constituidas por gotas de agua en su parte inferior y por partículas de hielo en la parte superior.

Al mismo tiempo se puede observar una separación de cargas eléctricas dentro de la nube, respecto a este fenómeno se tiene varias hipótesis de como se produce, pero a continuación explicaré 2 de las más aceptadas:

- **La separación de cargas positivas y negativas dentro de una nube:** Los cristales de hielo dentro de las nubes cumulo-nimbus se frotan entre sí debido a las corrientes aéreas ascendentes fuertes en estas nubes, acumulando así una carga estática fuerte. Los cristales positivamente cargados tienden a ascender lo que hace que la capa superior de la nube acumule una carga estática positiva. Los cristales negativamente cargados y los granizos caen a las capas del centro y del fondo de la nube que acumula una carga estática negativa. Los cumulo-nimbus que no producen suficientes cristales de hielo, en general, no pueden producir bastante electricidad estática para causar una descarga atmosférica.
- **El viento que asciende mantiene en suspensión las gotas de agua que se enriquecen y se agrandan hasta terminar por dividirse<sup>5</sup>:** Además debido a experimentos realizados se ha determinado que al pulverizar el agua por una corriente de aire produce el efecto de electrizarlo, con lo cual se sustenta esta teoría. Entonces mediante este principio y puesto que existe una división de las partículas de agua tenemos que las cargas más livianas, los electrones ascienden a la parte superior del cumulo-nimbus causando que se cargue positivamente, mientras las más pesadas los protones se mantienen en la parte inferior de la nube lo que causa que ésta se cargue negativamente.

---

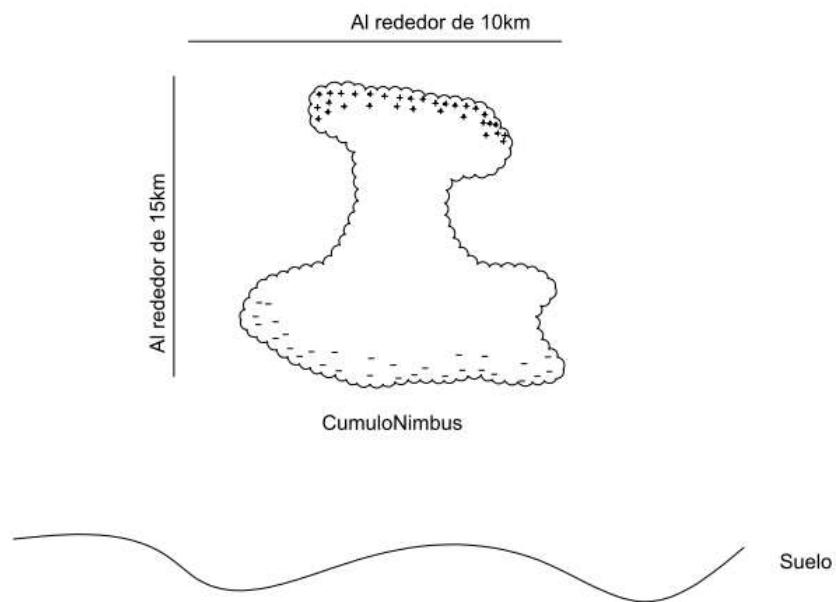
<sup>5</sup> Merchán H. – Mejía A. / Protección contra las descargas Atmosféricas/ Seminario IEEE 2002/ Pág. 3



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Lo que obtenemos como resultado sin importar cual sea la forma de explicarlo es básicamente una acumulación de cargas positivas en la parte superior de la nube y cargas negativas en la parte inferior de la nube y entonces tenemos que la nube se comportara como un enorme dipolo eléctrico.

Los cambios de temperatura en la nube son determinantes en la formación de carga eléctrica en ella; ya que, en zonas altas de la misma, la temperatura puede ser progresivamente más fría, hasta llegar bajo cero, en la cual las gotas de lluvia no pueden existir y se trasforman en cristales de hielo, con movilidad de caída muy baja.



**Figura 3 Dimensiones Cumulonimbos**

## 1.3 El Rayo

### 1.3.1 Qué es el Rayo

El rayo como comúnmente se conoce a una descarga atmosférica que se produce entre una nube y tierra o viceversa es un fenómeno natural conocido y temido por el hombre desde que comenzó a razonar.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Por las características que tiene lugar donde se presenta y las condiciones necesarias que se deben cumplir una descarga atmosférica, muestra cualidades características de un fenómeno natural, cambiando durante el año dependiendo del mes, clima, presión atmosférica del medio, humedad del aire además de variar según el tipo de paisaje en el que se presenta y otros factores, es por esto que existe variación en cuantas descargas atmosféricas caen, que tan seguido y con qué densidad, dependiendo de los factores antes mencionados.

Por lo antes indicado se puede notar que la descarga atmosférica es un fenómeno que se puede estimar de manera parecida a los fenómenos climáticos existentes pero no se puede predecir, es como el viento, la lluvia, es algo frecuente e inevitable, a más de eso, es difícil saber en dónde exactamente se dará una descarga atmosférica, pues al ser un evento de duración corta y más rápida que los demás fenómenos, los hace más impredecibles.

Es claro que existen medios para proteger a las personas y bienes de estos fenómenos, estos son los pararrayos, los cuales brindan un gran margen de seguridad, pero su diseño y colocación va a depender mucho de cuanto se conozca sobre este fenómeno en una determinada zona.

Básicamente una descarga atmosférica se produce debido a que existe un aumento del campo eléctrico hasta que se produce una ruptura del dieléctrico (aire) y se tiene un arco eléctrico, este fenómeno tiene duración del orden de los microsegundos a milisegundos, todo esto se trata en los siguientes puntos.

## 1.3.2 Variación de la Carga Atmosférica

Normalmente el campo eléctrico en un día con clima despejado es de unas pocas decenas de V/m, pero esto cambia drásticamente al existir un cumulo-nimbus cercano a la superficie terrestre, en este caso el campo eléctrico se invierte y aumenta hasta el orden de -10kV/m a -15kV/m, es claro que el valor que alcance va a depender de la altura a la cual se encuentra el cumulo-nimbus, de las características del terreno, humedad del ambiente y mas, este campo eléctrico puede seguir aumentando, en este caso si se toma en cuenta que la ruptura dieléctrica del aire como aislante se da entre 30-40 KV/cm, en este punto se



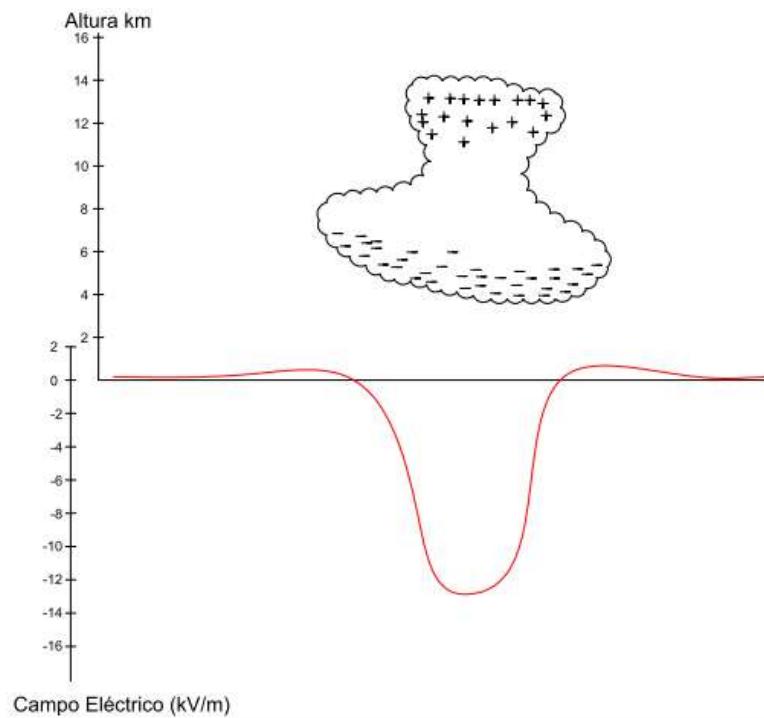
# UNIVERSIDAD DE CUENCA

comienza a producir los fenómenos como el efecto corona seguido de la descarga atmosférica.

Se tiene que destacar también que no solamente existen descargas nube-tierra sino también otros tipos de descarga, los cuales se mencionarán mas adelante. En todos estos tipos de descarga se tienen un efecto parecido al citado anteriormente.

A continuación se muestra una gráfica de cómo cambia el campo eléctrico debido a la presencia de una nube cargada, en éste se puede observar el drástico cambio de un estado al otro.

Se presenta una gráfica en donde mediante la línea roja se puede observar cómo cambia el campo eléctrico al existir un cumulo-nimbus en el ambiente, y se observa el cambio brusco de campo eléctrico antes mencionado.



**Figura 4 Variación del Campo Eléctrico debido a un Cúmulo-nimbus**

Si consideramos el valor de campo eléctrico necesario para la ruptura del dieléctrico (aire en este caso) tenemos mediante la formula:



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$E = \frac{V}{d} \text{ (kV/m)}$$

Se puede observar que el campo eléctrico es un poco bajo para que se produzca la ionización, más adelante se explicará cómo éste aumenta en las puntas de los líderes ascendentes y los precursores descendentes.

### 1.3.3 Propiedades Eléctricas

El momento en que se produce la descarga atmosférica, al igual que en todo fenómeno se presentan características propias de dicho fenómeno.

Se tiene que las descargas atmosféricas nube tierra y tierra nube tienen un alcance de 1 a 2 Km<sup>2</sup> en los cuales pueden causar daño, básicamente todos los rayos presentan las siguientes propiedades:

- Temperatura:	25000 - 30000 °C
- Corriente:	3 - 200 kA
- Tiempo de duración:	1 - 100 ms
- Pendiente de frente de onda	7 - 400k A/us
- Diferencia de Potencial Nube-Tierra	100MV
- Frecuencia	1- 1000 khz
- Propagación	340 m/s

Se debe diferenciar que existe un amplio rango en la corriente que pueden alcanzar los rayos, esto se debe a que los rayos tierra-nube son de mayor potencia aunque son los menos probables. Al igual el amplio tiempo de duración se debe a que puede existir descargas sucesivas a la contradescarga principal.

Además de esto un rayo presenta las siguientes particularidades en su forma de onda, las cuales se describe a continuación:

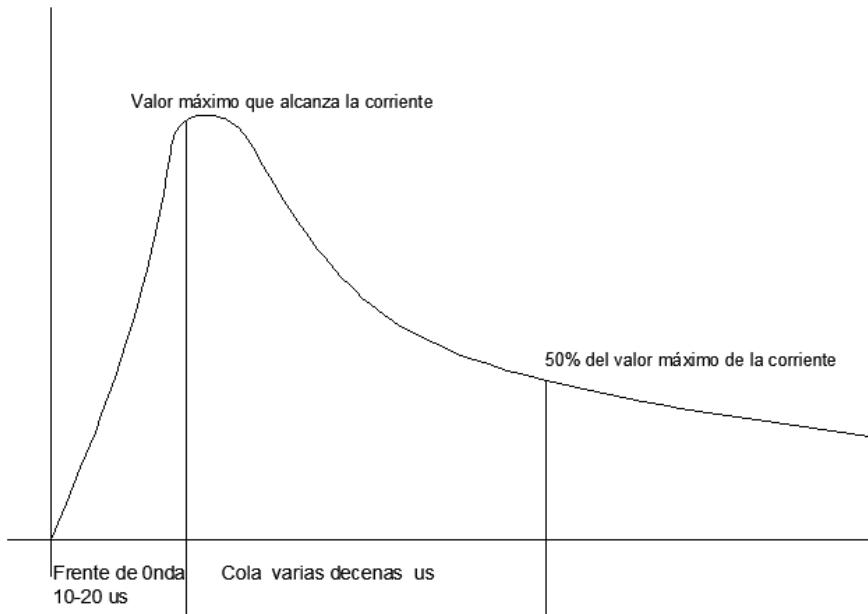
Este fenómeno presenta una onda de corriente que tiene características de una onda de impulso, pero con una cola más extensa, así pues el frente de onda se da



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

de 10-20us que es el punto en donde la corriente alcanza el mayor valor, y luego decae a un 50% de la misma en unas cuantas decenas de microsegundos. Además se sabe que rara vez se da solamente una descarga, en realidad se dan varias descargas sucesivas, superponiendo la onda inicial, esto puede tardar algunos milisegundos hasta que se termine por completo el fenómeno.

A continuación presento la grafica referente al fenómeno descrito:



**Figura 5 Variación de la Corriente en un Rayo**

Es claro que la forma de onda real va a diferir de la expuesta en la gráfica anterior debido a que existirán superposiciones de onda, ondas de mayor frecuencia y más fenómenos relacionadas.

## 1.3.4 Clasificación

Las descargas atmosféricas se pueden dar de diferente manera, seguidamente presento una clasificación según los medios entre los que se dan:



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Descarga Intra -nube
- Descarga Nube - Nube
- Descarga Nube - Tierra
- Descarga Tierra – Nube

En nuestro caso las descargas a tomar en cuenta serán la Nube – Tierra y la Tierra – Nube ya que éstas dos descargas afectan directamente a los objetos en la superficie terrestre a mas de que nuestra antena capacitiva sólo puede detectar este tipo de descargas. Las otras dos descargas no afectan a la superficie terrestre pero si pueden representar un problema para aviones u otros dispositivos capaces de llegar a esas alturas y que circulen por una nube cargada eléctricamente.

Seguidamente se explica cada tipo de descarga:

## - **Descarga Intra- Nube**

Este tipo de descarga eléctrica se produce en el interior de la nube y se da debido al campo eléctrico existente en la misma, ya que la parte superior de la nube se carga positivamente mientras la inferior negativamente, o existe un campo eléctrico intenso entre dos puntos de la nube.

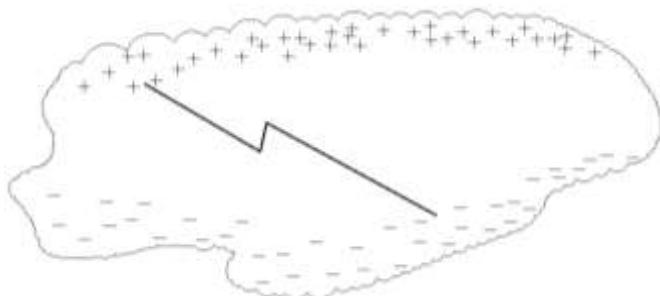


Figura 6 Descarga Intra – Nube

## - **Descarga Nube – Nube**

Esta descarga se da entre dos nubes al existir una diferencia de potencial entre las mismas.

Entre ésta y la anterior se tiene que constituyen el 15% de las descargas.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

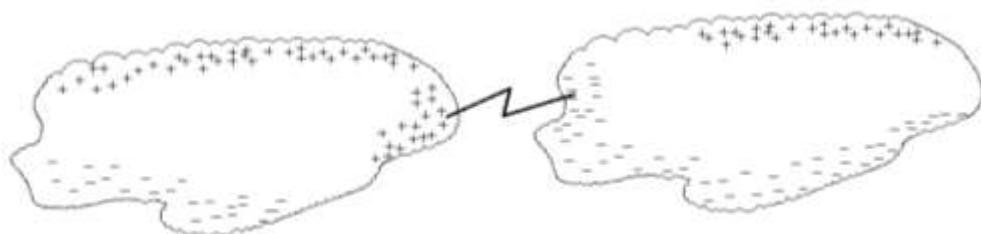


Figura 7 Descarga Nube - Nube

## - Descargas Nube Tierra

Son descargas que se dan entre una nube y la superficie de la tierra constituyen el 85% del total de descargas. Es decir son las más comunes y las cuales serán objeto de estudio.

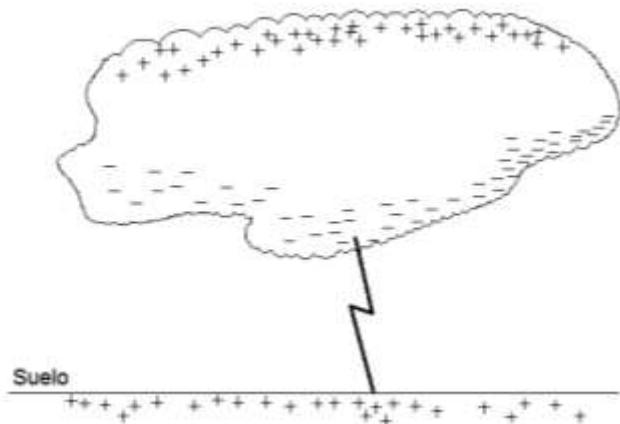


Figura 8 Descarga Nube - Tierra

## - Descargas Tierra - Nube

Son descargas que no ocurren muy a menudo en este caso la nube se encuentra cargada positivamente mientras el suelo esta cargado negativamente, éstas son las menos frecuentes pero las más peligrosas ya que sus corrientes tienen valores elevados.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

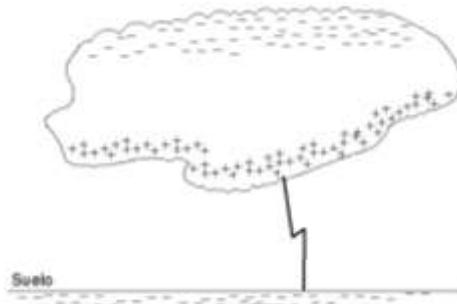


Figura 9 Descarga Tierra - Nube

### 1.3.5 Génesis del rayo

El rayo ha sido explicado de varias maneras pero solamente en trabajos de finales del siglo XX se le da una base científica para este fenómeno, posterior a esto se utilizaba razonamientos empíricos, seguidamente se indica cómo se forma un rayo nube- tierra. Para esto utilizaremos 2 conceptos los líderes ascendentes y los precursores piloto, daremos una explicación de éstos y seguidamente la teoría de su formación, se debe tomar en cuenta que las descargas en forma de chispa se darán cuando el potencial tierra- nube sea alto.

