

DISEÑO DE ANTENAS DE CAMPO MAGNÉTICO COMPATIBLES CON UNA ESTACIÓN DE LA RED DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE RAYOS BLITZORTUNG

*DESIGN OF MAGNETIC FIELD ANTENNAS COMPATIBLE WITH A
STATION OF THE BLITZORTUNG LIGHTNING DETECTION AND
LOCATION NETWORK*

Cristhian Rubel Pomacaja Jiménez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
crpomacajaj@correo.udistrital.edu.co

Herbert Enrique Rojas Cubides

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
herojasc@udistrital.edu.co

Recepción: 2/noviembre/2021

Aceptación: 21/diciembre/2021

Resumen

Entre los elementos más importantes de una estación de detección y localización de rayos están las antenas de campo magnético, las cuales se acoplan a una etapa electrónica que filtra y amplifica dichas señales. La red abierta Blitzortung no es la excepción y, debido a su filosofía, promueve la mejora de su hardware y el uso de diversos tipos de sensores. Por esta razón, este artículo muestra el proceso de diseño y construcción de una antena de ferrita Ni-Zn y una antena de loop sencillo, ambas con el potencial de reemplazar los sensores típicos que emplea la red (ferrita Mn-Zn). Luego de su construcción, se realizaron pruebas experimentales sobre las antenas exhibiendo diferencias en la inductancia por debajo del 7% respecto al diseño teórico. Adicionalmente, se evidenció que el ancho de banda de ambas antenas alcanza 120 kHz, aunque al conectarlas a la etapa electrónica se obtiene un rango óptimo de operación entre 3 y 40 kHz.

Palabras clave: Antena, Blitzortung, campo magnético, ferrita Ni-Zn, loop sencillo, rayos.

Abstract

Among the most important elements of a lightning location and detection station are the magnetic field antennas, which are coupled to an electronic stage that filters and amplifies these signals. The Blitzortung open network is no exception and, due to its philosophy, promotes the improvement of its hardware and the use of various types of sensors. For this reason, this paper shows the design and construction process of a Ni-Zn ferrite antenna and a single loop antenna, both with the potential to replace the typical sensors used in the network (Mn-Zn ferrite). After their construction, experimental tests were carried out on the antennas exhibiting differences in inductance below 7% with respect to the theoretical design. Additionally, it was evidenced that the bandwidth of both antennas reaches 120 kHz, although when connecting them to the electronic stage, an optimal operating range between 3 kHz and 40 kHz is obtained.

Keywords: *Antenna, Blitzortung, lightning, magnetic field, Ni-Zn Ferrite, single loop.*

1. Introducción

El estudio de descargas atmosféricas en el mundo es un campo importante a considerar en distintas áreas, tanto en la vida cotidiana, como a nivel industrial y productivo. Aunque el estudio de rayos posee un elevado nivel de madurez en países desarrollados como Estados Unidos, Suecia, Alemania, Italia, España y Japón, muchos países en vías de desarrollo, ubicados en la región tropical del planeta, han venido desarrollando en las últimas tres décadas acciones orientadas a la comprensión de este fenómeno natural y a tomar medidas en cuanto a la implementación de sistemas de protección contra rayos para personas, animales, edificaciones, infraestructura eléctrica, petrolera, entre otros.

Lo anterior se ha debido, en buena medida, a que su localización geográfica los enmarca como países con un alto nivel cerámico cuyas variaciones son significativas a lo largo del territorio. En el caso de Colombia, esta afirmación ha sido confirmada por diversos estudios [Rojas, 2018] [Pérez, 2014] [Hernando, 2018] sumado a los reportes de redes de detección y localización de rayos (LLDN)

privadas tanto nacionales como internacionales, las cuales cuentan con estaciones de medición basadas en diversas tecnologías y métodos de detección.

La financiación privada de estas redes permite una inversión considerable en el desarrollo e innovación del hardware (sensores, antenas, sistemas de procesamiento, etc.) requerido para una apropiada detección y localización de rayos. Sin embargo, existen LLDN abiertas que demuestran que este proceso puede realizarse utilizando hardware construido con elementos de bajo costo, siendo un ejemplo de estas redes la Red mundial de localización de rayos (WWLLN por sus siglas en inglés) y la iniciativa alemana Blitzortung.

Estas redes utilizan diseños, dispositivos y elementos diferentes, los cuales fueron propuestos inicialmente por sus fundadores y han venido evolucionando a través del tiempo. Sin embargo, la estructura básica de cada hardware y la interconexión entre sus módulos es muy similar (sensores, adecuación de señales, circuitos electrónicos, cables/sondas, sistemas de almacenamiento y métodos de transmisión de datos), constituyendo en cada caso un sistema de medición robusto basado en los métodos de detección y localización de tiempo de arribo (TOA) y el tiempo de arribo grupal (TOGA) [Narita, 2018].

En el caso particular de la Red Blitzortung, esta comunidad está dirigida principalmente a personas con intereses comunes en el campo de la meteorología, climatología, ingeniería eléctrica e informática. La ventaja más relevante de esta red es que tanto el hardware como el software se encuentra en constante desarrollo gracias a la participación de sus colaboradores, quienes generalmente cuentan con conocimientos en manejo de datos, procesamiento de señales y sistemas electrónicos. De hecho, una de las principales filosofías de esta red es que el hardware se preste a la experimentación, siendo el módulo de los sensores o antenas el que más se presta para esto. En este sentido, los promotores de la red indican en su foro-web (<https://www.blitzortung.org/es/forum.php>) que posible emplear antenas diseñadas para la detección de campo eléctrico o magnético en el rango de muy baja frecuencia (VLF: 3-30 kHz) y baja frecuencia (LF: 30-300 kHz), siempre y cuando estas cumplan con ciertos requerimientos tales como el límite de tensión máxima inducida en sus terminales, la frecuencia de corte y su impedancia.

