

# Construcción de un sensor de detección de descargas eléctricas atmosféricas para ser integrado a la red World Wide Lightning Location Network - WWLLN

---

César Miguel Araya J

---

2019

Requisito parcial para obtener el título de:  
Ingeniero Electricista

Profesor Guía:

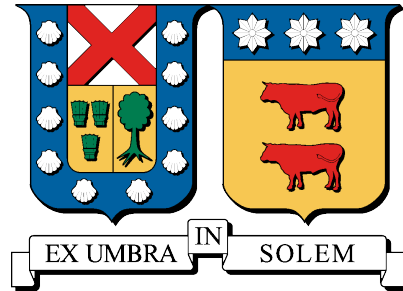
Dr. Johny Montaña Chaparro

Comisión:

Dr. Johny Montaña Chaparro

Dr. Pablo Lezana

Valparaíso, Mayo.



# Construcción de un sensor de detección de descargas eléctricas atmosféricas para ser integrado a la red World Wide Lightning Location Network - WWLLN

---

César Miguel Araya J

---

2019

*"Ser libre es... gastar la mayor cantidad de tiempo de nuestra vida en aquello que nos  
gusta hacer"*  
— José "Pepe" Mujica

# Agradecimientos

Sólo puedo pensar en agradecer a mi familia por el apoyo dado en un principio y a todos aquellos que en el camino se han sumado a alentar de alguna forma, y que han ayudado a que este camino este lleno de felicidad.

# Índice de Contenidos

Índice de Contenidos	II
Índice de Figuras	IV
Resumen	V
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación	1
1.2. Actividad Eléctrica Atmosférica (AEA)	2
1.2.1. Carga Eléctrica en nubes de tormenta	3
1.2.2. Proceso formación del rayo	5
1.2.3. Señales radiadas y aspectos generales de los rayos	7
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>9</b>
2.1. Evolución de la tecnología de observación de señales radiadas	9
2.1.1. Observación terrestre	9
2.1.2. Observación satelital	16
2.2. Sistemas de detección y localización de AEA	21
2.2.1. World Wide Lightning Location Network (WWLLN)	23
2.2.2. Técnica de detección de la WWLLN	24
2.2.2.a. Localización solo por tiempo	24
2.2.2.b. TOGA, teoría básica	25
<b>3. Sensor de detección</b>	<b>27</b>
3.1. Fundamento de funcionamiento	27
3.2. Antena VLF	28
3.3. Preamp	29
3.3.1. Amplificación con Amplificador Operacional AD744	30
3.3.2. Amplificación con circuito integrado SSM2142	32
3.3.3. Polarización y arreglo protección sobretensión	36
3.4. GPS	36
3.5. SU	37
<b>4. Construcción, instalación y prueba del sensor</b>	<b>42</b>
4.1. Armado antena VLF	42
4.2. Preamp	44
4.3. Service Unit	48
4.4. Prueba del Sensor	50

Índice de Contenidos	II
<b>5. Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>57</b>
<b>Apéndice</b>	<b>61</b>
<b>Esquemáticos de circuitos impresos</b>	<b>61</b>

# Índice de Figuras

1.1.	Rayo registrado en la bahía de la región de Valparaiso 24/03/2015 . . . . .	2
1.2.	Capas de la Atmósfera terrestre . . . . .	3
1.3.	Formación de nubes a distintas alturas . . . . .	4
1.4.	Esquema distribución de cargas dentro de una nube . . . . .	4
1.5.	Proceso que comprende una descarga negativa de nube a tierra . . . . .	5
1.6.	Parámetros de una corriente de retorno . . . . .	6
2.1.	Esquema funcionamiento antenas de <i>loop</i> abierto . . . . .	10
2.2.	Esquema detección punto impacto con sensores MDF . . . . .	11
2.3.	Señales radiadas producidas por descargas atmosféricas . . . . .	12
2.4.	Determinación Punto de impacto con dos sensores . . . . .	13
2.5.	Determinación punto de impacto con tres sensores . . . . .	14
2.6.	Localización Ambigua TOA . . . . .	14
2.7.	Hyperbolic Direction Finding TOA . . . . .	14
2.8.	Interferometría TOA . . . . .	15
2.9.	Optical Transient Detector con MicroLab1 . . . . .	16
2.10.	Optical Transient Detector (OTD) Captura del día 16/10/1996 . . . . .	17
2.11.	Lightning Imaging Sensor . . . . .	17
2.12.	Lightning Imaging Sensor, órbita descrita y área cubierta . . . . .	17
2.13.	Actividad eléctrica atmosférica desde 1998 al año 2013, registrado por la NASA/MSFC Lightning Imaging Sensor . . . . .	18
2.14.	Historia de GOES . . . . .	19
2.15.	“Flota GOES” . . . . .	19
2.16.	GOES-R . . . . .	20
2.17.	Sensor GLM . . . . .	20
2.18.	Frecuencias radiadas por una descarga eléctrica . . . . .	21
2.19.	Presencia de equipamientos Vaisala en el mundo al 2010 . . . . .	22
2.20.	Ilustración de diferencia en la localización de rayos al interior o exterior de la red . . . . .	23
3.1.	Esquema <i>return stroke</i> y orientación de campos . . . . .	28
3.2.	Esquema Antena VLF . . . . .	28
3.3.	Filtro Pasa Bajo utilizado en PREAMP . . . . .	29
3.4.	Diagrama de bode filtro pasa bajo . . . . .	29
3.5.	PREAMP . . . . .	30
3.6.	Amplificador Operacional AD744 . . . . .	30
3.7.	Diagrama Bode Amplificador Operacional AD744 . . . . .	32
3.8.	Circuito integrado SSM2142 . . . . .	33
3.9.	Amplificadores Operacionales internos de CI SSM2142 . . . . .	33

---

3.10.	Amplificador Operacional genérico para análisis de CI SSM2142 . . . . .	34
3.11.	Diagrama Bode Preamp . . . . .	35
3.12.	Diagrama Bode Preamp . . . . .	36
3.13.	Esquema de conexiones <i>Service Unit</i> . . . . .	37
3.14.	Ingreso señal VLF a SU . . . . .	37
3.15.	Esquema de circuito interno SU . . . . .	40
3.16.	Circuito impreso terminado. Ambos lados . . . . .	41
4.1.	Esquema Antena VLF . . . . .	42
4.2.	Anclaje mecánico utilizado para unir los conductores de distintos espesor	43
4.3.	Esquema distribución cables, vista superior . . . . .	44
4.4.	Presentación circuito impreso al interior cofre de aluminio . . . . .	45
4.5.	Preamp terminado . . . . .	45
4.6.	Enmallado de aluminio para protección mecánica . . . . .	46
4.7.	disposición final de Preamp . . . . .	47
4.8.	Tierra Preamp . . . . .	47
4.9.	Lugar de emplazamiento circuito Preamp con muestra porción de techumbre	48
4.10.	Lugar de emplazamiento circuito Preamp con muestra porción de techum- bre y localización antena GPS . . . . .	48
4.11.	Lugar de emplazamiento circuito SU con muestra . . . . .	49
4.12.	Circuito impreso terminado. Ambos lados . . . . .	50
4.13.	Esquema de ensayo sensor . . . . .	51
4.14.	Oscilografía 1 de ensayo . . . . .	51
4.15.	Oscilografía 3 de ensayo . . . . .	51
4.16.	Oscilografía 2 de ensayo . . . . .	51
4.17.	Oscilografía 4 de ensayo . . . . .	51
4.18.	Ejemplo de registro señal por parte de la WWLLN . . . . .	52
4.19.	Región de Tarapacá, 05 de Abril 2019 . . . . .	53
4.20.	Región de Valparaíso, 16 de Junio 2019 . . . . .	53
1.	Diseño PCB circuito . . . . .	61
2.	Circuito Impreso a escala 1:1 . . . . .	62
3.	Diseño PCB circuito SU . . . . .	63
4.	Circuito Impreso SU a escala 1:1 . . . . .	64

# Resumen

A pesar del rápido avance que ha tenido la electrónica en las últimas décadas, el desarrollo e investigación de sensores y redes de detección de descargas atmosféricas se ha visto mermado y limitado a intereses meramente económicos, como lo son la detección de descargas eléctricas atmosféricas para la navegación y aviación. Una vez resuelto este problema, no había habido un interés comercial que guiara a profundizar el conocimiento de este fenómeno, por lo que la liberación y propagación de la información ha sido acotado. Además, las redes de detección existentes hoy en día, están limitadas a territorios geográficos específicos y la información de ellos es procesada de forma independiente entre una red y otra.

La World Wide Lightning Location Network (WWLLN) es una red internacional, liderada por el profesor Robert Holzworth, la cual busca generar una red internacional de detección de descargas atmosféricas, a través de lazos de cooperación académicos con universidades del mundo. La expansión de la red está definida y guiada desde la WWLLN, viéndose limitada su agenda de expansión al presupuesto de investigación anual, resultando una expansión restringida a añadir sensores en donde la densidad de éstos sea momentáneamente más baja.

Una de las grandes ventajas que se encuentran en este sistema es que la cobertura de la red está enfocada en todo el mundo, y la información proporcionada podría resultar clave en un futuro próximo en donde se sabe que se está viviendo un cambio climático y en donde Chile es uno de los países más afectados. Además dada la característica de alta propagación de las señales VLF, se hace posible el registro e investigación de descargas que ocurren en el océano, lugar donde no es posible instalar sensores de ninguna característica. Con el sensor instalado en Valparaíso, se tiene un radio de detección de 5000 kilómetros, con el cual es posible detectar descargas hasta Isla de Pascua.

La expansión de la red y el aumento de su confiabilidad a lo largo del mundo, ayudará a que los países pobres que no cuenten con una red propia de detección, puedan tomar los datos de esta red como referencia para su propio país. Por otra parte los países que cuentan con redes propias y/o en aquellos en donde se esté realizando cooperaciones con los países vecinos para expandir su red de información, se podrá utilizar los datos de la WWLLN para contrastar su información y aumentar así la confiabilidad de sus datos.

En la presente memoria se hace pública la información para la construcción de un sensor VLF, para la cooperación con la red WWLLN, con este aporte, la mejora en la eficiencia de detección y cobertura de la red WWLLN queda también en manos de todo aquel que investigue las descargas eléctricas atmosféricas, descongestionando en parte la WWLLN y fortificando lazos de cooperación desde latinoamérica hacia el mundo. Además todos los sistemas de detección ya existentes en los países, podrían abrirse a la colaboración con la WWLLN y de esta forma, tener datos de un segundo sistema, para contrarrestar las propias mediciones y aumentar así su confiabilidad.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Se sabe que el planeta tierra posee un campo magnético y a pesar del precario conocimiento que se tenía sobre él, basados en su uso, fue posible que se desarrollaran instrumentos enfocados en mejorar la exploración por tierra y mar. Además se conoce que las masas de aire al calentarse se expanden, disminuyendo su densidad y desplazándose a una mayor altura, produciendo que masas de aire frío se ubiquen en el espacio liberado, esta es la explicación de las corrientes de aire, conocimiento del cual ha derivado el desarrollo de tecnologías que permitan aprovechar este suceso y así facilitar y/o mejorar la vida del hombre (como lo han sido los molinos de vientos utilizados para moler grano, bombear agua, generar energía eléctrica, entre otras). El ciclo del agua es un proceso natural y su comprensión, nos entrega información sobre los ríos, lo cual ha ayudado al desarrollo de la vida, a la agricultura e incluso se han estudiado y utilizado para la generación de energía eléctrica. Los procesos naturales señalados, sirven de ejemplos simples, para demostrar como el conocimiento del entorno (tierra) ha ayudado al hombre como especie, a superar las dificultades de cada época, mejorar y avanzar en pos de una mejor calidad de vida.

El comportamiento de las cargas atmosféricas, la acumulación de éstas y su posterior descarga a la superficie terrestre, es un complejo proceso natural, al cual la humanidad se ha habituado a presenciar y admirar, pero sin embargo le ha sido difícil explicar y mucho más aún hacer un pronóstico del mismo. Son fenómenos imprevisibles, y por lo mismo siempre han causado un gran impacto, produciendo daños como incendios forestales, cobrando vida de ganados, de personas, interrupción del servicio eléctrico y de las comunicaciones, entre otros. Debido a esto se desprende la necesidad de avanzar en la investigación de las descargas atmosféricas alrededor de todo el globo, ampliar el campo del conocimiento en este tema, para que en el futuro próximo sea posible el desarrollo de avances y nuevas tecnologías que ayuden a contrarrestar los efectos negativos asociados a ellos y tal vez, por qué no, sacarles provecho.

Se podría decir que la actividad eléctrica atmosférica (AEA), para el caso de Chile es baja, comparada a los países vecinos mas cercanos al ecuador, pero hay estudios que revelan una creciente AEA en la zona patagónica Chilena [1], zona que se encuentra precariamente poblada, pero que se considera de elevado interés energético, por los recursos hídricos que presenta, e ignorar la AEA podría generar fallas y accidentes en un futuro próximo de valor inmensurable.

Por otra parte existe una relación entre la AEA presente en una zona, con la temperatura global, con la variación de agua en la tropósfera superior, con las masas de precipitación de hielo, la presión, en definitiva con todos los parámetros climáticos que sabemos que hoy en día, producto del calentamiento global, están cambiando [2]. Por lo tanto el hecho que la AEA de un entorno sea históricamente baja, no afirma, bajo el contexto actual, que la situación continúe de esta forma. De hecho hay investigadores que estiman que por cada grado Celsius que sube la temperatura de la tierra la probabilidad de ocurrencia de un rayo aumenta en un 12% [3]. De esta forma toma un carácter importante mantenerse a la vanguardia y dar un paso adelante en este tema. Prueba de esto puede ser la fuerte tormenta registrada en la madrugada del 24 de marzo del 2015 en la costa de Valparaíso, tal como se ve en la figura 1.1.



Figura 1.1: Rayo registrado en la bahía de la región de Valparaíso 24/03/2015 [4]

Los rayos son atractivos y peligrosos. Las brillantes imágenes en el cielo que nos deleitan son descargas directas a la tierra, o descargas entre nubes, y son un reflejo de fuerzas destructivas asociadas a tormentas y climas fuertes. Las descargas desde una nube a tierra son las causales de sobre-tensiones transitorias, fallas, cortes de transmisión de potencia y de suministro energético en áreas residenciales e industriales. Adicionalmente, los rayos son el mayor causante de interferencia electromagnética y de fenómenos como la “resonancia Schumann” [5] que es capaz de afectar los sistemas electrónicos. La información recopilada por los sistemas de detección de descargas es útil además para la aviación, tráfico aéreo, servicios de meteorología, servicios forestales, entidades administradoras de terreno, y de utilidad pública. Avanzar en el desarrollo de la información en tiempo real es una necesidad propia del siglo XXI.

## 1.2. Actividad Eléctrica Atmosférica (AEA)

A mediados del siglo XVIII, se llevaría a cabo un experimento que abriría las puertas de la investigación de las descargas eléctricas atmosféricas. El famoso experimento de Benjamin Franklin [6], en donde ata una cometa con esqueleto de metal a un hilo de

seda que lleva en su extremo una llave también metálica. En este experimento se confirma que la llave se carga de electricidad, lo cual implica que los rayos son descargas eléctricas provenientes de las nubes, lo que a su vez implica que la electricidad proviene de ellas. Esta es la primera experimentación registrada que inspira la creación del pararrayos en Estados Unidos y que significaría un avance en el conocimiento de este fenómeno conocido como rayo [6].

### 1.2.1. Carga Eléctrica en nubes de tormenta

Se denomina como actividad eléctrica atmosférica a los procesos de intercambio de carga dentro de la tropósfera, capa más cercana a la superficie terrestre de cinco capas que posee la atmósfera (ver figura 1.2 ) siendo los rayos y relámpagos la forma mas habitual para referirse a ellas.

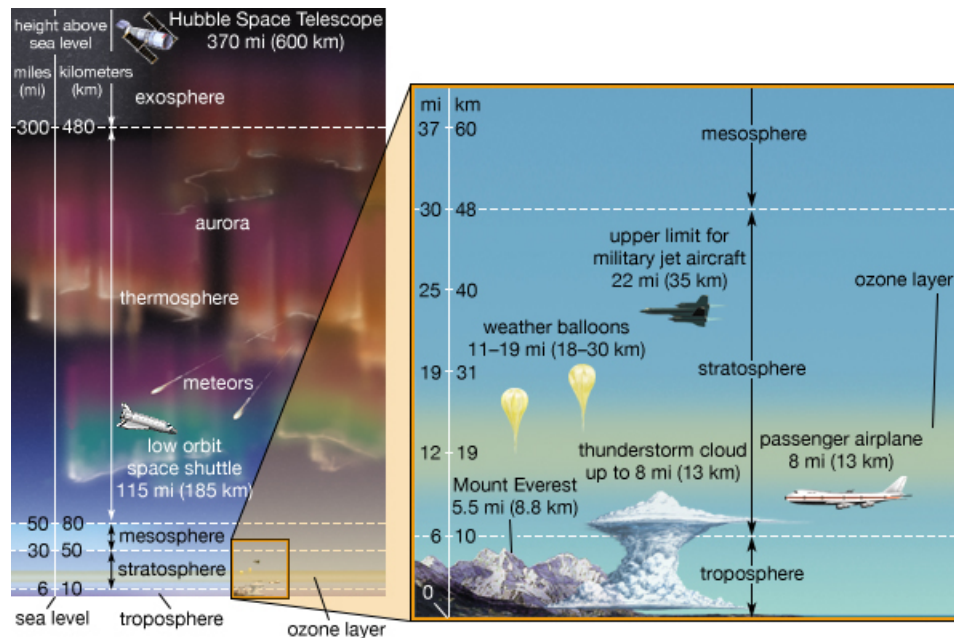


Figura 1.2: Capas de la Atmósfera terrestre. Extraído de [7].

En simples palabras se puede definir como: “el transporte de cargas eléctricas desde una zona con muchas carga a otras con menor carga”. Las descargas atmosféricas se asocian comúnmente a las nubes del tipo cumulonimbus [7], como la de la figura 1.3, pero también ocurren en otro tipo de nube llamada stratus o estrato, en tormentas de nieve, tormentas de arena y a veces en gases emitidos por erupciones volcánicas. Las cumulonimbus presentan en su interior regiones con cargas eléctricas de distintos signos, la distribución de las cargas en una nube de tormenta depende de los procesos por el cual se formó la nube de tormenta y puede ser descrita, en forma simplificada, como una estructura tripolar, como se ve en la figura 1.4

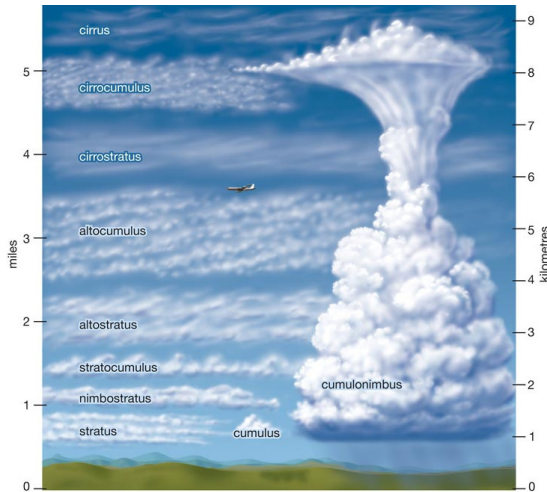


Figura 1.3: Formación de nubes a distintas alturas. Extraído de [7]

Básicamente, existen dos centros principales de carga: uno positivo, más o menos esparcido en la parte superior de la nube, hasta cerca del tope; y otro negativo, concentrado en la capa horizontal en que la temperatura se mantiene oscilando alrededor de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Pero existe un tercer centro menor y también positivo, junto a la base de la nube. Muchos mecanismos han sido propuestos para describir como es que se distribuyen las cargas al interior de una nube, la hipótesis que hoy por hoy es más aceptada dice que las partículas más largas y pesadas presentan polaridad negativa y que las más pequeñas y livianas polaridad positiva. Entonces la separación entre regiones positivas y negativas ocurre simplemente porque las partículas más largas caen más rápido que las livianas. Aunque esta hipótesis no explica con claridad como es que se forma un tercer centro de carga positiva a menor altura, (para este caso la hipótesis más aceptada es la termoelectrónica) [8–10]

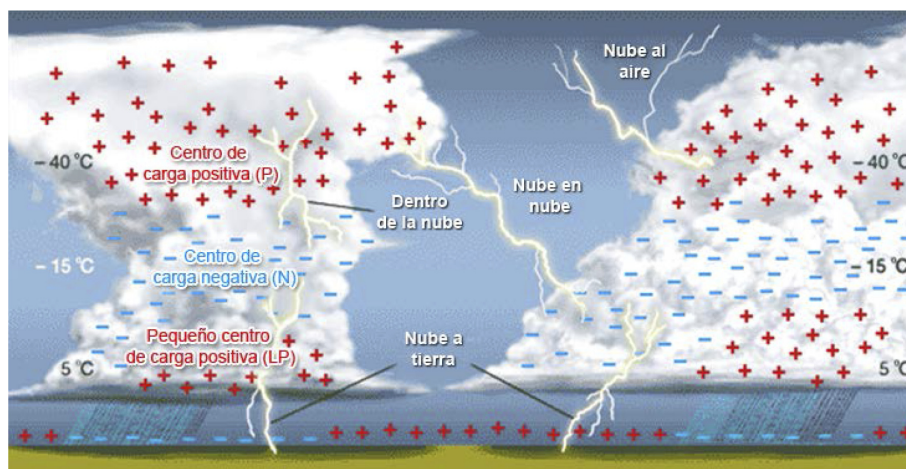


Figura 1.4: Esquema distribución de cargas dentro de una nube. Extraído de [7]

### 1.2.2. Proceso formación del rayo

Las cargas eléctricas se encuentran en un relativo equilibrio, sin embargo la propia dinámica interna de la nube hace que este estado no sea muy duradero. Los rayos pueden agruparse en dos grandes grupos, los que golpean la tierra y los que no. Se definen los relámpagos como las descargas que no tocan tierra, y de ahora en adelante para referirse a descargas que llegan a tierra se utilizará el término rayo. Los relámpagos sirven para disminuir las diferencias espaciales de cargas existentes en las nubes, tanto al interior de ellas como entre ellas. Típicamente los relámpagos comienzan al interior de las nubes o en lugares cercanos a la principal región de carga negativa en la nube (a una altura de 4 a 8km) y se propagan hacia una región positiva de mayor altura (8 a 12km) [10, 11].