El rayo se basa en el crecimiento de un canal ionizado entre los polos (tierra-nube), en el caso del líder ascendente éste sigue el camino dejado por una avalancha de electrones previa, esta situación se repite varias veces y en saltos consecutivos, pues del producto de la ionización de una parte del espacio se libera fotones los cuales a su vez existan e ionizan a los átomos próximos a los mismos, lo cual crea una reacción en cadena, este fenómeno se repite varias veces hasta que se encuentra con el precursor descendente, se pueden dar más de una avalancha cada vez, estas avalanchas secundarias ionizan el aire cerca a la avalancha principal creando ramificaciones, las cuales suelen terminar en pocos saltos más. En el caso del precursor descendente ocurre de manera similar solo que este presenta mayores magnitudes que el anterior. Debemos tomar en cuenta que la formación del rayo produce que estos dos fenómenos se den a la vez tanto los líderes ascendentes como los precursores descendentes, solamente que los primeros son positivos y salen desde tierra y los segundos son negativos y salen desde la nube (para el caso del rayo nube – tierra).

Se debe enfatizar que el campo eléctrico crece en la punta de los líderes ascendentes y los precursores descendentes, este campo crece lo suficiente como



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

para romper el dieléctrico, pues de otra manera como se dijo anteriormente el campo eléctrico no sería suficiente para que se produzca el fenómeno.

La formación del rayo se da cuando estos dos fenómenos se producen durante un instante y el momento mismo en el que se encuentran es cuando se da el rayo.

Presentamos una grafica que muestra la formación de los rayos y además se presenta los tiempos aproximados que tiene cada una

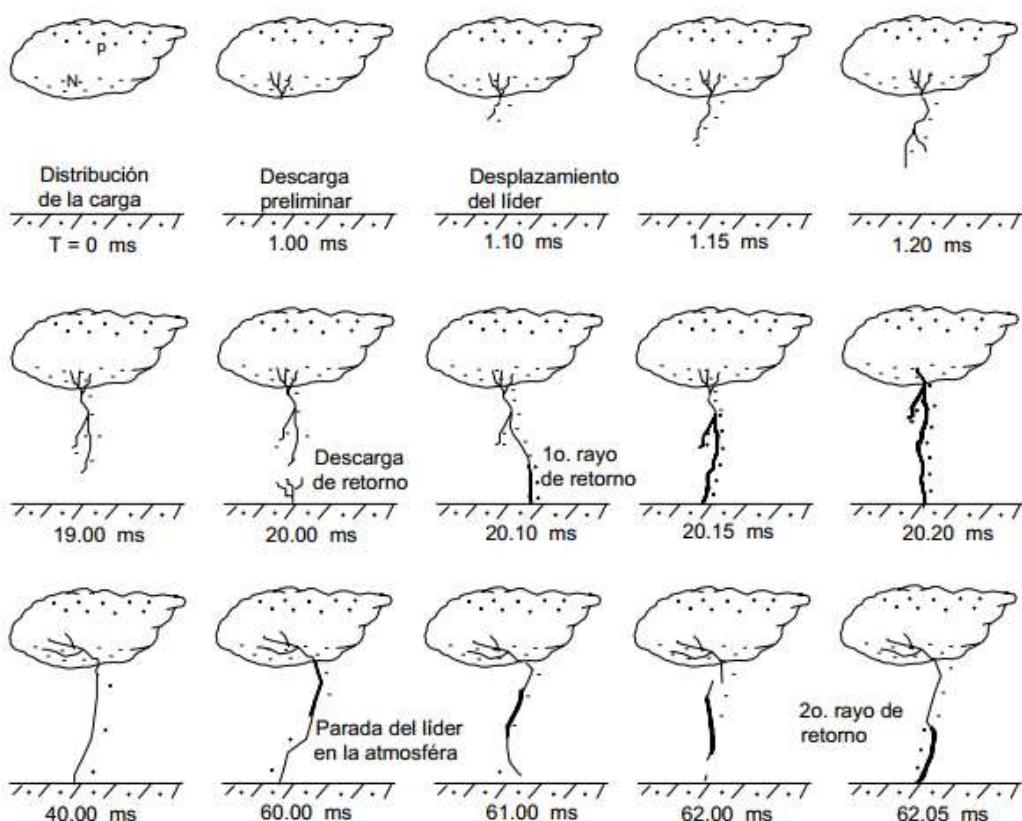


Figura 10 Secuencia de Formación de un Rayo<sup>6</sup>

Para el caso de las descargas nube tierra se tiene el mismo principio sino que en este caso los líderes ascendentes son negativos y los precursores pilotos son positivos, además que la corriente de esta descarga es mucho mayor a la anterior.

<sup>6</sup> Protección de redes de media tensión frente a las descargas atmosféricas/ Héctor L. Soidelzon/ Junio 2000/ Pág. 15.



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

### 1.4 Efectos de los rayos sobre las personas y los bienes

Al igual que todos los fenómenos de la naturaleza al encontrarse con las construcciones y personas causan grandes daños a estos lugares, en el caso de los rayos, no es la excepción, pues estos pueden causar grandes destrozos sobre construcciones y equipo electrónico e incluso perdidas de vidas, al producirse impactos directos o cercanos, a continuación se explica de una forma breve los principales problemas que estos pueden causar.

*“Un rayo puede viajar más de 1.5Km desde su punto de origen al de impacto, y en caso de existir descargas sucesivas estas pueden caer al menos a 2km a la redonda del lugar en donde se dio la primera descarga”.*

Primero procederemos a describir los daños causados a equipos eléctricos, electrónicos, y bienes no eléctricos, que producen los rayos, así pues dependiendo del tipo de equipo estos pueden ser variados pueden ser variados, pudiendo ir desde interferencia causada a medios de comunicación, hasta el daño de equipos completos, los mismos se explican a continuación:

- **Interferencia:** al comenzar a formarse los líderes ascendentes, se producen chispas, éstas pueden causar interferencia y ruido que puede afectar a equipos de radio y TV. También se tendrán altas corrientes por los cables conectados al punto por donde se dan los líderes ascendentes.
- **Daño de Equipos:** debido a la variación brusca del campo electrostático en el medio causado por una tormenta, los equipos aislados de tierra pueden sufrir grandes tensiones del orden de los kV, llegando a tener problemas de funcionamiento e incluso a dañarse, esto dependiendo del tipo de equipo y su función, entonces resulta recomendable tener un buen sistema de puesta a tierra para evitar estos problemas, sobre todo cuando se trata de equipos electrónicos.
- **Pulso Electromagnético:** El momento del impacto a tierra del rayo se tiene también un pulso electromagnético, la energía que se tenga de este fenómeno va a depender de la corriente que circula al momento de la descarga atmosférica, este fenómeno puede afectar a equipos que se

---

<sup>7</sup> Rayos y Relámpagos/ José Antonio Aparicio Florido/ Octubre, 2004



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

encuentren aislados de tierra hasta 1,5Km a la redonda del punto de impacto. Se debe tomar en cuenta que este fenómeno se da incluso en el caso de que el rayo caiga sobre un pararrayos

- **Daño de Equipos de forma directa:** el impacto directo sobre cables aéreos, transformadores y demás equipos eléctricos resulta en la destrucción del mismo o en el caso de las líneas eléctricas se pueden dañar los aislamientos, desconectar protecciones debido a las altas corrientes, e incluso debido a los esfuerzos físicos que se producen se pueden romper las líneas.
- **Daños a Bienes no eléctricos:** los daños causados a objetos y bienes personales generalmente son de completa o parcial destrucción del mismo, esto dependerá de la intensidad del rayo y si el impacto se da de forma directa o indirecta.

La caída de un rayo para las personas resulta ser muy peligrosa e incluso mortal dependiendo si esta es directa o indirecta, las principales zonas que daña un rayo al tener contacto con una persona son el cerebro y el corazón, sin olvidar que debido al paso de altísimas corrientes por los músculos se puede tener un efecto de calentamiento, produciendo quemaduras graves en los músculos lisos.

A continuación explicamos las causas por las cuales puede fallecer una persona al ser alcanzada por un rayo:

- **Fibrilación Ventricular.**- La corriente que circula por una persona en el caso del impacto del rayo causa la pérdida del ritmo cardíaco, ocasionando la falta de bombeo de sangre al cuerpo y una posterior muerte. Aunque a veces la principal causa de la muerte es que por la alta corriente, el corazón se detiene causando el deceso.
- **Paro Respiratorio.**- Se puede producir igualmente al tener un impacto del rayo y puede causar la muerte, ya que luego del paso de la corriente por el cuerpo el sistema respiratorio queda parado sin reacción, causando el deceso por asfixia.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Existen 4 formas básicas en las cuales un rayo puede causar daños en los seres humanos, y son:

- **Impacto directo.**- En este caso la corriente va desde la cabeza del individuo a los pies, actuando de alguna manera como un pararrayos. Este fenómeno causa un arco exterior al cuerpo pudiendo producir fibrilación.
- **Tensión de paso.**- “Se considera como la tensión a la cual quedaría sometida una persona al dar un paso, mientras se inyecta corriente en el área por donde se desplaza, pudiendo quedar sometida a grandes diferencias de potencial”<sup>8</sup>. Aunque no es muy común que este tipo de efecto cause una muerte en una persona ya que al ser la corriente elevada y no existir mayor resistencia en el medio no se produce un potencial peligroso.
- **Tensión de contacto.**- Este fenómeno se da si la persona está tocando de manera directa el objeto en donde cae el rayo, quedando sometido a una diferencia de potencial entre el punto de contacto y el suelo, por lo que es posible que una parte de la corriente se descargue por la persona.
- **Impacto lateral.**- Cuando una persona se encuentra junto al objeto en donde se da el impacto del rayo, pudiendo darse un arco entre la persona y el objeto debido a la alta corriente.

## 1.5 Nivel Isoceráunico

El nivel Isoceráunico se refiere básicamente al número promedio de días en un año en los que hay tormenta y se ve al menos un rayo o se escucha un trueno.

Cuando se tiene este fenómeno, el equipo que se está diseñando registrará el cambio en el campo eléctrico y por ende lo que se produce el rayo. Mediante esto podremos obtener la cantidad de rayos que caen en una determinada zona en un tiempo señalado, generalmente en el lapso de un año, este dato sirve para diseñar y tomar en cuenta protecciones que se necesiten para prevenir posibles desastres.

---

<sup>8</sup> Efectos de la Corriente en el Cuerpo Humano y su Conocimiento según pasan los años Parte 4 / : IEC/TR 479-1 Ed.3.0 del año 1994



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

En la actualidad se utiliza un cálculo poco exacto en donde se toma el nivel ceráunico, es decir la cantidad de tormentas que se dan al año en una zona establecida previamente, este valor se utiliza para calcular un aproximado de los rayos que se tendrían. Se utilizan diferentes fórmulas para calcular este valor, entre las utilizadas tenemos las de la IEEE y la del IEC, las fórmulas varían un poco en cuanto a las constantes, pero utilizan el mismo valor básico, estas son:

$$Ng = 0.04 * Td^{1.25} \text{ IEEE}$$

$$Ng = 0.1 * Td \text{ IEC}$$

En donde:

$Ng$ : Número total de rayos a tierra (descargas/km<sup>2</sup>-año)  
 $Td$ : Nivel Ceráunico (días de tormenta al año)

*“Aunque se tiene que para la región montañosa de Colombia un valor un poco diferente”<sup>9</sup>*

$$Ng = 0.0017 * Td^{1.56}$$

Este valor se podría utilizar para cálculos en la zona montañosa del Ecuador, debido a lo parecido del clima y las condiciones.

El fin del equipo que se está diseñando es brindar la posibilidad de que en un futuro, mediante pequeñas variaciones y aumentando equipos similares, se pueda medir el nivel isoceráunico de la ciudad de Cuenca o de cualquier otro sector que tenga esta necesidad o que se desee realizar a fin de tener mejores indicios sobre el comportamiento de este fenómeno en nuestro medio, y no depender de un cálculo que es poco confiable, esta claro también que estos niveles van a cambiar de un año a otro pero lo más lógico es que mantengan en un cierto margen de variación.

---

<sup>9</sup> Efectos de las descargas atmosféricos eléctricas/ Centro de investigación de Procesos- Laboratorio de Alta Tensión / Ing. María Carolina Blanco Dr. C – Ing. Carmen Luisa Vázquez Dr. C



## CAPITULO II

### Modelo de Corriente y Sensor Capacitivo

#### 2.1 Principios Físicos

Antes de comenzar con la descripción de la antena, se detalla brevemente un modelo matemático del campo eléctrico, desarrollado en el libro “Lightning: Physics and Effects”. Y un modelo matemático para la corriente de contradescarga presente en un rayo.

A continuación muestro el modelo del campo eléctrico producido por esta descarga, el mismo se considera que se propaga de forma transversal a la dirección de la corriente

Para determinar el campo eléctrico nos basamos en el siguiente gráfico.

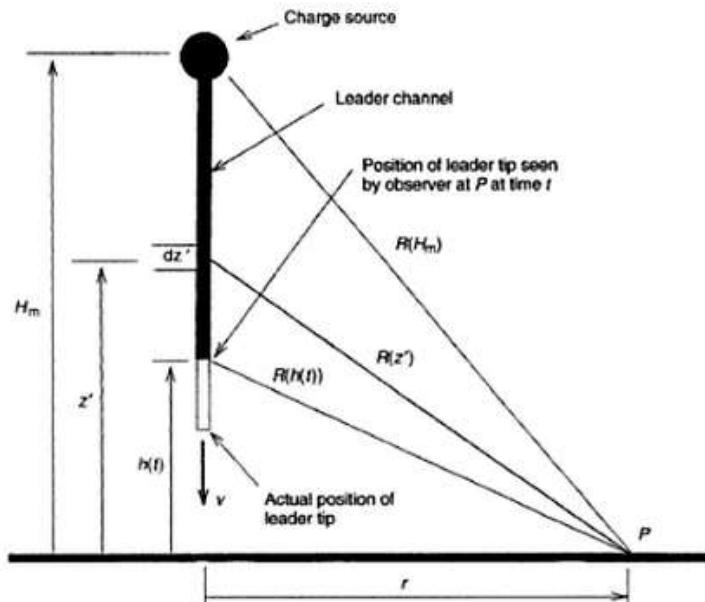


Figura 11 Modelo para obtener el Campo Eléctrico <sup>10</sup>

<sup>10</sup> Lightning: Physics and Effects/ Vladimir A. Rakov and Martin A/ 2003



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Asumiendo que la densidad de carga es constante y que está repartida de manera uniforme a lo largo del canal tendremos la ecuación:

$$E_{z(r,t)} = \frac{p_L}{2\pi\epsilon_0 r} \left[ \frac{1}{(1 + z_t^2/r^2)^{1/2}} - \frac{1}{(1 + H_m^2/r^2)^{1/2}} - \frac{(H_m - z_t)H_m}{r^2(1 + H_m^2/r^2)^{3/2}} \right]$$

La resolución de la ecuación se puede encontrar en el libro “*Lightning: Physics and Effects* página 129” citado anteriormente.

A continuación antes de desarrollar el modelo de la corriente presente en un rayo, procedemos a mostrar las ecuaciones del Telegrafista, las cuales se utilizan para el modelo, esto debido a que se considera como si fueran líneas de transmisión al canal por el cual se produce la caída del rayo.

$$-\frac{\delta v_{(z,t)}}{\delta z} = R'i_{(z,t)} + L' \frac{\delta i_{(z,t)}}{\delta t} \quad (3.1)$$

$$-\frac{\delta i_{(z,t)}}{\delta z} = G'v_{(z,t)} + C' \frac{\delta v_{(z,t)}}{\delta t} \quad (3.2)$$

A partir de estas ecuaciones y realizando ciertas consideraciones se obtienen algunos modelos para describir el fenómeno del rayo.

Para entender el comportamiento de la corriente se usa un modelo basado en una línea de transmisión, mediante el cual se pretende tener un mejor aproximado al comportamiento de la corriente de retorno del rayo, básicamente tendremos dos formas de aproximación, de las cuales describo de manera mas detallada la primera, pues presentan un decaimiento exponencial de la corriente, y es lo que se plantea en esta tesis:



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

**Modelos de propagación de corriente.**- “Este tipo de modelo se centra en la corriente de descarga que produce los campos electromagnéticos”<sup>11</sup>. Este modelo desprecia de cierta manera la corriente de retorno.