Al revisar los antecedentes de la red Blitzortung (reportes, foros, artículos) es posible evidenciar el uso de antenas de campo magnético tipo loop (forma cuadrada y circular) o antenas de ferrita. Sin embargo, los escasos trabajos presentados a la fecha no se centran en el diseño de antenas, se enfocan en el desempeño del sistema en general, ya sea para comparar con sistemas más robustos [Bergman, 2017] [Narita, 2018], analizar la influencia del lugar o región de instalación [Burtsev, 2018], o simplemente, para introducir su implementación y funcionamiento [Wolff, 2012]. Una de las razones que explica la baja cantidad de publicaciones es que la red entró en funcionamiento hace menos de una década (2013), siendo la documentación entregada por sus desarrolladores el referente para la construcción e implementación de sus módulos. De hecho, la antena de ferrita del tipo Mn-Zn que se promociona comercialmente ha sido usada y referenciada en buena parte de los trabajos previamente mencionados. A pesar de lo anterior, la necesidad de diseñar antenas de campo magnético para la red tomó mayor relevancia a inicios del 2021 después de que el proveedor de antenas de ferrita (sensor por defecto del sistema) anunciara su retiro y diera fin a la colaboración. Por esta razón, este artículo describe el proceso de diseño, construcción y prueba de dos tipos de antenas de campo magnético que pueden ser usadas en la red Blitzortung para la detección y localización de rayos.

Red Blitzortung y componentes de una estación típica

El proyecto "Blitzortung.org" es una red de detección y localización de rayos desarrollada para ubicar descargas electromagnéticas en la atmósfera (descargas de rayos nube-tierra) con ayuda de receptores que se basan en los métodos TOA y TOGA. El proyecto está compuesto por: (a) una comunidad de operadores (estaciones) ubicados en diversas regiones del mundo que envían sus datos a servidores informáticos; (b) programadores que desarrollan y/o implementan los algoritmos para localizar y visualizar las posiciones esféricas de los rayos; (c) colaboradores de diversas áreas en el campo de la ingeniería que ayudan a mantener el sistema en funcionamiento (con su trabajo o financiamiento). Una de las características más relevantes de esta red es que no hay restricción en la

membresía y todas las personas que mantienen la red en funcionamiento son voluntarios. No hay tarifas, términos y condiciones, y no hay contratos.

La red consta de más de 500 sensores de descargas atmosféricas y algunos servidores de procesamiento central. Las estaciones receptoras registran aproximadamente un milisegundo de cada señal con una frecuencia de muestreo superior a 500 kHz. No obstante, señal detectada por una estación (nodo) debe cumplir ciertas condiciones de calidad para ser escogida por el algoritmo como señal participante y que esta no sea identificada como solo ruido.

Con la ayuda de receptores GPS, los tiempos de llegada de las señales (TOA o TOGA) se registran con precisión de microsegundos y se envían a través de internet a los servidores centrales de procesamiento. Cada conjunto de datos contiene el tiempo preciso de llegada del impulso producido por la descarga y la posición geográfica exacta del receptor. Con esta información, sumada a la proveniente de varias estaciones, se calculan las posiciones exactas de las descargas a tierra. Para que la red pueda detectar un rayo, un mínimo de 8 estaciones deben registrar información del mismo evento.

El objetivo del proyecto es establecer una red de localización de rayos de bajo presupuesto con un alto número de estaciones. La información sobre la ubicación de las descargas es de libre acceso para los usuarios que transmiten sus datos a los servidores. De esta manera, los propietarios de cada estación pueden usar los datos para fines no comerciales. Adicionalmente, la actividad de rayos se puede consultar en el sitio web <https://www.lightningmaps.org> a través de varios mapas dispuestos de manera gratuita. El retraso promedio es de entre 3 y 20 segundos, dependiendo de los tiempos de transmisión y procesamiento de la información.

Una estación típica de la red Blitzortung está compuesta por tres módulos: las antenas de campo (magnético y/o eléctrico), un preamplificador de campo eléctrico o magnético y la tarjeta de adquisición. Esta última posee varios componentes, dentro de los cuales se tienen los controladores para el manejo de la antena GPS y la conexión de la estación a internet. Estos permiten el correcto posicionamiento global de la estación y su comunicación con sus similares dentro de la red. A continuación, se describen los módulos antes mencionados.

Caracterización de los módulos usados para el procesamiento de señales

La conexión entre módulos de una estación Blitzortung se muestra en la figura 1. Para diseñar antenas de campo magnético que puedan ser usadas en la red Blitzortung, en primera medida se debe realizar una identificación de los módulos que procesan las señales captadas por el sensor. Esto se logra a partir de pruebas experimentales que muestran el comportamiento en frecuencia de los dos módulos por los que pasa la señal: el preamplificador, usado para el acondicionamiento de la señal, y la tarjeta de adquisición.

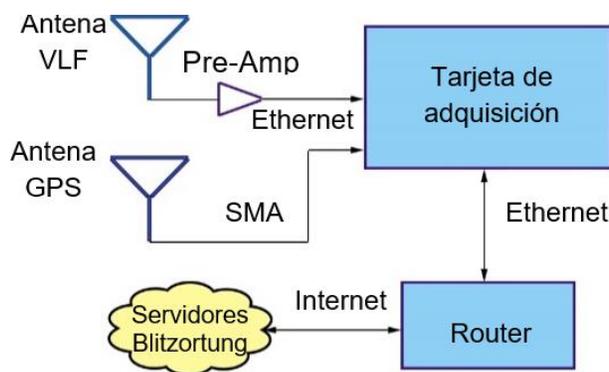


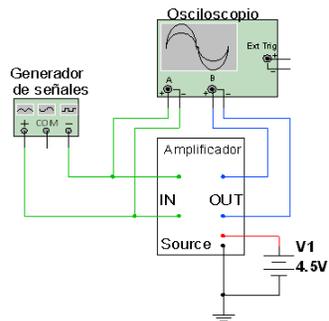
Figura 1 Estructura de interconexión entre módulos de una estación de la red Blitzortung.

Pre-amplificador y adecuación de la señal

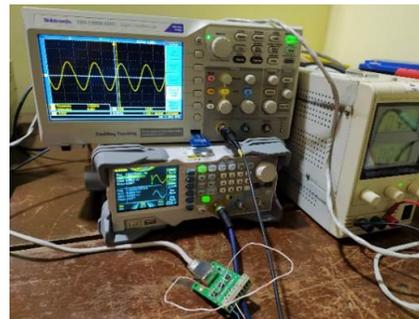
La estructura del preamplificador se basa en el uso de amplificadores diferenciales conectados cerca al sensor de campo magnético, con los cuales se busca anular el ruido que proviene de la antena y multiplicar la señal por una ganancia de 10. Posee un límite de voltaje de 3.3 V y cuenta también con una pequeña etapa basada en diodos que funciona como protección contra descargas electroestáticas (ESD).