Las nubes de relámpagos son importantes en el desarrollo de la tormenta. Los relámpagos típicamente superan en número a los rayos, en una proporción de diez es a dos. Tormentas severas, producen muchas más nubes de relámpagos que rayos a tierra, de hecho ciertas tormentas no producen rayos (todas las cargas se desplazan entre las nubes, o desde la nube al aire). Los relámpagos además pueden proporcionar una importante información referente al incremento e intensidad de la tormenta. En la mayoría de las tormentas los relámpagos, vienen antes de un rayo, esto es un antecedente de que se aproxima una tormenta eléctrica. Un tiempo típico entre el primer relámpago y la primera descarga que toca la tierra es de unas cuantas decenas de minutos. Este tiempo se traduce en una ventaja para la observación de los rayos y una acción preventiva para la mitigación de posibles daños. El tipo más común de descarga atmosférica, transmite carga negativa desde la nube hacia la tierra en una amplia área, pero también hay publicaciones que hablan de que en ciertas regiones, el transporte de carga más frecuente es el de las cargas positivas [8, 10].

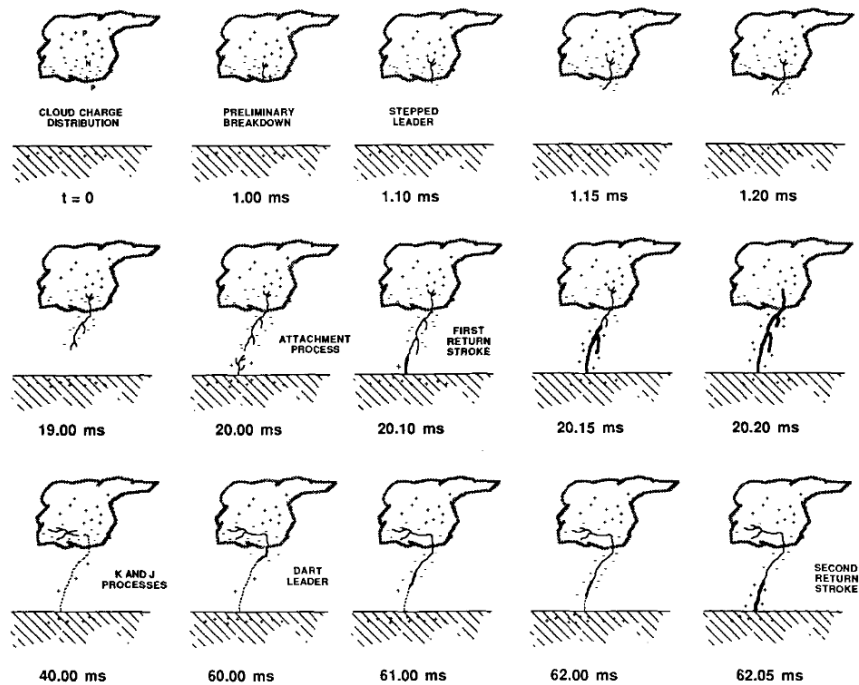


Figura 1.5: Proceso que comprende una descarga negativa de nube a tierra. Adaptado de [11].

Típicamente la ruptura del dieléctrico del aire es iniciada por un proceso preliminar de ruptura entre la región central de la nube, de carga negativa, con la zona de carga positiva que hay debajo de la nube de tormenta. Este proceso crea un canal de aire parcialmente ionizado. La descarga tiende a seguir un camino, que se va creando por sucesivos impulsos desde la nube a la tierra. Se denomina guía escalonada (*Stepped Leader*) [11], se propaga hacia abajo siguiendo el canal creado preliminarmente por el proceso de ruptura. Este *leader* a medida que se propaga es altamente ramificado. Cuando esta descarga está próxima a la superficie de la tierra, una descarga ascendente, de carga opuesta, se eleva desde el suelo hasta una altura típica de unos 30 metros en donde se conectan y se concreta el primer rayo (el primer *stroke*) [11]. Cuando la unión es completada, la nube se ha conectado efectivamente a tierra, una descarga de retorno brillante aparece hacia la nube, a una velocidad de alrededor de un tercio de la velocidad de la luz. Un rayo típico contiene tres o cuatro corrientes de retorno seguidas, pero podrían llegar a ser incluso veinte, el número de descargas en un evento, también puede ser referido como la multiplicidad de un rayo. En este punto hay que tener en cuenta lo siguiente, la primera descarga es producida por el *stepped leader*, y esta origina una descarga de retorno, un *return stroke*. Luego de este, la siguiente descarga utilizará más o menos el mismo camino generado por la primera descarga, pero casi no será ramificada debido a que aún está ionizado el aire, por lo tanto la conductividad de éste es mejor, esta segunda descarga de nube a tierra es llamada *dart leader*, se define como el primer *stroke* después del *stepped leader* y desencadenará una nueva corriente de retorno (*return stroke*), la figura 1.5 resume bien el proceso. Carga adicional puede ser transferida en una “corriente continua” que se mantiene durante los intervalos entre descargas. Para muchos rayos, los subsecuentes rayos que toquen tierra después de él, lo harán en el mismo punto porque viajan a través del mismo camino que construyó el primero. Sin embargo, desde el 30 % al 50 % de todos los rayos contienen descargas que producen diferentes puntos de impacto, por lo mismo es que algunos autores agrupan este conjunto de descargas como un *flash* el cual tiene un radio de unos 10km y una duración de 1s [10,11].

Un rayo es representado como una fuente de corriente ideal, cuyos parámetros, tales como la polaridad y multiplicidad, vienen determinados de forma aleatoria de acuerdo con la función de distribución de densidad. [12]. Una forma de onda de una corriente de retorno es definida por el peak de la magnitud de corriente,  $I_{100}$ , el tiempo de subida,  $t_f$  y el tiempo de cola,  $t_h$ , tal como se ve en la figura 1.6 [12,13]

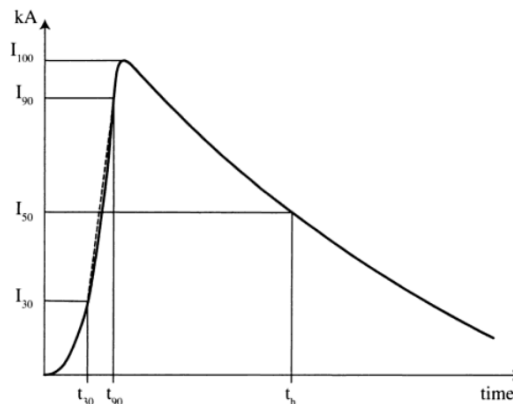


Figura 1.6: Parámetros de una corriente de retorno [12].

La variación estadística de los parámetros del rayo pueden ser aproximados por una distribución normal logarítmica, de acuerdo a la siguiente función:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_{\ln x}}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \ln x_m}{\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right] \quad (1.1)$$

donde  $\sigma_{\ln x}$  es la desviación estándar de  $\ln x$ , y  $x_m$  es el valor medio de  $x$  [12, 13]. Algunos ejemplos de aplicación y análisis son descritos en [13].

### 1.2.3. Señales radiadas y aspectos generales de los rayos

Las descargas, ya sean entre nubes o nube a tierra producen radiación electromagnética de energía en un amplio rango de frecuencia. Gran parte de esta energía está contenida en pulsos de alta frecuencia con un tiempo de subida amplio. Estas emisiones pueden ser en general procesadas y categorizadas en los tradicionales rangos de radio frecuencia. El proceso de ruptura que crea el nuevo canal del rayo y los rápidos procesos que iluminarán el existente canal producirá fuertes emisiones en la banda de frecuencia VHF. Un tipo es casi continuo por un par de milisegundos sin exhibir distintivos peaks durante este tiempo. El otro tipo consiste en un pulso en una escala de microsegundos. Otro tipo son las “puntas incandescentes”, citadas como *bursts of narrow*, que son pulsos de microsegundos. Cuando se está propagando de forma ramificada el líder escalonado, es bastante frecuente que una de las ramificaciones encuentre en su camino una carga, la cual ascenderá rápidamente a través de este e iluminará el camino recorrido (este fenómeno suele citarse como *recoil streamers*). Los rápidos movimientos de *recoil streamers* y los *dart leader* tienden a emitir las emisiones más continuas de “interferencia” (*bursts*). El líder escalonado (*stepped leader*) en descargas negativas nube a tierra, produce impulsos asociados con los pasos que va dando al descender, pero a medida que se va acercando a tierra y la estructura ramificada se vuelve más compleja, las emisiones comienzan a parecer más continuas en el tiempo [10,11].

Cuando hay grandes corrientes transitorias tales como las corrientes de retorno y algunos pulsos en la nube, previo de haberse establecido los canales de conducción, las emisiones más fuertes son en el rango LF y VLF. En la banda VLF la radiación es dominante por las corrientes de retorno (*return stroke*). Las descargas a nubes producen desde decenas a cientos de pequeños pulsos con la energía contenida en su mayoría en el rango LF o superior. Usualmente, una actividad relativamente pequeña en la banda VHF es producida por la corriente de retorno [10].

La diferencia de potencial entre la nube y la tierra es del orden de los 10 a 100MV, y el peak de corriente alcanzado, por una descarga de retorno es típicamente de unos 30kA, la cual se mantiene por un par de micro segundos (puede alcanzar hasta los 200kA). El peak de temperatura que alcanza el canal de propagación, es del orden de los 30000°C y la presión que se genera dentro de éste supera los 1 MPa. El proceso entero es bastante rápido, la descarga inicial se toma un tiempo cercano a los 30ms para alcanzar tierra mientras que la descarga de retorno se toma un tiempo cercano a los 100µs en alcanzar el centro de la nube. El trueno [14] es producido por el rápido calentamiento del aire en el canal del rayo y un consecuente aumento de la presión en él. El aumento de la presión hace que el canal se expanda a velocidad supersónica, lo cual termina por producir la onda sonora que se escucha y conoce como trueno. Dadas las diferencias de velocidades a las que viajan

la luz del rayo y la onda del trueno, es que se puede utilizar este desfase para estimar la distancia a la descarga. Cada 3 segundos, corresponde a un kilómetro [8–11, 15–19].

Durante la etapa de descarga de retorno, son aproximadamente  $10^5$  Joule de energía los que se disipan en el interior del canal del rayo. Esta energía es dividida entre la disociación, ionización, excitación y energía cinética de las partículas, la energía de expansión del canal y radiación. Mediciones espectroscópicas revelan que las moléculas de aire, principalmente de nitrógeno, oxígeno y agua, son divididas en sus respectivos átomos y que en promedio es removido un electrón por cada átomo. La conversión de moléculas neutras de aire a un completo plasma ionizado ocurre en unos pocos micro segundos [8–11, 15–19].

# Capítulo 2

## Estado del Arte

### 2.1. Evolución de la tecnología de observación de señales radiadas

El desarrollo de instrumentación moderna para la detección de rayos ha sido inspirada y guiada, por mero interés científico y por una variedad de aplicaciones y necesidades prácticas. Los requerimientos de las aplicaciones de detección y localización de los rayos, usando sistemas terrestres o sistemas satelitales, vienen de muchas formas y se han ido presentando y desarrollando con el correr de los años. Estos requerimientos se traducen en una mejora en la calidad de información y una reducción de costos en la producción de estos.

#### 2.1.1. Observación terrestre

Alexander Stepanovich Popov (citado también como Popoff) [20], fue un físico e ingeniero electricista ruso, acreditado por ser el primero en construir una antena para emitir y recibir ondas de radio, en el año 1895 (por lo mismo es que en Rusia y Europa del este se le acredita como el inventor de la radio). Popoff empleó en su trabajo un “coherer” [21], la forma más primitiva de lo que hoy se conoce como una radio y presentó el 7 de mayo de 1895 el trabajo “On the Relation of Metallic Powders to Electric Oscillations” sobre un detector inalámbrico de rayos, utilizando un coherer para detectar “ruido de radio” proveniente de una descarga. Más tarde el desarrollo del “audion” (vacuum tube) [22] y el osciloscopio de rayos catódicos permitió visualizar las formas de ondas de señales radiadas asociados a estos fenómenos, cuando ocurre una tormenta, lo que daría paso al nacimiento del análisis cuantitativo de “señales de radio atmosféricas” o “esféricas” [23], en el año 1920.

Las “señales de radio atmosféricas” serían vistas como interferencia, para las tecnologías emergentes como las comunicaciones de larga distancia por radio, lo cual incentivaría el avance en la observación de señales radiadas.

El *Cathode-ray direction finder* (CRDF), que fue desarrollado por Watson-Watt y Herd, utilizaba un par de *loops* ortogonales sintonizados a frecuencias cercanas a 10kHz. Para determinar el ángulo azimuth [24] de la descarga, dispusieron los *loops* ortogonales orientados de norte a sur y de este a oeste, y las señales las proyectaron de forma simultánea

en un osciloscopio x-y, con lo cual obtenían un vector apuntando al lugar donde ocurrió la descarga. Luego utilizando dos o más CRDF, que recibieran la radiación, se era capaz de determinar el punto de impacto intersectando los vectores [25]. Mediciones de campo electromagnético producido por rayos eran usados normalmente para la comunicación entre los barcos y tierra.

Estos instrumentos ayudaron a caracterizar la ionósfera y su efecto en la propagación de ondas de radio. Luego, antes del desarrollo de radares de clima, los sistemas de detección en el ancho de banda correspondiente a VLF (esféricos, radio atmosférica) emplearon dos o más receptores con *loops* ortogonales llamados “*magnetic-direction-finding*” (MDF), espacialmente separados. Estos fueron los principales medios de identificación y seguimiento de las tormentas a mediano y largo alcance con una precisión de localización de varias decenas de kilómetros [26–28].

Un sensor MDF (*Magnetic Direction Finder*) utiliza dos “*loops*” ortogonales [26], al igual que el CRDF, los cuales según su orientación y la localización del rayo, recibirán una componente de la magnitud del campo magnético. El ancho de banda de estas antenas es aproximadamente desde 1kHz a 1MHz. El voltaje producido en cada *loop* abierto es, según la Ley de Faraday, al campo magnético generado por la descarga multiplicado por el coseno del ángulo existente entre el plano del *loop* y la dirección de propagación del campo [26].

$$V = -A \cos(\theta) \frac{dB}{dt} \tag{2.1}$$

donde A es el área del *loop*, cuyo vector normal es paralelo a la dirección de propagación del campo que produce la tensión V.

Entonces la dirección de la descarga eléctrica puede ser determinada por la proporción de señal que recibe cada *loop* de la antena, tal como se ve en la figura 2.1 [26].

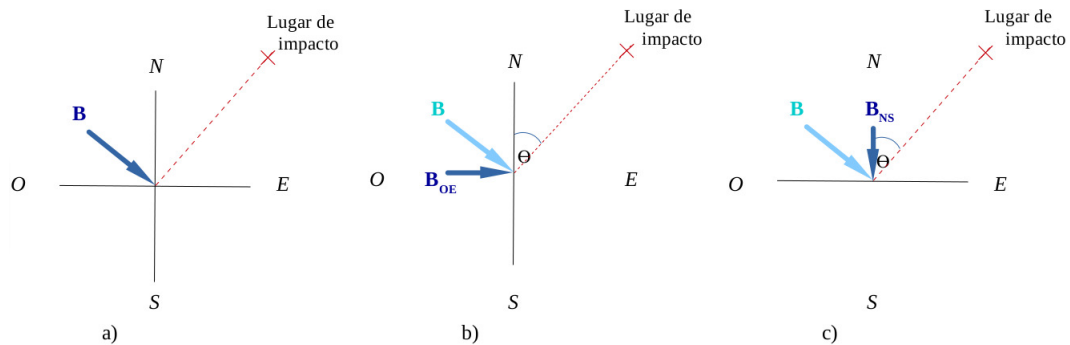


Figura 2.1: Esquema funcionamiento antenas de *loop* abierto

En la figura 2.1a) se ejemplifica la disposición de una antena de *loops* ortogonales orientados de norte a sur y de oeste a este. La figura 2.1b) muestra lo que sería la componente “oeste-este” del campo magnético, la cual es normal al área del *loop* norte - sur, de la misma forma en 2.1c) se ve la componente “norte-sur” que sería vista por el *loop* oeste - este. Teniendo esto en cuenta y considerando que los *loops* son iguales, se pueden construir las siguientes relaciones:

$$V = -A \cos(\theta) \frac{dB}{dt} \quad (2.2)$$

$$V_{NS} = -A_{NS} \cos(\theta) \frac{dB}{dt} \quad \Rightarrow \quad V_{NS} \sim -A_{NS} B_{OE} \quad (2.3)$$

$$V_{OE} = -A_{OE} \sin(\theta) \frac{dB}{dt} \quad \Rightarrow \quad V_{OE} \sim -A_{OE} B_{NS} \quad (2.4)$$

$$\tan(\theta) = \frac{V_{OE}}{V_{NS}} \quad (2.5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_{OE}}{V_{NS}} \right) \quad (2.6)$$

De esta forma el ángulo  $\theta$  puede ser determinado, como el inverso de la tangente de las señales medidas y la magnitud del campo magnético, puede ser estimado mediante

$$\sqrt{V_{NS}^2 + V_{OE}^2} = \sqrt{(-A_{NS} B_{OE})^2 + (-A_{OE} B_{NS})^2} \quad (2.7)$$

$$= \sqrt{A^2 ((B_{OE})^2 + (B_{NS})^2)} \quad (2.8)$$

$$= A \sqrt{(B_{OE})^2 + (B_{NS})^2} \quad (2.9)$$

$$= AB \quad (2.10)$$

Sistemas que operan con MDF podrían operar con al menos dos sensores. Obtenida la dirección que apunta hacia el punto de impacto, la localización de la descarga viene de la intersección de las direcciones obtenidas de los distintos sensores, tal como se muestra en la figura 2.2.

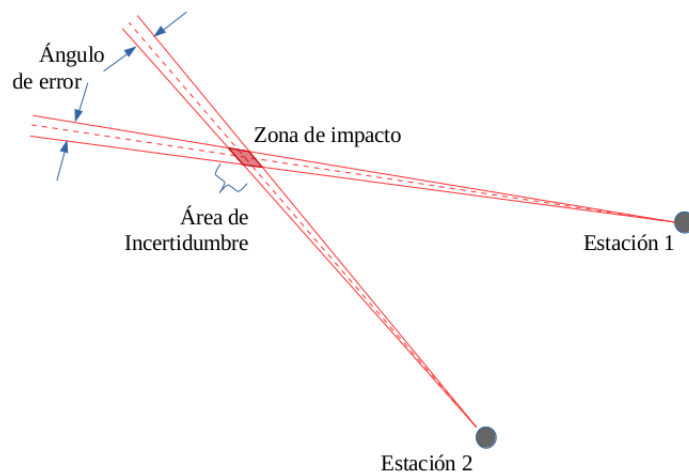


Figura 2.2: Esquema detección punto impacto con sensores MDF

En la figura 2.2 se ve un área considerable de incertidumbre, pero en una red típica, tres o más sensores reportan una descarga y cuentan con una optimización que minimiza el

ángulo de discrepancia que reportan los sensores. Una apropiada localización de un rayo, con sensores MDF, puede ser mejorada con la implementación de corregidores de error de sitio (*Site Error Correction*) en el algoritmo de localización. Condiciones locales del sitio en donde se encuentra el sensor (objetos cercanos, cercos metálicos, cables enterrados o instalación con conductores) son causales en cambios más o menos significativos en la dirección del campo incidente, el cual puede estar sobre los  $10^\circ$  o incluso más. Es posible determinar el error sistemático producido por estas condiciones para cada sensor MDF, haciendo una estadística de los datos recolectados por el mismo, para realizar una función de corrección e ingresarlo en el algoritmo de localización [15].

Una vez que la distancia al punto de impacto es determinada (cruzando la información obtenida de diferentes sensores), se puede utilizar la amplitud estimada del campo magnético, para estimar el peak de la corriente de retorno (*return stroke*). La técnica de los sensores MDF es la única capaz de estimar peak de corriente.

Con tal de optimizar la precisión y eliminar ruido, los sensores MDF son diseñados para responder a las formas de onda generadas característicamente por corrientes de retorno. Esto se debe a que la forma y polaridad de la señal emitida por un *return stroke* son bastantes distintivas y diferentes de las generadas por las descargas nube a tierra y de la mayoría del ruido ambiente [26].

La figura 2.3 extraída de [26] ilustra bien el caso, en donde se ve una clara diferencia entre la primera señal, etiquetada como a), que corresponde a una primera descarga (*stepped leader*), a las etiquetadas como b) y c) son las correspondientes al *return stroke* siguiente a la descarga y el subsiguiente. Estas formas de onda, fueron capturadas a una distancia de 60km. Entre otras cosas los sensores MDF requieren que el campo radiado tenga un tiempo de subida, ancho y una estructura de *peaks* características de las corrientes de retorno. El campo de un primer retorno debe tener un tiempo de subida de unos  $20\mu s$  y los *peaks* siguientes no pueden superar al primero por más de un 15%. El campo eléctrico debe tener una polaridad inicial positiva (polaridad producida cuando un rayo incidente es de polaridad negativa) en el momento del primer *peak* y debe permanecer positivo por al menos  $15\mu s$  después del primer *peak* (Un análisis más detallado se puede ver en [26]).

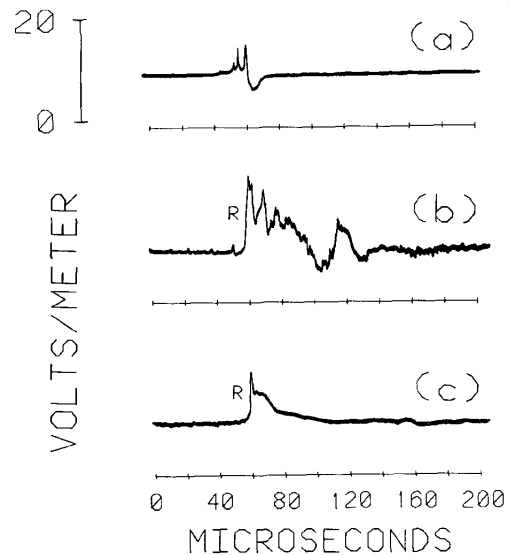


Figura 2.3: Señales radiadas producidas por, a) Primera descarga a tierra, b) Primer *Return Stroke* y c) Subsiguiente *return stroke*. (Extraído y adaptado de [26]).

Se ha implícitamente asumido que el canal por el que desciende el rayo es de orientación vertical, pero en realidad la orientación es inclinada levemente, por lo que una justificación adicional, resulta ser calibrar los equipos para operar con las corrientes de retorno (las cuales se asocian de mejor manera a una señal vertical ascendente) y no con las descargas

desde la nube, por lo que se mitiga el posible error introducido [15,26].