Se presenta 4 posibles modelos existentes, los cuales se enuncian a continuación:

- Modelo de Bruce y Golde (BG)
- Modelo de Uman y McLain (TL)
- Modelo de Rakov y Dulzon (MTLL)
- Modelo de Nucci et al

La forma básica de la ecuación generalizada para estos 4 modelos se tiene desarrollada en “Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application”.

Presentaremos a continuación la grafica en la cual se basa para desarrollar estos modelos:

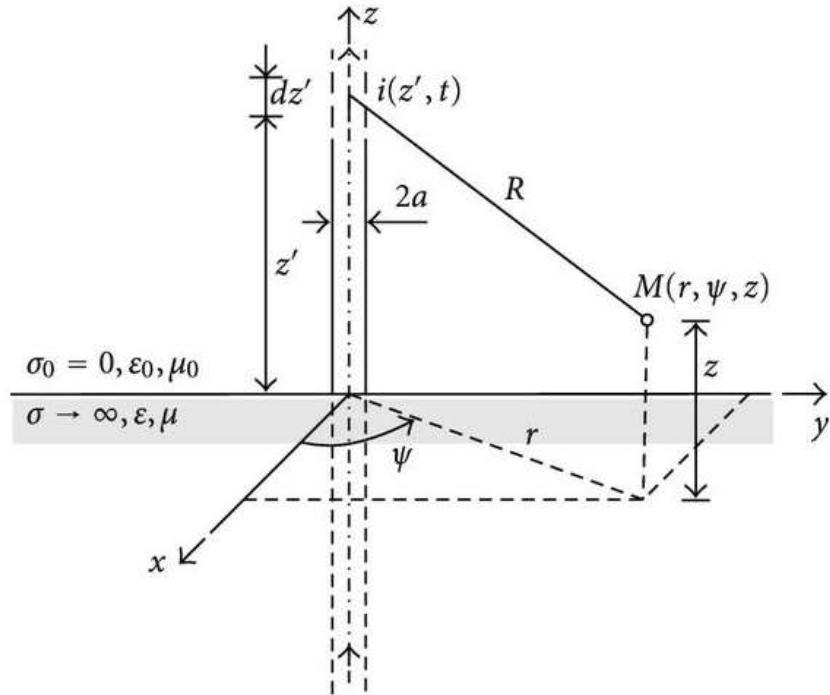


Figura 12 Modelo de Propagación de Corriente<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Análisis De Un Modelo De Descarga De Retorno, Con Neutralización De La Carga De Corona, Usando Geometrías Irregulares Del Canal/ Juan Diego Pulgarín Rivera/ Universidad Nacional de Colombia 2011/ pag. 8

<sup>12</sup> Modeling of Lightning Strokes Using Two-Peaked Channel-Base Currents/ V. Javor/ Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, Serbia / 6 de Junio 2012



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Como se menciono anteriormente, el modelo matemático general será:

$$i_{(z',t)} = \rho_{(z',t)} i_{(0,t-\frac{z'}{v})} u_{(\frac{z'}{v_f})}^{13}$$

En donde se tiene que

- $u$  función escalón unitario
- $\rho$  es el factor de atenuación de la corriente dependiente de la altura.
- $v_f$  es la velocidad de propagación hacia arriba del frente de la descarga de retorno.
- $v$  es la velocidad de propagación de la onda de corriente.
- $z'$  es la coordenada a una altura medida desde el suelo a la cual se desea conocer la corriente.

Tenemos además la siguiente tabla en donde se especifican los diferentes parámetros según el modelo que se utilice

Modelo	$\rho_{(z')}$	$v$
BG	1	$\infty$
TL	0	$v_f$
TCS	$\frac{z'}{c}$	$v_f$
MTLE	$e^{-z'/\lambda}$	$v_f$

Tabla 1 Modelos de Propagación de Corriente

Se tiene dos términos nuevos en donde  $h$  es la altura total a la que se produce la descarga y  $\lambda$  es la constante de decaimiento de la corriente que en el caso del modelo de “Nucci et al es igual a  $\lambda = 2000m$ ”<sup>14</sup>.

Para el modelo de BG (Bruce- Golden) se observa que la velocidad de propagación tiende al infinito, esto es debido a que en este modelo se plante que

<sup>13</sup> C. A. Nucci et al. / Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparision. Journal of Geophysical Research, pages 20395–20408/ 1990

<sup>14</sup> C. A. Nucci et al. / Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparision. Journal of Geophysical Research, pages 20395–20408/ 1990



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

la carga en cada altura desaparece de forma instantánea al producirse el frente de onda, con lo que presenta una discontinuidad, lo cual no es físicamente posible aunque si representa un modelo cercano. Se tiene el modelo en la siguiente ecuación:

$$i_{(0,t)} = \frac{2\pi_0 c^2 r}{v_t} \int_0^t E_{far}(r, \tau + \frac{r}{c}) d\tau \quad ^{15}$$

En donde:

- $c$  representa la velocidad de la luz
- $r$  es el radio en coordenadas cilíndricas
- $\tau$  representa el ángulo
- $v_t$  velocidad de propagación de la onda

El modelo TL (Transmission line) plantea la transferencia de carga solamente desde la parte inferior, considerándola como una línea sin perdidas, tiene el problema que cualquier carga presente en el canal no es considerada sino que se desprecia, presenta una formula parecida a la del modelo anterior, la cual se presenta a continuación:

$$i_{(0,t)} = \frac{2\pi_0 c^2 r}{v_t} E_{far}(r, t + \frac{r}{c}) \quad ^{16}$$

En donde:

- $c$  representa la velocidad de la luz
- $r$  es el radio en coordenadas cilíndricas
- $\tau$  representa el ángulo
- $v_t$  velocidad de propagación de la onda
- $t$  es el tiempo que transcurre

---

<sup>15</sup> C. A. Nucci et al. / Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparision. Journal of Geophysical Research, pages 20395–20408, 20,395-20,408/ 1990

<sup>16</sup> C. A. Nucci et al. / Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparision. Journal of Geophysical Research, pages 20395–20408, 20,395-20,408/ 1990



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

El modelo TCS (Traveling current source) presenta que la carga es afectada de forma directa por la corriente de retorno por el canal. La expresión matemática utilizada es la siguiente:

$$\begin{aligned} i_{(z',t)} &= i_{\left(0,t+\frac{z'}{c}\right)} & z' \leq vt & ^{17} \\ i_{(z',t)} &= 0 & z' > vt \end{aligned}$$

Finalmente el modelo MTLE (Modelo de línea de transmisión modificado) presenta un decaimiento exponencial de la corriente luego de que se da la contradescarga, la fórmula matemática es presentada a continuación

$$i_{(0,t)} = \left(\frac{I_1}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2 \frac{e^{(-t/\tau_2)}}{1+(t/\tau_1)^2} + I_2 \left[ e^{(-t/\tau_3)} - e^{(-t/\tau_4)} \right] \quad ^{18}$$

En donde:

- $\eta$  es una constante que se impone, generalmente 0,845
- $\tau_1 - \tau_2 - \tau_3 - \tau_4$  es el tiempo que se designa para el modelado
- $I_1 - I_2$  se determinan dos corrientes en un tiempo determinado
- $t$  es el tiempo

**Modelos de generación de corriente.** - “También llamados modelos de fuente de corriente viajera, asumen la descarga de retorno como la descarga de una línea de transmisión y la corriente se determina completamente por la carga almacenada en el canal del líder”<sup>19</sup>.

---

<sup>17</sup> C. A. Nucci et al. / Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparison. Journal of Geophysical Research, pages 20395–20408, 20,395-20,408/ 1990

<sup>18</sup> Análisis De Un Modelo De Descarga De Retorno, Con Neutralización De La Carga De Corona, Usando Geometrías Irregulares Del Canal/ Juan Diego Pulgarín Rivera/ Universidad Nacional de Colombia 2011/ pag. 9

<sup>19</sup> Vernon Cooray/ The Lightning Flash/ The Institution of Electrical Engineers 2003/ pag5



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## 2.2 Características y funcionamiento

Se dispone en el laboratorio de una antena capacitiva previamente diseñada como parte de una tesis en años anteriores, esta consta de dos discos concéntricos, separados entre si 5mm, el disco interior constituye la parte activa de la antena y tiene un diámetro de 30cm, el disco exterior está conectado a tierra y tiene un diámetro exterior de 59cm y un diámetro interior de 31cm, estos dos discos están separados 5mm entre si, a continuación se muestra una fotografía de la antena.

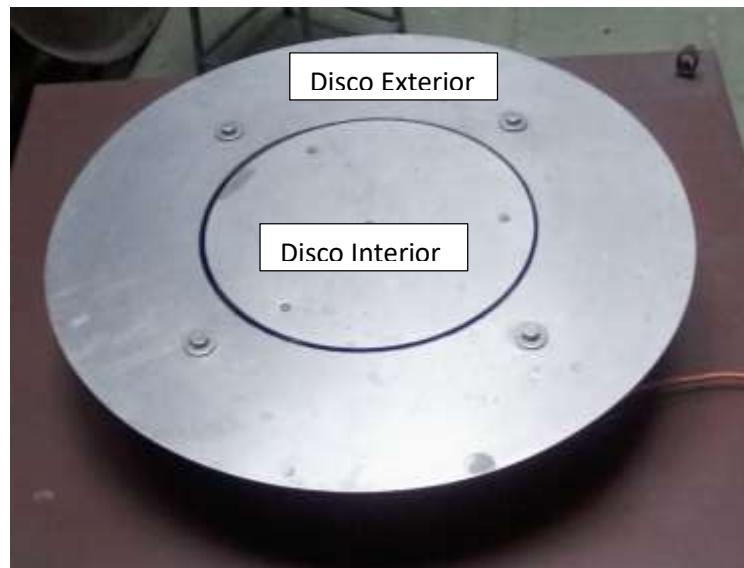


Figura 13 Antena Capacitiva

Por lo antes mencionado para obtener el modelo, se considera a la antena como un material mediante el cual se capta energía de una onda que incide en ella y suministra esta energía a una carga.

La capacidad de una antena de capturar la energía de una onda y convertirla en potencia, está relacionada directamente al área efectiva, para obtener el área efectiva se necesita de dos variables, las cuales son la densidad de potencia de la onda incidente  $S_i$  ( $\frac{W}{m^2}$ ) y la potencia interceptada  $P_{int}$  (W) la que se suministra a una carga.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Entonces la relación de estas dos cantidades nos dará el área efectiva de la antena.

$$A_e = \frac{P_{int}}{S_i} \quad (m^2) \quad (3.2)$$

Ahora si modelamos a la antena como un circuito equivalente de Thevenin obtendremos lo siguiente:

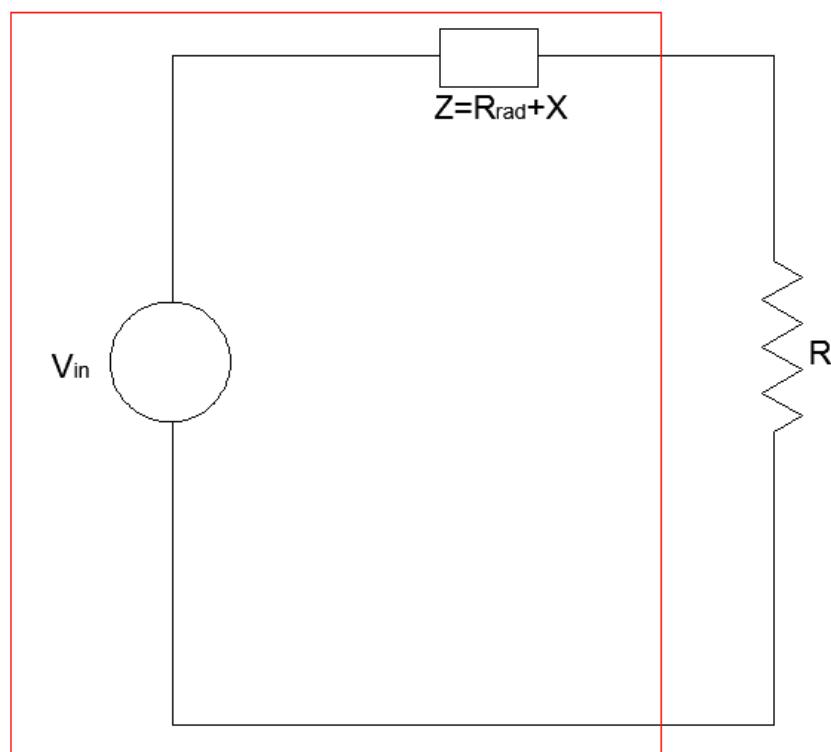


Figura 14 Modelo Antena Capacitiva

En este equivalente se tiene que:

- $V_{in}$  es el valor de voltaje de circuito abierto inducido en la antena.
- $R_{rad}$  es la resistencia de radiación de la antena.
- $X$  es el valor de la reactancia de la antena, será capacitiva, pues esta es más predominante y se desprecia el valor de la reactancia inductiva.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- $R$  es el valor de la carga que para este caso será puramente resistiva.

Se puede considerar que:

$$P_{int} = P_R = \frac{|\tilde{V}_{in}|^2}{8R_{rad}} \quad (3.3)$$

Además la densidad de potencia de una onda de campo eléctrico incidente a la antena será:<sup>20</sup>

$$S_i = \frac{|\tilde{E}_i|^2}{2\eta_0} = \frac{|\tilde{E}_i|^2}{240\pi} \quad (3.4)$$

Si remplazamos las ecuaciones 3.3 y 3.4 en 3.2 tendremos lo siguiente.

$$A_e = \frac{P_{int}}{S_i} = \frac{\frac{|\tilde{V}_{in}|^2}{8R_{rad}}}{\frac{|\tilde{E}_i|^2}{240\pi}} \quad (m^2) \quad (3.5)$$

Resolviendo tendremos:

$$A_e = \frac{30\pi|\tilde{V}_{in}|^2}{R_{rad}|\tilde{E}_i|^2} \quad (m^2) \quad (3.6)$$

Se conoce que  $R_{rad} = 80\pi^2(l/\lambda)^2$  este valor se toma para el dipolo corto<sup>21</sup>, en donde  $\lambda = c/f$  siendo  $c$  la velocidad de la luz y  $f$  la frecuencia del rayo,  $l$  se tomara como la distancia que se tiene del centro del sensor capacitivo a la periferia.

<sup>20</sup> Elementos de electromagnetismo/ Matthew N. O. Sadiku/ Tercera edición/ Oxford 2003/ pag. 621-622

<sup>21</sup> Elementos de electromagnetismo/ Matthew N. O. Sadiku/ Tercera edición/ Oxford 2003/ pag. 621-622



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Se procederá a determinar el campo eléctrico que capta la antena en función del voltaje obtenido, a partir de la ecuación 3.6, en donde se despejará el mismo, obteniendo:

$$E_i = \sqrt{\frac{30\pi |\tilde{V}_{in}|^2}{R_{rad} A_e}} \quad (V/m) \quad (3.7)$$

Para esto solamente será de interés la magnitud tanto del campo eléctrico como del voltaje, sin ser necesario, su ángulo.

## 2.3 Polaridad Campo eléctrico

Se conoce que básicamente un campo eléctrico en días de buen clima sin nubes tiene un campo eléctrico de centenas de V/m, pero como se dijo anteriormente en caso de que se tenga cumulo-nimbus este campo varía e induce un campo eléctrico negativo y que supera los 15KV/m, al detectar esta variación la antena tiene un comportamiento un poco diferente, pues esta detecta cargas eléctricas de polaridad inversa a la polaridad del campo.

Así pues en nuestro caso si existe un rayo nube – tierra se tendrá un campo eléctrico negativo y la antena captara una señal positiva, y en caso contrario tenemos que si existe un campo eléctrico positivo, la antena captara una señal negativa.

## 2.4 Relación Campo Eléctrico Corriente del Rayo

De la tesis de “Construcción de un medidor de campo eléctrico ambiental “La Antena Capacitiva””, tenemos una relación directa entre el campo eléctrico medido y la corriente captada del rayo por la antena capacitiva, la cual se enuncia a continuación:



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$I = \left( \frac{2\pi c \varepsilon_0}{v} \right) * E * D \quad (3.8)$$

En donde

- $\varepsilon_0$  permeabilidad del aire que es igual a  $8.85 \times 10^{-12}$
- $c$  velocidad de la onda electromagnética  $3 \times 10^8 \left( \frac{m}{s} \right)$
- $v$  velocidad de la contradescarga  $100 \times 10^6 \left( \frac{m}{s} \right)$
- $D$  distancia entre el lugar de medición y el de caída del rayo (m)
- $E$  Campo eléctrico medido  $\left( \frac{V}{m} \right)$
- $I$  corriente de contradescarga

Al sustituir los valores, y realizar las operaciones nos queda que

$$\frac{2\pi c \varepsilon_0}{v} = 0.05005 = k \quad (3.9)$$

Entonces la formula será:

$$I = k * E * D \quad (3.10)$$

Remplazando 3.7 en 3.10 tenemos lo siguiente.

$$I = k * D * \sqrt{\frac{30\pi |\widetilde{V}_{in}|^2}{R_{rad} A_e}} \quad (3.11)$$

Mediante esta fórmula se puede determinar la corriente eléctrica de la contradescarga, que se produce en el momento que se da el rayo.