La impedancia de entrada de esta etapa es ajustable en dos posiciones, lo cual permite tener una entrada de 75 Ω y 2 k Ω , siendo la primera recomendada para el uso de antenas tipo Loop. Estas antenas se construyen en base a un cable coaxial con esta impedancia característica. La segunda impedancia es utilizada para antenas de ferrita (sensor por defecto del sistema) las cuales eran comercializadas e incluidas por los desarrolladores en el kit básico de una estación.

La impedancia de salida de la electrónica está configurada a 100Ω . Esto permite usar un cable tipo ethernet con la misma impedancia para transportar la señal desde la antena hasta la tarjeta de adquisición de manera confiable, sin mayores pérdidas o distorsiones. Para medir campo magnético, el preamplificador cuenta con tres canales independientes, razón por la cual se deben utilizar cables con al menos seis hilos. Además, cuenta con cables para la alimentación de la electrónica que vienen desde la tarjeta de adquisición. La caracterización en frecuencia del preamplificador se hizo empleando un generador de señales (con impedancia ajustable) y un osciloscopio digital para observar la señal de entrada y salida. Durante la prueba se alimentó con una señal senoidal de baja tensión para evitar saturación por efectos de la amplificación de la señal. Las conexiones realizadas se muestran en la figura 2 y el comportamiento del preamplificador se puede observar en la figura 3.

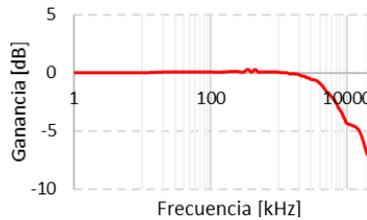


a) Conexión para prueba de tarjeta

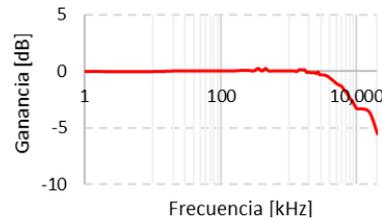


b) Conexión de equipos en laboratorio

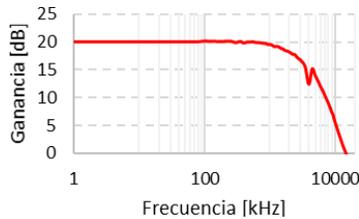
Figura 2 Conexión para caracterización de preamplificador magnético.



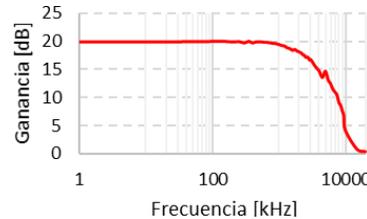
a) Ancho de banda solo generador $Z_{out} = 2 \text{ k}\Omega$



b) Ancho de banda solo generador $Z_{out} = 75 \Omega$



c) Ancho de banda preamplificador $Z_{in} = 2 \text{ k}\Omega$



d) Ancho de banda preamplificador $Z_{in} = 75 \Omega$

Figura 3 Caracterización de preamplificador y generador para distintas impedancias.

Los resultados muestran que el preamplificador posee un punto de atenuación cercano a los 300 kHz. Previo a esta zona se observa una ganancia de 20 dB con ambas impedancias de entrada o lo que es equivalente a una ganancia de 10 veces, ver figuras 3c y 3d. Estos resultados se encuentran dentro de lo establecido por los desarrolladores y permiten garantizar que ante cualquier diseño de antena cuya frecuencia de corte esté por debajo de 300 kHz no se produzcan afectaciones en la forma de onda de la señal por efecto de la electrónica.

Tarjeta de adquisición

Antes de ser subidas al servidor, las señales que entran a la tarjeta de adquisición pasan por un filtro pasabanda, el cual está formado por un filtro pasabajos pasivo y un filtro pasa altos activo de topología Sallen Key. Asimismo, se incluye una etapa de amplificación utilizando integrados MCP6S93 los cuales, al usarse combinados, permiten ganancias que van desde 1x1 hasta 32x32. La tarjeta cuenta con varios puertos con los cuales es posible sensor las señales en la etapa de filtrado.

Durante su caracterización, se realizó un barrido en frecuencia de la tarjeta para verificar su frecuencia de corte. La conexión en el laboratorio se muestra en la figura 4 y es similar a la realizada para el preamplificador, obteniendo salida vs entrada. La única diferencia en este caso es que la tarjeta utiliza un puerto SMA con una impedancia de entrada de 100 Ω . Con este terminal es posible observar la forma de onda en salida de la tarjeta, siempre y cuando se utilice una sonda con una impedancia característica similar o mayor.

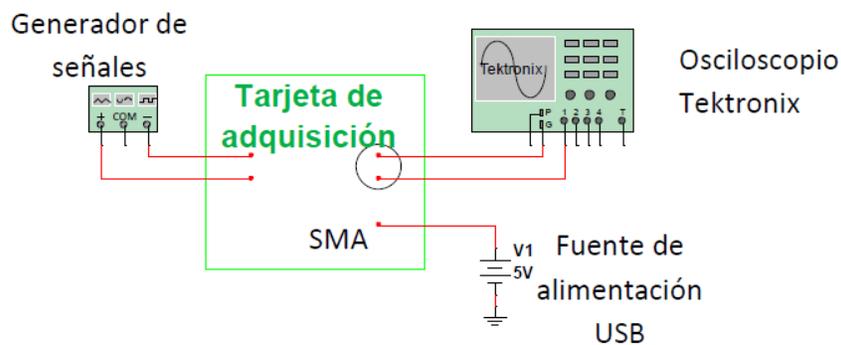
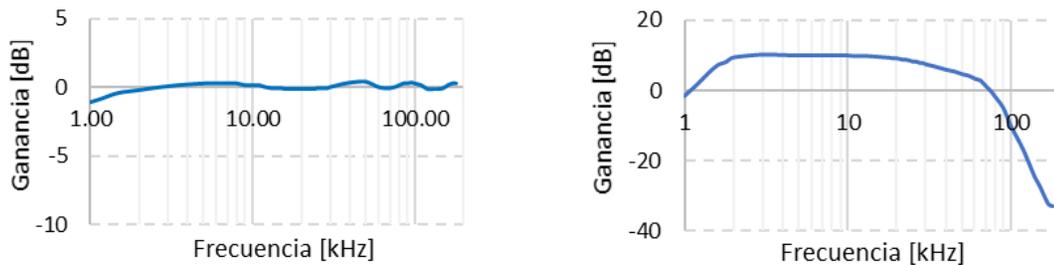


Figura 4 Conexión para caracterización de la tarjeta de adquisición de señales.