A medida que los sistemas instrumentales se volvían populares, como los previamente descritos, para observación de rayos, estos fueron evolucionando e incorporando nuevas tecnologías. Poco a poco la radio-detección fue incorporando los avances tecnológicos hechos en la electrónica y en los sistemas de comunicación [15].

La técnica “tiempo de llegada” (TOA por su sigla en inglés, *Time-of-arrival*) fue una técnica desarrollada para la navegación marítima entre los años 1930 y 1940 y fue empleada por primera vez para la geolocalización de los rayos en la década del 50 [15]. Básicamente el método consiste en medir la diferencia de tiempo de llegada de la señal de dos estaciones. Esta diferencia de tiempo da como resultado una hipérbola, en donde cada estación pasa a ser uno de los focos de esta misma, y la fuente emisora de la señal un punto correspondiente a la hipérbola. Múltiples estaciones permiten la construcción de múltiples hipérbolas, las cuales al interceptarse permiten encontrar la localización de la fuente. La figura 2.4 ilustra como sería posible la localización del punto de impacto, con la existencia de sólo dos sensores.

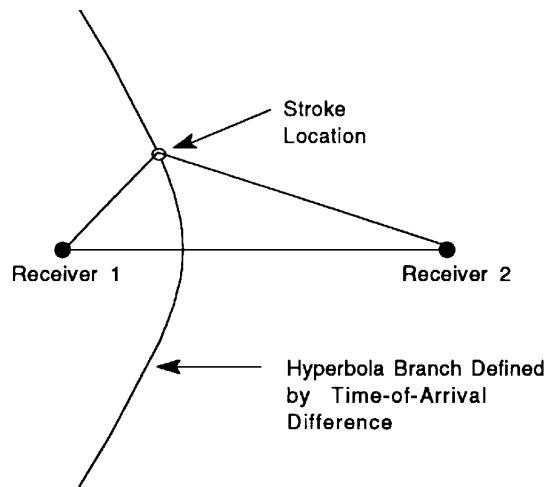


Figura 2.4: Determinación Punto de impacto con dos sensores. Extraído de [29]

Esta configuración carece de confiabilidad dado que el punto de impacto podría tratarse de otro punto ubicado a la misma distancia de los dos receptores, y que también pertenezca a la hipérbola [15,25]. En cambio la figura 2.5 ilustra el posicionamiento del punto de impacto con 3 sensores. En general se define como condición necesaria un mínimo 3 sensores para que el sistema funcione, pero aún así podrían haber ambigüedades, por ende se considera no suficiente.

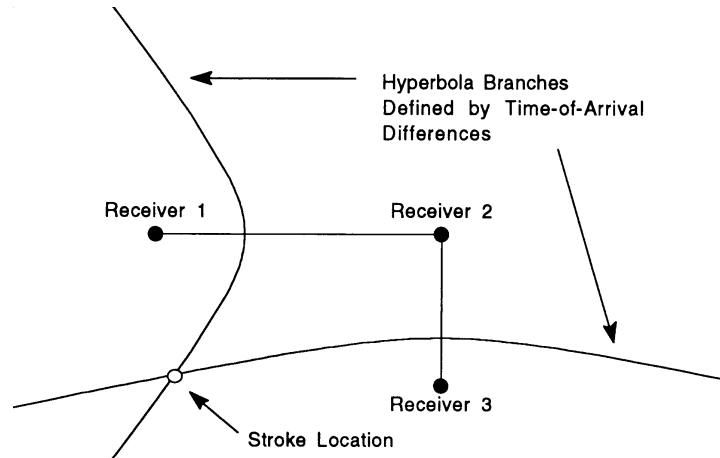


Figura 2.5: Determinación punto de impacto con tres sensores. Extraído de [29]

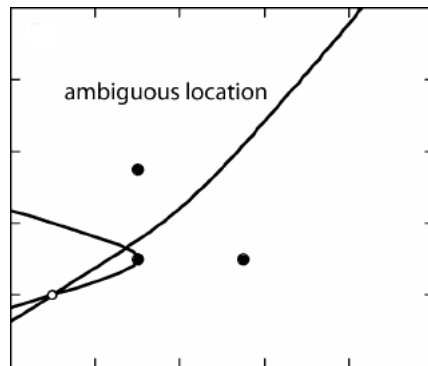


Figura 2.6: Localización Ambigua TOA. Extraído de [15]

La figura 2.6 ilustra la necesidad de que haya una cantidad mayor a tres sensores. Para este caso en particular se produce una ambigüedad dado que las hipérbolas se interseccionan en más de un punto. Es por esto que se hace necesaria la presencia de más sensores para poder realizar un sistema de mayor confianza y encontrar el punto de impacto sin problemas.

Lewis [30] geolocalizó rayos a grandes distancias de los sensores instalados lo cual resultó en una geometría que hace parecer que cada par de sensores producen una línea recta asociada a su hipérbola, que van abruptamente en direction del mismo punto. Este hecho fue denominado como *Hyperbolic direction finding* y fundó la base de lo que serían las redes de detección que vinieran luego. La figura 2.7 ilustra un ejemplo de este método.

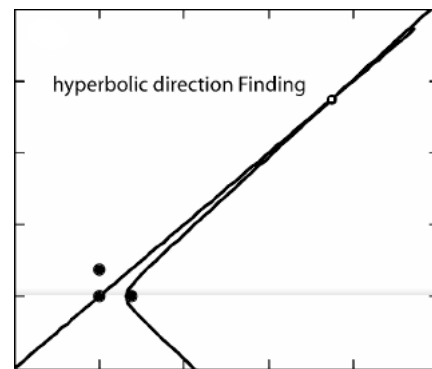


Figura 2.7: Hyperbolic Direction Finding TOA. Extraído de [15]

Es de suponer, que a partir de esta configuración se desprenda la idea de introducir una nueva técnica, la cual es hacer uso de la interferometría [31], para establecer la localización de los puntos de impacto. Esto se hace espaciando los sensores en no más de un largo de onda, entonces se aplica el fenómeno de interferencia de ondas para determinar el punto de impacto

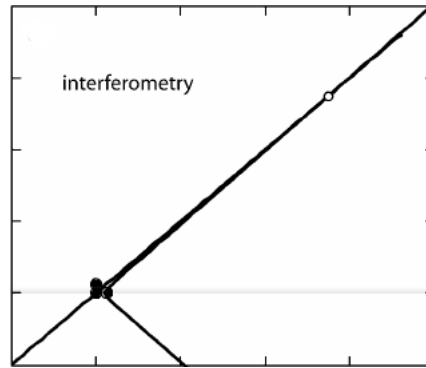


Figura 2.8: Interferometría TOA. Extraído de [15]

Así es como en la década de los ochenta, estos mismos equipos (MDF y TOA), estarían presentes en las regiones de Europa, Japón y Norteamérica, siendo en esta misma época en la que nacen los sensores “IMPACT” (*IMProved Accuracy using Combined Tecnology*) que combinan ambas técnicas, MDF y TOA, introducidos por Global Atmospherics Inc. Estos sensores son capaces de entregar información azimuth y tiempo de llegada. La redundante información además hace posible obtener latitud, longitud y tiempo de descarga [15,25,28].

Quedaba una tarea pendiente, y era el mayor desafío para los sistemas en la época. La necesidad de precisión en el tiempo de sincronización de los múltiples sensores remotos para una acertada localización. En la década siguiente de los noventa, los sistemas desplegados incorporaran GPS. Esto sumado a las técnicas basadas en la interferometría provocaría que mejoraran sus prestaciones reduciendo los errores angulares, dando inicio en este momento a que se comiencen a tener sistemas de alta precisión [15, 32].

Para el último cuarto del siglo XX, a pesar de la progresiva evolución, la exploración obtenida por las redes de radiodetección terrestre no ha sido homogénea en todo el planeta, debido a las diferencias instrumentales entre los sistemas de cada región y al gran contraste de la densidad de estaciones entre continentes ricos y zonas pobres o muy despobladas. Se puede hablar de un seguimiento casi global de la actividad eléctrica, sobre todo en las zonas más pobladas del planeta. La eficiencia de detección en los países más avanzados consta de un porcentaje superior al 90 % de los rayos ocurridos y la precisión en la localización del evento se sitúa en un valor cercano a los 500 metros (en las zonas con mejor cobertura) [27].

En la actualidad, durante la primera década del siglo XXI, se han fundado redes que buscan proporcionar una cobertura global, mediante estaciones de largo alcance que operan en el rango VLF. Este es el caso de la red GLD360, financiada por VAISALA, que cuenta con un porcentaje superior a un 80 % en el hemisferio norte, y entre un 10 y 80 % en el hemisferio sur, con la menor eficiencia en latitudes más al sur de los 42 grados sur (datos según el mismo sitio web de VAISALA [33]). Otra red que se desarrolla en la actualidad es la World Wide Lightning Location Network (WWLLN) la cual afirma en la actualidad, contar con una eficiencia de detección de rayos (de 30kA) de aproximadamente un 30 % globalmente [34].

### 2.1.2. Observación satelital

En búsqueda de mejorar y/o complementar la cobertura total de la AEA, es que la NASA también ha implementado sistemas satelitales para el mapeo de la actividad eléctrica de la tierra. El primer dato de localización de una AEA fue hecho desde el *Operational Linescan System* (OLS), a bordo del *U.S Air Force DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)* el cual no fue fabricado precisamente para este efecto. La observación en este caso fue limitada a la noche y la cobertura espacial fue bastante escasa. La información recolectada fue procesada por NASA MSFC durante trece años, entre 1973 y 1997. La primera observación dedicada a la actividad eléctrica atmosférica en el rango visible fue iniciada en abril de 1995 con el OTD y LIS en noviembre de 1997 [35].

Desde 1995 hasta el año 2000 la NASA pone en órbita polar, a bordo del satélite MicroLab-1 un sensor óptico (*Optical Transient Detector*, OTD) para captación de los destellos luminosos de las descargas eléctricas procedentes de las tormentas. El *Optical Transient Detector* debe su nombre a su capacidad de detectar cambios ópticos momentáneos en una cuadrícula, lo cual indica que hubo actividad eléctrica.



Figura 2.9: Optical Transient Detector con MicroLab1. Extraído de [35]

El OTD entrega un gran avance en tecnología, y desarrollo de la técnica, dado que éste, en comparación a su antecesor, es capaz de registrar la actividad ocurrente, tanto de noche como de día. Adicionalmente provee mucha mayor eficiencia y una resolución espacial de  $128 \times 128$  pixels. En la figura 2.9 se puede ver el OTD y lo que sería su emplazamiento físico a bordo del MicroLab-1. La cámara del sensor es de aproximadamente 8 pulgadas (20,32 cm) de diámetro y 15 pulgadas de alto (38 cm), mientras que el paquete que lo soporta es de un tamaño semejante al de una máquina de escribir. Juntos los dos módulos pesan alrededor de 18 kilogramos y el peso total del satélite, puesto en órbita es de 75 kg. EL OTD fue puesto aproximadamente a 710 km de altitud con una inclinación de 70 grados. Con esta órbita y con los 100 grados de campo visual con los que cuenta el detector, se logra inspeccionar un area de  $1300 \times 1300 \text{ km}^2$ , virtualmente toda el área del globo en donde normalmente ocurren descargas. La figura 2.10 muestra de forma gráfica el área de cobertura que tiene el OTD [35].

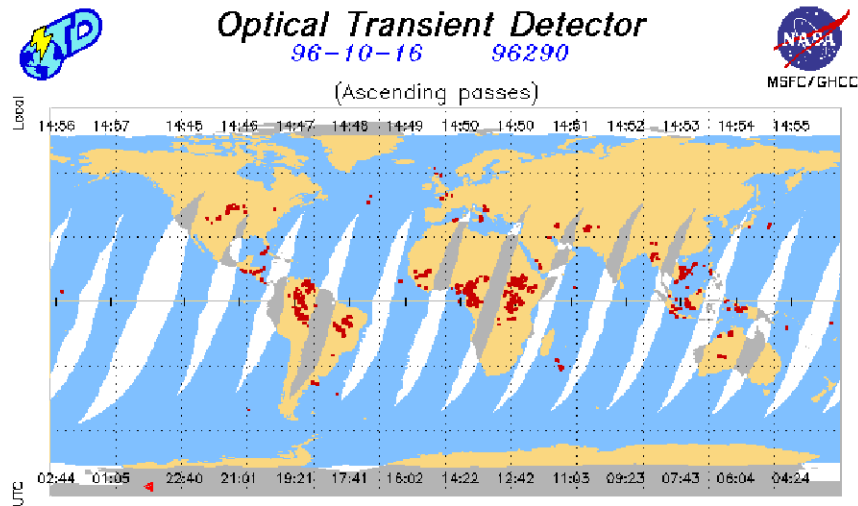


Figura 2.10: Optical Transient Detector (OTD) Captura del día 16/10/1996. Extraído de “<https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/OTDbrowse/1996/gif/>”

Como una continuación y mejora de la exploración satelital es que la NASA envía el satélite TRMM a orbitar. *Lightning Imaging Sensor* (LIS) es un instrumento usado para detectar la distribución y variabilidad del total de actividad eléctrica (nube a nube, intranube y nube a tierra) que ocurren en la región tropical de la tierra.

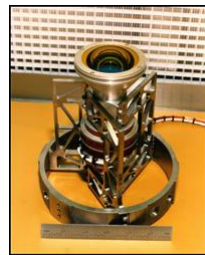


Figura 2.11: Lightning Imaging Sensor. Extraído de [36]

El LIS se encuentra a bordo del Observatorio TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), el cual fue lanzado el 28 de noviembre de 1997. El sensor está optimizado para localizar y detectar la actividad eléctrica con una resolución de 4 a 7 km sobre la región ( $600 \times 600 \text{ km}^2$ ). La figura 2.12 ilustra el área barrida por el satélite.



Figura 2.12: Lightning Imaging Sensor, órbita descrita y área cubierta. Extraído de [37]

El satélite TRMM viaja una distancia de 7km cada segundo, lo cual permite al LIS observar un punto de la tierra o una nube durante unos 90 segundos. A pesar del breve momento de observación, es lo suficientemente largo para estimar la tasa de descargas de la mayoría de las tormentas. El instrumento almacena el tiempo de ocurrencia, mide la energía radiada y determina la localización de las descargas.

El dispositivo porta un procesador en tiempo real de eventos (RTEP) en el interior, el cual se utiliza para determinar cuando ocurre una descarga. Para mejorar la eficiencia y detectar las descargas débiles que puedan ocurrir durante el día, y que sean difíciles de detectar por el bajo contraste de luz, quita el fondo “de la imagen” y así puede visualizar eventos débiles y lograr una eficiencia de detección de un 90 % [37].

La figura 2.13 agrupa todos los eventos ocurridos desde el año 1998 hasta el 2013, dentro de la franja de cobertura del satélite. El TRMM ha sido enviado a realizar esta órbita, porque según los resultados obtenidos desde el OTD, la mayor ocurrencia de descargas ocurren alrededor del trópico. Es así que se ha optimizado y calibrado la tecnología de este sensor, para cubrir esta área [38].

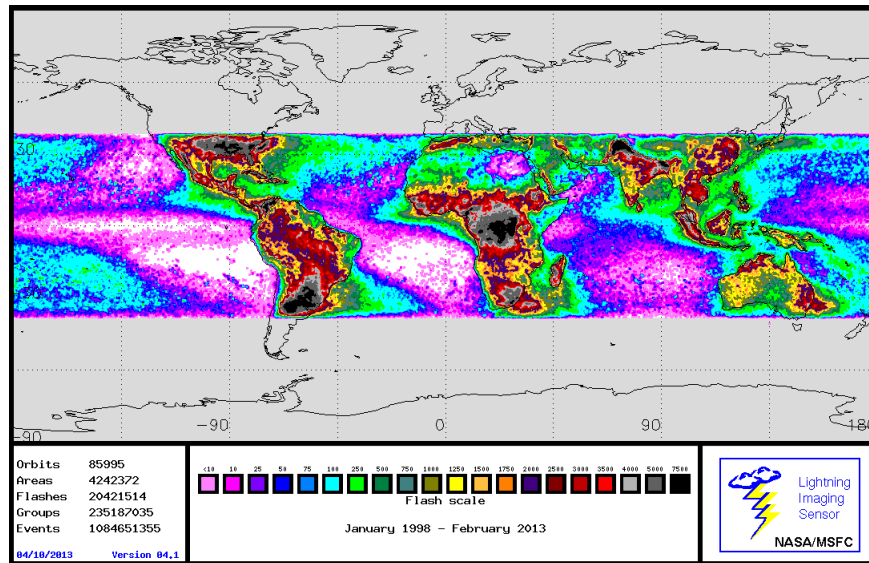


Figura 2.13: Actividad eléctrica atmosférica desde 1998 al año 2013, registrado por la NASA/MSFC Lightning Imaging Sensor. Extraído de [39]

El OTD detecta AEA durante día y noche, con una eficiencia de detección desde un 40 % a un 65 %, dependiendo de condiciones externas, tales como nivel de destello y radiación. El instrumento LIS, para el cual OTD es el prototipo de ingeniería, tiene una eficiencia de detección aproximada de 90 %. Por otra parte ambos sistemas, no discriminan si la descarga ocurre desde una nube a tierra o si ocurre al interior de una nube o de nube a nube.

En la figura 2.14 se ve que desde 1975 existe el programa *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) de la NASA, el cual provee imágenes e información continua respecto de las condiciones de la atmósfera y la actividad solar en general y en la etapa más reciente, en el pasado 2016 se decide implementar un sistema de mapeo de actividad eléctrica.

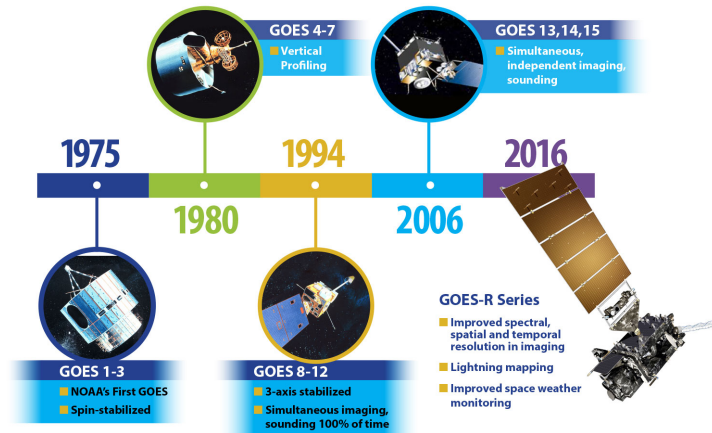


Figura 2.14: Historia de GOES. Extraído de [40]

Los satélites continuamente supervisan todo lo que es el continente americano y gran parte del océano pacífico y atlántico, como muestra la figura 2.15

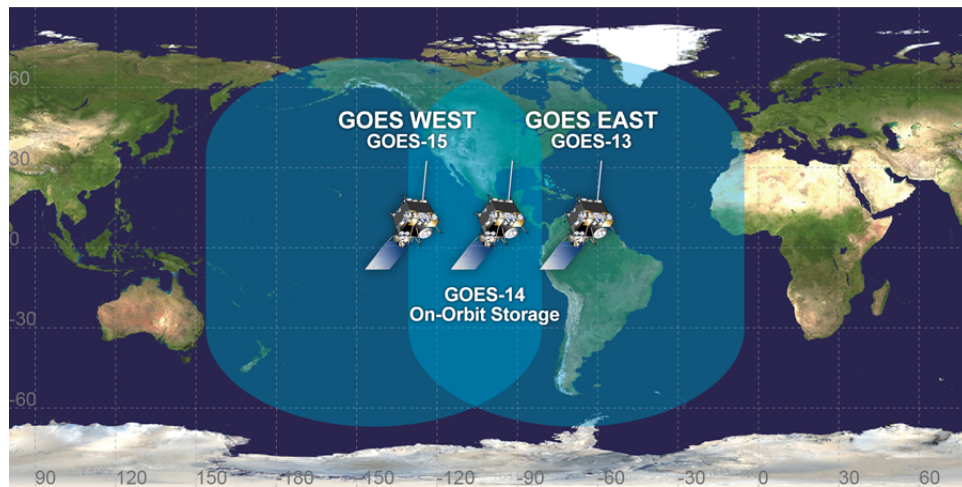


Figura 2.15: “Flota GOES”. Extraído de [39]

La siguiente generación de satélites GOES, comienza con el GOES-R, estos son satélites que pesan 2800kg e incluyen una unidad de suministro de energía superior a 4000W. Los satélites prooverán imagenes continuas y mediciones de la atmósfera terrestre, información total de la actividad eléctrica atmosferica y monitoreo espacial del clima que proveerá información crítica sobre hidrología, océanos, climas, radiación solar e información espacial. Todo esto con la ayuda de los seis sensores con los que cuenta, los cuales se pueden ver en la figura 2.16. Se espera que la plataforma cuente con una vida útil de al menos 15 años.

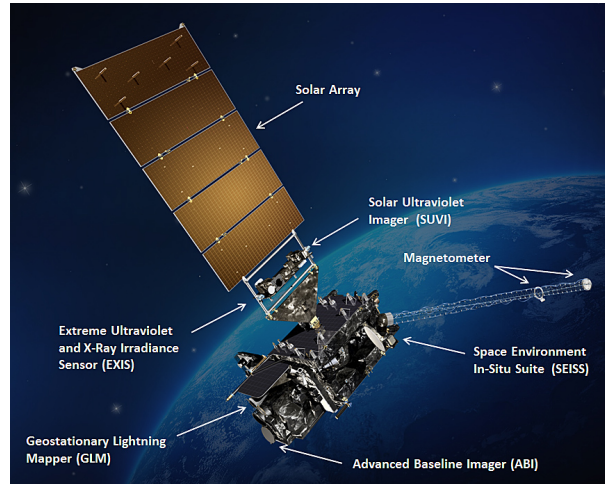


Figura 2.16: GOES-R. Extraído de [40]

El *Geostationary Lightning Mapper* (GLM) estará a bordo de la nueva generación de satélites GOES, y cuenta con un detector óptico de cambios transitorios, al igual que sus antecesores puede detectar cambios momentáneos en una escena, indicando la presencia de AEA sin discriminar su naturaleza, es decir, identifica movimientos de carga dentro de una nube, entre nubes y de nube a tierra por igual. Se encuentra monitoreando continuamente, toda la región de América, y los océanos adyacentes (pacífico y atlántico). GLM recolectará información tal como la frecuencia, localización y alcance de las descargas con tal de identificar la intensidad de las tormentas eléctricas y ciclones tropicales. La información que se espera proveerá el GLM tiene un gran potencial para mejorar el tiempo de entrega de advertencias respecto de tormentas eléctricas y tornados, y a su vez reducir las falsas alarmas. La información se espera que sirva incluso para detectar ciclos en la actividad eléctrica atmosférica, hacerle un seguimiento, apreciar cambios, etc.