## CAPITULO III

### Desarrollo del Circuito

#### 3.1.- Breve descripción del circuito a realizar

El circuito a desarrollar estará compuesto de 3 partes, la primera que consiste en la adquisición de datos, la misma que esta formada por un filtro anti-alising, y un circuito para adecuar la señal de la onda, de modo que luego pueda ser captada de manera correcta y sin perder ningún detalle, además de no tener problemas de lecturas erróneas causadas por lo que podría ser ruido, la segunda parte consiste en un sistema de almacenamiento de la información, la misma que posteriormente es enviada a la PC en donde se le realiza el tratamiento debido para obtener los valores finales de corriente, los mismos que se puedan almacenar e interpretar, con el fin de obtener resultados y de crear una base de datos con información de la zona. A más de esto se debe tomar en cuenta el circuito para la captura del sonido del rayo, el mismo que necesitará de un filtro y un micrófono.

La descripción de cada circuito se realizará a lo largo de este capítulo, tomando en cuenta también el hardware utilizado e indicando el porque se utilizó dichos elementos. También se muestra en el Anexo 1 el resultado de los elementos ante señales de prueba, utilizadas para comprobar su respuesta a altas frecuencias.

A continuación se muestra una figura que presenta de manera general el funcionamiento del circuito:

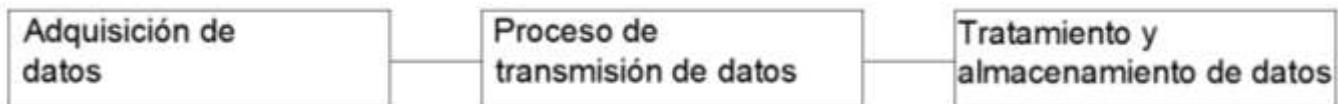


Figura 15 Diagrama de Funcionamiento del Circuito

Para comenzar explicaremos el Hardware utilizado, los elementos principales y más importantes, omitiendo los secundarios tales como resistores, capacitores y otras



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

cosas, también se dará una breve reseña sobre filtros, ya que esto resulta de vital importancia el momento de recibir y acondicionar la señal.

## 3.2 Hardware Utilizado

Los elementos más importantes utilizados para este circuito se enuncian y describen a continuación, sus características más sobresalientes y por qué se los utilizó.

### 3.2.1 INA 114

Se trata de un amplificador operacional de instrumentación, utilizado para obtener la señal procedente de la antena capacitiva, el mismo que presenta características como la posibilidad de una alta ganancia, una alta impedancia de entrada y salida lo cual no altera la señal, además de una velocidad de variación suficiente para seguir la parte más critica de la onda a estudiar.

A continuación detallo las características más importantes de este elemento

- Voltaje de Offset	50uV mínimo
- Voltaje de deriva	0.25uV/°C
- Corriente mínima de polarización	2nA
- Voltaje máximo de entrada	±40V
- Ganancia máxima	1000
- Frecuencia de trabajo	1Mhz
- Voltaje de salida	±2.25V a ±18V

Menciono también que la ganancia máxima que tiene este elemento dependerá de la frecuencia a la que se trabaja, para un mayor detalle del mismo se debe consultar el datasheet del elemento.

El esquema interno del ina114 se puede interpretar como tres amplificadores operacionales, colocados de la siguiente manera



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

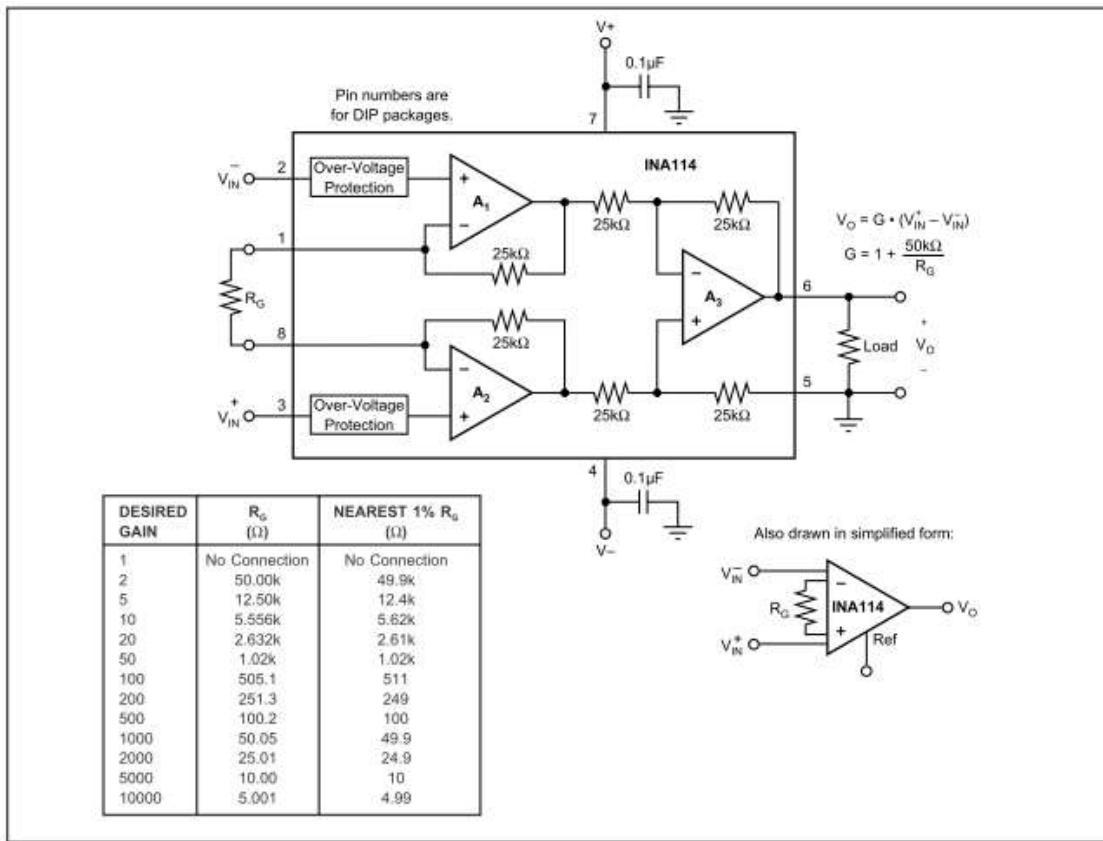


Figura 16 Esquema del Amplificador Operacional INA114<sup>22</sup>

Como se puede observar en la figura previa, se considera a este elemento como si tuviera resistencias internas, las mismas que le dan la configuración establecida. Otra importante observación en el elemento es la tabla para la ganancia y la formula para obtener la misma, se puede observar que la ganancia se da en función de la resistencia externa R<sub>G</sub> la misma que se considera según la necesidad de amplificación de la señal de entrada.

El INA114 tiene al igual que un amplificado normal una entrada inversora una entrada no inversora, una salida y los respectivos pines para alimentación, pero presenta 3 elementos mas, en los cuales se conecta la resistencia que determinara la ganancia R<sub>G</sub> y el otro en el que se coloca la referencia que se debe tomar para obtener una adecuada salida de la señal.

<sup>22</sup> BURN-BROWN /INA114 Precision Instrumentation Amplifier / Marzo de 1998 /Pág. 8



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

A continuación se muestra una imagen con el encapsulado PDIP, que se utilizó en el desarrollo del equipo.

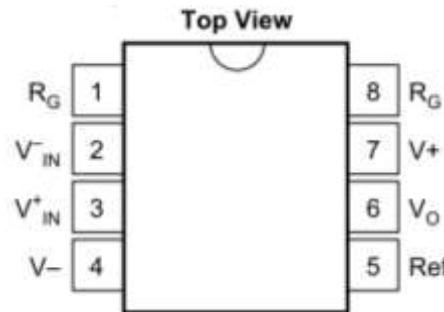


Figura 17 Encapsulado tipo PDIP del INA114<sup>23</sup>

## 3.2.2 TL082

Este elemento es un integrado que consta de 2 amplificadores operacionales los cuales se utilizarán en este circuito para realizar filtros activos, y para acondicionar la señal a ser muestreada, estos circuitos se explicarán más adelante.

Este elemento presenta entre sus características más sobresalientes y la razón por la cual se utilizaron las siguientes:

- Pérdida interna de tensión	15mV
- Corriente de polarización mínima	50nA
- Ruido de entrada de voltaje	16nV/Hz
- Ruido de entrada de corriente	0.01pA/Hz
- Ganancia de Ancho de banda	4MHz
- Velocidad de respuesta	13V/us
- Consumo de corriente	3.6mA
- Impedancia de entrada	$10^{12} \Omega$

Se debe mencionar que otra razón por la cual se lo utilizó es que es de fácil acceso en nuestro medio y amplificadores de mejores condiciones no existen, y se tenía la dificultad de traerlos del extranjero.

El esquema interno de este elemento es el siguiente:

<sup>23</sup> BURN-BROWN /INA114 Precision Instrumentation Amplifier / Marzo de 1998 /Pág. 3



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

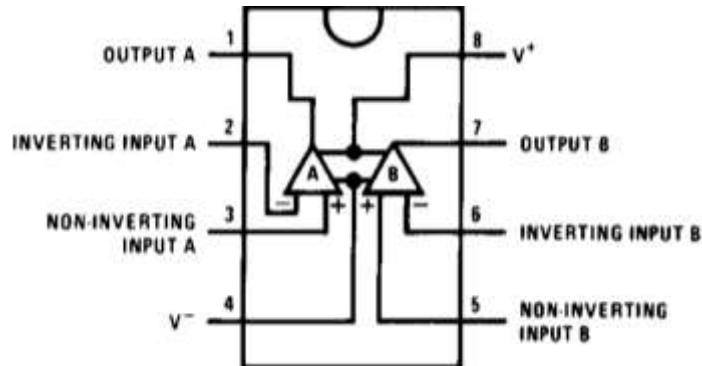


Figura 18 Esquema TI 082<sup>24</sup>

### 3.2.3 dsPIC30F4011

La principal razón de utilizar este elemento fue su conversor analógico digital (ADC), el mismo que tiene una resolución de 10 bits y puede llegar a tener una velocidad de muestreo de 1Msps, a mas de eso se lo puede conseguir en nuestro medio, facilitando el desarrollo del equipo y su posible sustitución en caso de tener algún problema, cosa que resulta muy común al momento de construir un circuito. Además presenta la posibilidad de construir más equipos del mismo tipo de una forma rápida. Otra característica que dispone este elemento es sus comunicaciones, como se muestra en la siguiente tabla, además de una memoria SRAM de 2048 Bytes lo cual es primordial en nuestro equipo, ya que la alta velocidad permite registrar el fenómeno y su memoria aunque un poco escasa nos resulta útil para almacenar todos los datos necesarios.

Se muestra los principales detalles de este elemento a continuación:

- |                             |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| - Tipo de Arquitectura      | Harvard modificada de 16 bits |
| - Velocidad CPU             | Máximo 30Mips                 |
| - Memoria de programa flash | 48 Kbytes                     |
| - Memoria RAM               | 2048 Bytes                    |

<sup>24</sup> National Semiconductor Corporation / TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier/ 1994 / Pág. 1



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Encapsulado PDIP 40 pines (encapsulado utilizado)
- Memoria EEPROM 1 Kbyte
- Voltaje de funcionamiento 2.5 - 5.5 V
- ADC 9 10bits
- Interface de Comunicación 2 UART
- 1 SPI
- 1 I2C
- 1 CAN
- Consumo en los pines 25mA en cada pin sea entrada o salida
- Ciclos de lectura/ escritura Flash 10k  
EEPROM 1 M

Se presenta una gráfica del dsPIC 30F4011:

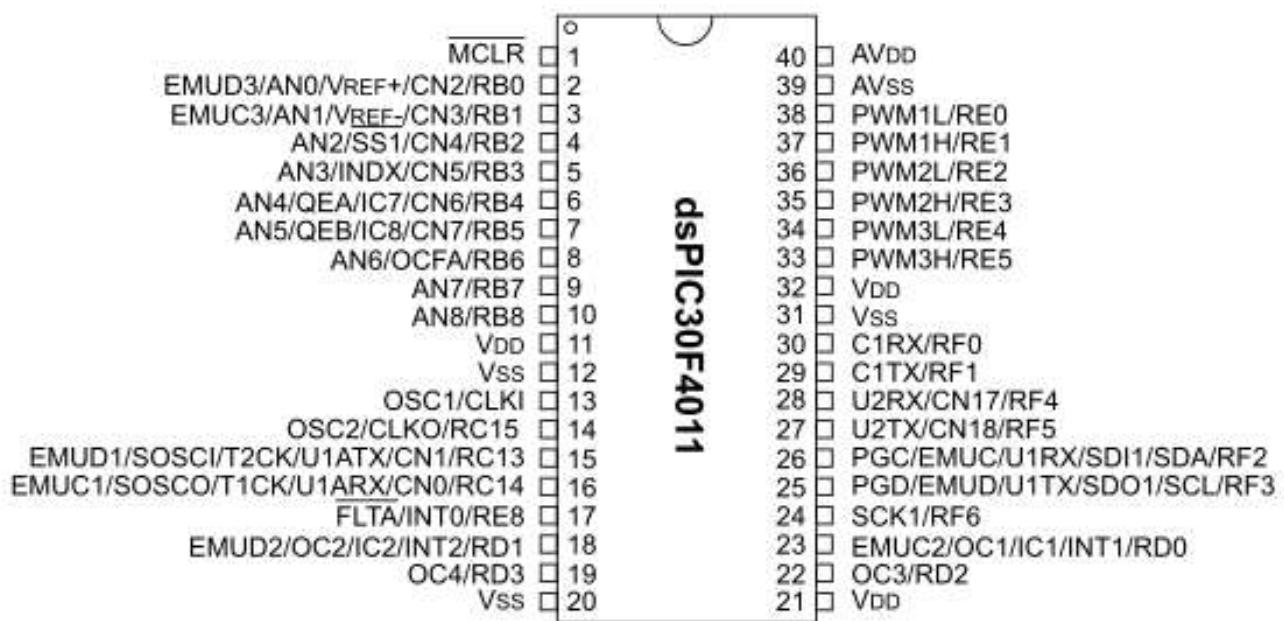


Figura 19 dsPic 30F4011 encapsulado PDIP<sup>25</sup>

Describo de manera mas especifica el conversor analógico digital, referido de aquí en adelante como ADC, pues este resulta la parte más llamativa del elemento y la razón principal por la que se lo escogió.

<sup>25</sup> Microchip Technology Inc. / dsPIC30F4011/4012 Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers / 2010 / Pág. 5



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

A continuación muestro una imagen que pondrá mas claro el funcionamiento del ADC.

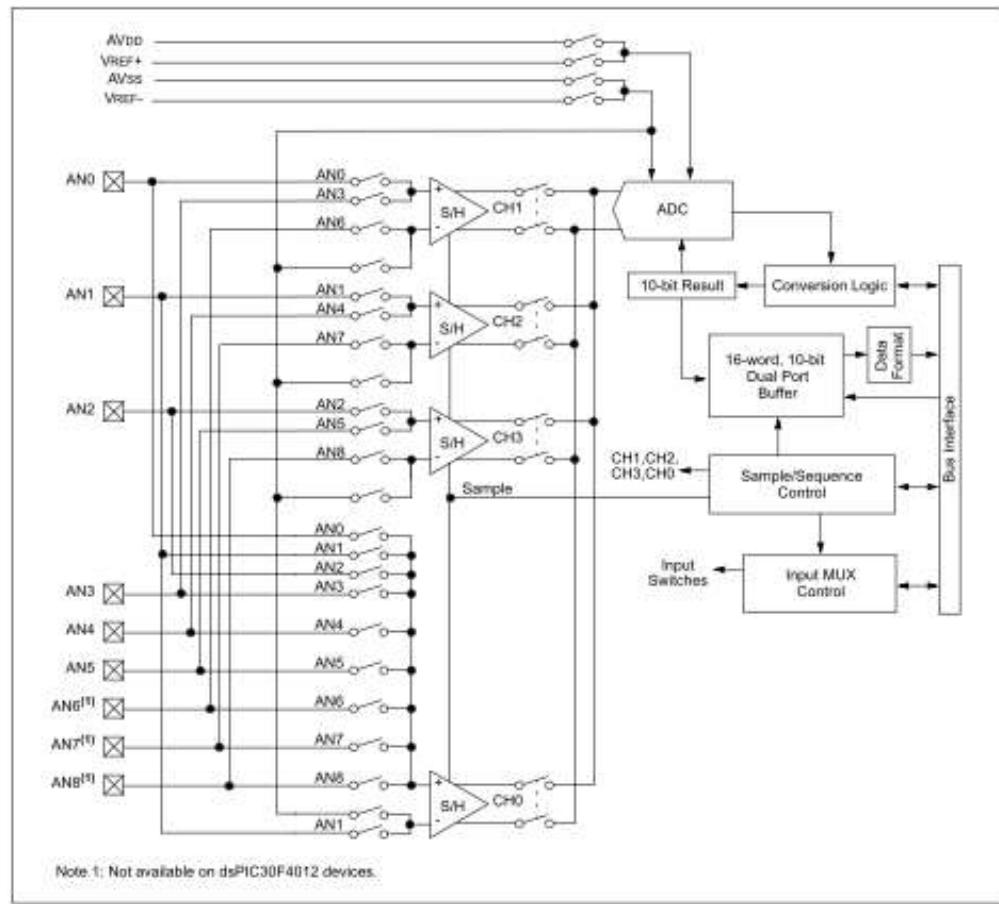


Figura 20 Diagrama de Bloques del ADC del DsPic30f4011<sup>26</sup>

Se puede observar que este elemento posee 9 canales de conversión analógica digital, pero se debe tomar en cuenta que para realizar el muestreo a máxima velocidad, se necesita tener habilitados 2 switch, esto se indica en el datasheet del elemento, además que solamente se utilizará un canal en ese caso, para adquirir datos a menores velocidades de muestreo se lo puede realizar de manera paralela, es decir todos los elementos del ADC muestrean una señal diferente, esto resultaría muy útil el momento en que se pretende realizar control de señales y mas.

