

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA
PARA LA DETECCIÓN DE PULSOS DE RADIO
PRODUCIDOS POR ASTROPARTÍCULAS**

JESÚS DAVID BONILLA NEIRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA, ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020**

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE PULSOS DE RADIO PRODUCIDOS POR ASTROPARTÍCULAS

JESÚS DAVID BONILLA NEIRA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
ingeniero electrónico

Director

Ernesto Aguilera Bermudez

Dr. Ingeniería Electrónica

Codirector

Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez

Dr. Física

Codirector

Christian Sarmiento Cano

Mg Física

Tutor

Alejandro Almela

Dr. Ingeniería Electrónica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA, ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2020

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han sido importantes a lo largo de estos años para mí, la ayuda de todos ha hecho que este sueño se haga realidad. En primer lugar, agradezco a mis padres por sus incontables esfuerzos, por su apoyo incondicional para hacer que yo llegue hasta aquí. A mi hermana por sus enseñanzas, sus sabios consejos y por creer en mí, a mi hermano por su compañía y apoyo. A Christian por su dedicación y gran demostración de aprecio por la ciencia. A Laura por escucharme y comprenderme cada día. Agradezco a los profesores Ernesto, Luis y Jaime quienes me enseñaron mucho más que conceptos técnicos, me enseñaron un estilo de vida, sentir pasión por lo que se hace. También estoy agradecido con Alejandro y el grupo ITEDA, quienes además de enseñarme un nuevo mundo, me acogieron en mi viaje y me hicieron sentir como en casa. Doy gracias a el grupo Halley y al team oficina radiogis, en especial a mi querido cuarteto, el tenernos los unos a los otros ha sido vital en este proceso, por toda su colaboración e incondicional amistad y por tantas conversaciones interesantes alrededor de un buen café.

*“No solo no hubiera sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a mi alrededor desde el comienzo. Algunos siguen hasta hoy **GRACIAS TOTALES**”*

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. LAS ASTROPARTÍCULAS	16
1.1.1. Lluvias atmosféricas extendidas	17
1.2. RADIOFRECUENCIAS EN LLUVIAS ATMOSFÉRICAS	18
1.2.1. Emisión geomagnética	18
1.2.2. Emisión por exceso de carga	19
2. CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ESTACIÓN	22
2.1. REQUISITOS PRELIMINARES	23
2.2. DISEÑO DE LA ANTENA	26
2.2.1. Antena tipo LPDA	27
2.2.2. Antena tipo Butterfly	28
2.2.3. Antena tipo SALLA	28
2.2.4. Selección de la antena	29
2.3. DISEÑO DEL LNA	32
3. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE LA ESTACIÓN	34
3.1. <i>4NEC2</i> SOFTWARE DE SIMULACIÓN	34
3.2. SIMULACIÓN DE LA ANTENA	35
3.2.1. efecto de la tierra	37
3.2.2. Modelo de la antena	40
3.3. SIMULACIÓN DEL LNA	42
3.3.1. Selección del transistor	42
3.3.2. Red de polarización	43
3.4. TOPOLOGÍA DEL CIRCUITO	45
3.4.1. Simulaciones del circuito.	46
3.4.2. Estabilidad	47

3.4.3. Ganancia	47
3.4.4. Ruido	48
4. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN	50
4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA ANTENA	50
4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL LNA	53
5. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTACIÓN	56
5.1. PRUEBAS DE LA ANTENA	57
5.2. PRUEBAS DEL LNA	62
5.3. PRUEBAS DE LA ESTACIÓN	67
6. CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	85

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1. Esquema de componentes de una lluvia de partículas.	17
2. Representación gráfica de la emisión de radio por EAS.	19
3. Esquema general modelo de un observatorio	22
4. Espectro de señales de radio producido por EAS.	24
5. Mapa de observatorios y líneas de campo	25
6. Temperatura de ruido del entorno según ITU.	26
7. Antena LPDA en AERA.	27
8. Antena Butterfly en Nancay Radio Observatory.	28
9. Antena SALLA en Tunka-Rex.	29
10. Distribución de arreglos de detectores	30
11. Modelos de LNA implementaos.	32
12. Pantalla principal de 4NEC-2	35
13. Esquema de simulación de la antena en espacio libre.	36
14. Ajuste de parámetros en NEC	36
15. Plano E de la antena en espacio libre	37
16. Esquema de la simulación con plano de tierra	38
17. Variación de distancia a tierra.	38
18. Variaciones de tipo de tierra en antena.	39
19. Plano E de la antena en dBi.	40
20. Patrón de radiación de la antena sencilla 3D en dBi.	41
21. Plano E de la antena SALLA dBi	41
22. Patrón de radiación de la antena SALLA en dBi.	42
23. Ganancia y factor de ruido, datos del fabricante	44
24. Circuito de polarización.	45
25. Circuito de LNA.	46
26. Simulación de la estabilidad del LNA.	47
27. Simulación de la ganancia del LNA.	48
28. Simulación de la figura de ruido del LNA.	49

29. Doblado de tubo antena SALLA.	50
30. Espira de antena SALLA.	51
31. Conexiones superior e inferior de la espira sencilla.	52
32. Conexiones antena SALLA.	52
33. Antena SALLA instalada.	53
34. Diseño de la PCB del LNA.	54
35. PCB del LNA, superior sin componentes, inferior con componentes LNA. . .	55
36. Esquema de la prueba de la antena 1.	58
37. Esquema de emisión de señal GNU-Radio	59
38. Antena en el analizador de espectros	59
39. Antena en recepción y emisión	60
40. Pruebas de laboratorio para antena SALLA	61
41. Recepción de la antena	62
42. Prueba de estabilidad del LNA	63
43. Señal en el osciloscopio del LNA	64
44. Prueba del amplificador con el VNA	64
45. Parámetro S21 del LNA	65
46. Ganancia simulada y ganancia medida del LNA	67
47. Esquema para la prueba de la estación	68
48. Espectro de potencias de la estación	68
49. Representación de una red de dos puertos	72
50. Modelos línea de transmisión	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
1. Tabla de características de antenas.	31
2. Parámetros de diseño de LNA.	33
3. Tabla de características de transistores.	43
4. Tabla de caracterización del LNA	66