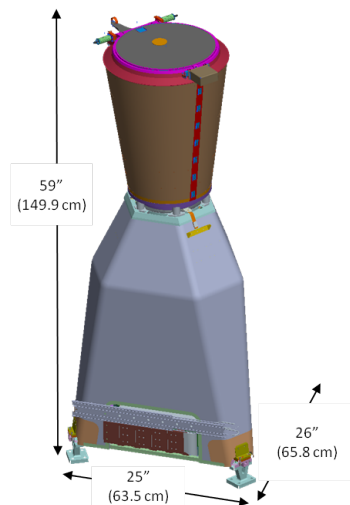


Figura 2.17: Sensor GLM. Extraído de [40]

La figura 2.17 muestra las dimensiones físicas del sensor GLM. Otras características del mismo son:

- Una cámara CCD (*charge coupled device*) de 1372 x 1300pixels.
- Resolución espacial cercana a 8km que alcanza un máximo de 14 en las zonas del borde.
- Cobertura sobre los 52 grados de latitud.
- 0-90 % de detección, día y noche.
- Tasa de muestra de 2ms.

El GOES-R fue lanzado al espacio el 19 de noviembre del 2016 y alcanzó órbita geostacionaria el 29 de noviembre del mismo año. Por ahora aún se encuentra en etapa de

validación pos lanzamiento, por lo que no ha entrado en operación [35–40].

## 2.2. Sistemas de detección y localización de AEA

En la sección anterior se habló del estado del arte de mediciones radiadas, y se hizo una revisión de como se fueron adoptando y cambiando las diferentes técnicas para hacerlo, desde Benjamín Franklin quien es la primera persona que confirmaba la naturaleza física de los rayos, hasta el lanzamiento de la nueva flota de la NASA, que se evocará a investigar sobre esto. Todo esto desde un punto de vista de investigación, sin especificar con gran énfasis cual es la motivación de cada organismo que quiere investigar.

Una diferencia notable de los sistemas satelitales impulsados por la NASA, es que no cuentan con la capacidad de diferenciar la naturaleza de la AEA, es decir si son descargas de nube a nube, nube a tierra o intra-nube. Es por esta razón que desde ahora se hablará de los sistemas de detección terrestre, debido a que para nuestro caso de interés, importan las descargas que llegan a tierra, es decir los rayos.

Debido a las diferentes amplitudes de frecuencia de la radiación electromagnética, es que diferentes técnicas son aplicadas, siendo algunas mejores que otras para detectar diferentes procesos en la nube y descargas a tierra [41]. El espectro de frecuencia de trabajo para la radiodetección de descargas se puede agrupar en tres grandes grupos, los cuales son VLF (3kHz - 30kHz), LF (30kHz - 300kHz) y VHF (30MHz - 300MHz) (de su sigla en inglés *Very Low Frequency*, *Low Frequency*, *Very High Frequency*) tal como resume la figura 2.18 en dónde además la energía de la descarga se encuentra principalmente alojada en las frecuencias VLF y LF.

Según el rango de frecuencia con el que se trabaje, se podría obtener información relacionada con la polaridad, el tipo e intensidad de la descarga, y sin importar del rango de frecuencia, se es capaz de informar la posición espacial y el tiempo de ocurrencia de la descarga [15].

Pulsos transitorios de polaridad vertical en el rango LF y VLF se propagan a lo largo de la tierra y han sido usados para detectar y localizar corrientes de retorno por varios años [41]. Sensores que operan en LF y VLF pueden también ser usados para detectar y localizar pulsos producidos por nubes. Estos tipos de sensores pueden detectar y localizar rayos muy distantes debido a que señales en el rango VLF se pueden propagar miles de kilómetros, porque se reflejan entre la ionósfera y la tierra. Esto representa una gran ventaja porque pueden ser detectadas descargas que ocurren en el océano, donde no se pueden instalar sensores [25, 41]. En el rango VLF, debido al amplio rango de detección, se hace posible construir sistemas globales con la capacidad de monitorear la actividad eléctrica atmosférica de todo el globo. Estos sistemas proveen información sobre la posición espacial y el tiempo de ocurrencia de la descargas, y cuentan con una cobertura de, a lo menos, 4000 Km de distancia desde la fuente. Los sistemas en el rango de frecuencia

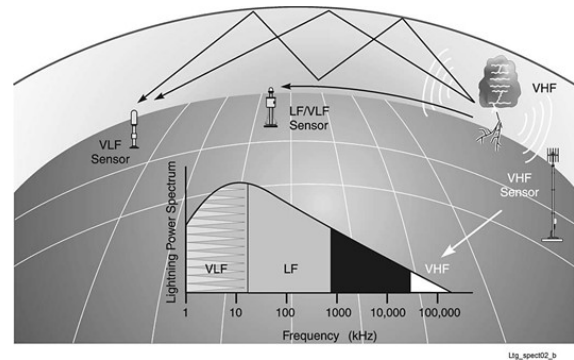


Figura 2.18: Frecuencias radiadas por una descarga eléctrica. Adaptado de [15]

LF detectan descargas a distancias intermedias, cercanas a los 400 Km, y son capaces de determinar la posición geográfica en dos dimensiones (X, Y) con una buena resolución espacial y temporal, proveen además información del tipo de descargas y de la intensidad de ésta. Generalmente son redes nacionales y/o regionales de alta eficiencia quienes trabajan bajo estas condiciones [41].

Hay más de 60 LLS (*Lightning Location System*) a lo largo del mundo que emplean instrumentación comercial en el rango VLF/LF. La mayoría de ellos utilizan sensores fabricados por LLP/Global Atmospheric (*Lightning Location Protection/Global Atmospheric*). Global Atmospheric es reconocida por ser el mayor fabricante de equipamientos y operador de servicios de datos en todo el mundo. Cambiando su nombre a Vaisala-GAI Inc. la compañía es ahora parte de la división de sensores remotos de Vaisala, otro gigante de la radiodetección, fundada en Estados Unidos por tres científicos de la Universidad de Arizona, Dr. E. Philip Krider, Dr. Burt Pifer y Dr. Martin Uman. Algunas redes que operan con estos equipos, son la red internacional de colaboración europea llamada EUCLID, el *Japan Lightning Detection Network* JLDN, la red nacional Brasileña BrasilDAT, *Canadian Lightning Detection Network* CLDN, *South African National Network*, *Australian Lightning Detection Network* ALDIS, entre otros. En la figura 2.19 se ilustra la presencia de los equipamientos Vaisala en el mundo, según la misma compañía [41, 42].



Figura 2.19: Presencia de equipamientos Vaisala en el mundo al 2010. Extraído de [43]

Sensores que operan en el rango VHF son igual de sensibles al proceso de ruptura y a los procesos de los “*leaders*”, que ocurren en descargas de nube a tierra y dentro de la nube [25]. Las señales VHF tienden a estar limitadas por la línea de visión, es decir, no son capaces de propagarse más allá del horizonte, por lo que los sistemas que operan en este rango de frecuencia tienen un rango más limitado de cobertura. Sin embargo, debido a su corta duración, las fuentes de emisión de VHF pueden ser modeladas como puntos en el espacio, por lo que su localización puede hacerse con alta precisión [25]. Sistemas que trabajan con frecuencias pertenecientes al rango de 30 a 300 MHz, pueden obtener información referente a la polaridad, el tipo de descarga (nube a nube, nube a tierra, tierra a nube, nube a aire) e intensidad de ésta. La posición de incidencia se puede determinar e incluso la trayectoria del canal en tres dimensiones (X, Y, Z) con alta resolución, tanto temporal como espacial. Los sistemas que operan en este rango pueden detectar descargas a una distancia de  $\sim 100$  Km. Algunos sistemas comerciales que trabajan en este rango

son *The New Mexico Tech 3D Lightning Mapping Array* NMT Lightning Array, Vaisala SAFIR, Vaisala GAI LDAR II, los cuales ofrecen mapas 3D como parte de sus servicios [25].

### 2.2.1. World Wide Lightning Location Network (WWLLN)

La red internacional World Wide Lightning Location Network (WWLLN), es una red fundada en el año 2003, liderada por el profesor Robert Holzworth de la universidad de Washington, que funciona con la cooperación de diferentes universidades de todo el mundo y que pretende construir una red de detección y localización de descargas eléctricas atmosféricas con cobertura en todo el globo. Debido a su propósito, la WWLLN trabaja en VLF con sensores de polarización vertical utilizando un método semejante al mencionado TOA. Según lo que informa la propia WWLLN en su sitio oficial "wwlln.net/new", para la localización de cada *stroke* se requiere el "tiempo de llegada en grupo" (*Time of Group Arrival*, TOGA) de al menos 5 sensores de la red. Estos sensores pueden estar a varios miles de kilómetros del punto de descarga. Cada sensor de la red consta básicamente de un receptor VLF y de un GPS.

El arreglo de sensores, geográficamente hablando, es importante. Un rayo que se encuentre rodeado de sensores podrá ser detectado y localizado con una mayor precisión que uno que se produzca afuera del arreglo, tal como se ilustra en la figura 2.20 donde se ejemplifica esta situación usando tan solo tres. Este hecho hace inferir con facilidad que debido a que la tierra no tiene bordes, un espaciamiento uniforme de sensores alrededor del mundo será lo ideal (evitando así que ocurran descargas "al exterior de la red"), pero debido a las dificultades obvias referentes a las masas de agua en donde no es posible instalar sensores y/o los lugares escasamente poblados, se hace difícil este propósito.

Típicamente alrededor del 15 % al 30 % de las descargas detectadas por un sensor son detectados por cinco sensores, siendo éstas las más fuertes. Investigaciones recientes de la propia red, revelan que la eficiencia de detección, para descargas de 30kA es de aproximadamente un 30 % globalmente. Para mejorar esta situación la solución parece obvia, pero para poder dar cobertura con un espaciamiento de 1000km entre sensores, se requerirían 5000 en todo el mundo; y si el espaciamiento fuera de 3000km, serían necesarios entre 50 a 60 sensores. Acorde a su sitio web, en la actualidad la WWLLN cuenta con alrededor de 40 sensores instalados alrededor del mundo y se encuentran trabajando para expandir esta cantidad a 60 en los próximos años [44].

Debido a que se comparte un interés común en la investigación referente a la AEA alrededor de todo el globo, es que se realiza el proyecto de la construcción de un sensor para aportar en el mejoramiento de la eficiencia y cobertura del sistema. En los capítulos

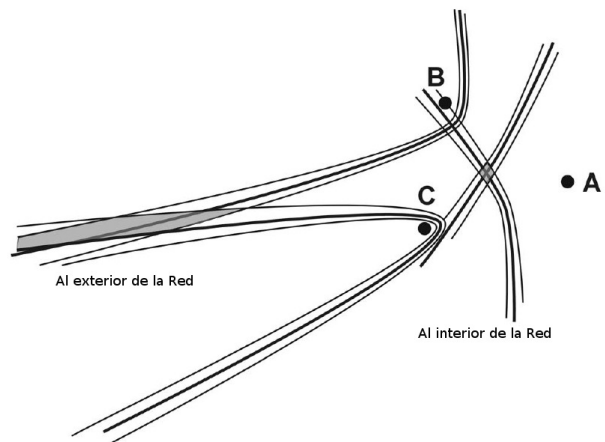


Figura 2.20: Ilustración de diferencia en la localización de rayos al interior o exterior de la red. Adaptado de [15]

siguientes se documentará la construcción del sensor, los circuitos impresos, piezas ensamblados y funcionamiento de ellos, las pruebas de rutina para corroborar el funcionamiento y cada paso necesario para la exitosa adhesión a la red.

### 2.2.2. Técnica de detección de la WWLLN

Los sistemas de localización de descargas que utilizan sensores de radiación electromagnética, son principalmente de dos clases. El primero es del tipo MDF (*Magnetic Direction Finding*) en donde se recolecta información de cada estación, y cada una de estas es capaz de entregar una dirección hacia donde se encuentra la descarga (siendo la intersección de las informaciones el punto de impacto). La segunda clase de sistema es del tipo que utiliza solo el tiempo de llegada (*Time of Arrival*, TOA), la cual usa las diferencias de tiempo de llegada, de los impulsos generados por las descargas a diferentes de sensores.

Los sistemas que usan solo el tiempo de llegada para la identificación del punto de impacto, necesitan medir básicamente dos variables de las señales recibidas, las cuales son el tiempo de llegada que éstas tienen al sensor y la forma de onda VLF que se recibe. A su vez hay dos formas de usar la información recibida. Una es midiendo la diferencia de tiempo (ATD) [45] haciendo correlaciones entre las formas de ondas recibidas en diferentes pares de sensores y enviando toda la forma de onda a un servidor central. La segunda forma es midiendo la tasa de cambio de la fase del esférico (o *sferics* en inglés) con respecto a la frecuencia del tiempo disparo para encontrar el tiempo de llegada de grupo a cada par de receptores y enviando a un servidor central únicamente un número (*Time of Group Arrival*, TOGA) [46].

#### 2.2.2.a. Localización solo por tiempo

Para todos los métodos de radio localización usando solo el tiempo, son requeridos al menos tres pares independientes de sensores, se decir 4 sitios de receptores (la WWLLN se exige cinco sensores), para una localización no ambigua. La diferencia en el tiempo de llegada para un par de sitios, es solo relevante si es que puede ser deducido desde aquí, el tiempo absoluto de ocurrencia del rayo y esto es posible una vez que el rayo ha sido localizado. Este es el caso cuando el tiempo individual de llegada de un esférico puede ser determinado (TOA o TOGA), entonces la diferencia es simplemente la diferencia entre los dos tiempos, así como cuando la forma de onda del esférico de un par de sitios son procesados juntos para determinar el ATD para ese par, sin buscar tiempos individuales de llegada [46].

A pesar de que el tiempo de llegada (TOA) de una VLF no es claramente definido, el esférico puede ser detectado cuando la amplitud en todo el ancho de banda de la señal se incrementa por sobre lo que se consideraría como "ruido ambiente", a su vez, se ha estudiado que es más efectivo medir la tasa de cambio de la amplitud de la señal, para una determinada frecuencia, por lo que se ha utilizado éste como un criterio de detección [46].

El muestreo de las señales radiadas se realiza a una tasa aproximada de unos 50kHz, esto quiere decir que dos muestras consecutivas tienen un espaciamiento aproximado de unos 20  $\mu s$ , así es que se mide la amplitud de muestras consecutivas y se mide la diferencia entre ambas, cuando este valor supera un umbral, se considera el tiempo de la segunda muestra, como el tiempo  $t_0$ , tiempo de disparo (el tiempo de disparo no es el TOGA, pero

es un valor bastante aproximado, el cual tiene un nivel de precisión relativo a la precisión del GPS que se está utilizando, para determinarlo) [46].

### 2.2.2.b. TOGA, teoría básica

El tiempo de disparo  $t_0$  es un sustituto adecuado para el TOGA, si se tiene en mente los errores que se están arrastrando por esto. Esta aseveración tiene un error aleatorio de unos  $20 \mu s$  al menos, debido a la tasa de muestreo mencionada previamente. El segundo error que se tiene es un error sistemático, inherente a las mediciones y se debe a que el umbral de disparo es alcanzado más tempranamente en las formas de ondas de esféricos más fuertes que en los esféricos débiles, además un esférico de un determinado rayo es más fuerte en los receptores más cercanos a la descarga (la señal radiada ha viajado una menor distancia, la energía disipada en su viaje ha sido menor, por ende la señal es más fuerte), produciendo un disparo más temprano en el receptor más cercano. El tiempo de disparo,  $t_0$ , es definido como cierto punto en la digitalizada forma de onda VLF y puede ser determinado con una precisión cercana a unos cientos de nanosegundos (definido y limitada por la precisión del GPS), siendo la misión ahora encontrar una corrección a éste para determinar el TOGA [46].

La corriente de retorno típica alcanza su máximo en aproximadamente  $2 \mu s$  y decaen desde este punto hasta la mitad de su magnitud en unos  $40 \mu s$ , como resultado se tienen pulsos cortos de unos  $100 \mu s$  en un espectro de frecuencia bastante amplio, que va desde la banda ULF hasta frecuencia óptica. Investigadores apuntan a que la mayor parte de la potencia de un rayo se encuentra localizada en la primera corriente de retorno, dentro de los 2 km más bajos de esta (la cual es una muy baja fracción de todo el largo de onda), así la fuente de radiación VLF es un pequeño elemento de corriente. Esta última aseveración es de suma importancia porque debido a esto se dice que todas las componentes de la serie de Fourier que descompone la señal radiada se encuentran en fase. Se tiene la siguiente ecuación genérica de campo eléctrico

$$E(r, t, \omega) = \sum A(\omega) \text{Cos}(\phi(\omega)) \quad (2.11)$$

donde  $\phi$  está definido como

$$\phi(\omega) = \omega t - k(\omega)r + \phi_0 \quad (2.12)$$

siendo  $k$  el vector de onda y  $r$  la distancia hacia la fuente (hacia el punto donde ha caído el rayo). Luego diferenciando la ecuación respecto de la frecuencia se tiene

$$\frac{d\phi}{d\omega} = t - r \frac{dk}{d\omega} = t - \frac{r}{\nu_g(\omega)} \quad (2.13)$$

siendo  $\nu_g$  la velocidad de grupo, dependiente de la frecuencia [46].

De la definición de velocidad de grupo, el tiempo,  $t_g(\omega)$ , tomado por el grupo de onda que viaja desde el lugar de incidencia del rayo (y de la corriente de retorno) hasta el receptor, ubicado a una distancia  $r$ , es  $\frac{r}{\nu_g(\omega)}$ . La ecuación 2.13 será cero cuando  $t = t_g(\omega)$ , lo cual significa que el tiempo de viaje de grupo a una frecuencia  $\omega$  podría ser encontrado

a simple prueba y error. Sin embargo es fácil medir la variación de fase respecto de la frecuencia, por lo que se obtendrá

$$t_g(\omega) = t_0 - \frac{d\phi}{d\omega} \quad (2.14)$$

Si el espectro de energía del esférico estuviese siempre concentrado en una estrecha banda centrada en  $\omega_a$  se podría utilizar (2.14) para determinar el TOGA desde la variación de fase respecto de la frecuencia, a la frecuencia  $\omega_a$  e instante  $t_0$ . Por otra parte, para maximizar la utilidad de los datos extraídos se aplica una regresión lineal de mínimos cuadrados para  $\phi(\omega)$  abarcando los rangos de frecuencia dentro del rango 6 - 22 kHz. La pendiente de la regresión lineal será la mejor estimación de la variación de fase respecto de la frecuencia, por lo que la determinación del TOGA y definición del mismo, quedará de la siguiente forma:

*“El TOGA de un esférico es el instante cuando la regresión lineal de la fase versus la frecuencia sobre una específica banda, tiene una pendiente cero” [46].*

Este instante depende de la banda de frecuencia especificada. Se escoge la banda 6 - 22kHz porque es donde se sabe que la amplitud del esférico es la más alta.

Así finalmente se tiene la relación

$$TOGA = t_s + \overline{t_g(\omega)} \quad (2.15)$$

donde  $t_s$  es el tiempo absoluto de ocurrencia del rayo (en UTC) y  $t_g(\omega)$  es el tiempo de viaje de grupo desde la fuente de emisión hasta el receptor, por ende el valor del tiempo TOGA está en horario UTC [46].

# Capítulo 3

## Sensor de detección

En los capítulos anteriores se habló de como fue evolucionando el monitoreo de la AEA, se hizo mención a las diferentes técnicas utilizadas y se nombraron algunos sistemas que se dedican a esto y con que fines lo han hecho. De ellos se desprende la *World Wide Lightning Location Network* (WWLLN), la cual es una red internacional que busca monitorear la AEA de todo el planeta. Es para esto que se ha trabajado en conjunto con el profesor Robert Holzworth para la construcción de un sensor que ha sido puesto en marcha a principios del mes de mayo del 2017 y así colaborar con la investigación referente al tema.

El sensor construido consta de cuatro partes principales, las que son:

- Antena VLF
- PreAmp (Pre-amplificador)
- SU (Service Unit)
- GPS

de las cuales fueron construidas tres (Antena, Preamp y SU), siendo el GPS adquirido directamente de un proveedor de Reino Unido (Diamond Point International).

### 3.1. Fundamento de funcionamiento

El funcionamiento del sensor, para captar las señales radiadas, se basa en la Ley de Faraday. Recordando que la ley es

$$fem = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3.1)$$

en donde  $fem$  es la tensión inducida en la “varilla” de longitud  $l$ ,  $\vec{E}$  es el vector campo eléctrico y  $d\vec{l}$  es el diferencial de longitud de la “varilla” en cuestión.

Según la ecuación 3.1 la tensión inducida en un conductor es igual a la integral cerrada del producto punto entre el campo eléctrico y el diferencial de largo. Por otra parte, retomando la consideración de que las descargas se consideran verticales, tal como ilustra

la figura 3.1 es que se estima que el campo eléctrico es vertical, por lo que la disposición de la antena debe ser también de esta forma, para que el ángulo con el diferencial de longitud sea cero.

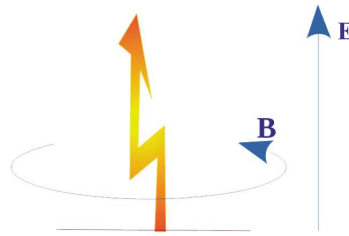


Figura 3.1: Esquema *return stroke* y orientación de campos

De esta forma es que se disponen varillas verticales, a las cuales se les llamará “Antena VLF” y se medirá la diferencia de potencial existente entre éstas y una referencia (tierra) aislada de la red eléctrica, para así “medir” y registrar las descargas ocurridas en un radio de hasta 4000 kilómetros. Para poder medir la tensión inducida en las varillas y no contaminar la medición, es que éstas se conectan todas en un extremo con un cable coaxial apantallado, el cual permite proteger la tensión inducida de señales no deseadas.

Se dispone de un circuito simple, para amplificar la señal, y así poder facilitar la lectura de la misma. Por otra parte se dispone de una antena GPS la cual es utilizada para registrar el tiempo de ocurrencia de cada perturbación percibida por la antena. Ambas señales, la proveniente de la antena VLF y la proveniente del GPS, ingresan a un computador a través de la tarjeta de sonido, como si fuera un sonido estéreo, siendo la onda VLF la que ingresa por el canal izquierdo y la PPS (*Pulse Per Second*) por el derecho. Es así que luego la señal es enviada a la Universidad de Washington para ser procesada y comparada con los otros sensores.