El ADC cuenta con 6 registros de 16 bits cada uno, para su configuración, estos registros son:

<sup>26</sup> Microchip Technology Inc. / dsPIC30F4011/4012 Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers / 2010 / Pág. 140



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- ADCON1
- ADCON2
- ADCON3
- ADCHS
- ADPCFG
- ADCSSL

Los tres primeros se encargan de configurar la operación del modulo, mientras el cuarto se encarga de seleccionar el canal a utilizar, el quinto configura los pines del puerto mientras el ultimo registro determina los parámetros de escaneo de la señal. Además tenemos el buffer en donde se guardan los datos adquiridos ADCBUF, este buffer presenta 16 posiciones de 16 bits cada uno, y se divide en dos partes de 8 bits cada una para facilitar el almacenamiento de datos.

Además el momento de utilizar ciertas velocidades de muestreo se debe realizar una conexión adicional para utilizar referencias externas de voltaje, a continuación se muestra para qué velocidades se debe realizar este procedimiento, a más de otros parámetros que se debe saber.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

dsPIC30F 10-bit A/D Converter Conversion Rates						
A/D Speed	TAD Minimum	Sampling Time Min.	Rs Max.	Vdd	Temperature	A/D Channels Configuration
Up to 1 Msps <sup>(1)</sup>	83.33 ns	12 TAD	500 $\Omega$	4.5V to 5.5V	-40°C to +85°C	
Up to 750 ksps <sup>(1)</sup>	95.24 ns	2 TAD	500 $\Omega$	4.5V to 5.5V	-40°C to +85°C	
Up to 600 ksps <sup>(1)</sup>	138.89 ns	12 TAD	500 $\Omega$	3.0V to 5.5V	-40°C to +125°C	
Up to 500 ksps	153.85 ns	1 TAD	5.0 k $\Omega$	4.5V to 5.5V	-40°C to +125°C	
Up to 300 ksps	256.41 ns	1 TAD	5.0 k $\Omega$	3.0V to 5.5V	-40°C to +125°C	

Figura 21 Parámetros de Conversión del ADC<sup>27</sup>

En donde  $V_{ref-}$  y  $V_{ref+}$  presentan los valores de referencia y son los valores entre los cuales tomara los datos el elemento (estas referencias deben ser cero o voltajes positivos no pueden ser voltajes negativos).

Otra ventaja que presenta el Dspic 30F4011 al igual que otros elementos parecidos es la capacidad de multiplicar internamente la señal del oscilador externo. El oscilador solamente se puede multiplicar hasta 30Msps, pues ésta es la velocidad máxima de trabajo del DsPic30F4011.

A continuación se tiene una lista de los modos de utilizar el oscilador.

Modo de Oscilación	Descripción	Función Alterna del OSC2
EC	Entrada de reloj externa hasta 40MHz	FOSC/4
ECIO	Entrada de reloj externa hasta 40MHz	I/O
ECw/PLL4x	Entrada de reloj externa entre 4 a 10 MHz habilitado el 4x PLL	I/O

<sup>27</sup> Microchip Technology Inc. / dsPIC30F4011/4012 Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers / 2010 / Pág. 143



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

ECw/PLL8x	Entrada de reloj externa entre 4 a 10 MHz habilitado el 8x PLL	I/O
ECw/PLL16x	Entrada de reloj externa entre 4 a 10 MHz habilitado el 16x PLL	I/O
ERC	Oscilador externo RC	FOSC/4
ERCIO	Oscilador externo RC	I/O
XT	Cristal de 4-10MHz	Conexión del cristal entre OSC1 y OSC2
XTw/PLL4x	Cristal de 4-10MHz, habilitado el 4x PLL	Conexión del cristal entre OSC1 y OSC2
XTw/PLL8x	Cristal de 4-10MHz, habilitado el 8x PLL	Conexión del cristal entre OSC1 y OSC2
XTw/PLL16x	Cristal de 4-10MHz, habilitado el 16x PLL	Conexión del cristal entre OSC1 y OSC2
XTL	Cristal de 200KHz a 4MHz	Conexión del cristal entre OSC1 y OSC2
HS	Cristal de 10 a 40MHz	Conexión del cristal entre OSC1 y OSC2

**Tabla 2 Modos de Oscilación del DsPic30F4011**

A continuación expongo sobre la comunicación UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter), la cual se utilizará para enviar los datos a una PC, con el objetivo de tener una base de datos, o en el caso de alguna prueba en laboratorio, se lo puede utilizar para almacenar esta información.

El DsPic que utilizamos cuenta con dos puertos UART, cada puerto presenta las siguientes características:

- Full – Duplex, 8 o 9 bits para la comunicación
- Los 8 bits de datos pueden transminirse de forma: par, impar o sin paridad
- Presenta uno o dos bits de parada
- Función de generador para altas velocidades, con un preescalador de 16-bit
- Velocidad de transferencia que van desde 38 bps a 1,875 Mbp
- La transmisión de datos puede realizarse en buffer de 4 palabras
- La recepción de datos puede realizarse en buffer de 4 palabras
- Presenta buffer para detectar errores de paridad trama
- Puede realizar interrupción por separado de transmisión como de recepción



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

A más de las características previamente señaladas, se puede observar en la siguiente gráfica un esquema de transmisión de datos.

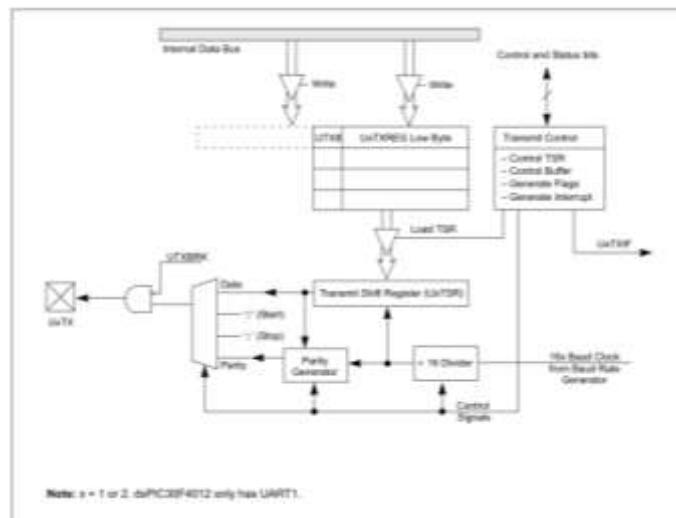


Figura 22 Esquema de transmisión de datos por el modulo UART<sup>28</sup>

Para mi circuito utilizaré el UART2 con el fin de realizar la comunicación con la PC.

#### 3.2.4 Max 232

Es un circuito integrado que sirve de interface para la transmisión de señales producidas, en este caso en un protocolo de comunicación UART se transmite a la PC.

Las características más sobresalientes de este elemento son:

- |                               |            |
|-------------------------------|------------|
| - Voltaje de Operación        | 5V         |
| - Velocidad de Operación      | 120kbits/s |
| - Corriente mínima            | 8mA        |
| - Dos canales de comunicación |            |

El diseño del elemento se muestra en la figura siguiente

<sup>28</sup> Microchip Technology Inc. / dsPIC30F4011/4012 Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers / 2010 / Pág. 121



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

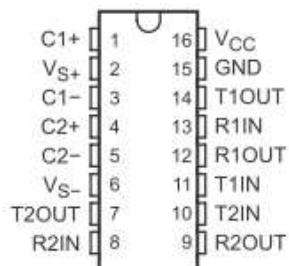


Figura 23 Max 232<sup>29</sup>

### 3.3 Filtros

Se puede definir un filtro como un elemento que se coloca entre las terminales de un circuito eléctrico para dejar pasar un determinado grupo de frecuencias mientras se elimina otras, los filtros se los puede clasificar según la frecuencia que pueden pasar, según el tipo de filtro.

Los parámetros más importantes de un filtro son los siguientes:

- Frecuencia de Corte ( $F_C$ ).- esta define el límite de la banda de paso, por lo común corresponde a 3db de atenuación, en los filtros pasa alto y pasa bajo, existe solamente una mientras en los pasabanda existen dos.
  - Frecuencia Central.- Es la frecuencia exacta a la cual es asignada el filtro, ésta se puede calcular de la siguiente forma:

$$F_0 = \sqrt{F_1 F_2}$$

- Frecuencia de corte Supresión de banda ( $F_s$ ).- Es la zona de transición entre la banda de paso y de rechazo, y especifica la atenuación mínima que se requiere.
  - Factor de selectividad.- Es la razón entre la frecuencia central y las frecuencias superior e inferior en un filtro pasabanda, se puede expresar como sigue:

<sup>29</sup> Texas Instrument / Max232/Max232I datasheet/ 2004/ Pag. 1



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$Q_0 \frac{F_c}{F_2 - F_1}$$

### 3.3.1 Clasificación de los Filtros

Los filtros se pueden clasificar básicamente en los siguientes grupos por:

- Función de Transferencia
- Orden
- Respuesta en Frecuencia
- Activos o Pasivos
- Analógicos, Digitales o Mecánicos
- Piezoeléctricos

#### Por su función de transferencia.-

Está determinada por la forma en que la señal aplicada cambia en amplitud y fase a través del filtro, los más habituales son<sup>30</sup>:

- **Filtro Butterworth.**- Es el más básico, presenta la respuesta más plana en la banda de paso y caída aguda en la frecuencia de corte a razón de  $20n$  [db/dec] en donde “n” es el orden del filtro.

$$|H_{jw}| = \frac{Kp_b}{\sqrt{1 + (w/w_c)^{2n}}}$$

En donde “K” es la ganancia “w”, la frecuencia de corte y “n” el orden del filtro

El filtro de orden 1 tiene la siguiente forma:

---

<sup>30</sup> Introducción Filtros/ Notas de Clase / Profesora Lucelly Reyes



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

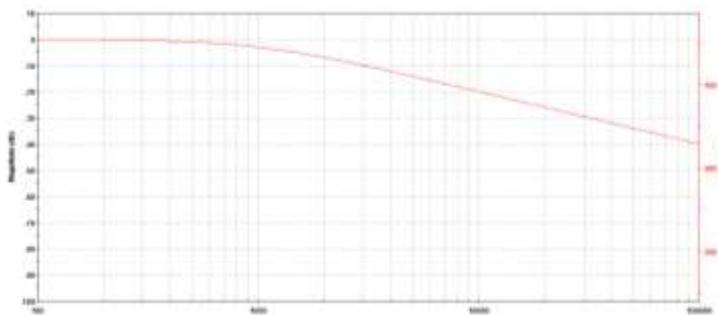


Figura 24 Filtro Butterworth de Primer Orden

De quinto orden tiene la forma:

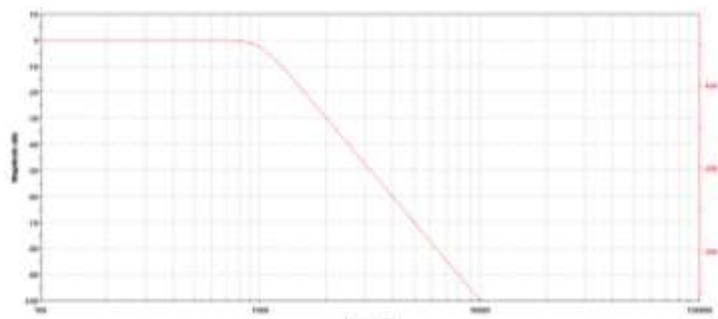


Figura 25 Filtro Butterworth de Quinto Orden

- **Filtro Bessel.**- Es un filtro que tiene únicamente 2 polos, está diseñado para tener una fase lineal en las bandas pasantes, por lo que no distorsiona las señales, por el contrario tiene una mayor zona de transición entre bandas pasantes y no pasantes. Su función de transferencia es:

$$H_{(s)} = \frac{1}{\sum_{k=0}^N a_k s^k}$$

En donde “N” es el orden del filtro, y el denominador está compuesto por un polinomio de Bessel<sup>31</sup>.

- **Filtro Chebyshev.**- Sus características se derivan de los polinomios de Chebyshev, poseen mejor respuesta en frecuencias bajas debido a que se tiene un rizado en alguna de sus bandas. Sus polos se encuentran sobre una elipse y sus ceros en el eje imaginario, su función de transferencia es:

<sup>31</sup> Introducción Filtros/ Notas de Clase / Profesora Lucelly Reyes



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$|H_{(jw)}| = \frac{Kp_b}{\sqrt{1 + E^2 C_n^2 (w/w_c)^2}}$$

En donde  $Kp_b$  es la ganancia del filtro cuando la frecuencia es cero,  $w_c$  es la frecuencia de corte, “E” es la constante que determina la amplitud del rizado,  $C_n$  polinomio de Chebyshev

Un filtro de segundo orden presenta la siguiente gráfica:

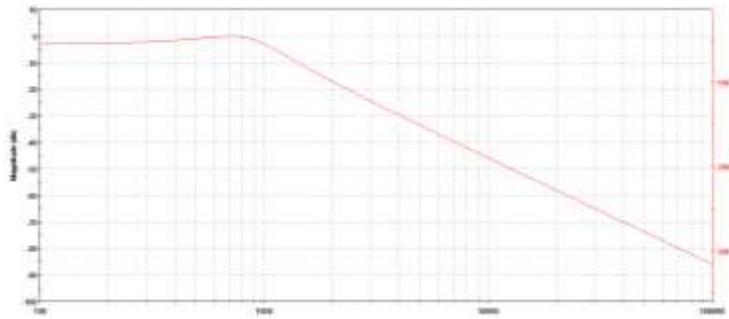


Figura 26 Filtro Chebyshev de Segundo Orden

Mientras que un filtro de octavo orden tiene la forma:

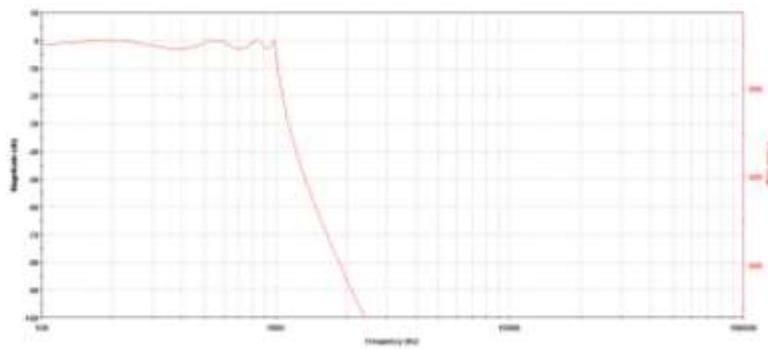


Figura 27 Filtro Chebyshev de Octavo Orden

**Por su Orden**



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

El número de polos y ceros determina el orden del filtro y según su orden se determinan las características del mismo, tales como su respuesta en frecuencia y su estabilidad.

Básicamente un filtro de primer orden tiene una atenuación de 20dB/dec mientras que uno de segundo orden presenta una atenuación del doble es decir de 40dB/dec y así sucesivamente. Mientras mayor es el orden del filtro su atenuación será más pronunciada.

## Respuesta en Frecuencia

Tenemos 4 tipos básicos según esta clasificación, los cuales son:

- **Filtro Pasa bajo.**- Este tipo de filtro deja pasar todas las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte establecida hasta la frecuencia cero, eliminando las que están sobre ella. Presenta ceros a alta frecuencia y polos a baja frecuencia.