De esta manera, el comportamiento en frecuencia del generador utilizado en vacío, así como los resultados las pruebas de laboratorio sobre la tarjeta y de la simulación se muestran en la figura 5. Los resultados contrastan con aquellos obtenidos para el preamplificador ya que se observa en la parte baja una frecuencia de corte de 2 kHz y un punto de corte superior cercano a los 50 kHz. Para señales de rayos con anchos de banda superior se debe tener en cuenta que algunas componentes de frecuencia serán atenuadas y pueden distorsionar parcialmente la forma de onda registrada. Sin embargo, es de aclarar que buena parte de los sistemas de localización de rayos se basa en la medición de señales de baja y muy baja frecuencia por debajo de los 30 kHz. En caso de que se quiera medir impulsos de campo eléctrico y/o magnético con frecuencias mayores, se debe utilizar una configuración de ganancia diferente con ayuda de los MCP6S93.



a) Comportamiento del generador de señales (prueba en vacío).

b) Comportamiento de la tarjeta

Figura 5 Caracterización de tarjeta de adquisición.

Diseño de antenas de campo magnético

En esta sección se describe el proceso de diseño y construcción de dos tipos de antenas que pueden ser usadas en una estación Blitzortung. El primer prototipo se aproxima a la antena de ferrita típica usada en este tipo de estaciones, mientras el segundo se enfoca en la construcción de una antena de loop sencilla basada en cables coaxiales.

Antena de ferrita

Aunque el kit básico comercializado por Blitzortung incluía de manera opcional antenas de ferrita Mn-Zn, este trabajo plantea la construcción de antenas de ferrita suave Ni-Zn las cuales son de fácil adquisición en el mercado, tienen bajo costo y

poseen permeabilidades relativas que pueden ir desde 15 hasta 150. En este proceso, se busca que el diseño de esta nueva antena tenga una inductancia igual o cercana a la que tienen las antenas Mn-Zn.

Para lograr lo anterior, se realizó una caracterización en frecuencia (rango de 1-400 kHz) de dos de las antenas típicas de ferrita Mn-Zn, identificando el cambio de la inductancia, impedancia y fase. Los resultados obtenidos para las variables mencionadas se muestran en la figura 6, mientras que en la tabla 1 se sintetizan los valores promedio.

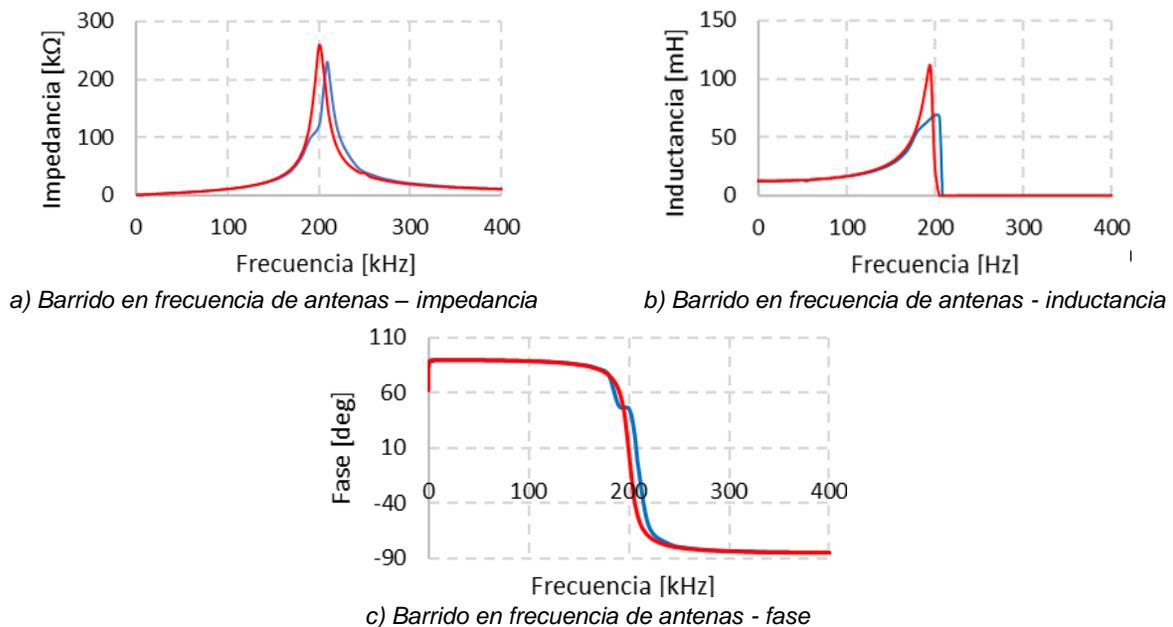


Figura 6 Comportamiento antenas de ferrita Mn-Zn, antena 1 (Azul) y antena 2 (Rojo).

Tabla 1 Valores promedio para antenas de ferrita Mn-Zn.