## 3.2. Antena VLF

Probablemente, de todo el sensor, sea la parte más simple de construir, pero a la vez se puede decir que es la más importante.

La figura 3.2 muestra una esquema de lo que es la antena y sus partes principales, una descripción más detallada es dada en el capítulo siguiente. Así, la antena consiste en:

- 1 tubo de PVC de 80mm, que sirve de protección frente al clima
- 1 Tapa de tubería de PVC para el tubo.
- 4 Conductores, espaciados 90° entre sí.
- 1 segmento de 20 cm cable coaxial, de 75 ohm, con conector BNC

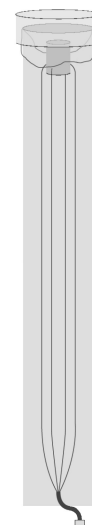


Figura 3.2: Esquema Antena VLF

### 3.3. Preamp

El circuito llamado Preamp tiene la misión de amplificar la débil señal percibida. Debido a la naturaleza de la antena VLF, es normal de que las tensiones inducidas en ella sean de un amplio espectro de frecuencia, por lo que como primera etapa del preamp, se ha dispuesto de un filtro pasa bajo que se puede ver en la figura 3.3 el cual es de muy fácil diseño, fácil de implementar, de bajo costo y ayuda bastante a limpiar las imágenes percibidas. Las frecuencias de interés, están en el rango VLF, el cual tiene un límite superior de 30kHz. En la figura (3.4) se ve como desde los 30kHz en adelante comienzan a atenuarse las frecuencias de entrada, por otra parte, siendo la frecuencia de corte igual a la frecuencia en la que la amplitud se reduce en 3dB de la máxima, resulta que la frecuencia de corte del filtro implementado es cercana a los 110kHz, la cual se puede ver con claridad en el diagrama de bode de la figura (3.4).

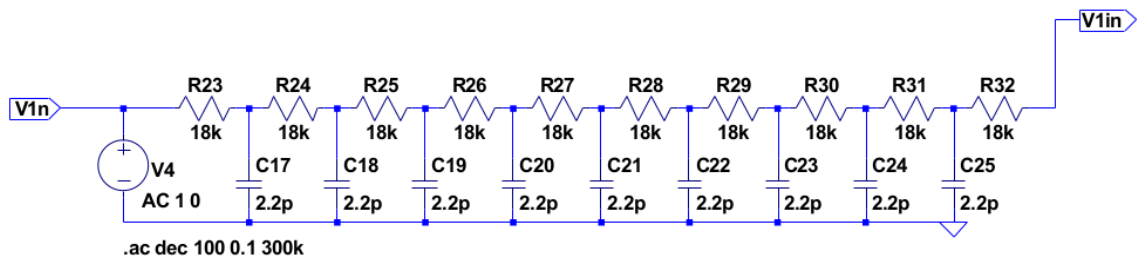


Figura 3.3: Filtro Pasa Bajo utilizado en PREAMP

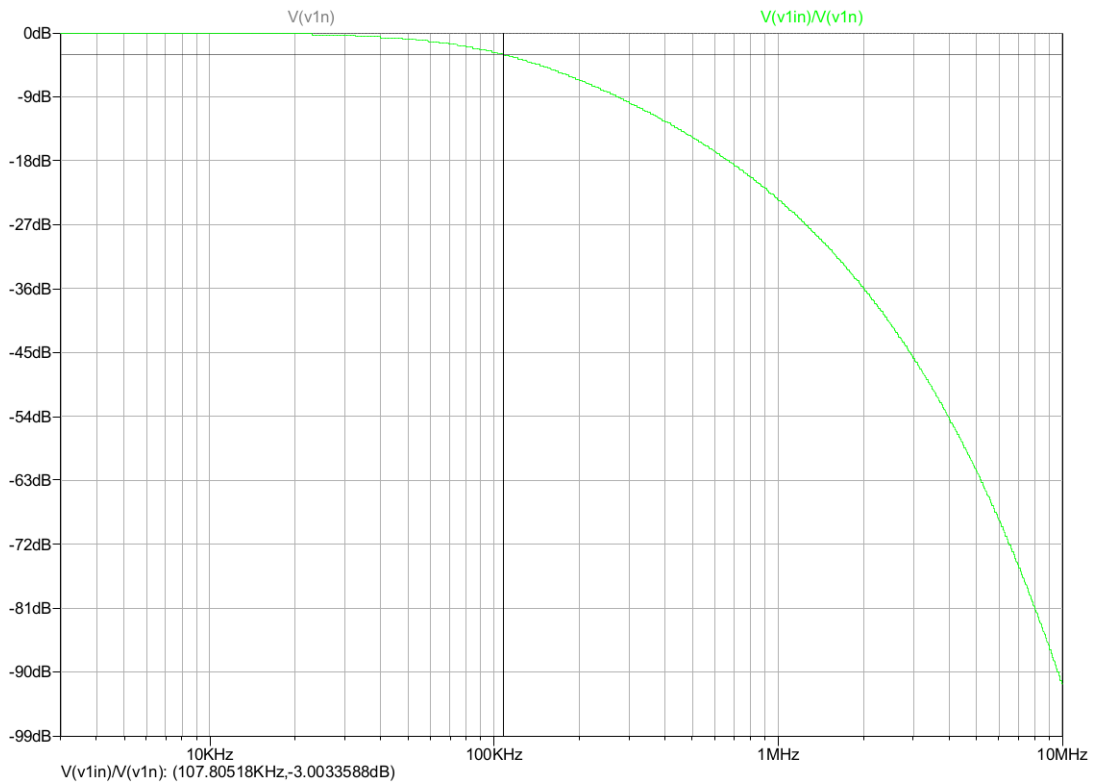


Figura 3.4: Diagrama de bode filtro pasa bajo

Luego de este filtro viene la etapa de amplificación, la cual se hace mediante el circuito de la figura 3.5.

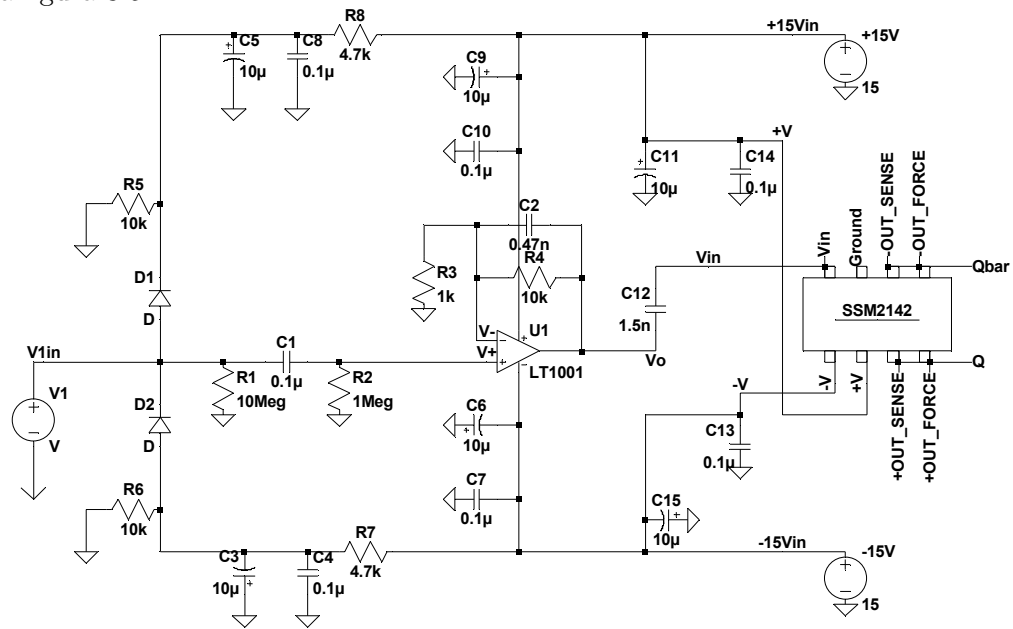


Figura 3.5: PREAMP

Este circuito se puede descomponer en 3 partes, las cuales son:

- Amplificación con Amplificador Operacional AD744
- Amplificación con circuito integrado SSM2142
- Polarización y arreglo protección sobretensión

### 3.3.1. Amplificación con Amplificador Operacional AD744

La amplificación con el amplificador operacional AD744, es la primera amplificación de la señal, la cual se ve con claridad en la figura 3.6

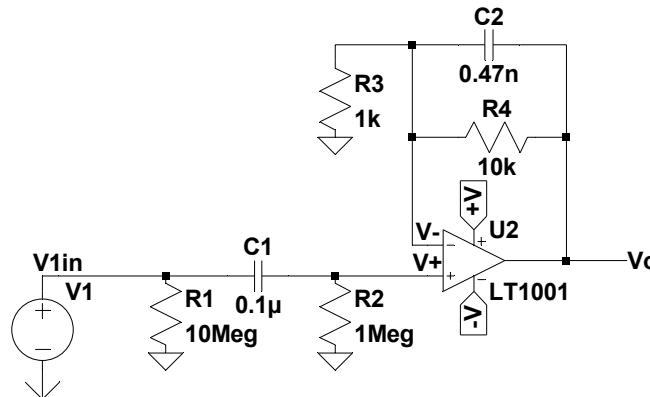


Figura 3.6: Amplificador Operacional AD744

En la figura 3.6 se ha dibujado una fuente de tensión continua, sólo para representar las señal de entrada que proviene de la antena, (bajo ninguna condición se considera que las señales que ingresan al preamplificador sean continuas o de alguna característica semejante, al menos no en este análisis). Por otra parte, la fuente V1 ha sido dibujada con el terminal negativo conectado a un terminal común, no conectado al resto del circuito, este terminal común representa la conexión de la pantalla del cable coaxial, la cual está conectada a la carcasa del circuito PREAMP, que también está conectado a las planchas de zinc en el techo del edificio B y que no posee conexión alguna con el resto del circuito.

Del circuito de la figura 3.6 es posible decir que

$$V^- = V^+ \quad (3.2)$$

$$V1 = V_{C1} + V^+ \quad (3.3)$$

$$V_o = V_{C2} + V^- \quad (3.4)$$

luego

$$\begin{aligned} V1 &= V_{C1} + V_{R2} \\ V1 &= V_{C1} + R_2 C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} \\ V1(s) &= V_{C1}(s) (1 + sR_2 C_1) \\ V_{C1}(s) &= V1(s) \left( \frac{1}{1 + sR_2 C_1} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} V_o &= V_{C2} + V_{R3} \\ V_o &= V_{C2} + R_3 \left( C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} + \frac{V_{C2}}{R_4} \right) \\ V_o(s) &= V_{C2}(s) \left( 1 + sR_3 C_2 + \frac{R_3}{R_4} \right) \\ V_{C2}(s) &= V_o(s) \left( \frac{R_4}{R_4 + sR_3 R_4 C_2 + R_3} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Entonces juntando 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se obtiene lo siguiente

$$\begin{aligned} V^- &= V^+ \\ V_o - V_{C2} &= V1 - V_{C1} \\ V_o - \left( V_o(s) \left( \frac{R_4}{R_4 + sR_3 R_4 C_2 + R_3} \right) \right) &= V1(s) - \left( V1(s) \left( \frac{1}{1 + sR_2 C_1} \right) \right) \\ V_o(s) \left( \frac{sR_3 R_4 C_2 + R_3}{R_4 + sR_3 R_4 C_2 + R_3} \right) &= V1(s) \left( \frac{sR_2 C_1}{1 + sR_2 C_1} \right) \\ V_o(s) &= V1(s) \frac{(sR_2 C_1)(R_4 + sR_3 R_4 C_2 + R_3)}{(1 + sR_2 C_1)(sR_3 R_4 C_2 + R_3)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

teniendo en cuenta que los valores de las componentes son los siguientes

$$\begin{aligned} R_1 &= 10M\Omega & R_3 &= 1k\Omega \\ R_2 &= 1M\Omega & R_4 &= 10k\Omega \\ C_1 &= 100nF & C_2 &= 0,47nF \end{aligned}$$

la función de transferencia del amplificador operacional AD744 queda finalmente como

$$V_o(s) = \frac{(s^2 \cdot 0,47 \cdot 10^{-3} + s \cdot 1,1 \cdot 10^3)}{(1 + s \cdot 10^{-1})(s \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} + 10^3)} \quad (3.8)$$

Entonces la señal proveniente del filtro ingresa por “V1in” al AD744, sale por “Vo” y a través del condensador de acople C12 ingresa al circuito integrado SSM2142. La figura 3.7 muestra el diagrama de bode del circuito.



Figura 3.7: Diagrama Bode Amplificador Operacional AD744

### 3.3.2. Amplificación con circuito integrado SSM2142

La señal de entrada “Vin” se conecta al circuito integrado SSM2142, el cual resulta ser un arreglo de amplificadores operacionales que se ilustra en la figura 3.8.

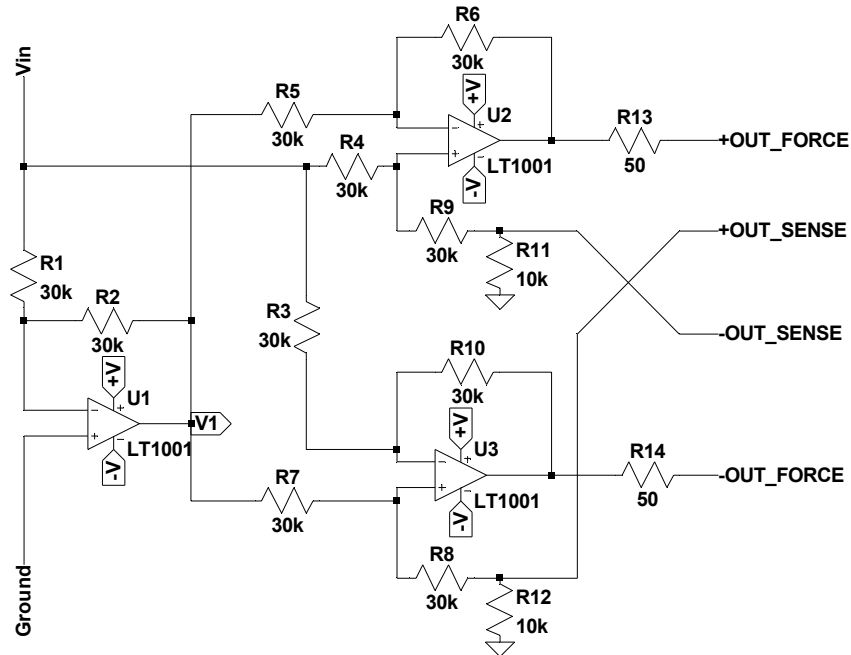


Figura 3.8: Circuito integrado SSM2142

El amplificador operacional de la izquierda, de la figura 3.8 es un amplificador operacional inversor de ganancia unitaria, siendo su misión generar la señal de entrada invertida. Los amplificadores operacionales restantes, son idénticos, cambiando únicamente el orden de la tensión de alimentación, como se ve en la figura 3.9

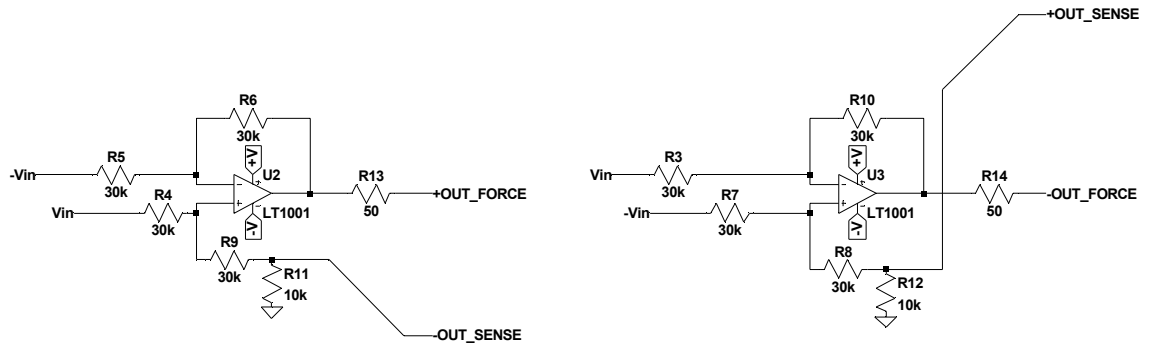


Figura 3.9: Amplificadores Operacionales internos de CI SSM2142

Así, el análisis del circuito integrado SSM2142, se resume a sólo uno de estos dos operacionales. En la figura 3.10 se muestra el amplificador operacional, con la salvedad de que la tierra que va conectada a la resistencia  $R_c$ , no se conecta, debido a que es así como se hace funcionar el circuito integrado, con el terminal “Ground” desconectado (al aire)

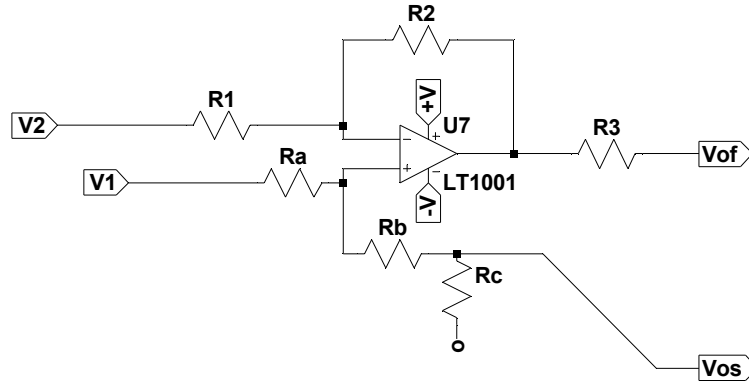


Figura 3.10: Amplificador Operacional genérico para análisis de CI SSM2142

de este amplificador operacional resulta la ecuación 3.9

$$V_{of} = \left( -V_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{os} \frac{R_a}{R_a + R_b} \right) \frac{(R_1 + R_2)}{R_1} + \left( \frac{V_1 R_b + V_{os} R_a}{R_a + R_b} \right) \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (3.9)$$

luego, si se tiene en cuenta que todas las resistencias del CI, son de valor R igual a 30kΩ y que para el funcionamiento de este, se conectan los terminales +OUT\_FORCE con +OUT\_SENSE y -OUT\_FORCE con -OUT\_SENSE, resulta lo siguiente

$$V_{of} = \left( -V_2 \frac{1}{2} + V_{os} \frac{1}{2} \right) (2) + \left( \frac{V_1 + V_{os}}{2} \right) 2 \quad (3.10)$$

$$V_{of} = (-V_2 + V_{os}) + (V_1 + V_{os}) \quad (3.11)$$

por otra parte, para cada amplificador operacional de la figura 3.9 se cumple

$$V_{of1} = V_{os2} \qquad V_{of2} = V_{os1} \quad (3.12)$$

siendo 1 y 2 números arbitrarios que representan los amplificadores operacionales, de la izquierda y derecha respectivamente, de la figura 3.9. De esta forma la ecuación 3.11 se reescribe para cada amplificador operacional, resultando lo siguiente

$$\begin{aligned} V_{of1} &= (-V_2 + V_{os1}) + (V_1 + V_{os1}) \\ V_{of2} &= (-V_2 + V_{os2}) + (V_1 + V_{os2}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} V_{of1} &= (-V_2 + V_{of2}) + (V_1 + V_{of2}) \\ V_{of2} &= (-V_2 + V_{of1}) + (V_1 + V_{of1}) \end{aligned} \quad (3.14)$$

finalmente para los amplificadores operacionales 1 y 2 se cumplen respectivamente que

$$V_1 = V_{in} \qquad V_2 = -V_{in} \qquad , \text{para operacional 1} \qquad (3.15)$$

$$V_1 = -V_{in} \qquad V_2 = V_{in} \qquad , \text{para operacional 2} \qquad (3.16)$$

obteniéndose, luego de reducir que

$$V_{of1} = \frac{2}{3}V_{in} \qquad V_{of2} = -\frac{2}{3}V_{in} \qquad (3.17)$$

El CI SSM2142 es altamente ocupado en sistemas de audio, debido a que facilita el transporte de señales, ayudando a absorber la atenuación que podría presentarse producto de los conductores. El circuito integrado se hace funcionar como amplificador diferencial, que amplifica la diferencia entre las dos entradas de voltaje. En sus terminales, “Q” y “Qbar”, tiene  $\frac{2}{3}$  y  $-\frac{2}{3}$ , de la señal de entrada respectivamente, con lo que se obtiene una señal de salida cercana a dos veces la señal de entrada.

El cuidado de la fase original, se pierde de forma relativa debido a los condensadores integrados en el circuito, esta salvedad puede ser considerada en el algoritmo de localización, para corrección del mismo y su mejora. El Preamp en su conjunto, considerando su etapa de filtrado y de amplificación, cuenta con una respuesta en frecuencia de hasta 21dB tal como se ve en el siguiente diagrama.

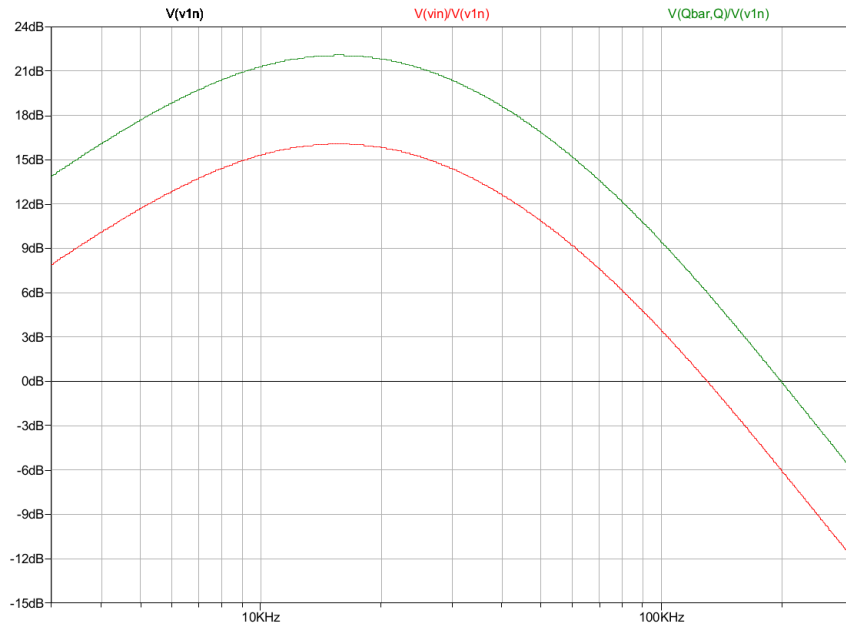


Figura 3.11: Diagrama Bode Preamp

En la figura 3.11 se ven  $V(v1n)$  en negro,  $V(vin)/V(v1n)$  en rojo y  $V(Qbar,Q)/V(v1n)$  en verde los cuales son el voltaje inducido en la antena VLF, la relación de tensión entre esta señal y la salida del amplificador operacional AD744 y la relación entre la diferencia de las salidas del SSM2142 y el voltaje de entrada al Preamp respectivamente. En el diagrama Bode, el eje de las abscisas va desde los 3kHz hasta los 300kHz. Este es el rango de frecuencia comprendido para las señales VLF y LF. A los 3kHz la amplificación es de

13.8dB, a los 9kHz es 21dB, manteniéndose superior a este valor hasta poco más de los 20 kHz. Siendo las frecuencias que van desde los 3kHz hasta los 30kHz, las pertenecientes al rango VLF, podemos decir que con esta configuración se obtiene la ganancia más pobre a los 3kHz y la mejor cerca de los 15kHz, por otra parte a los 30kHz se tienen una ganancia no despreciable de 20dB.