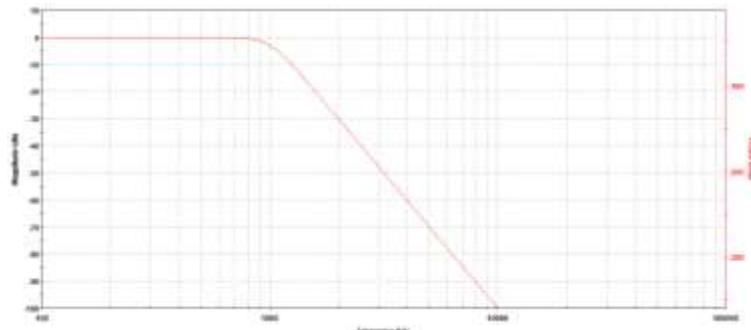


Figura 28 Filtro Pasa bajo

- **Filtros Pasa altos.**- Este tipo de filtro a diferencia del anterior solamente deja pasar las frecuencias sobre la frecuencia de corte establecida sin tener una frecuencia superior limitante. Presenta ceros a bajas frecuencias y polos a altas frecuencias



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

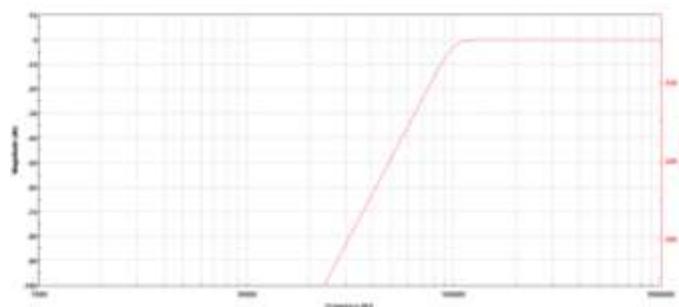


Figura 29 Filtro Pasa Alto

- **Filtros Pasa banda.**- En Este caso este filtro permite el paso solamente de un rango de frecuencias que se encuentran entre una frecuencia de corte superior y una inferior.

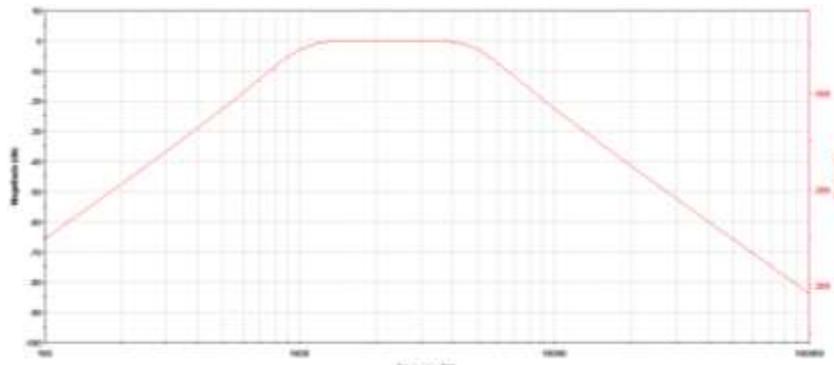


Figura 30 Filtro Pasa banda

- **Filtros Elimina banda.**- Funciona de forma diferente al anterior en este caso solamente se elimina las frecuencias comprendidas entre una frecuencia de corte inferior y otra superior, permitiendo el paso de todo el espectro de frecuencias fuera de este rango.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

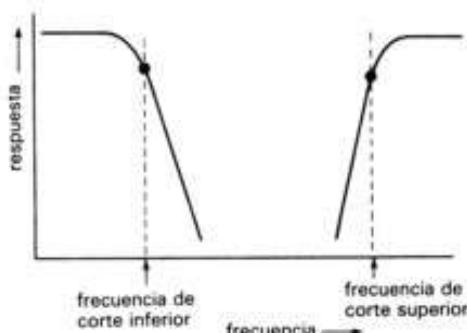


Figura 31 Filtro Elimina Banda<sup>32</sup>

## Filtros Activos o Pasivos

La principal diferencia entre estas dos clasificaciones se basa en los elementos que los componen, los cuales son:

- Filtros pasivos.- Están formados por resistencias, capacitores e inductores, es decir por elementos pasivos.
- Los filtros activos están formados por la combinación de elementos pasivos y activos, es común utilizar en estos amplificadores operacionales, por esta razón se puede incluso tener una ganancia en los mismos.

## Filtros Analógicos y Digitales

Los filtros analógicos son utilizados para intervenir sobre señales analógicas y son continuos en el tiempo, generalmente son realizados mediante filtros activos o pasivos.

Los filtros digitales son utilizados para el tratamiento de señales digitales, responden a una discretización del tiempo y se los realiza mediante programación.

## Filtros Piezoelectrinos

Este tipo de filtros aprovechan las propiedades resonantes de algunos materiales tales como el cuarzo<sup>33</sup>.

<sup>32</sup> [http://www.sapiensman.com/ESDictionary/B/Technical\\_vocabulary\\_Spanish\(B3-A\).php](http://www.sapiensman.com/ESDictionary/B/Technical_vocabulary_Spanish(B3-A).php) consultado el 15/01/2013



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## 3.4 Circuitos Utilizados

En este punto se describe los circuitos utilizados para la realización del equipo:

- Adecuación y filtrado de la señal
- Captura y envío de datos para su almacenamiento
- Filtro para el micrófono

A continuación, una descripción de cada uno de los circuitos:

### 3.4.1 Adecuación y filtrado de la señal

Primeramente el circuito de adecuación y filtrado de la señal consta de tres partes una que constituye obtener la señal, mediante el INA114, la segunda parte la conforma el filtro Anti-Aliasing y la tercera parte que constituye la adecuación de señal pues se tiene rayos positivos y negativos respectivamente, los cuales producen un voltaje de diferente signo en la antena, por esta razón se debe tener dos circuitos de almacenamiento de información y por lógica se debe preparar la señal según sea el caso. Para el diseño del filtro Anti-Aliasing se utilizó el programa “FilterLab”, en el Anexo 2 se muestra el proceso que se siguió para el diseño del mismo.

El circuito final que se obtuvo se muestra en la siguiente gráfica:

---

<sup>33</sup> Introducción Filtros/ Notas de Clase / Profesora Lucelly Reyes



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

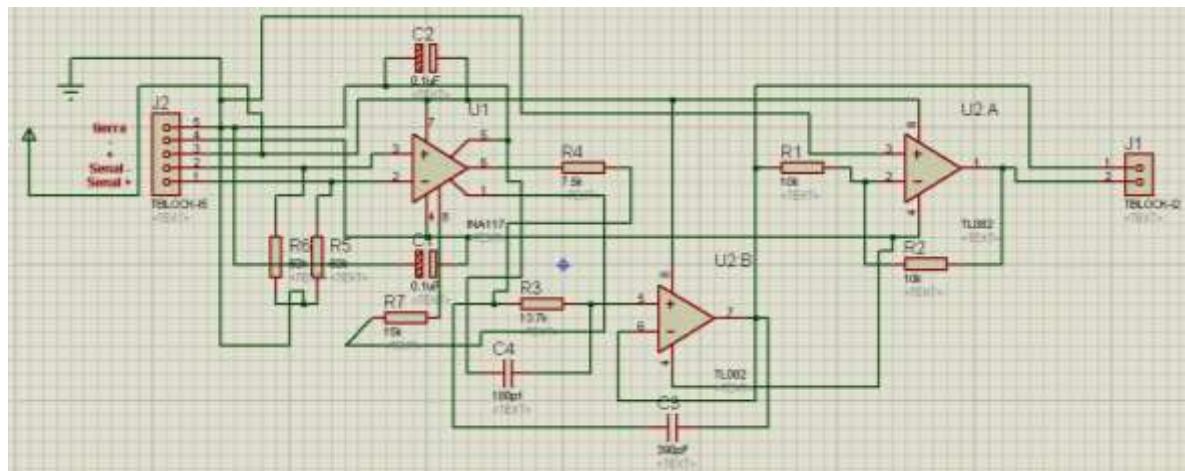


Figura 32 Circuito de Adquisición y filtrado de la señal

### 3.4.2 Captura y envío de datos

Luego de adecuar la señal entre 0 y 5V se procede a enviarla al DsPic30F4011, en el mismo que se procede a almacenar las muestras cada 1us, esto hasta llenar un vector de almacenamiento.

Se debe aclarar que se tiene dos circuitos para almacenar la señal, una para los rayos positivos y otro para los negativos, esto debido a que un DsPic solamente registra valores entre 0 y 5 voltios.

Luego de almacenar los datos en memoria se envían mediante una comunicación UART a la computadora.

A continuación muestro el esquema utilizado:



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

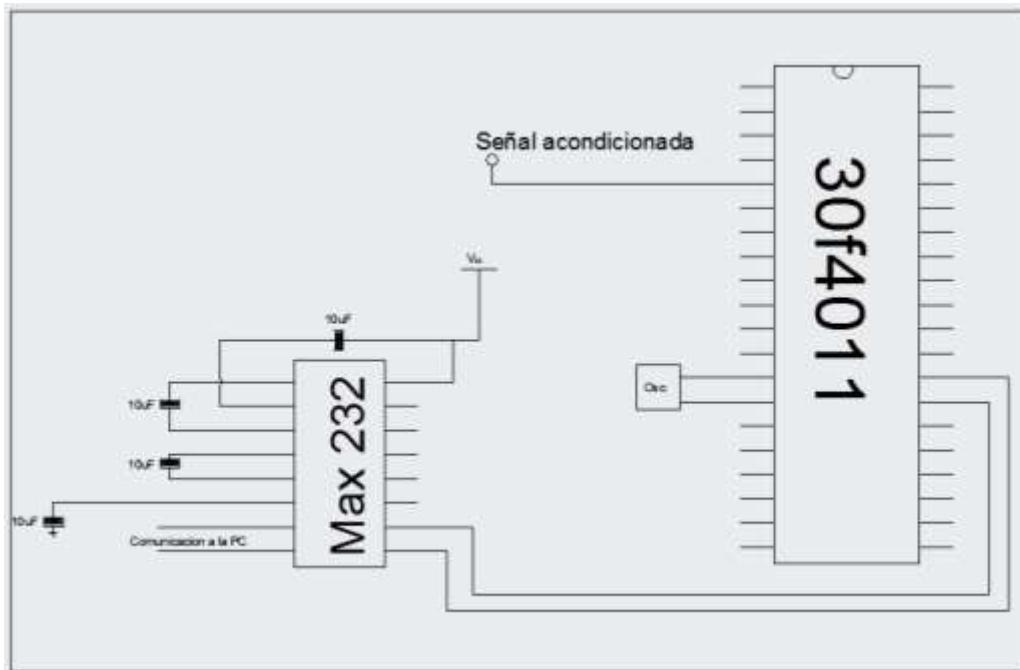


Figura 33 Esquema De Almacenamiento y envío de datos

En el esquema previo no se toma en cuenta las conexiones de alimentación del DsPic y del Max232, tampoco las conexiones para colocar las referencias del ADC y solamente se muestra un Dspic pues la conexión del segundo es idéntica.

### 3.4.3 Filtro para el micrófono

De igual manera que con el filtro Anti-Alising se utiliza el programa “FilterLab”, para diseñar un filtro pasa-bajo, la forma en que se utiliza el programa es básicamente la misma, la única diferencia radica en el tipo de filtro.

Se desea identificar la distancia hasta el punto en donde se produce el rayo. Con este fin se utiliza el sonido producido por el mismo, esto debido a que la onda electromagnética llegaría prácticamente en el mismo instante en el que cae, mientras que el sonido se tardará en llegar, y considerando las propiedades del aire y la velocidad del sonido se puede determinar la distancia, al conocer el tiempo que se demora en llegar la onda sonora.

Luego de realizar el filtro en el programa antes mencionado tenemos:



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

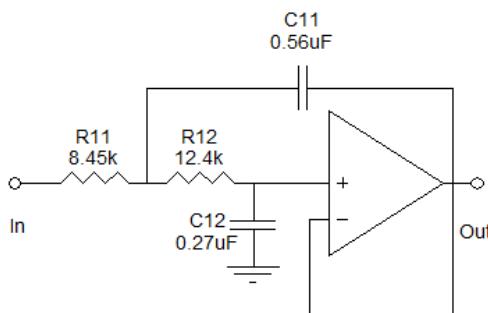


Figura 34 Esquema del Filtro pasa bajo

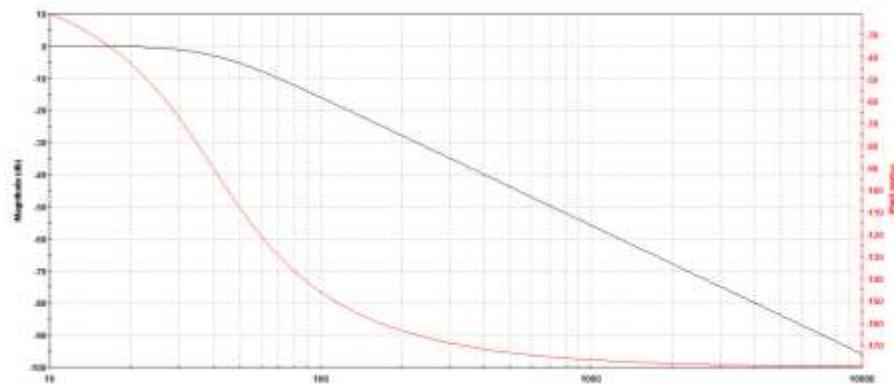


Figura 35 Características del Filtro

En el anexo 3 se muestra el ruteado de la placa y una imagen generada que muestra el resultado final del trabajo, para cada circuito descrito anteriormente.

## CAPITULO IV

### Pruebas en el Laboratorio de Tensión

Se realizarán las pruebas para calibrar y comprobar el correcto funcionamiento del equipo en el Laboratorio de Alta Tensión de La Universidad de Cuenca.

#### 4.1.- Laboratorio de Alta Tensión

##### 4.1.1. El Laboratorio de Alta Tensión



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

El Laboratorio de Alta Tensión está ubicado en el campus principal de la Universidad de Cuenca junto a la facultad de Ingeniería, en el mismo encontramos todos los equipos necesarios, es en este lugar que se llevará a cabo todas las pruebas y las calibraciones correspondientes.

## 4.1.2. Normas de Seguridad

Antes de comenzar con las pautas de seguridad se indicarán los principales riesgos existentes en el laboratorio:

- Peligro de electrocución al energizar los equipos.
- Peligro de recibir una descarga por elementos desconectados cargados y que todavía no han sido puestos a tierra (básicamente capacitores).
- Problemas Auditivos debido a los altos niveles de ruido existentes el momento de realizar las pruebas.

Las normas de seguridad básicamente se establecen para la protección de las personas y equipos, de esta manera impedir cualquier siniestro que pueda darse.

Dividiremos la seguridad en el laboratorio en dos partes, la primera que será los equipos físicos existentes en el mismo y sobre los cuales el individuo al realizar el trabajo no puede actuar de forma mayor, y la segunda las normas básicas de comportamiento de las personas en el laboratorio.

### Equipos de Protección:

Entre los equipos de protección tenemos:

**Cerramiento.-** Toda Instalación de alta Tensión debe estar blindado, mediante una malla metálica conectada a tierra, además se debe evitar la introducción de objetos conductores por esta (excepto cables de medida previamente blindados a tierra) y debe existir una distancia mínima de seguridad entre las piezas sometidas a altas tensiones y la malla<sup>34</sup>.

Tensión Alterna	50cm por cada 100kV
Tensión de Choque	20cm por cada 100kV

<sup>34</sup> Laboratorio de Alto Voltaje/ Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional/ pag. 9



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Separación Mínima      50cm

**Puertas de Acceso.-** Las puertas deben tener incorporado un elemento para cortar la energía del transformador principal el momento en que se accede, a más de eso debe tener un sistema visual para indicar el peligro existente al momento de energizar el equipo, en donde si está encendida la luz roja quiere decir que existe peligro pues el equipo está energizado, pero si esta encendida la luz verde es relativamente seguro el ingreso pues el equipo se encuentra desenergizado.



Figura 36 Sistema de aviso visual para la seguridad del operador

**Puesta a Tierra.-** Debe existir construida una buena malla de tierra en donde se conectará el cerramiento, equipos, y sobre todo una varilla de descarga, la cual es de suma importancia al momento de realizar las prácticas, puesto que mediante esta se descarga los elementos del circuito previniendo una descarga por tensiones residuales en los mismos.

## Normas de Seguridad de las personas

En esta sección, se enumera las condiciones generales que deben cumplir las personas con el fin de evitar un accidente.

- No ingresar al interior del cerramiento si los equipos están energizados.
- No correr en los laboratorios.
- En caso de existir más de una persona en el laboratorio la operación del equipo solo lo debe hacer un individuo previamente capacitado.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Antes de energizar el equipo se debe dar la alerta mediante la sirena que existe en el mismo.
- Al ingresar al lugar en donde se encuentra el equipo llevar siempre consigo la varilla de puesta a tierra, con la cual se descargará los equipos antes de realizar cualquier cambio en el circuito empleado.
- Utilizar equipo de protección auditiva, pues el ruido es alto y a más de ser molesto una continua exposición al mismo, puede causar daños permanentes o temporales.

### 4.1.3. Descripción de Equipos existentes

En el laboratorio encontramos varios equipos para realizar diferentes experimentos y pruebas, pero en este caso solamente describiremos el equipo utilizado para realizar las pruebas necesarias para probar el equipo diseñado.

**Transformador.**- Se utiliza dos transformadores secos, con aislamiento en resina fundida, los mismos que se encuentran conectados en cascada, se debe recalcar que este tipo de equipo tiene un devanado de excitación dentro de cada transformador.