	Impedancia [1-60 kHz]	Inductancia [1-60 kHz]	Frecuencia de corte con electrónica	Frecuencia de corte sin electrónica
Antena 1	1038 [Ω]	12.57 [mH]	25.32 [kHz]	140 [kHz]
Antena 2	1060 [Ω]	12.64 [mH]	25.18 [kHz]	142 [kHz]

De esta prueba, se concluye que en la zona 1-60 kHz se tiene el comportamiento más estable de las antenas tanto en inductancia como en fase. Al analizar las antenas en vacío se tiene una zona crítica de cambio de fase e impedancia en el rango 150 - 250 kHz (con un punto máximo en 200 kHz), aunque al conectar la electrónica la frecuencia de corte de todo el arreglo disminuye a 25 kHz

aproximadamente. Una vez estimado el comportamiento de las antenas Mn-Zn se procede a diseñar la nueva antena Ni-Zn utilizando las ecuaciones planteadas por Alan Payne [Payne, 2014]. En este modelo se tiene una antena cuyo bobinado se encuentra centrado en la barra de ferrita y está alejado de los extremos. Para lograr esto, se define una serie de procedimientos que expresan el cambio de inductancia cuando una barra de ferrita es insertada en una bobina. Esta relación se representa como L_f/L_{air} , o de manera más corta μ_{rod} , de manera se tiene la ecuación 1.

$$L_f = L_{air} * \left(\frac{L_f}{L_{air}} \right) \quad (1)$$

Dónde L_{air} se define con la fórmula clásica usada para el cálculo de la inductancia de una bobina, ecuación 2.

$$L_{air} = \frac{\mu * N^2 * A}{l} \quad (2)$$

En la ecuación 2, μ es la permeabilidad del aire, N el número de vueltas, A el área de la bobina y l la longitud. Regresando al factor μ_{rod} , este puede hallarse usando la ecuación 3.

$$\frac{L_f}{L_{air}} = \frac{1 + x}{\frac{1}{k} + \frac{x}{\mu_f}} \quad (3)$$

Donde, μ_f representa la permeabilidad efectiva del núcleo, $(1 + x)$ representa el factor que relaciona las reluctancias externas e internas de la ferrita, y finalmente, k representa el factor de reducción para la reluctancia exterior. Este factor será uno en caso de que la ferrita esté completamente cubierta de cobre, De no ser así, se debe seguir el procedimiento que se muestra en las ecuaciones 4 a 9.

$$x = \frac{5.1 \left[\frac{l'}{d_{bobina}} \right]}{\left[1 + 2.8 \left(\frac{d_{bobina}}{l'} \right) \right]} \quad (4)$$

$$l' = l_{bobina} + 0.45 * d_{bobina} \quad (5)$$

$$k = \frac{\left[\frac{\phi}{\phi_{max}} * C_{anf} + 2 * d_{ferrita} \right]}{2 * d_{bobina}} \quad (6)$$

$$\frac{\phi}{\phi_{max}} \approx \frac{1}{\left[1 + \frac{\left(l'_{ferrita} / d_{ferrita} \right)^{1.4}}{5 * \mu_f} \right]} \quad (7)$$

$$C_{anf} = \frac{0.5 * \pi * (l_{ferrita} - l_{bobina})}{\ln \left(\frac{2 * (l_{ferrita} + d_{ferrita})}{d_{ferrita}} \right) - 1} \quad (8)$$

$$\mu_{fe} = (\mu_f - 1) * \left(\frac{d_{ferrita}}{d_{bobina}} \right)^2 + 1 \quad (9)$$

Las variables l y d representan longitud y el diámetro, siendo su subíndice un identificador de la ferrita o la bobina. Por su parte, l' representa una relación entre la longitud de la bobina y su diámetro, ϕ/ϕ_m representa la relación entre el flujo magnético que tendría la antena con permeabilidad finita y con permeabilidad infinita. El parámetro C_{anf} representa la capacitancia en la antena, siendo esta definida por [Schelkunoff, 1952]; y finalmente, μ_f representa la permeabilidad relativa de la ferrita y μ_{fe} es la permeabilidad corregida debido a los espacios de aire que pueden quedar entre el bobinado y la ferrita.

Ahora bien, si se quiere tener en cuenta las pérdidas debido a la construcción propia de la antena se aplican dos factores al resultado final de la ecuación 1. Estos son el factor de Nagaoka (K_n), el cual se utiliza para el cálculo de inductancias en bobinas con núcleo de aire [Nagaoka, 1909], y el factor Rosa (\mathbb{R}), utilizado para calcular pérdidas en caso de que la bobina tenga ciertos “huecos” entre cada vuelta [Payne, 2014]. Estos factores se definen en ecuaciones 10 a 13.

$$K_n \approx \frac{1}{\left[1 + 0.45 \left(\frac{d_{bobina}}{l_{bobina}} \right) - 0.005 \left(\frac{d_{bobina}}{l_{bobina}} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

$$\mathbb{R} = 1 - \frac{[l_{bobina} * (A + B)]}{\left[\pi * \left(\frac{d_{bobina}}{2} \right) * N * K_n \right]} \quad (11)$$

$$A = 2.3 * \log_{10} \left(1.73 * \frac{d_w}{p} \right) \quad (12)$$

$$B = 0.336 \left(1 - \frac{2.5}{N} + \frac{3.8}{N^2} \right) \quad (13)$$

En la ecuación 12, d_w representa el diámetro del alambre utilizado para la construcción de la bobina y p representa la distancia de centro a centro entre cada vuelta. Un ejemplo gráfico de estos parámetros se muestra en la figura 7a.



a) Distancias para cálculo de factor rosa. b) Circuito equivalente entre antena y electrónica

Figura 7 Consideraciones para diseño de antenas de ferrita.

Si se considera que las antenas se conectan a la electrónica del preamplificador, se debe tener en cuenta el divisor de voltaje que se forma entre la impedancia de las antenas (Z_S) y la impedancia de carga de la electrónica (Z_L), tal como se muestra en la figura 7 b). Teniendo en cuenta lo anterior, se obtiene la ecuación 14 que define el voltaje que verá la electrónica en su entrada.

$$V_{ferrita}(t) = -A_{loop} * N * \frac{dB}{dt} * \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} \quad (14)$$

Considerando el dominio de la frecuencia, se obtiene la ecuación 15.

$$V_{ferrita}(\omega) = -j\omega * B(\omega) * \frac{A_{loop} * N * R_L}{R_s + R_L} \quad (15)$$

Si ahora se tiene en cuenta que Z_L es una carga netamente resistiva (R_L), y que la impedancia Z_S está formada por una resistencia en serie (R_s) con una inductancia (L_s), dependiente de la frecuencia, el voltaje generado en las terminales de la antena puede expresarse con la ecuación 16.

$$V_{ferrita}(\omega) = -j\omega * B(\omega) * \frac{A_{loop} * N * R_L}{R_s + R_L} * \left[\frac{1}{1 + j\omega * \left(\frac{L_s}{R_s + R_L} \right)} \right] \quad (16)$$

La expresión encerrada en corchetes cuadrados hace referencia al modelo de un filtro pasa bajos con un punto de corte definido en la ecuación 17 y 18.