### 3.3.3. Polarización y arreglo protección sobretensión

Del circuito PREAMP no se ha hecho mención al arreglo de diodos mostrado en la figura 3.12, la función de estos es proteger la fuente y componentes del circuito de alguna sobretensión atmosférica producida en algún punto muy cercano al sensor o por una descarga muy violenta y evitar así que el circuito se sature.

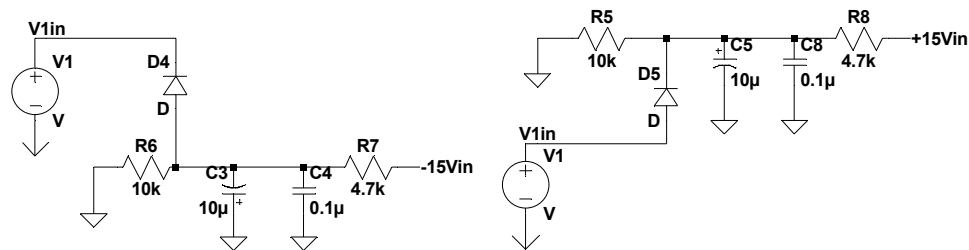


Figura 3.12: Arreglo para protección sobretensión y no saturación de Amplificador Operacional

## 3.4. GPS

El equipamiento GPS consta de dos partes, la cual es la antena GPS que se encarga de comunicarse con los satélites que hayan disponibles y recibir la información provenientes de ellos y el modulo “RES SMT 360”, el cual es el encargado de recibir la información proveniente del GPS y proveer los terminales necesarios para poder transmitirlo a un computador y hacer lectura de ellos.

La antena adquirida está diseñada para cualquier tipo de ambiente, es a prueba de agua, soporta un rango de temperatura desde los  $-40^{\circ}C$  hasta  $90^{\circ}C$ , necesita ser alimentada con solo 3.3V los cuales son provistos desde la placa “Res SMT 360” y es bastante compacta y de fácil instalación.

La placa RES SMT 360, es una tarjeta que cuenta con “Multi-GNSS Timing Module”, el cual es un modulo diseñado para trabajar con señales débiles y/o en zonas urbanas. En esta tarjeta se encuentran los pines de alimentación de la antena y la placa misma, como también los pines de comunicación para poder leer la información recibida desde la antena GPS y para poder comunicarse con el equipo y/o cambiar el protocolo de comunicación.

La información requerida que proviene desde el GPS son los denominados PPS (*Pulse Per Second*), los cuales son utilizados para la sincronización de las diferentes estaciones de la WWLLN. Gracias a esta información es que se puede aspirar a generar una red Global.

Mas información referente a estos equipos puede ser encontradas en los *datasheet* correspondientes, o en el sitio web del fabricante [www.trimble.com/timing](http://www.trimble.com/timing).

### 3.5. SU

De las diferentes partes que componen el sensor, la que se puede denominar como el corazón es la SU (*Service Unit*). En esta placa es donde se suministra la energía al sensor, donde se encuentra alojado la tarjeta RES SMT 360, en donde se conecta este último a la antena, donde se recibe la señal proveniente del Preamp, del GPS y donde se juntan y envían a la red, tal como se resume en el esquema siguiente.



Figura 3.13: Esquema de conexiones *Service Unit*

- Alimentación Preamp,

Viene dada por el circuito integrado NMH1215S. Este CI se encarga de proporcionar  $\pm 15$  y  $0V$  de forma independiente y aislada de la red y de toda otra parte del circuito. Esto es muy importante porque debido a la naturaleza de la señal, podría ser muy fácil de contaminar con información no proveniente de la antena VLF. Así se suplementan  $\pm 15V$  para la polarización de los amplificadores operacionales y  $0V$ , otorgando una “tierra” aislada de la red y todas partes.

- VLF,

Se refiere a la señal proveniente del Preamp, la cual es conducida por dos conductores coaxiales.

Manteniéndose la necesidad de que la señal VLF debe estar aislada de toda forma de la red y de cualquier parte del circuito, su ingreso a la SU se hace mediante un transformador A262A2E, tal como se ilustra en la figura 3.14.

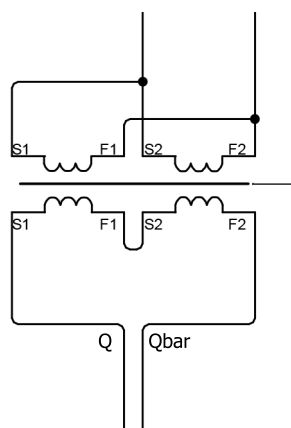


Figura 3.14: Ingreso señal VLF a SU

- PPS,

Son los pulsos por segundo provenientes del GPS. Cuando el GPS recibe la señal de cuatro o más satélites GPS, comenzarán a producirse los PPS.

- Alimentación Principal,

Consta de 12V DC, siendo ésta la única vía de alimentación. La potencia de la fuente no necesita ser alta, y para la implementación del proyecto se optó por el uso de una fuente de 12W.

- VLF + PPS,

Son las salidas deseadas de la SU, con esta información es con la cual trabaja la WWLLN. Como ya se mencionó previamente esto se hace a través de un cable de audio estéreo, enviando por el canal izquierdo la señal VLF y por el derecho la PPS.

- Tarjeta de Sonido,

Para la correcta operación del sensor, la tarjeta de sonido del computador al cual se están ingresando los datos, debe ser tal que trabaje en los rangos de frecuencia deseados, es decir, que pueda operar al menos entre 3 a 30kHz. La utilizada para este proyecto fue una “Asus Xonar DSX PCI Express 7.1 Channel Audio Card”.

Algunas características relevantes, de la tarjeta de sonido, son las siguientes:

- Relación señal ruido (SNR): 100dB
- Respuesta Frecuencia: < 10 Hz a 40 kHz -3dB
- Frecuencia de muestreo: 24 bit 96 kHz 7.1 Canal DAC
- Frecuencia de muestreo: 24 bit 96 kHz ADC

- TSIP,

Es un protocolo de información propio de Trimble el cual podría ser cambiado a NMEA. Este es una línea de texto por segundo con el detalle de cuántos satélites se están viendo, la hora exacta, la ubicación de la antena, etc.

Finalmente hay una parte de la *Service Unit* que no ha sido mencionada la cual guarda relación con la interfaz del usuario. Con tal de dar aviso de funcionamiento a quien esté alojando la SU, se disponen de semiconductores led, para dar señal de una buena operación, conectados a distintos circuitos integrados. Así se tienen dos semiconductores led conectados al NMH1215S, para dar señal de que el Preamplificador está energizado debidamente. La conexión del GPS con el computador se hace mediante el circuito integrado MAX202ECPE el cual se encarga de recibir y transportar la información proveniente del GPS. Este circuito cuenta además con protección contra descargas electrostáticas de hasta +-15kV. En relación a la interfaz con el usuario, tiene conectado un led que provee aviso de que la señal TSIP está siendo transmitida hacia el computador, y que además el circuito se encuentra debidamente energizado. Por otra parte se conecta también con un NE555 conectado en modo monoestable, al cual se le envían los PPS invertidos para dar aviso al usuario de que están siendo recibidos los PPS. En un normal funcionamiento, el led asociado a los PPS debiera parpadear uno o dos veces y luego permanecer apagado hasta que el GPS se encuentre sincronizado con los satélites. El uso del CI NE555 permite hacer más estrecha la señal PPS, para que así sea posible percibir un pulso por segundo y hacer que el led parpadee una vez por segundo. El led asociado a la señal TSIP parpadea cuando esta señal está presente, lo cual es un indicador de que el GPS funciona apropiadamente. Los datos TSIP al ser una línea de texto, es una señal que puede durar desde 200 a 400 milisegundos, dependiendo de cuanta información contenga la señal, por

lo que el tiempo que permanezca encendido el led también puede variar. El semiconductor led correspondiente a los PPS y el correspondiente a la señal TSIP, debieran parpadear prácticamente al unísono (al ojo humano, percibido al mismo tiempo).

En la figura 3.15 se puede ver un esquema del circuito completo, en el apéndice 5 el circuito impreso en escala 1:1 y en la figura 3.16 ambos lados del circuito fabricado. En la figura 3.15 en la izquierda inferior se ve el transformador por el cual ingresa la señal VLF. A la derecha de este se encuentran los terminales que se conectarán al cableado que energizará el Preamp, se visualizan los led conectados a este que dan aviso de que el preamplificador se encuentra energizado, y el circuito integrado que le suministra energía de forma independiente. En la parte derecha se aprecian los circuitos integrados MAX202ECPE y NE555, con sus correspondientes conexiones. Estos dos últimos CI son alimentados con 5V provenientes del regulador de tensión 7805. Finalmente en la parte del centro inferior, se ven un conjunto de terminales, los cuales representan los 8pin de conexión disponibles en la tarjeta del GPS. En la parte superior del esquema, se ven las salidas de la SU y el terminal de alimentación.

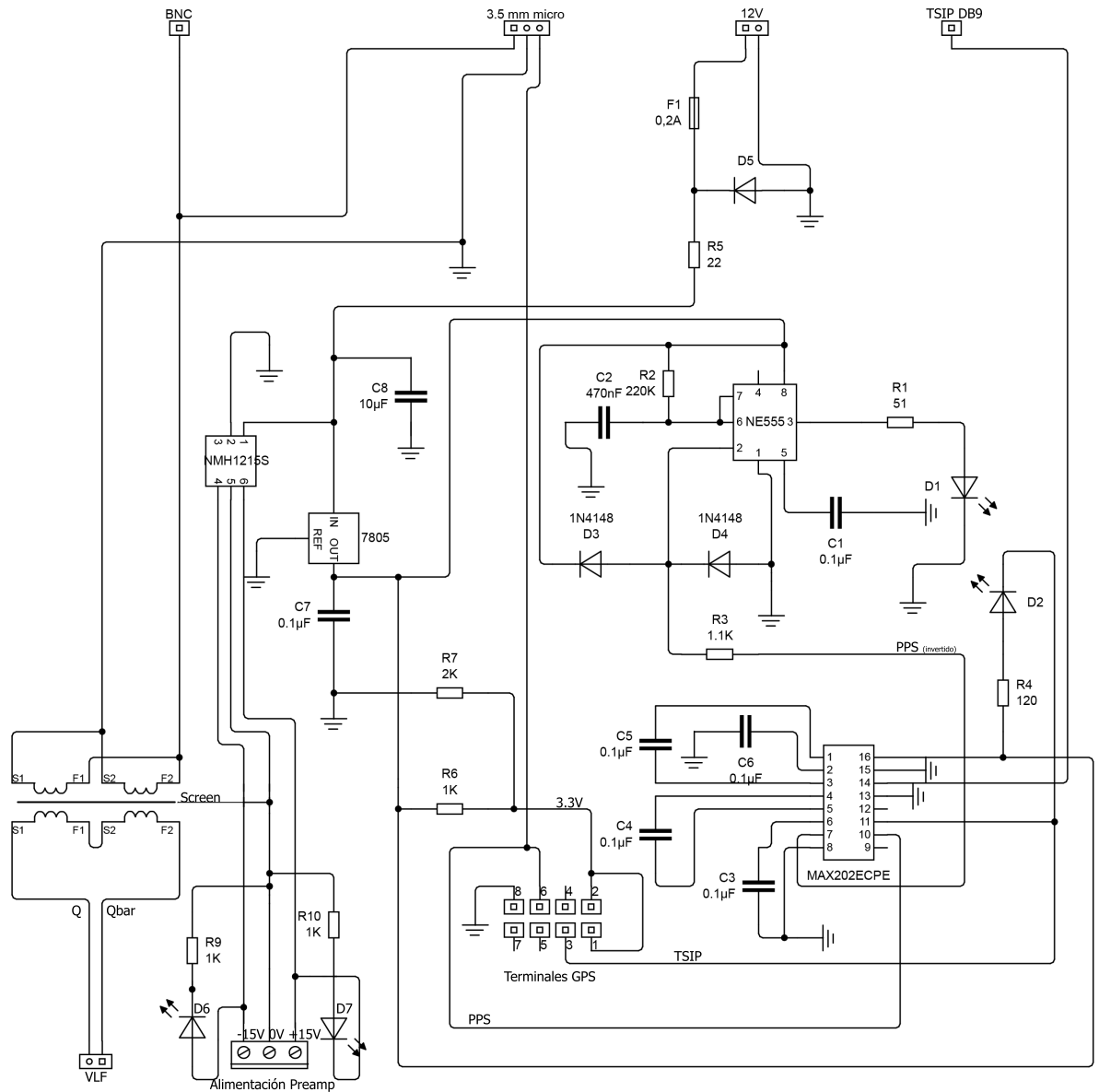


Figura 3.15: Esquema de circuito interno SU

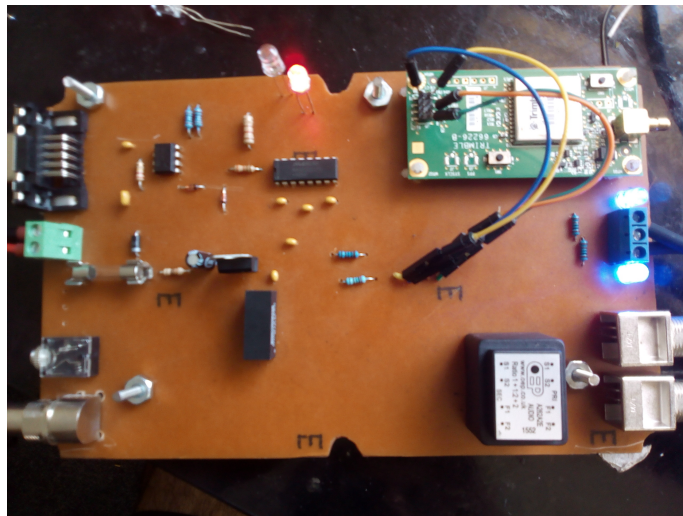
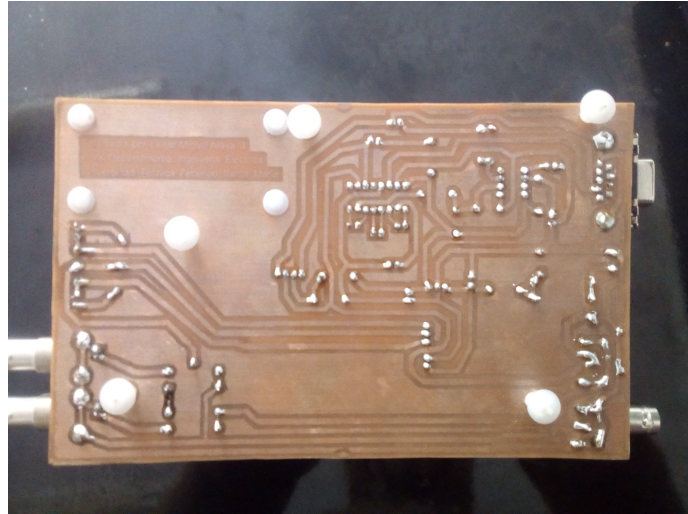


Figura 3.16: Circuito impreso terminado. Ambos lados

# Capítulo 4

## Construcción, instalación y prueba del sensor

En el capítulo 3 se habló de todos los aspectos técnicos del sensor, su principio de funcionamiento y de como se trabajaba la información para no ser adulterada, y/o contaminada. En el presente capítulo se documentará el armado y ensamblado de las piezas y se hará mención a ciertos aspectos técnicos considerados.

### 4.1. Armado antena VLF

La antena VLF, tal como se dijo en el capítulo anterior, es sumamente fácil de construir y para ello se requieren:

- Tubo de PVC de al menos 2 pulgadas
- Tapa de PVC correspondiente al tubo
- Conductores de cobre (al menos 8 metros)
- 1 Corcho
- Cinta adhesiva
- Hilo de pescar o similar

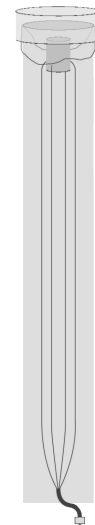


Figura 4.1: Esquema Antena VLF

Se requieren “varillas” verticales, para las cuales se ha seleccionado un conductor 14 AWG. Los trozos de conductor están unidos todos en el extremo inferior y conectados al centro del cable coaxial, y en el extremo superior, se encuentran separados y unidos a una

“estructura” de tal forma de poder sostenerlos verticalmente. La estructura seleccionada es un material doméstico, un corcho, el cual se utilizó para reunir las piezas de cobre alrededor de él. Para que la fijación no se pierda, todos los conductores fueron incrustados un par de milímetros en el material y luego amarrados con cinta adhesiva. A su vez la estructura de soporte tiene conectado un hilo de pescar, el cual es utilizado para fijarla a la parte superior del tubo de PVC con la ayuda de la tapa del tubo de PVC.

Para la parte superior de la antena VLF, no produce mayor problema ni se deben hacer consideraciones relevantes al momento de hacerlo. Para la parte inferior si se tomó una precaución, la cual fue la unión de los conductores con el cable BNC. Debido a las diferencias en los espesores de los conductores, es que la unión se hizo de forma mecánica mediante argollas de ensamblaje, así como se ve en la figura 4.2. El efecto de reflexión de onda no es observado y/o considerado en el estudio, esto se debe a dos consideraciones básicas. La primera es que debido a la amplia longitud de onda de las señales estudiadas, de 10 a 100 km, el medio por el cual se propaga la señal (las varillas del sensor, de largo 2 m) se consideran muy pequeñas, por ende el fenómeno no es perceptible considerablemente. La segunda razón es porque el método TOGA trabaja básicamente con el frente de onda y no con la señal completa, o al menos con un ciclo de ella, por lo tanto, si es que hubiera una reflexión considerable, esta ocurriría una vez la señal ya ha sido procesada.



Figura 4.2: Anclaje mecánico utilizado para unir los conductores de distintos espesor

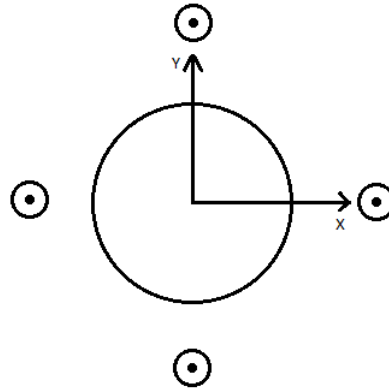


Figura 4.3: Esquema distribución cables, vista superior

El largo seleccionado para los conductores fue de 2.7 metros y para el conductor BNC fue de 40cm. El largo del tubo es de 3 metros, así los cuatro conductores debiesen poder estar estirados en el interior. El espaciamiento entre los conductores fue escogido arbitrariamente de  $90^\circ$ , tal como muestra la figura 4.3, para distribuirlos alrededor del corcho lo más equidistante posible, sin embargo esta consideración no es un requerimiento para que el dispositivo funcione adecuadamente, se consideró más bien para distribuir el esfuerzo en el material de soporte (corcho). Para una cómoda manipulación es que se ha escogido que el cable BNC pueda sobresalir una porción del tubo, para poder ser conectado al preamplificador y luego ser escondido de vuelta en la tubería.

## 4.2. Preamp

El circuito Preamp es diseñado para amplificar la señal generada por la antena VLF, para así poder transmitirla y analizarla, debido a esto es que se requiere que se sitúe justo después de la antena VLF, lo cual obliga a que su construcción considere las condiciones climáticas y sea de un material que lo proteja de cualquier fuente de interferencia para la señal VLF. Es así que se adquiere un cofre de aluminio 1590DD, de la marca Hammond Manufacturing el cual cumple estas condiciones.

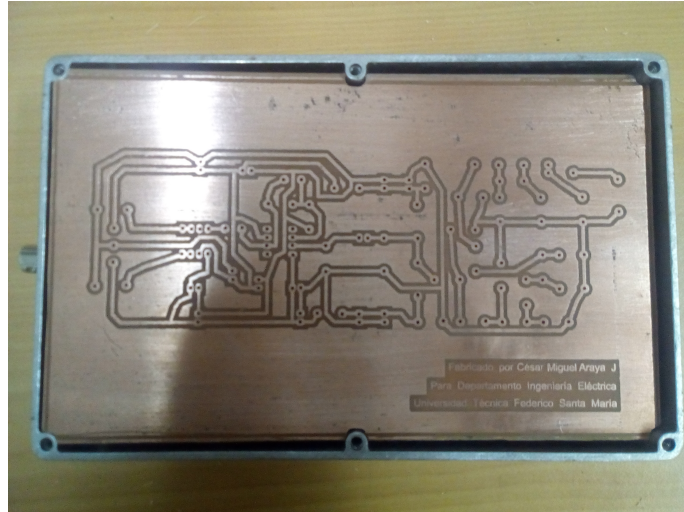


Figura 4.4: Presentación circuito impreso al interior cofre de aluminio

La figura 4.4 muestra como cabe el circuito impreso dentro del cofre y la imagen 4.5 el preamplificador terminado.