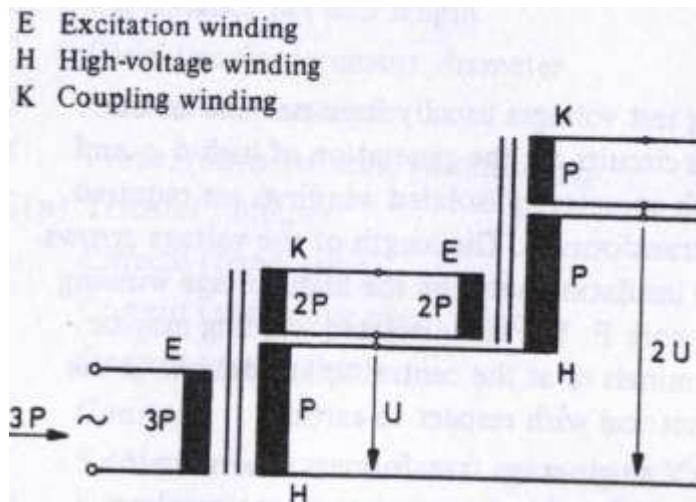


Figura 37 Esquema de conexión del transformador<sup>35</sup>

<sup>35</sup> An Introduction To High Voltage Experimental Technique/ Dieter Kind /Braunschweig:Vieweg, 1978/ pag 2



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

**Rectificador.**- Posee una resistencia de protección, la misma que a pesar de que causa una caída de tensión (pequeña) protege al rectificador.



Figura 38 Rectificador de media onda para altos voltajes

**Capacitores.**- Se tiene capacitores de diversos valores en el laboratorio propios para manejar los altos valores de tensión existentes.



Figura 39 Capacitor para altos voltajes

**Resistencias.**- Al igual que los capacitores, existen de diversos valores en el laboratorio.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA



Figura 40 Resistor para alto voltaje

Esferas espinterométricas.- Son dos esferas separadas una distancia entre sí, esta distancia se puede ajustar, con el fin de obtener una distancia de disparo adecuada para la onda que se desea obtener.



Figura 41 Esferas Espinterométricas

Elementos de unión.- Tales como aisladores, soportes de conexión, cabezas de conexión, fases, conexiones a tierra, conos que sirven para la implementación del circuito y mediante los cuales se unen los elementos descritos anteriormente.



Figura 42 Aislador y uniones



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## 4.2 Circuito

El circuito utilizado en este experimento necesita un rápido incremento de su frente de onda y un decaimiento mucho más lento, para este propósito se utiliza un circuito generador de voltajes de impulsos, aquí muestro el mismo:

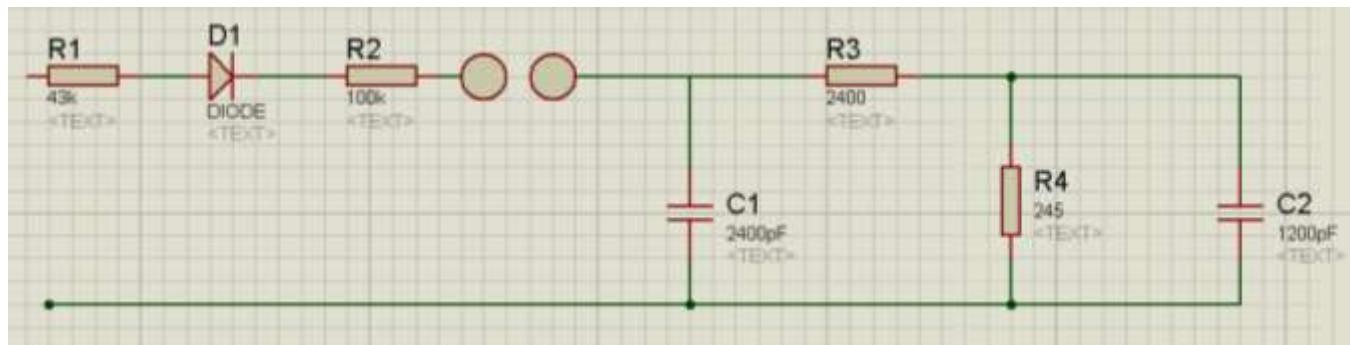


Figura 43 Circuito Generador de Voltajes de Impulso

Este circuito funciona de la siguiente manera:

El capacitor C1 es cargado lentamente desde una fuente de tensión continua (transformador y rectificador de onda) a través de una resistencia elevada, con el fin de tener una constante de tiempo de carga elevada. El valor de la tensión se eleva hasta el valor pico de disrupción de los explosores, una vez que esto ocurre la carga del capacitor C1 se transfiere al capacitor C2 en un tiempo muy corto (esto produce el frente de onda), el cual es definido por la Resistencia R3, la resistencia de los conductores y la producida por el arco en G. Una vez que el capacitor C2 ha adquirido su carga máxima empieza a descargarse (produciendo la cola de la onda), esta descarga está en función de la resistencia R4.

## 4.3 Señales Detectadas

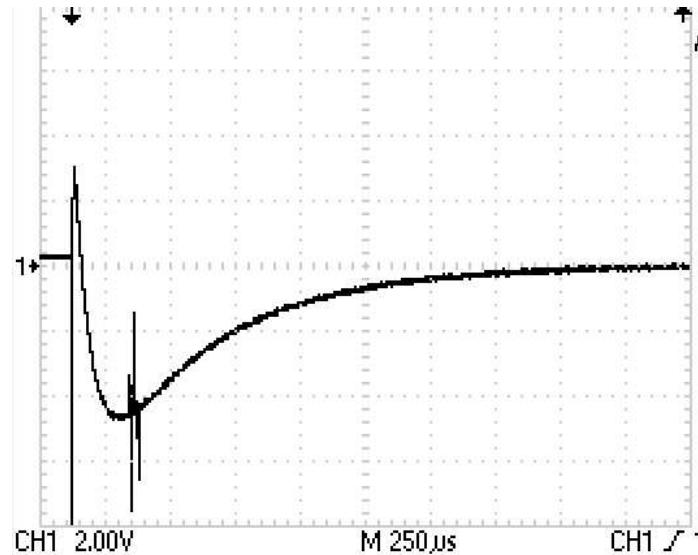
Las señales detectadas al momento de realizar las pruebas, se pueden separar en dos partes, la primera que indica el tipo de señal que detecta y acondiciona la primera parte del equipo, y la segunda, que consiste en la señal detectada por el DsPic y enviada al computador para su posterior almacenamiento.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Para las pruebas se utilizó la norma CEI Pub.60-1962. Según la misma la onda de choque debe tener características 1.2/50 us, se utilizó este tipo de onda debido a que con ésta se realiza las simulaciones de sobretensiones atmosféricas.

La señal detectada en la antena es la siguiente:

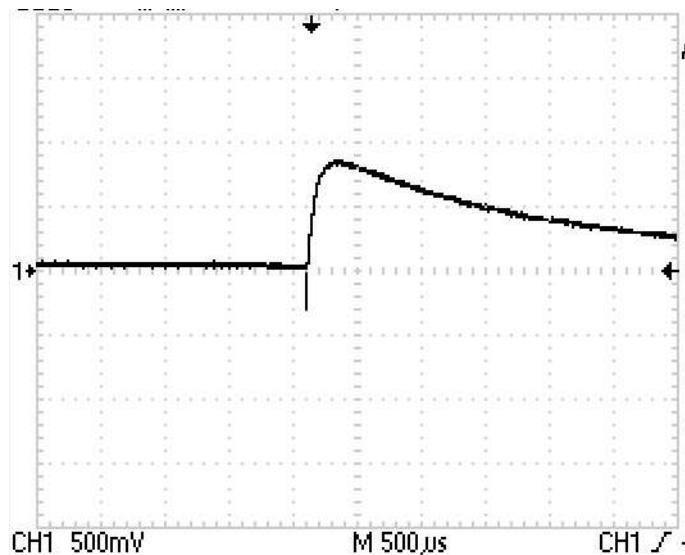


**Figura 44 Señal de salida de la antena**

La señal a la salida del circuito de filtrado y acondicionamiento de la señal muestro a continuación.



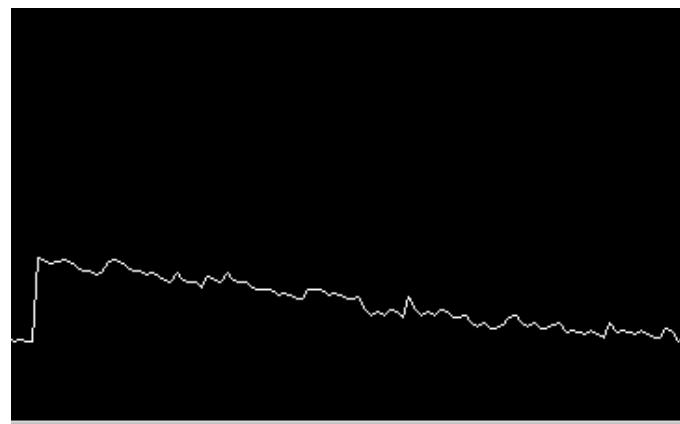
# UNIVERSIDAD DE CUENCA



**Figura 45 Señal detectada y acondicionada**

Como se puede observar se ha invertido y se tiene una señal en donde los picos y ruidos se han eliminado casi por completo permitiendo detectar solamente la onda de interés, aunque su amplitud máxima ha disminuido en valor, todavía se mantiene la forma de la misma, este problema se soluciona aumentando la ganancia en la captura de la señal en el amplificador de instrumentación.

Finalmente en el computar se muestra la siguiente gráfica el momento de transmitir la señal.



**Figura 46 Onda Capturada**



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

En la grafica anterior se puede observar el rápido crecimiento de la onda y su posterior decaimiento, además ésta presenta cierto ruido en la cola de la onda, esto se debe a los campos ambientales existentes y al ruido en si que provoca el ADC del DsPic.

## 4.4 Calibración y análisis de resultados del equipo

Luego de realizar pruebas en el laboratorio, se vió la necesidad de realizar algunos ajustes al equipo para la captura de la señal, el principal fue hacer que el amplificador de instrumentación presente una ganancia de alrededor de 4 sobre la señal, es decir la señal de entrada saldrá multiplicada por un valor de 4, con lo cual se aumenta la amplitud de dicha señal, y se puede leer con el ADC de una mejor forma, ya que caso contrario el mismo se confunde y presenta valores que no corresponden o incluso simplemente no la detecta debido al bajo voltaje que presenta la misma.

A la salida de la antena capacitiva se tiene una señal que presenta una amplitud máxima de 2 voltios, pero la misma se pierde el momento en que entra al amplificador.

Para ajustar la escala de los datos obtenidos se lo divide para 256, obteniendo un máximo de un volt en el computador, por lo cual se procedió a multiplicar por 20000, pues el valor pico de la onda de prueba es de 20kV, con lo cual se realiza el escalado respectivo.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## CAPITULO VI

### Conclusiones Y Recomendaciones

#### 6.1 Conclusiones

- Los efectos y problemas que pueden causar cuando la naturaleza se encuentra con la sociedad es algo que siempre nos ha afectado, en este caso no es la excepción, puesto que la caída de un rayo causa grandes problemas en nuestros días, pudiendo ir éstos desde la pérdida de equipos hasta la pérdida de la vida, estos problemas se vuelven más agudos puesto que con el crecimiento de las construcciones y el avance de las ciudades se altera la geografía de muchos sitios, en donde las construcciones se vuelven puntos de descarga.
- Se ha observado y leído que la mayoría de la teoría que se presenta sobre descargas atmosféricas se basaba en gran parte en empirismos, en las últimas décadas, se ha procedido a modelar el rayo de una forma matemática, dejando muy poco a la parte empírica.
- Luego de realizar el equipo y de verificar el funcionamiento de la antena, se puede observar, la sensibilidad de la misma y su capacidad para detectar las descargas atmosféricas, o para las simulaciones en el laboratorio, lo cual brinda una gran ayuda al momento de capturar la señal deseada, a más de que la misma no introduce distorsión.
- Las normas de seguridad en el laboratorio de alta tensión se puede aplicar a otras actividades, considerando siempre el colocar las líneas desconectadas a tierra y así evitar posibles problemas, además se debe colocar estos elementos a tierra ya que ambientalmente adquieren un campo eléctrico, así pues un conductor de cobre como un alambre desconectado, puede adquirir una carga eléctrica, claro que esto dependerá mucho del grosor y longitud del cable.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- El incluir el amplificador de instrumentación INA 114 ha brindado una gran ayuda al momento de capturar la señal, es aquí donde se pudo observar su utilidad y funcionamiento como elemento, además de ver como se destaca sobre los otros amplificadores comunes.

## 6.2 Recomendaciones

- La antena capacitiva resultó responder de manera muy buena, pero sería interesante la construcción de una antena inductiva, la misma que a mi parecer presentaría un modelado más exacto y fácil. Puesto que está se basaría en la captura del campo magnético, se necesitaría una construcción algo más laboriosa y de un mayor costo. Además fuese una interesante alternativa y presentaría la posibilidad de observar y comparar los datos obtenidos con los dos tipos de antena, claro, luego de su respectiva conversión.
- Además se debe tomar en cuenta la posibilidad de crear un sistema para la triangulación de los datos en un determinado sector, es decir con la instalación de tres antenas y la colocación de sistemas de detección de rayos y un sistema de comunicación se puede llegar a saber con cierta precisión el lugar en donde ha caído un rayo, esto también permitiría obtener una recopilación de datos más clara y determinar posibles anomalías, además de permitir el determinar con mayor precisión las zonas más propensas a recibir descargas, debido a su forma geográfica o a las construcciones ahí existentes y se puede tomar decisiones para una solución más eficiente.
- El momento de diseñar y construir el equipo se debe tomar muy en cuenta las protecciones para capturar la señal, además de los filtros en la fuente, ya que una fuente normal utilizada en una aplicación de alta frecuencia introduce ruidos que pueden crear un malestar en el equipo.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- El conseguir elementos de mejores respuestas, brindarían soluciones y capturas más precisas y simples, los mismos no se consiguieron debido a no existir en el medio, y a su alto costo individual, pero el tener éstos permitiría el diseño de un mejor equipo, sobre todo se debe enfocar en elementos de alta frecuencia, y en DsPic's de mayor memoria.
- El tener un cable blindado para transmitir la señal además de un amplificador de instrumentación que permita referenciar posteriormente la señal son de gran utilidad pues de esta forma se evita el ruido producido por el conectar a tierra, ya que en altas frecuencias ésto es considerable.
- El utilizar un sistema con almacenamiento en una MicroSD resultaría muy útil para convertir el equipo en autónomo de muchas formas, ya que su requerimiento de energía disminuiría mucho, su versatilidad sería mayor y su facilidad de transporte y ensamblaje mucho mas fácil, en este trabajo no se lo realizó de esa manera ya que no se contaba con las librerías correspondientes en el programa utilizado.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Bibliografía

### Bibliografía consultada

- Merchán H. – Mejía A. / Protección contra las descargas Atmosféricas/ Seminario IEEE 2002.
- TORMENTAS ELÉCTRICAS, RAYOS Y PARARRAYOS/ Geraldina T. Golup/ 2002.
- Apuntes de clase Alta Tensión.
- Apuntes de clase Puestas a Tierra.
- Construcción de un medidor de campo eléctrico ambiental: La antena capacitiva/López Bustamante- Manuel Malo Cevallos.
- Actualización del mapa isoceráunico de Guatemala y su influencia en el diseño de líneas de transmisión/Gilberto Rafael Tomas Laroj.
- Merchán H. - Mejía A./ Protección contra las descargas atmosféricas/ Seminario IEEE 2002
- Protección de redes de media tensión frente a las descargas atmosféricas/ Héctor L. Soidelzon/ Junio 2000
- Rayos y Relámpagos/ José Antonio Aparicio Florido/ Octubre, 2004
- Efectos de la Corriente en el Cuerpo Humano y su Conocimiento según pasan los años Parte 4 / : IEC/TR 479-1 Ed.3.0 del año 1994
- Efectos de las descargas atmosféricos eléctricas/ Centro de investigación de Procesos- Laboratorio de Alta Tensión / Ing. María Carolina Blanco Dr. C – Ing. Carmen Luisa Vázquez Dr. C.
- Lightning: Physics and Effects/ Vladimir A. Rakov and Martin A/ 2003
- Análisis De Un Modelo De Descarga De Retorno, Con Neutralización De La Carga De Corona, Usando Geometrías Irregulares Del Canal/ Juan Diego Pulgaír Rivera/ Universidad Nacional de Colombia 2011
- Modeling of Lightning Strokes Using Two-Peaked Channel-Base Currents/ V. Javor/ Faculty of Electronic Engineering, University of Nis, Serbia / 6 de Junio 2012
- C. A. Nucci et al. / Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparision. Journal of Geophysical Research/ 1990.
- Análisis De Un Modelo De Descarga De Retorno, Con Neutralización De La Carga De Corona, Usando Geometrías Irregulares Del Canal/ Juan Diego Pulgaír Rivera/ Universidad Nacional de Colombia 2011.
- Vernon Cooray/ The Lightning Flash/ The Institution of Electrical Engineers 2003.
- Elementos de electromagnetismo/ Matthew N. O. Sadiku/ Tercera edición/ Oxford 2003.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- URN-BROWN /INA114 Presicion Instrumentation Amplifier / Marzo de 1998
- National Semiconductor Corporation / TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier/ 1994.
- Microchip Technology Inc. / dsPIC30F4011/4012 Data Sheet High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers / 2010.
- Texas Instrument / Max232/Max232I datasheet/ 2004.
- Introducción Filtros/ Notas de Clase / Profesora Lucelly Reyes.
- Laboratorio de Alto Voltaje/ Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.
- An Introduction To High Voltage Experimental Technique/ Dieter Kind /Braunschweig:Vieweg, 1978

## Páginas web consultadas

- [http://www.sapiensman.com/ESDictionary/B/Technical\\_vocabulary\\_Spanish\(B3-A\).php](http://www.sapiensman.com/ESDictionary/B/Technical_vocabulary_Spanish(B3-A).php) consultado el 15/01/2013
- <http://www.izaping.com/3523/por-que-los-rayos-buscan-los-arboles.html> consultado el 5/11/2012
- <http://forums.ni.com/t5/Discusiones-sobre-Productos-NI/Adquirir-datos-mediante-puerto-serial-calcular-tiempo/td-p/1464232> /consultado el 05/01/2013
- <http://www.todopic.com.ar/foros/index.php?topic=32762.0;wap2> consultado el 23/12/2012



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

# **ANEXOS**



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## ANEXO 1 Respuesta de los circuitos utilizados a altas frecuencias

En este caso se tiene tres circuitos principales en donde se comprobó su respuesta a las altas, y en los cuales se utilizó una onda de prueba, la misma que se muestra en la siguiente imagen.