$$\omega_c = \frac{R_s + R_L}{L_s} \quad (17)$$

$$2\pi f_c = \frac{R_s + R_L}{L_s} \quad (18)$$

Teniendo en cuenta que la resistencia R_s es mucho menor que R_L la frecuencia de corte se expresa con ecuación 19. De esta forma, la frecuencia de corte de la antena en Hz depende de la resistencia de la electrónica y la inductancia de la antena.

$$f_c = \frac{R_L}{2\pi L_s} \quad (19)$$

Aplicando las ecuaciones enunciadas para el diseño de la antena Ni-Zn, como medida adicional, se diseñó la nueva antena para que la inductancia final tuviera valor ligeramente más grande que las antenas originales de Mn-Zn. Los valores con los que se aplicaron las expresiones descritas en esta sección se muestran en la tabla 2. Adicionalmente, los resultados de los cálculos realizados se muestran en la tabla 3, donde L_{NR} representa la inductancia final incluyendo las correcciones de Nagaoka y Rosa.

Tabla 2 Valores utilizados para cálculo de inductancia.

Antena	μ_f	N	Longitud Bobina	Diámetro Bobina	Longitud Núcleo	Diámetro Núcleo	Calibre AWG
A	40	508	4 cm	10 mm	14 cm	~10 mm	40
B	40	520	4.1 cm	10 mm	12 cm	~10 mm	40

Tabla 3 Resultados para ecuaciones aplicadas.

Antena	x	l'	k	q/qmax	C_{anf}	μ_{fe}	L_f/L_{air}	L_{air}	L_{NR}
A	13.85	44.7e-3	3.87	0.88	65.3e-3	39.4	24.3	0.63 mH	14 mH
B	14.40	46.0e-3	3.48	0.91	54.6e-3	39.4	23.6	0.65 mH	13.8 mH

A partir del diseño, se construyeron dos antenas y los resultados del respectivo barrido en frecuencia se muestran en la figura 8, mientras la tabla 4 resume los

resultados obtenidos. Se destaca que los valores promedio de inductancia experimental obtenidos en el rango 1-100 kHz (13.2 mH y 13.8 mH) se aproximan bastante a los resultados teóricos (13.8 mH y 14 mH). Esta similitud valida las ecuaciones empleadas durante el diseño y el proceso constructivo. Adicionalmente, la frecuencia donde la inductancia empieza a variar sustancialmente la inductancia (130 kHz aproximadamente) es ligeramente menor a la observada en las antenas de ferrita Mn-Zn, aunque sigue estando en la zona donde mejor responde la electrónica (preamplificador y tarjeta de adquisición). Por su parte, la fase de las nuevas antenas sin electrónica se mantiene casi invariante hasta los 720 kHz.

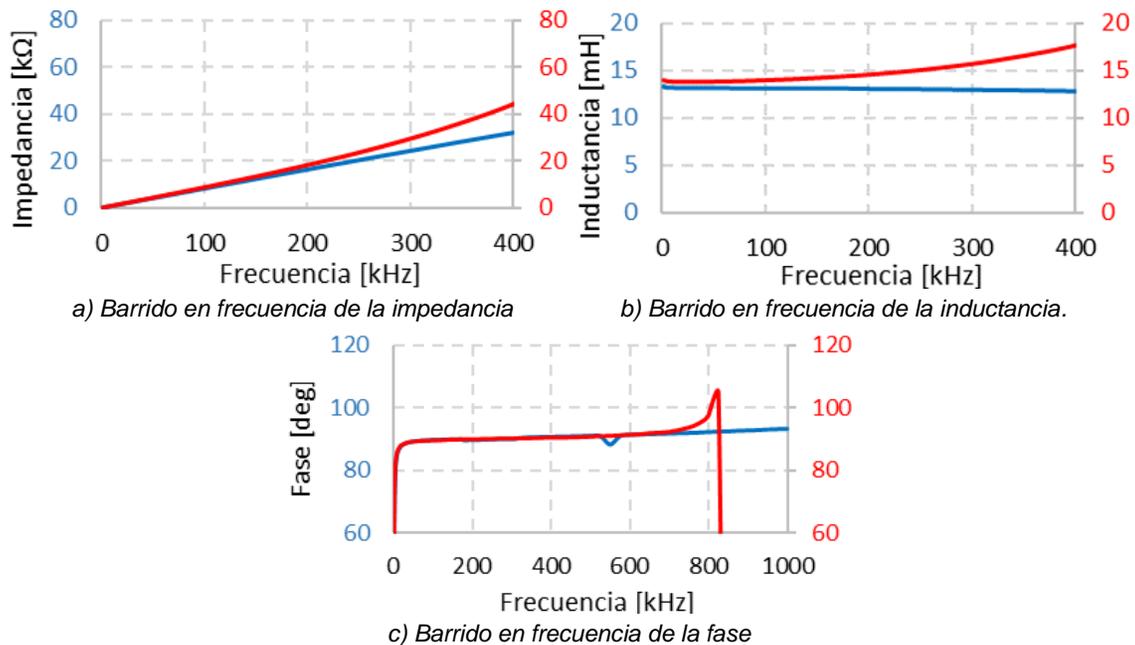


Figura 8 Barrido en frecuencia de antenas Ni-Zn, antena A (Azul) – antena B (Rojo).

Tabla 4 Resultados de inductancia para antenas de ferrita Ni-Zn.

Antena	Impedancia promedio [1-100kHz]	Inductancia promedio [1-100kHz]	Frecuencia de corte con electrónica	Frecuencia de corte sin electrónica
Antena A	705 [Ω]	13.2 [mH]	24.21 [kHz]	132 [kHz]
Antena B	737 [Ω]	13.8 [mH]	23.03 [kHz]	124 [kHz]

Antena tipo Loop

La construcción de una antena tipo Loop se basa en el uso de un cable coaxial con impedancia característica (Z_0) de 75 Ω, lo cual garantiza un acople correcto con

la electrónica del preamplificador. Para lo anterior, se realizaron barridos en frecuencia sobre cuatro cables de diferentes fabricantes cuyas hojas técnicas indican una impedancia de 75Ω . Estas pruebas fueron:

- Medición en cada extremo del conductor interno de cobre.
- Medición en cada extremo de la chaqueta (cable exterior).
- Medición entre un extremo del conductor de cobre y la chaqueta externa.