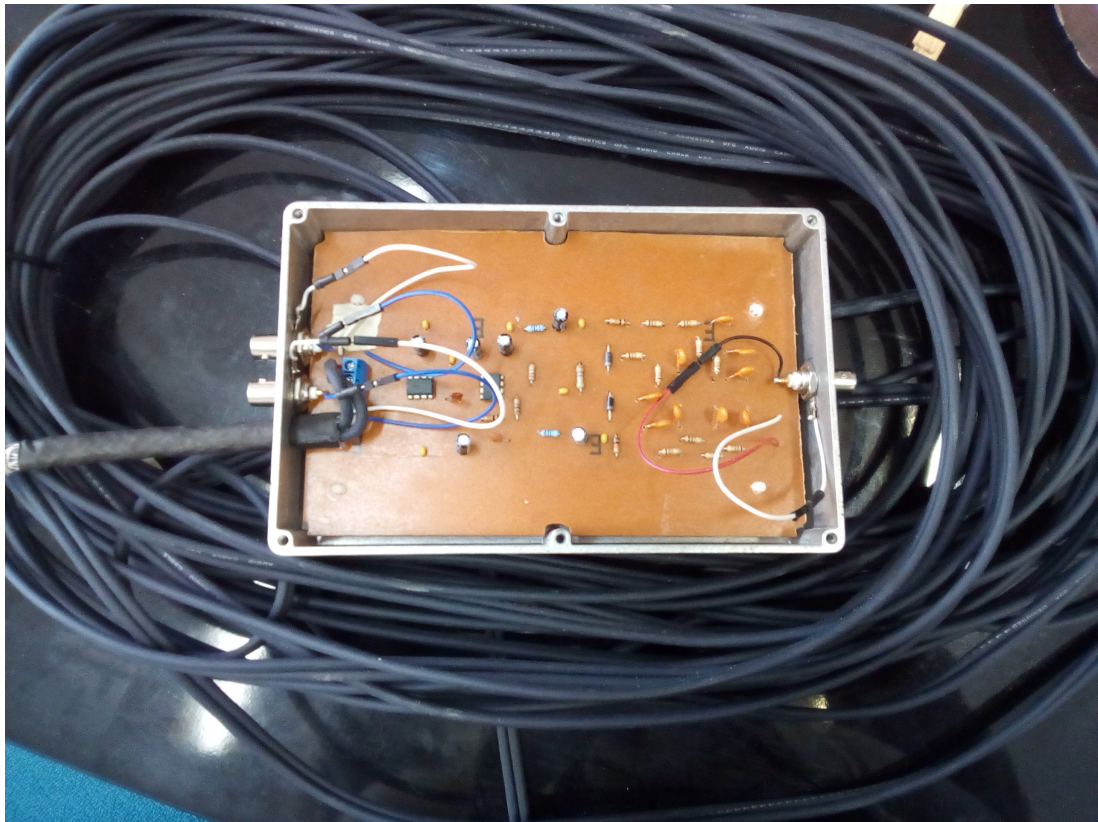


Figura 4.5: Preamp terminado

En el lado derecho del cofre se puede apreciar la entrada del conector BNC, al cual irá conectada la antena VLF. La forma de instalación del circuito es disponiendo este terminal

hacia arriba, para que así el cable conector proveniente desde la antena VLF descienda y sea conectado fácilmente. Luego se debe utilizar el mismo tubo de PVC que protege la antena VLF para proteger el conector, por lo cual es que debe ser empujado hacia arriba el preamplificador y asegurarse de que el conector quedo debidamente protegido por el tubo de PVC.

En el lado izquierdo se ven tres terminales. Dos de ellos son conectores BNC los cuales transportarán las señales Q y Qbar hacia la *service unit*, el tercero es la alimentación que llega al circuito. La alimentación se hace mediante un cable de audio estéreo en donde se envían los  $\pm 15\text{v}$  por los canales izquierdo y derecho y los  $0\text{V}$  a través de la pantalla del mismo cable. Para proteger su ingreso al cofre, de forma mecánica, es que se protege el conductor con tres mallas de aluminio y un aislante termo-contracturante.



Figura 4.6: Enmallado de aluminio para protección mecánica

La figura 4.6 muestra el enmallado previamente citado y la 4.7 el cofre ya instalado. El cofre del preamplificador protege el circuito del clima y de las ondas electromagnéticas presentes en el ambiente en el que se encuentra, es por esto que se aprecia una amarra de cobre alrededor del cofre, esta fue instalada debido a que el cofre debe ser aterrizado, pero para este hecho se debe cumplir la particularidad que la “tierra” a la que se conecta no debe ser la tierra de la red, debido a que se podrían inducir señales no deseadas, es por esta razón, que en este lugar donde deba conectarse a una estructura metálica, disponible en el área para que esta haga la función de tierra, esta será una tierra artificial. Para el caso de estudio, tal como se ve en la figura 4.8, 4.9 y 4.10, se utilizó el techo del edificio, el cual esta cubierto de planchas de zinc que funcionarán como una tierra artificial para la medición.



Figura 4.7: disposición final de Preamp



Figura 4.8: Tierra Preamp



Figura 4.9: Lugar de emplazamiento circuito Preamp con muestra porción de techumbre



Figura 4.10: Lugar de emplazamiento circuito Preamp con muestra porción de techumbre y localización antena GPS

### 4.3. Service Unit

Para la construcción de la SU se dispuso del mismo cofre 1590DD utilizado para el preamplificador, pero debido a que este no se encuentra expuesto a la intemperie y aloja una mayor cantidad de conexiones externas, se hizo una alteración en el cofre para poder brindar además una mejor manipulación por parte del usuario, ya sea para conectar la fuente al circuito, energizar el circuito alojado con la antena y/o hacer cambio del fusible. La figura 4.11 muestra una vista del cofre donde se encuentra el conector del cable serial, la entrada de energía, el acceso al fusible, la salida de las señales VLF-PPS y un conector BNC por si se quiere visualizar la señal VLF. Las imágenes en la figura 4.12 muestran el circuito impreso y terminado por ambos lados.

La SU ha sido provista con 4 led para verificar la correcta energización de los elementos. 2 leds azul, visibles en la figura 4.12 indican la correcta energización del PREAMP. Luego los dos led visibles en la figura 4.11, son verde y rojo. El led verde, cuando el equipo ha sido energizado por primera vez, parpadeará 2 o 3 veces y se detendrá. Luego el led rojo comenzará a parpadear cada un segundo de forma indefinida, este led es el indicador de la señal NMEA/TSIP. Mientras el led rojo parpadea, sin el led verde, la señal NMEA/TSIP no ha sido sincronizada con algún satélite. Durante la primera vez que se instala la antena, el proceso de sincronización podría tomar hasta 10 minutos, una vez que el GPS a logrado sincronizarse con un satélite, el led verde y rojo parpadearan ambos cada 1 segundo con un leve desfase entre ellos.

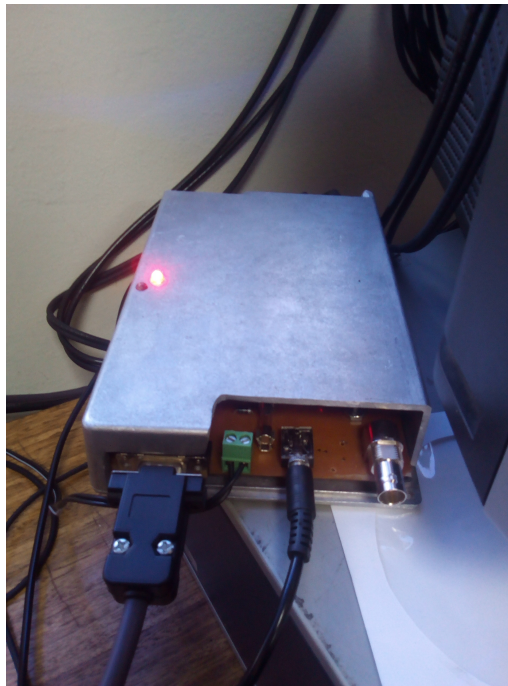


Figura 4.11: Lugar de emplazamiento circuito SU con muestra

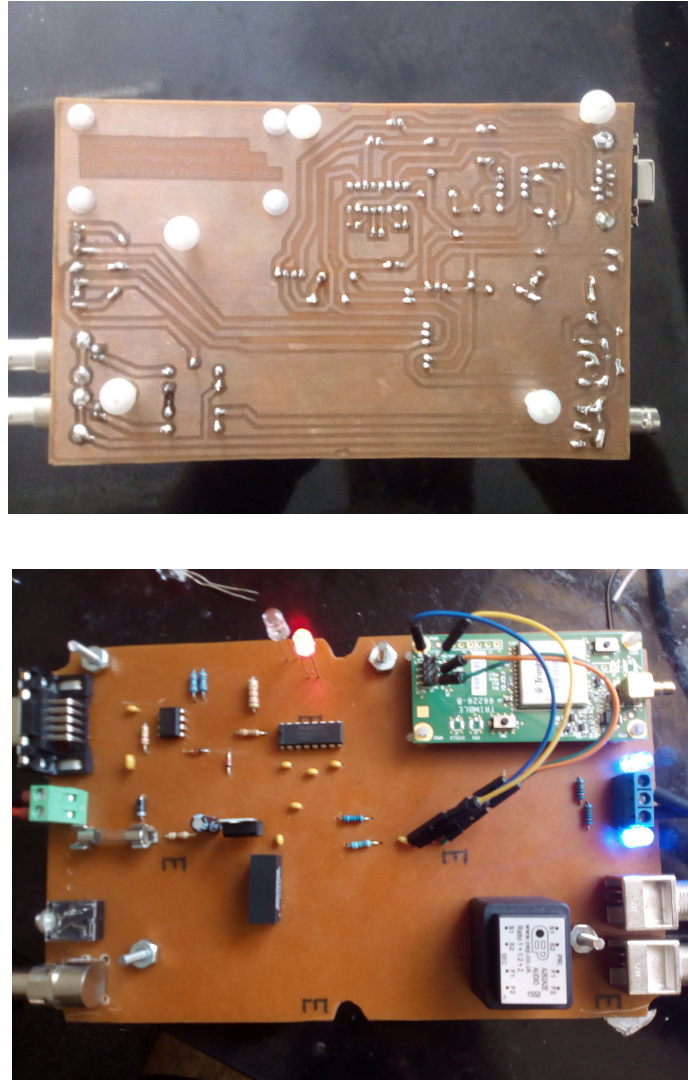


Figura 4.12: Circuito impreso terminado. Ambos lados

#### 4.4. Prueba del Sensor

Como parte del diseño de la SU, se dispone de un terminal de audio, para corroborar el funcionamiento y captura de la señal VLF. Adicional a esto se instala un conector BNC para la visualización de la señal recibida con un osciloscopio. Entonces, con tal de probar el correcto funcionamiento del sensor es que se realiza un ensayo en laboratorio de Alta tensión, acorde al esquema presentado en la figura 4.13.

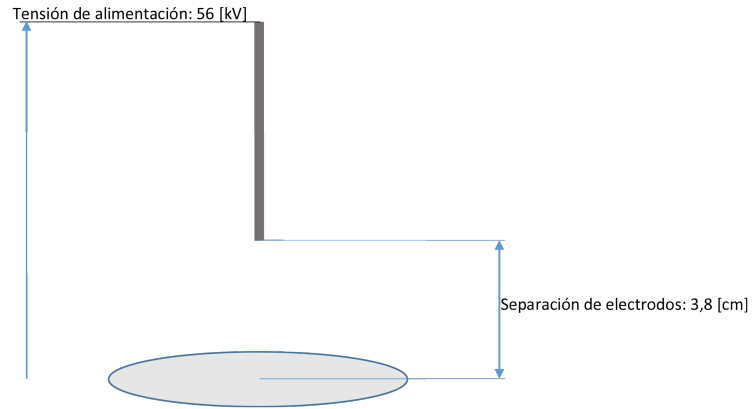


Figura 4.13: Esquema de ensayo sensor

Como resultado se tienen las siguientes oscilografías



Figura 4.14: Oscilografía 1 de ensayo



Figura 4.16: Oscilografía 2 de ensayo

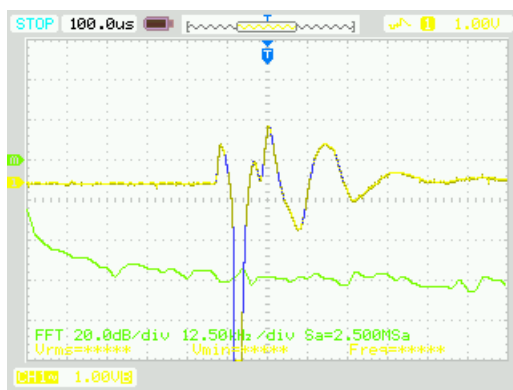


Figura 4.15: Oscilografía 3 de ensayo



Figura 4.17: Oscilografía 4 de ensayo

Del resultado de la configuración hecha en laboratorio, es difícil presentar una conclusión debido a que dentro del proceso de descarga, existen radiaciones desde microsegundos antes de la primera descarga hasta que esta ocurre. De acuerdo a [47] esta forma de onda

puede deberse al proceso previo de ruptura del dieléctrico. La detección de un falso positivo de la red, se descarta debido a la baja energía del presente ensayo, comparado con la energía descargada por una descarga a tierra, esto quiere decir que la propagación de la radiación electromagnética producida por un ensayo en LAT no cuenta con la energía necesaria para propagarse largas distancias y ser detectada por la red, debido a la atenuación natural del medio de propagación, el aire. La tabla 4.1 compara los datos registrados en el ensayo previamente descrito con valores de descargas documentados.

Variable	Ensayo LAT	Descarga atmosférica
Corriente Peak kA	3	30 - 200
Tensión kV	56	10,000 - 100,000

Tabla 4.1: Comparación de valores de corriente peak y tensión registrados, entre un ensayo impulso realizado en LAT y descargas eléctricas atmosféricas

Un estudio más acabado y dedicado a caracterizar las señales radiadas por un ensayo impulso rayo sería necesario para la identificación apropiada de la señal, estudio que escapa del objetivo de este trabajo.

Por otra parte el registro y procesamiento de las señales por parte de la WWLLN es como la figura 4.18

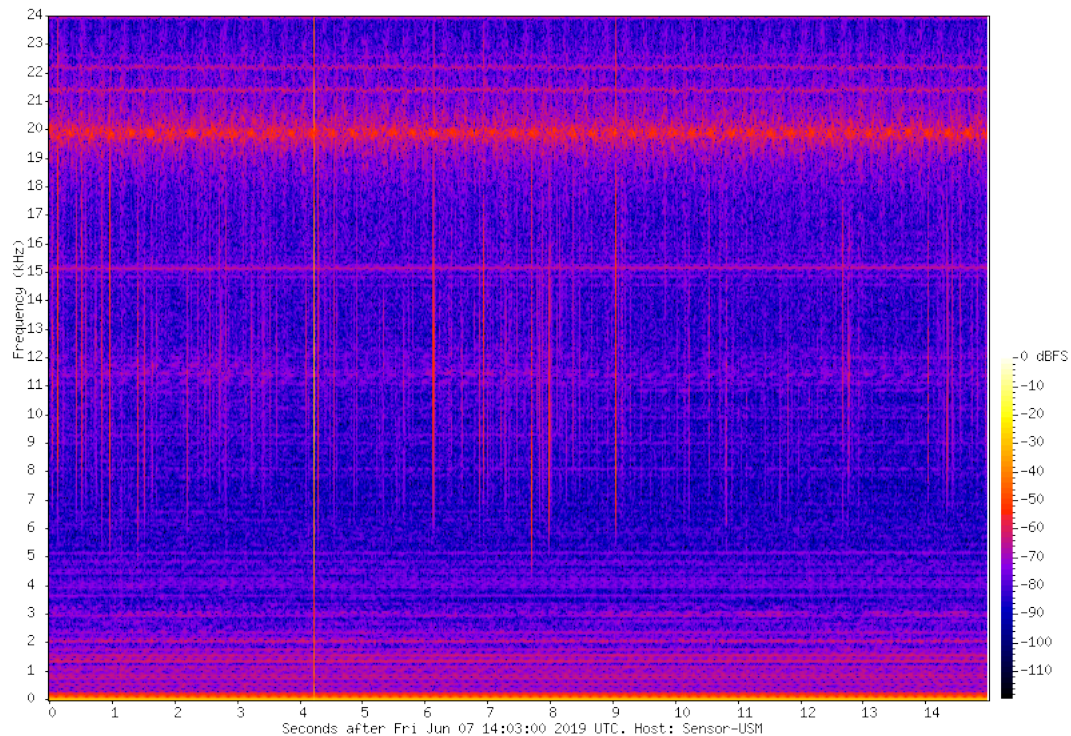


Figura 4.18: Ejemplo de registro señal por parte de la WWLLN

La banda de frecuencia de señales VLF se sitúa entre los 3 y 30kHz, encontrándose la mayor parte de la energía radiada alrededor de los 5 a los 18kHz [15]. Por otra parte se aprecian emisiones en frecuencias cercanas a los 15 a 20 y 21.3 kHz que no han sido

identificadas con precisión, pero podrían corresponder a Alpha/RSDN-20 secondary, JJI (Japanese Navy, FSK) y NPM (MSK Station) de acuerdo a [48].

Los días 05 de Abril y 16 de Junio del año 2019, se presentó en la región de Tarapacá y Valparaíso, respectivamente, actividad eléctrica atmosférica [49,50], la cual fue registrada y procesada por la red WWLLN. En las figuras 4.19 y 4.20 se ven los eventos registrados por la red en las regiones mencionadas, identificando con asteriscos los impactos correspondientes a cada fecha y donde los valores que se ven como líneas de nivel, corresponden a los días de tormenta al año, calculados con los datos de la red desde el 2012 hasta el 2017.

Eventos registrados por la WWLLN en dos días de prueba

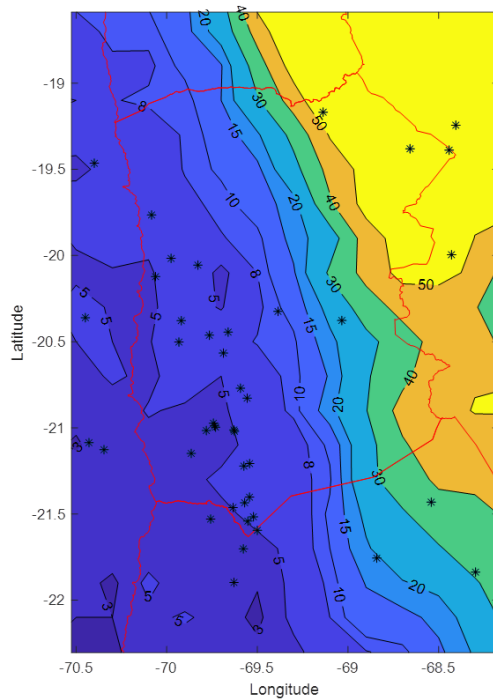


Figura 4.19: Región de Tarapacá, 05 de Abril 2019

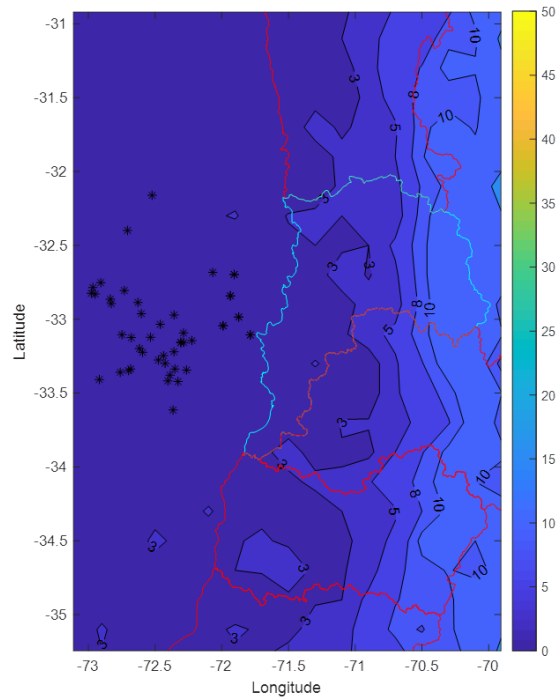


Figura 4.20: Región de Valparaíso, 16 de Junio 2019

Para estos mismos días, los datos globales registrados por la WWLLN fueron los resumidos en la tabla 4.2

Fecha	Impactos registrados globalmente	Impactos localizados por sensor USM	Porcentaje de participación sensor USM
05 de Abril	655,897	103,722	15.8 %
15 de Junio	557,677	86,658	15.5 %

Tabla 4.2: Resumen participación de localización global de sensor USM en la WWLLN

Por parte de la WWLLN se hace mención al rendimiento del sensor, catalogándolo

---

como de los más destacados dentro de las estaciones que pertenecen a la red, estimándose que en promedio, éste ayuda a localizar 100,000 impactos diariamente.

Finalmente, la construcción total del sensor, considerando todas las componentes electrónicas importadas, desde condensadores hasta tarjeta y antena GPS, con el respectivo cableado, cofre de protección e insumos para la fabricación de los circuitos es de aproximadamente de \$450,000 pesos chilenos sin considerar el computador para el procesamiento de datos, internet y sus costos asociados al consumo de energía y utilización de espacio.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Gracias a la información disponible a través de la WWLLN, es que ya se trabaja y construye una mapa isoceraúnico para Chile, siendo este el primero en su categoría, para el país, y que permitirá entre otras cosas mejorar los sistemas de protección en contra descargas atmosféricas, mejorar los sistemas de detección y mejorar la confiabilidad y cálculos de los sistemas de aislación. Por otra parte el aporte en información abre las puertas a la innovación y apertura de nuevos campos de investigación, no mencionados previamente. El estudio e investigación de los parámetros de los rayos en las latitudes del hemisferio sur, también se hacen posible gracias a la incorporación a la red WWLLN.

El trabajo desarrollado, a pesar de su sencillez, agrupa y sintetiza conocimientos básicos de electrónica, de telecomunicaciones, de tecnología de computadores y de campos electromagnéticos. La síntesis de la información y agrupación de esta en un documento habilita la utilización de la misma y reduce coste en tiempo para el inicio de una nueva investigación. Además hace público el interés de colaboración en la investigación y abre la oportunidad a la colaboración con la comunidad científica interesada en el tema, de la región y el mundo.

Se construyó un sensor de detección de descargas atmosféricas, que se logra incorporar a la red WWLLN a partir del día lunes 12 de Junio del año 2017, siendo este día en el que se le da la bienvenida a la universidad Técnica Federico Santa María a la red de colaboración internacional para la detección de descargas atmosféricas en el mundo. Desde esa fecha hasta el día de hoy el sensor ha funcionado de forma continua. El dispositivo fue revisado y calibrado desde el departamento *Earth and Space Sciences* de la universidad de Washington, siendo considerado como un sensor de buen desempeño por la claridad de las señales registradas. La buena calidad de la señal captada por el sensor, en el período que se ha encontrado a prueba, ha permitido mejorar la confiabilidad de detección y eficiencia en la región, además reduce el tiempo de mejora de la red WWLLN en Sudamérica y abre la posibilidad a que más investigadores de la región hagan lo mismo.