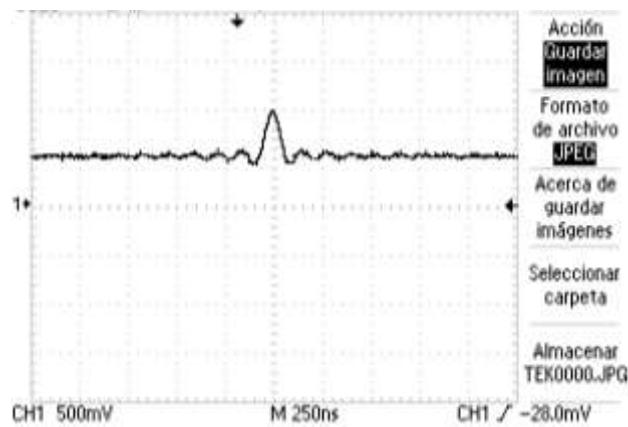


Figura 47 Señal de Prueba utilizada

La respuesta a esta señal, obtenida en cada elemento se presenta a continuación:

- Luego del amplificador de instrumentación INA114, al colocar en la entrada inversora y en la no inversora se obtuvo lo siguiente:

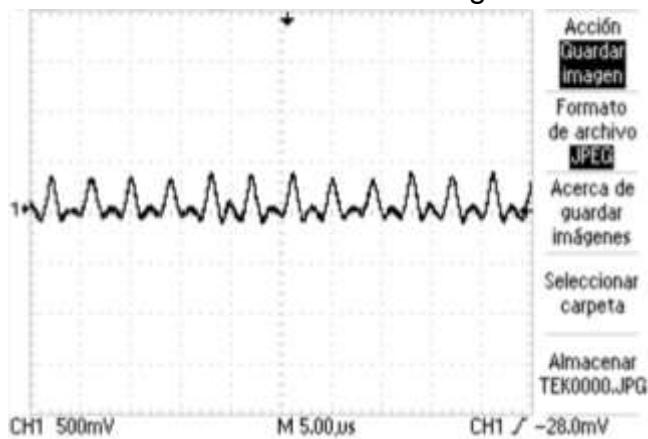


Figura 48 Respuesta de la señal en la entrada no inversora del INA114



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

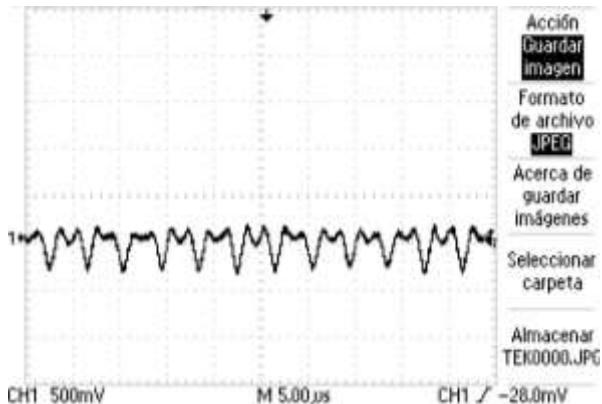


Figura 49 Respuesta de la señal en la entrada inversora del INA114

Como se puede observar la respuesta a alta frecuencia del elemento es muy buena, sin generar ruidos y teniendo de salida la misma onda de entrada.

- En el TI082 se obtuvo una señal similar a la presentada previamente, pero en este caso se realizó la prueba de manera separada, ya que debido al filtro anti-alising la señal era cortada, lo que también permitió comprobar la efectividad del filtro.
- En el programa encargado de detectar la señal en el computador, se obtuvo lo siguiente:

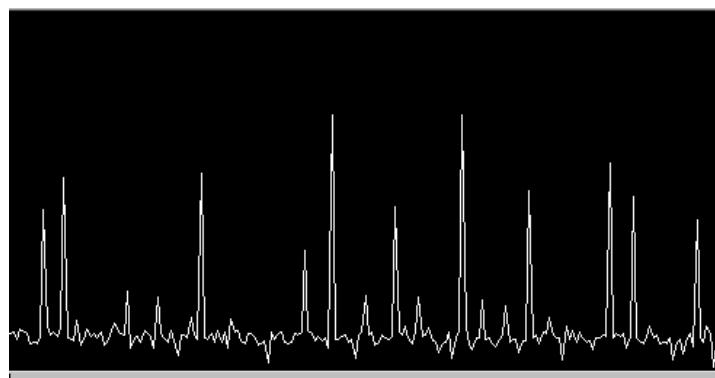


Figura 50 Datos recogidos por el Dspic y mostrados en el computador

Se debe aclarar que las pruebas de igual manera se realizaron por separado, por el problema con el filtro anti-alising.



## ANEXO 2 Diseño del filtro Anti-Aliasing utilizando el programa “FilterLab”

Antes de comenzar a utilizar el programa, necesitamos establecer algunos parámetros y calcular otros, a continuación se muestra los pasos a seguir:

- $n$  Numero de bits utilizados en la adquisición, para nuestro caso el ADC tiene una resolución de 10 bits
- Determinar la relación señal ruido (SNR), en nuestro caso será:

$$SNR = 6.02 * n + 1,76db = 61,78db$$

- Establecemos la frecuencia de muestreo, que para nuestro caso será de 1Mhz, con lo cual sacamos el valor de la banda de interés

$$F_s = 17 * B_{in}$$
$$B_{in} = \frac{F_s}{17} = 59KHz$$

- Determino el valor de la señal para encontrar la banda de atenuación, en este caso tengo

$$F_s/2 = 500KHz$$

- Establecemos un factor de seguridad

$$F_{seg} = 1.18 * B_{in} = 59KHz$$

- Ahora se inicia el programa, en el mismo nos vamos a la pestaña “filter”, luego escogemos la opción Anti-Aliasing Wizard, seguidamente en ella damos click, presentando la imagen en la misma que damos “siguiente”, y entonces se nos abre la siguiente ventana, en la cual ingresamos el factor de seguridad.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA



Figura 51 Manual FilterLab - Elección del factor de seguridad

- Al dar “siguiente” se nos abre otra ventana en donde colocamos la frecuencia de muestreo



Figura 52 Manual FilterLab - Elección de la Frecuencia de Muestreo

- Damos en el botón “siguiente” y a continuación colocamos la resolución del equipo que utilizaremos para muestrear la señal, para nuestro caso será 10 bits.



# UNIVERSIDAD DE CUENCA



Figura 53 Manual FilterLab - Elección de la resolución del ADC

- Damos en el botón “siguiente”, entonces colocamos la señal de ruido.



Figura 54 Manual FilterLab - Ruido Tolerable

- Al dar en el botón “siguiente” se nos presenta el cuadro a continuación en donde elegiremos el tipo de filtro que se desea.



Figura 55 Manual FilterLab - Diseño del Filtro



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

- En nuestro caso para finalizar, pasamos al filtro de quinto orden a uno de segundo orden, con esto aunque se pierde algunas características del mismo, se obtiene un circuito mas simple, como se muestra a continuación.

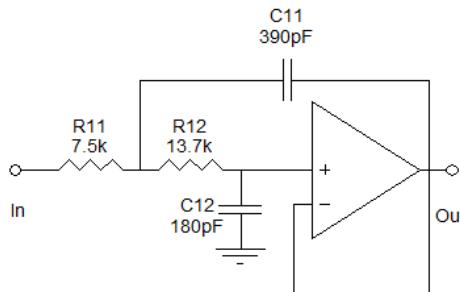


Figura 56 Manual FilterLab - Diagrama final a implementar

Es claro que no todos los valores de los elementos como resistores y condensadores se encontrarán, por lo que se debe colocar los valores más cercanos, con el fin de mantener el filtro lo más cerca del diseñado.

- La gráfica esquemática del filtro nos quedará

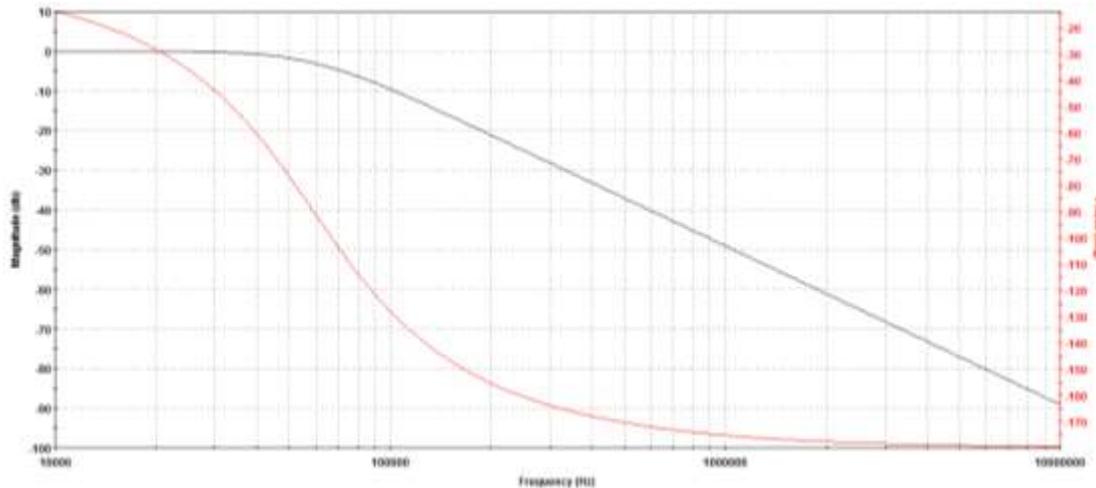


Figura 57 Manual FilterLab - Grafica de Características

Con lo cual se tiene diseñado el filtro Anti-Aliasing



## ANEXO 3 Ruteado de la placa y vista generada del terminado de la placa

Se presenta el ruteado y la vista final de la parte de acondicionamiento de la señal

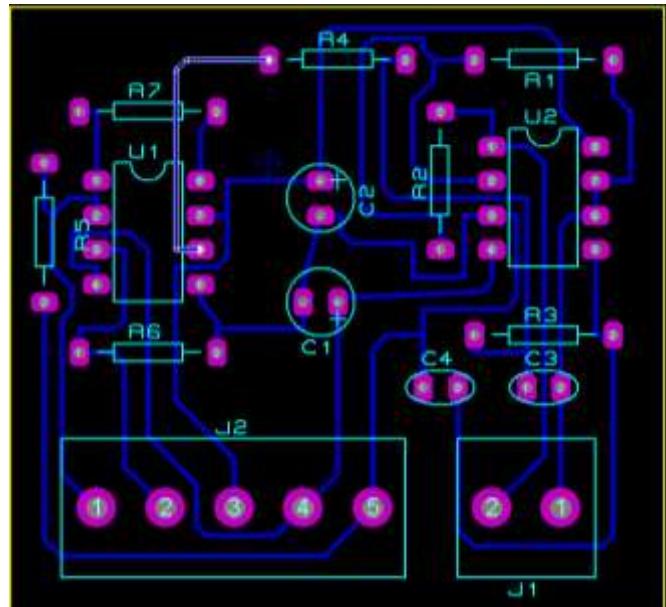
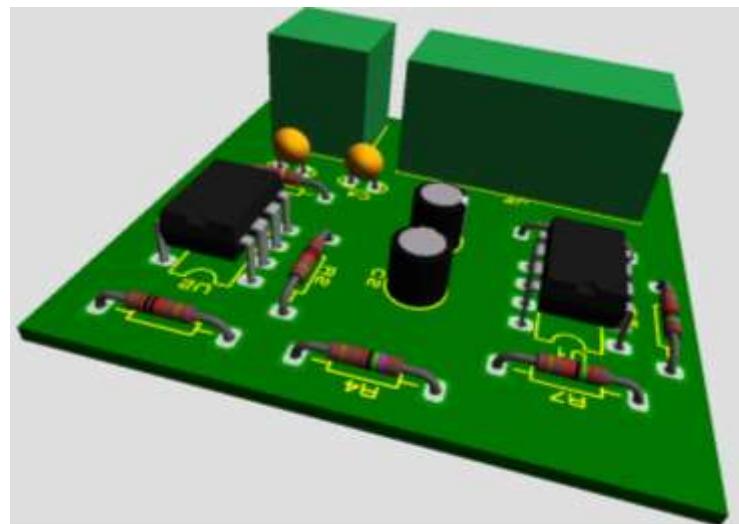


Figura 58 Ruteado del circuito de acondicionamiento de la señal



UNIVERSIDAD DE CUENCA



**Figura 59 Vista final del Circuito**

Se presenta el ruteado de la placa, para almacenar la señal y posteriormente transmitir al computador

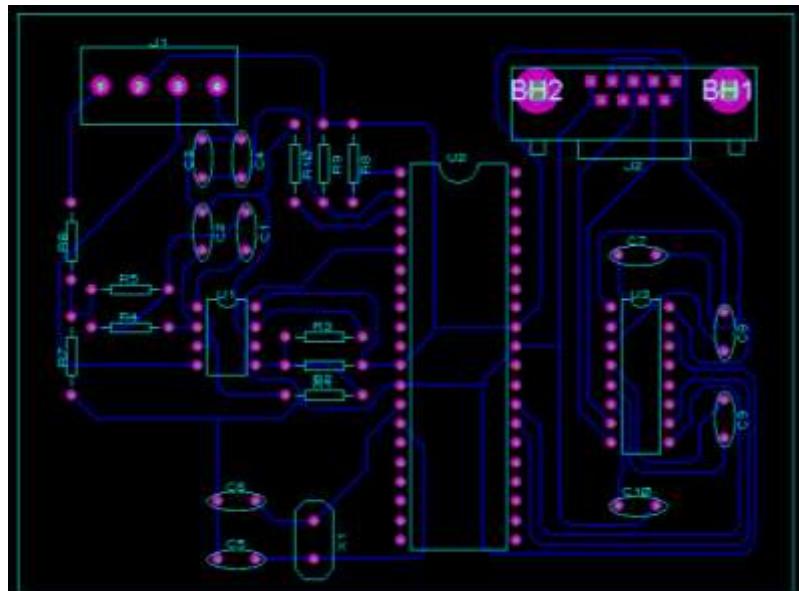


Figura 60 Ruteado del almacenamiento y circuito de transmisión de datos



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

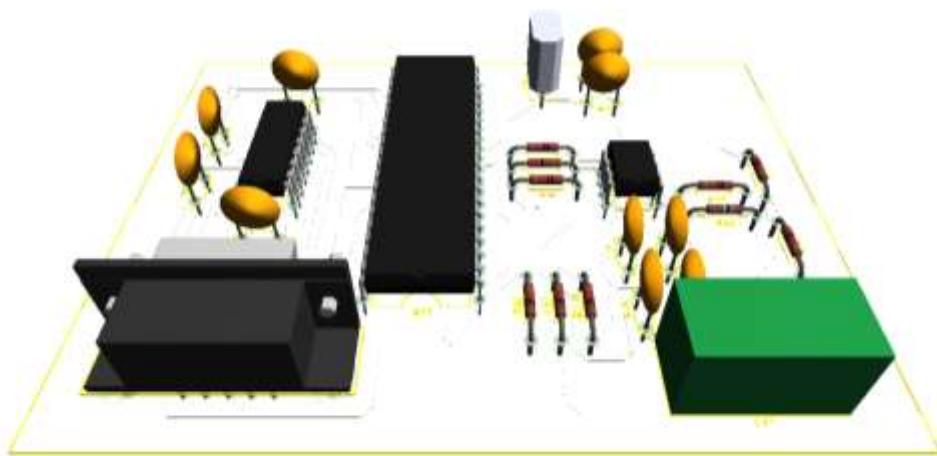


Figura 61 Vista final de la placa