Con esta información experimental se obtuvo la impedancia característica real de cada cable, lo cual permite tener una mayor seguridad al momento de utilizar alguno de ellos para construir la antena. Los resultados de estas mediciones se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5 Resultados de variables para diferentes tipos de cables coaxiales.

Cable Coaxial	Capacitancia teórica [pf/m]	Capacitancia promedio y desviación std [pf/m]	Zo teórica [Ω]	Zo experimental y desviación std [Ω]
RG6 Genérico	52	51.09 $\sigma = 0.485$	75	111.5 $\sigma = 42.5$
RG6 TRI-SHIELD	52	55.01 $\sigma = 0.593$	75	86.39 $\sigma = 20.2$
RG11 Genérico	53.14	46.24 $\sigma = 0.156$	75	87.21 $\sigma = 1.75$
RG11 Steren®	67.26	67.55 $\sigma = 1.63$	75	68.96 $\sigma = 1.64$

Teniendo como criterio la cercanía entre el valor teórico y el valor experimental de la impedancia característica (Z_o), incluyendo una baja desviación estándar, se seleccionaron inicialmente los cables RG11 Steren® ($Z_o = 69 \Omega$) y el RG11 genérico ($Z_o = 87 \Omega$). Sabiendo que en ningún caso se obtuvo un valor de 75Ω se estimó el factor de reflexión de cada cable. Esto se logró con ayuda del software ATP/EMTP implementando el circuito mostrado en la figura 9a.

Durante la prueba, la fuente es un escalón de 1 V que se activa en $t = 1.05 \text{ s}$, el cable tiene una velocidad de propagación de $2/3$ de la velocidad de la luz y una longitud de 1 m. Considerando los tiempos de viaje y el bajo factor de reflexión (0.997) el cable seleccionado para la antena es el coaxial tipo Steren RG11 (línea azul en figura 9b).

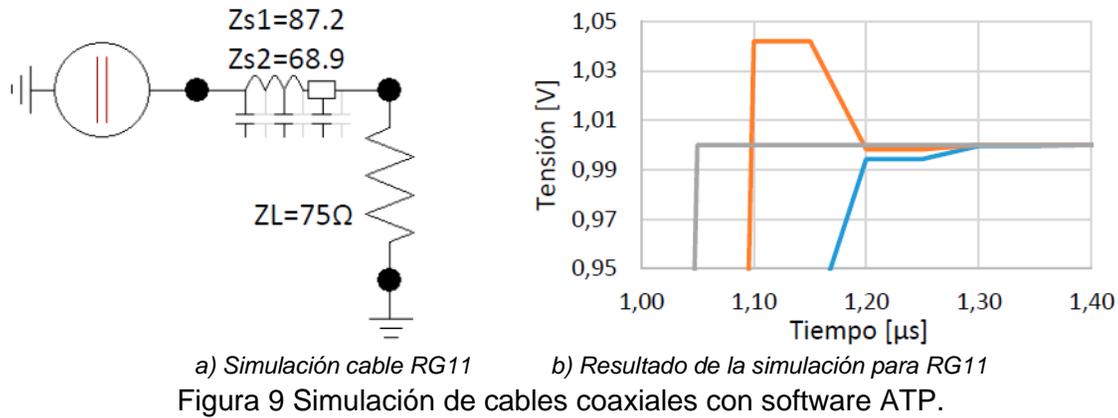


Figura 9 Simulación de cables coaxiales con software ATP.

Adicionalmente, se observó que la variación de la capacitancia experimental de este cable respecto a sus valores teóricos es muy baja (menor del 3%). Ahora, siguiendo el proceso propuesto por [Grover, 1973], mostrado en las ecuaciones 20 y 21, se diseñó la antena.

$$L_{lazo} = \frac{(\mu_0 \mu_r N^2)}{\pi} \left[w \ln \left(\frac{2w}{\rho} \right) + h \ln \left(\frac{2h}{\rho} \right) + 2\sqrt{w^2 + h^2} - 2(w + h) + T \right] \quad (20)$$

$$T = \left[\frac{(w + h)}{4} - w \sinh^{-1} \frac{w}{h} - h \sinh^{-1} \frac{h}{w} \right] \quad (21)$$

En estas ecuaciones N representa el número de vueltas del loop (1 en este caso), w y h representan el ancho y alto de la antena (con forma rectangular) y ρ representa el diámetro del conductor interno (2.8 mm). A partir de lo anterior, se estimó una inductancia de 5.1 μH para una antena tipo loop sencillo con 0.8 m de ancho y 0.9 m de alto. La frecuencia de corte de la antena diseñada (valor teórico) antes de conectar la electrónica (usando la ecuación 19) es 2.34 MHz, lo cual está muy por encima del límite de la estación.

A partir del diseño expuesto se procedió con la construcción de dos antenas tipo loop (este-oeste y norte-sur) y se repitió el procedimiento aplicado para las antenas de ferrita. Los resultados obtenidos en los barridos de frecuencia se muestran en la figura 10. La inductancia promedio en cada caso fue de 4.96 μH y 4.81 μH . De esta forma, los valores experimentales exhiben menos de un 6% de diferencia respecto al valor teórico. Debido a que el generador posee un ancho de banda de 1 MHz no

fue posible identificar la frecuencia de corte experimental de las antenas. Sin embargo, en el rango de frecuencia disponible se observó que la inductancia posee un comportamiento cuasi-lineal y con ligeras variaciones.

A partir de los resultados presentados en esta sección se valida el proceso de diseño y construcción de ambos prototipos de antena. La figura 11 muestra un vistazo final de la antena de ferrita y la antena tipo loop luego de ser construidas.