Finalmente queda como trabajo pendiente, seguir reforzando la cobertura de la red. Recientes datos recibidos desde ésta, advierten que la AEA detectada en latitudes cercanas a la ciudad de Puerto Montt, es menor a la existente a latitudes más al norte y más al sur de esta localidad. Esta observación podría ser una singularidad a estudiar si es que se descartara en primera instancia que la efectividad de detección de la WWLLN no es la que está ocasionando este “fenómeno”. Es por esto que se plantea como un trabajo futuro la

---

instalación de un sensor adicional en alguna ciudad cercana a Puerto Montt, para reforzar la confiabilidad de detección de la WWLLN en estas latitudes.

# Bibliografía

- [1] R. D. Garreaud, M. Gabriela Nicora, R. E. Bürgesser, and E. E. Ávila, “Lightning in Western Patagonia,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, no. 8, pp. 4471–4485, 2014.
- [2] S. L. y. B. O. Margarita Caballero, “Efecto invernadero, caletamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra,” *Revista Digital Universitaria*, vol. 8, no. 10, pp. 1–12, 2007. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [3] D. M. Romps, J. T. Seeley, D. Vollaro, and J. Molinari, “Projected increase in lightning strikes in the united states due to global warming,” *Science*, vol. 346, no. 6211, pp. 851–854, 2014.
- [4] Carolina Reyes, “Metro valparaíso reanuda operaciones tras suspensión temporal por tormenta eléctrica.” <http://www.biobiochile.cl/noticias/2015/03/24/metro-valparaiso-suspende-servicio-por-caida-de-rayo-en-subestacion-de-villa-alemana.shtml>, 2015. [Online; accessed 24-August-2015].
- [5] R. A. Miller and I. Miller, “Resonancia de schumann (frecuencias rs) y biocomunicaciones,”
- [6] B. y Vidas, “Biografía de Benjamín Franklin,” 2016. [Internet; descargado 3-agosto-2016].
- [7] i. Encyclopedia Britannica, “Cumulonimbus,” 2016. [Internet; descargado 3-agosto-2016].
- [8] O. Pinto and J. H. Diniz, “Tormentas positivas: Sorpresa en los cielos brasileños,” *Ciencia hoy*, vol. 8, no. 44, pp. 42–49, 1998.
- [9] i. Encyclopedia Britannica, “Thunderstorm,” 2016. [Internet; descargado 24-enero-2017].
- [10] J. R. Dwyer and M. A. Uman, “The physics of lightning,” *Physics Reports*, vol. 534, no. 4, pp. 147 – 241, 2014. The Physics of Lightning.
- [11] M. A. Uman, “Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1548–1565, 1988.
- [12] F. C.-A. Juan A. Martínez-Velasco, “Modeling of overhead transmission lines for lightning overvoltage calculations,” *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 18, no. 1, pp. 120–131, 2010.

- [13] P. Chowdhuri, J. G. Anderson, W. A. Chisholm, T. E. Field, M. Ishii, J. A. Martinez, M. B. Marz, J. McDaniel, T. E. McDermott, A. M. Mousa, T. Narita, D. K. Nichols, and T. A. Short, "Parameters of lightning strokes: a review," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 346–358, Jan 2005.
- [14] i. Encyclopedia Britannica, "Thunder," 2015. [Internet; descargado 24-enero-2017].
- [15] K. L. Cummins and M. J. Murphy, "An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the us nldn," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 499–518, 2009.
- [16] i. Encyclopedia Britannica, "Lightning," 2015. [Internet; descargado 24-enero-2017].
- [17] i. Encyclopedia Britannica, "Atmospheric electricity," 2011. [Internet; descargado 24-enero-2017].
- [18] H. Torres, "El rayo," *National University of Colombia-UNIBIBLOS*, 2002.
- [19] H. D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, *Lightning: principles, instruments and applications: review of modern lightning research*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [20] i. Encyclopedia Britannica, "Aleksandr Popov," 1998. [Internet; descargado 04-febrero-2017].
- [21] Wikipedia, "Coherer — wikipedia, the free encyclopedia," 2017. [Online; accessed 5-February-2017].
- [22] Wikipedia, "Audion — wikipedia, the free encyclopedia," 2016. [Online; accessed 5-February-2017].
- [23] Wikipedia contributors, "Radio atmospheric — Wikipedia, the free encyclopedia." [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio\\_atmospheric&oldid=911459376](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio_atmospheric&oldid=911459376), 2019. [Online; accessed 24-September-2019].
- [24] Wikipedia, "Azimuth — wikipedia, the free encyclopedia," 2017. [Online; accessed 16-February-2017].
- [25] K. L. Cummins, M. J. Murphy, and J. V. Tuel, "Lightning detection methods and meteorological applications," in *IV International Symposium on Military Meteorology*, pp. 26–28, 2000.
- [26] E. P. Krider, R. C. Noggle, A. E. Pifer, and D. L. Vance, "Lightning direction-finding systems for forest fire detection," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 61, no. 9, pp. 980–986, 1980.
- [27] F. P. Puebla, "La observación de las tormentas eléctricas desde satélite," *AME Boletín*, vol. 5, no. 31, pp. 38–40, 2011.
- [28] G. Diendorfer, "Lightning Location Systems (LLS)," in *IX International Symposium on Lightning Protection*, 2007.
- [29] "Time-of-Arrival (TOA) Sensors," 2017. [Online; accessed 16-February-2017].

- [30] E. Lewis, R. Harvey, and J. Rasmussen, “Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin,” tech. rep., DTIC Document, 1962.
- [31] Wikipedia, “Interferometría — wikipedia, la enciclopedia libre,” 2016. [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [32] K. L. Cummins, M. J. Murphy, E. A. Bardo, W. L. Hiscox, R. B. Pyle, A. E. Pifer, *et al.*, “A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. D8, pp. 9035–9044, 1998.
- [33] VAISALA, “Technical specifications lightning data information.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [34] World Wide Lightning Location Network, “Network.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [35] NASA MSFC and The University of Alabama in Huntsville, “Optical transient detector.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [36] NASA MSFC and The University of Alabama in Huntsville, “Space station sensor to capture ‘striking’ lightning data.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [37] NASA MSFC and The University of Alabama in Huntsville, “Lightning & atmospheric electricity research.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [38] NASA MSFC and The University of Alabama in Huntsville, “Lightning imaging sensor.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [39] NASA MSFC and The University of Alabama in Huntsville, “Lightning & atmospheric electricity research.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [40] NASA MSFC and The University of Alabama in Huntsville, “Goes - r.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [41] H. D. Betz, K. Schmidt, P. Laroche, P. Blanchet, W. P. Oettinger, E. Defer, Z. Dziewit, and J. Konarski, “An international lightning detection network in europe,” *Atmospheric Research*, vol. 91, no. 2-4, pp. 564–573, 2009.
- [42] K. L. Cummins and M. J. Murphy, “An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the u.s. nldn,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, pp. 499–518, Aug 2009.
- [43] J. Ferrell, “Lightning seminar part 1: Lightning 101, lightning lingo,” 3/15/2010. [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [44] World Wide Lightning Location Network, “How it works.” [Internet; descargado 6-febrero-2017].
- [45] A. C. L. Lee, “An operational system for the remote location of lightning flashes using a vlf arrival time difference technique,” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 630–642, 1986.

- [46] R. L. Dowden, J. B. Brundell, and C. J. Rodger, “Vlf lightning location by time of group arrival (toga) at multiple sites,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 7, pp. 817–830, 2002.
- [47] Z. Baharudin, N. A. Ahmad, M. Fernando, V. Cooray, and J. Mäkelä, “Comparative study on preliminary breakdown pulse trains observed in johor, malaysia and florida, usa,” *Atmospheric Research*, vol. 117, pp. 111 – 121, 2012. Special Issue dedicated to the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP).
- [48] G. Lorenz, “Vlf transmissions (10 - 150 khz),” 2004-2017. Copyright (C) 2004-2017 by Günter Lorenz (glorenz (at) fmlist.org). All rights reserved.
- [49] María José Villarroel, Cristián Núñez, “Intensas lluvias y tormentas eléctricas provocaron corte de ruta entre iquique y alto hospicio.” <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-tarapaca/2019/04/05/intensas-lluvias-y-tormentas-electricas-afectan-a-sectores-de-la-region-de-tarapaca.shtml>, 2019. [Online; accessed 24-September-2019].
- [50] Raul Marin, “Intensa tormenta eléctrica se registró en valparaíso.” <https://www.mega.cl/noticias/nacional/264841-tormenta-electrica-valparaiso-redes-sociales.html>, 2019. [Online; accessed 24-September-2019].

# Esquemáticos de circuitos impresos

En apéndice se incorporan los circuitos impresos de PREAMP y SU, estos son el diseño PCB de cada placa y los circuitos impresos en escala 1:1, que han sido quemado para el desarrollo del proyecto.

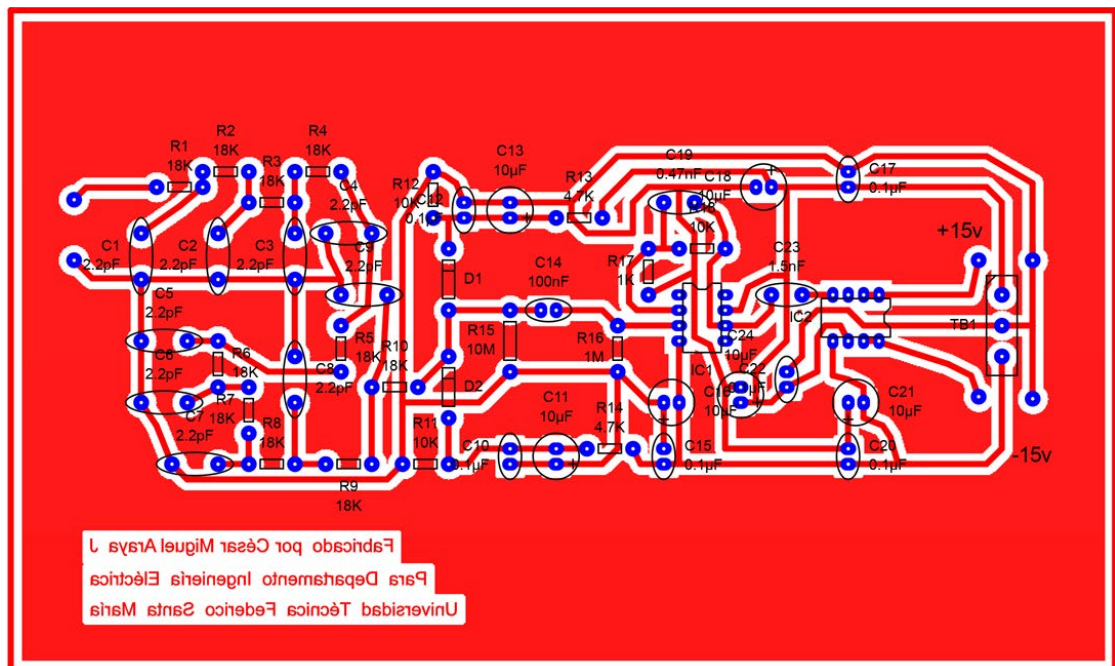


Figura 1: Diseño PCB circuito

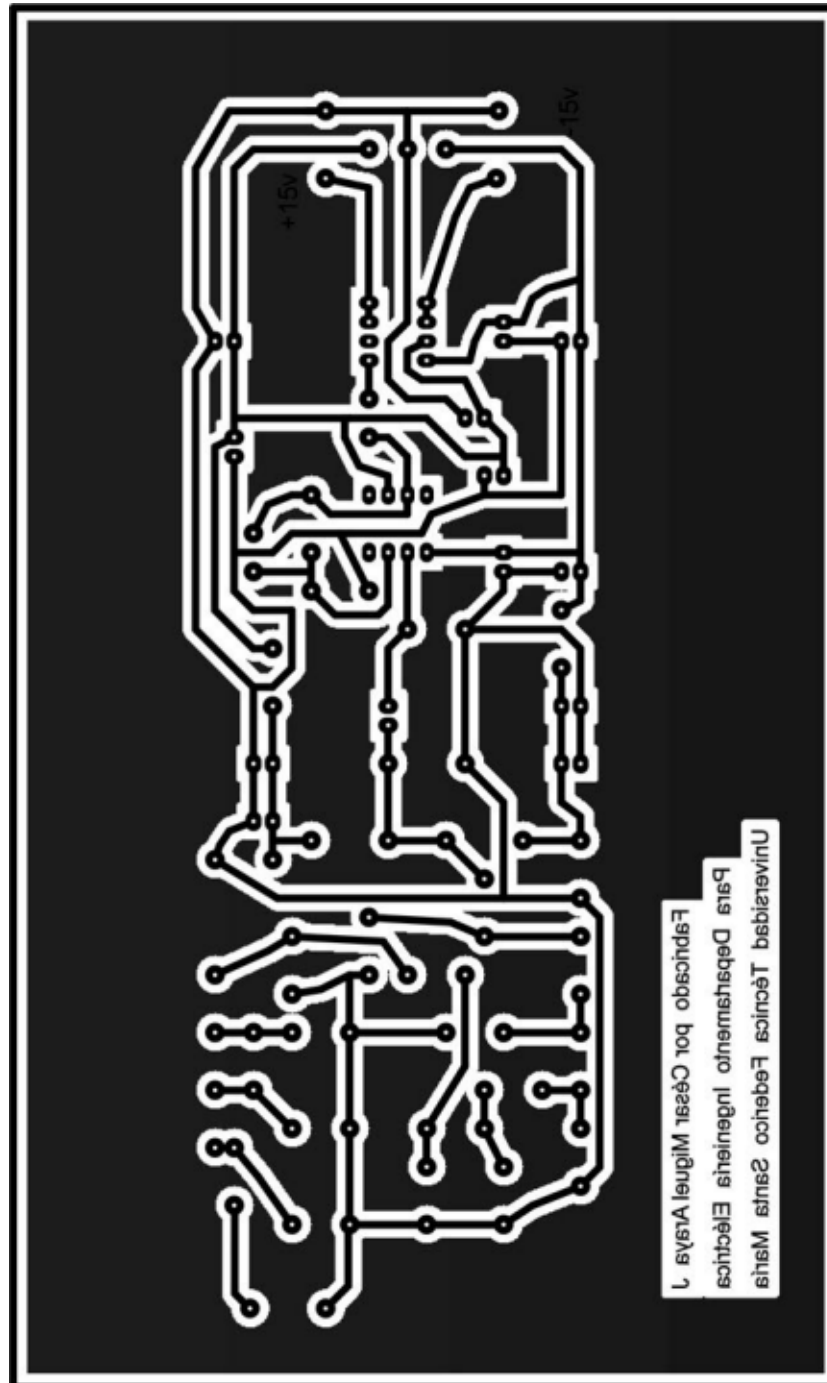


Figura 2: Circuito Impreso a escala 1:1

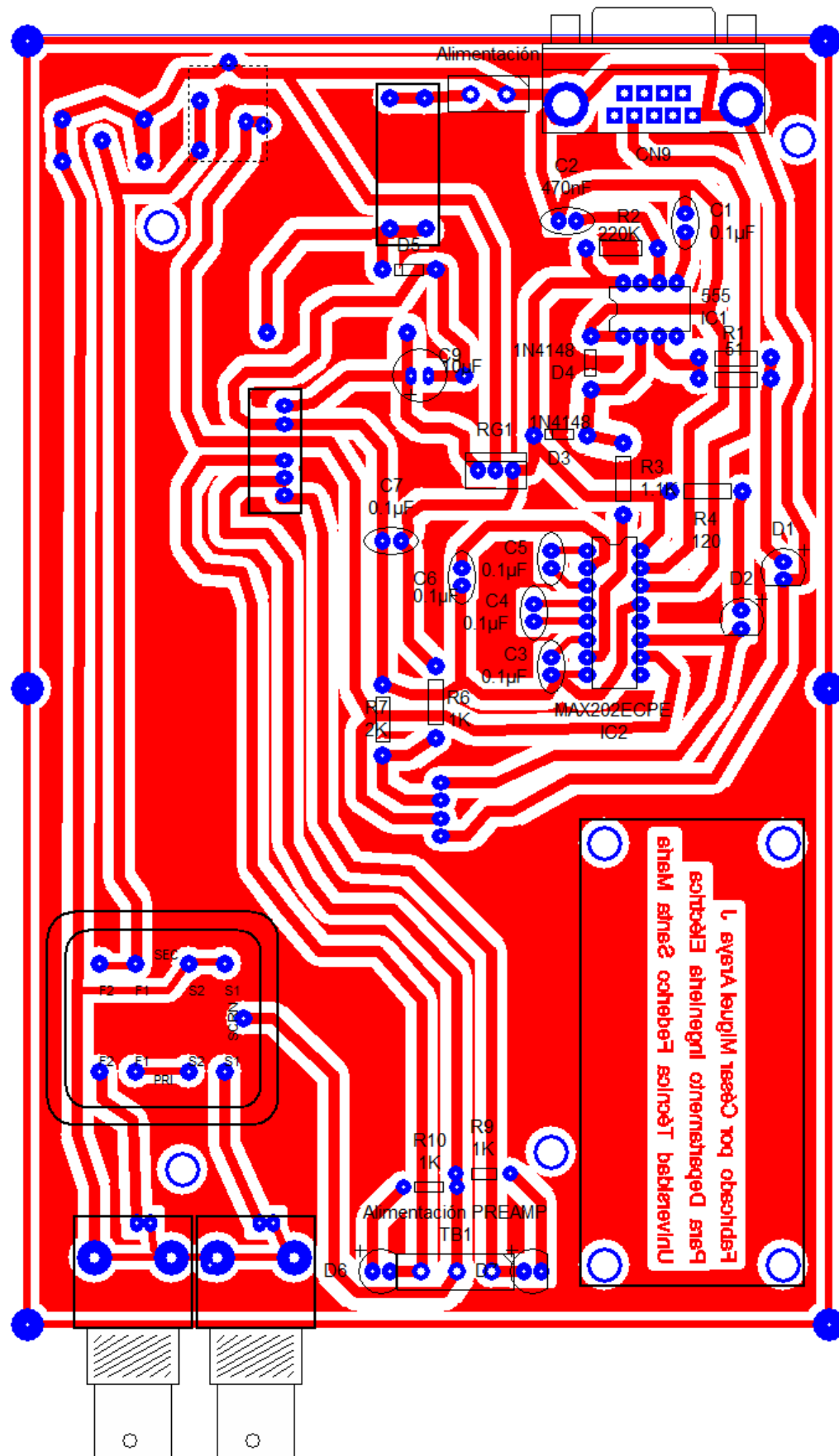


Figura 3: Diseño PCB circuito SU

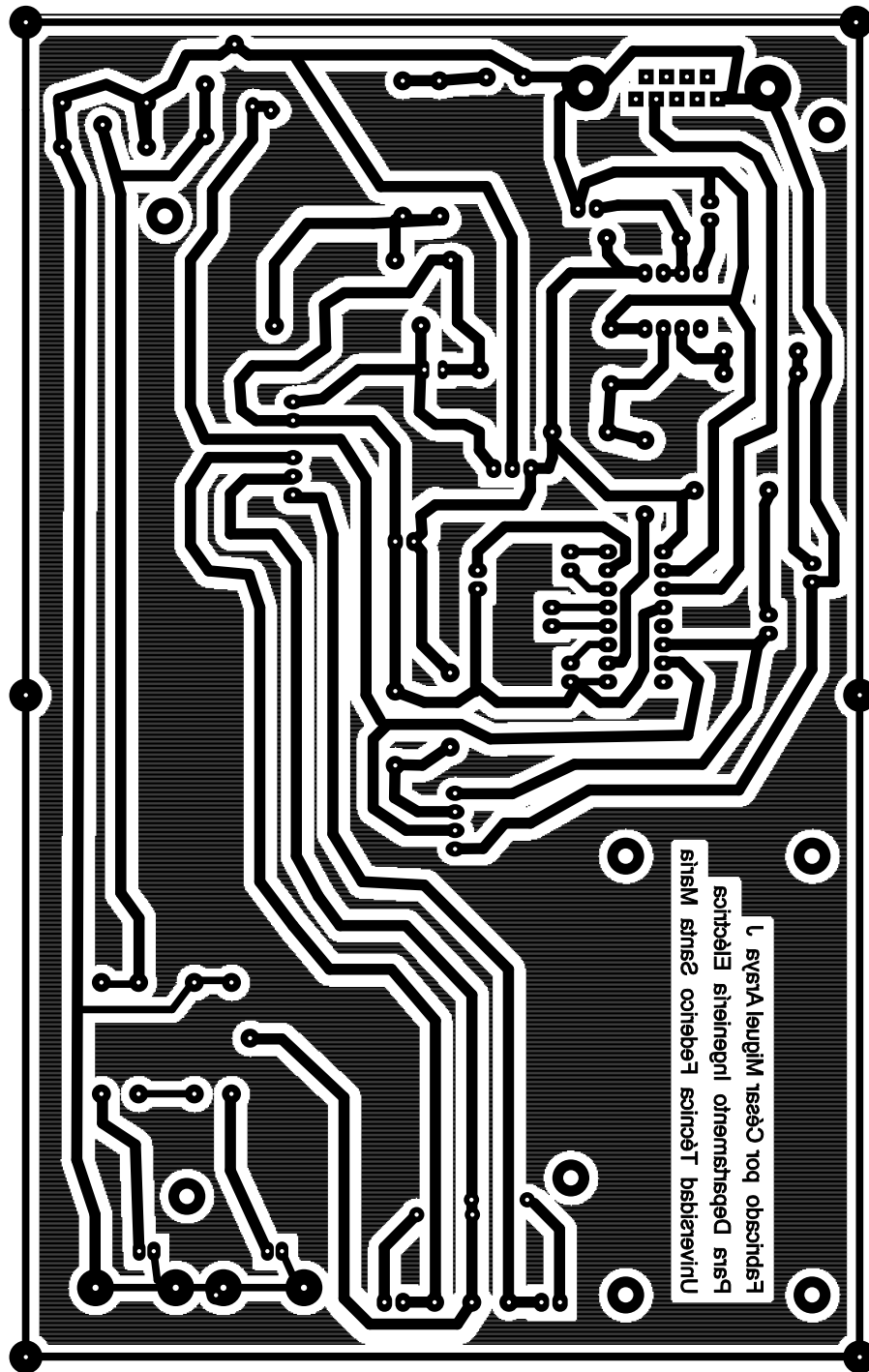


Figura 4: Circuito Impreso SU a escala 1:1