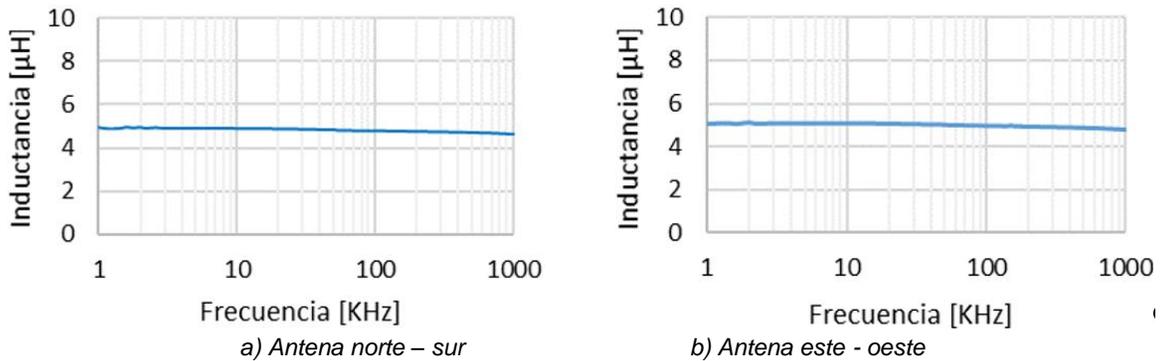
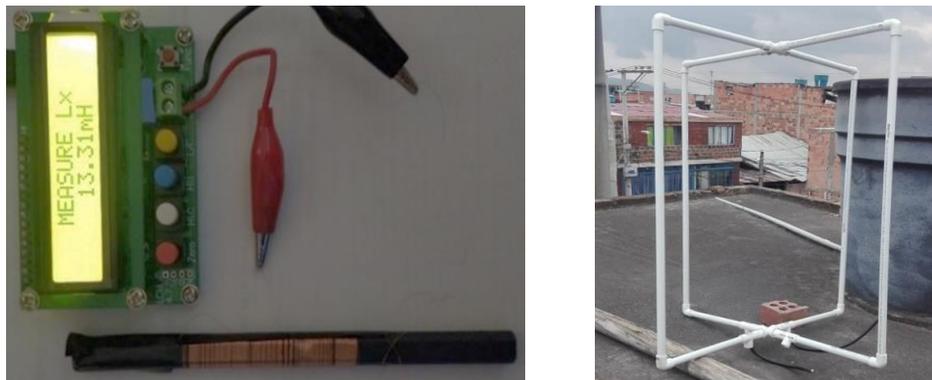


Figura 10 Comportamiento en frecuencia de antenas tipo Loop.



a) Antena de ferrita Ni-Zn

b) Antenas tipo Loop

Figura 11 Antenas construidas.

5. Conclusiones

En este artículo se describió el proceso de diseño y construcción de dos prototipos de antenas de campo magnético (de ferrita y tipo loop) que pueden ser usadas en una estación de la red abierta de detección y localización de rayos Blitzortung. La aplicación de modelos electromagnéticos para el diseño de las antenas, incluyendo los factores de Nagaoka y Rosas para antenas de ferrita,

mostró su validez luego de obtener un alto nivel de concordancia entre los valores teóricos y los resultados experimentales (por debajo de 7%). Dichas diferencias se pueden asociar a la imperfección de los materiales y a defectos ocurridos durante la construcción. Esto se evidenció especialmente en el caso de las antenas de ferrita, cuyo conductor era tan delgado que dificultó la organización perfecta de las espiras.

En cuanto al comportamiento de las antenas, respecto a su contraparte de ferrita (Ni-Zn y/o Mn-Zn), se puede observar que las antenas tipo loop tienen un mejor acople de impedancia con la electrónica. Sin embargo, aunque su fácil construcción es un punto a favor de su uso para la medición de rayos, su baja inductancia (entre 2500 y 3000 menor a la de una antena de ferrita) es un factor en que debe ser considerado en este tipo de aplicaciones. Lo anterior, se refleja en la baja tensión inducida por un solo loop (del orden de algunas decenas de microvoltios) y en la disminución de rayos que se pueden detectar, especialmente aquellos ocurridos a distancias por encima de 100 km de la estación. La influencia del tipo de antena sobre la eficiencia de detección de rayos se analizará en trabajos futuros.

Finalmente, es importante tener en cuenta que con ambas antenas se obtendrán atenuaciones en señales de rayos que posean componentes de frecuencia por encima de la zona óptima de medición (3-40 kHz). Esto debido a los filtros que poseen tanto la etapa del preamplificador, como la tarjeta de adquisición de señales. Sin embargo, se debe tener en cuenta que buena parte de la componente energética de las señales de campo magnético que es registrada con estaciones de detección y localización de rayos se encuentra por debajo de los 30 kHz (VLF y LF).

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Bergman, A., (2017). Utvärdering av Blitzortung blixlokaliseringssystem En jämförande studie med SMHI. UPPSALA UNIVERSITET.
- [2] Grover, F. W., (1973). Inductance Working Formulas and Tables (ISA (ed.)). Dover Publications.
- [3] Nagaoka, H., (1909). The Inductance Coefficients of Solenoids. Journal of the College of Science, Imperial University, 27(6), 1–33.

- [4] Burtsev, A. V., Yaroshevich, V. V. & Fastiy, G. P., (2018). The Concept of Lightning Detection Network Enhancement on the Kola Peninsula. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, 1–5. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602585>.
- [5] Hernando, A., Cortés, C., Hernando, A. & Cortés, C., (2018). Implementación de un Sistema MDF- GIS de Detección, Localización y Monitoreo de Descargas Atmosféricas en Tiempo Real. Universidad Nacional de Colombia.
- [6] Narita, T., Wanke, E., Sato, M., Sakanoi, T., Kumada, A., Kamogawa, M., Hirohiko, I., Harada, S., Kameda, T., Tsuchiya, F. & Kaneko, E., (2018). A study of lightning location system (Blitz) based on VLF sferics. 34th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2018. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503311>.
- [7] Payne Alan, (2014). The Inductance of Ferrite Rod Antennas. Alan Payne Associates, 3, pp. 1–18.
- [8] Pérez, D. de J., (2014). Eficiencia de los Sistemas de Localización del Rayo en Zonas Montañosas. Universidad Nacional de Colombia.
- [9] Rojas, H., (2018). Técnicas avanzadas para el tratamiento y procesamiento de señales de campos electromagnéticos generados por rayos. Tesis Doctorado, Universidad Nacional de Colombia.
- [10] Schelkunoff, S. & Friis, H., (1952). Antennas theory and practice (Wiley (ed.); 3rd ed.).
- [11] Wolff, V., (2012). Integration von Blitzdaten aus Blitzortung. org zur Darstellung in OSM. 150–155.