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	72
ANEXO B	80
ANEXO C	83

RESUMEN

TÍTULO: : DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA DETECCIÓN DE PULSOS DE RADIO PRODUCIDOS POR ASTROPARTÍCULAS.¹

AUTOR: JESÚS DAVID BONILLA NEIRA²

PALABRAS CLAVE: ASTROPARTÍCULAS, RADIO, ANTENAS, RADIOASTRONOMÍA.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo se desarrolla en el contexto de la detección de astropartículas en Colombia. Existen diferentes técnicas de detección entre las cuales están los tanques Cherenkov, los centelladores, los detectores de fluorescencia, los arreglos de antenas, entre otros. Específicamente en este trabajo se estudia el detector compuesto de un arreglo de antenas para la recepción de señales de radio producidas por las lluvias de partículas, estas se generan en la atmósfera a causa de la incidencia de astropartículas.

En esta investigación se muestra el diseño y la construcción de un sistema para la detección de las señales de radio frecuencia en la banda de VHF producidas por los fenómenos astrofísicos de las lluvias de partículas. El sistema tiene cuatro componentes. El primero es una antena receptora, de doble espira perpendicular y 1.2 metros de diámetro. El segundo es un balun para adaptar la impedancia de la antena a la siguiente etapa. El tercero es un amplificador de bajo ruido que permite alcanzar la sensibilidad necesaria para diferenciar la señal de la radiointerferencia del medio. El cuarto componente es un SDR que permite utilizar su hardware para el estudio del sistema.

Finalmente, se realizó una verificación a la implementación del sistema, una serie de pruebas para corroborar el funcionamiento y analizar las posibles mejoras que se pueden realizar al mismo. El desarrollo de este proyecto se realizó en conjunto entre el Grupo Halley de astronomía y ciencias aeroespaciales de la UIS, el grupo de investigación radiogis de la UIS y el Instituto de tecnología en detección de astropartículas ITEDA, perteneciente a la comisión nacional de energía atómica de Argentina.

¹Trabajo de Grado.

²Facultad: Ingenierías Fisicomecánicas. Director: Dr.Ernesto Aguilera Bermudez. Codirector: Dr.Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez – Msc. Christian Sarmiento Cano

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SYSTEM FOR THE DETECTION OF RADIO PULSES PRODUCED BY ASTROPARTICLES.³

AUTOR: JESÚS DAVID BONILLA NEIRA.⁴

KEY WORDS: ASTROPARTICLES, RADIO, ANTENNAS, RADIO ASTRONOMY.

DESCRIPTION:

This work is developed in the context of astroparticle detection in Colombia. There are different detection techniques among which are Cherenkov tanks, scintillators, fluorescence detectors, antenna arrays, among others. Specifically, this work studies the detector composed of an antenna array for the reception of radio signals produced by particle showers, which are generated in the atmosphere due to the incidence of astroparticles.

In this research, the design and construction of a system for the detection of radio frequency signals in the VHF band produced by the astrophysical phenomena of the particle showers is shown. The system has four components. The first one is a receiving antenna, of double perpendicular spiral and 1.2 meters of diameter. The second is a balun to match the impedance of the antenna to the next stage. The third is a low noise amplifier to achieve the necessary sensitivity to differentiate the radio interference signal from the medium. The fourth component is an SDR that allows the use of its hardware for the study of the system.

Finally, a verification of the implementation of the system was carried out, a series of tests to corroborate the operation and to analyze the possible improvements that can be made to the system. The development of this project was carried out jointly by the Halley Group of Astronomy and Aerospace Sciences of the UIS, the radiogis research group of the UIS and the Institute of Technology in Astroparticle Detection ITEDA, belonging to the National Atomic Energy Commission of Argentina.

³Bachelor Thesis.

⁴Facultad: Ingenierías Fisicomecánicas. Director: Dr. Ernesto Aguilera Bermudez. Codirector: Dr-Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez – Christian Sarmiento Cano

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de radiación producidos por partículas provenientes de espacio exterior han sido objeto de estudio desde hace más de 100 años. Estas partículas pueden originarse en objetos astrofísicos galácticos o extragalácticos y son conocidas como astropartículas. Y al interactuar con la atmósfera pueden generar cascadas de partículas secundarias, las cuales son detectadas por observatorios ubicados en la superficie terrestre.

Así mismo, las astropartículas al interactuar con el campo geomagnético producen radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda. Una de ellas está en el régimen del radio y es generado por dos efectos físicos. El primero de ellos da por la deflexión de las partículas cargadas con el campo geomagnético y el segundo, cuando las partículas se acumulan en el frente de la lluvia con velocidades cercanas a las de la luz lo que da lugar al efecto Askaryan. Actualmente, existen diferentes métodos de detección de astropartículas en tierra. Entre ellos se destacan los tanques Cherenkov de agua, como los instalados por el Grupo Halley de Astronomía en la UIS, los cuales detectan la radiación dejada por los secundarios al atravesar el tanque detector. Así mismo, se encuentran los telescopios de fluorescencia, ellos captan la radiación generada por las partículas secundarias en el aire, lo que permite estudiar parte de su evolución. Sin embargo, estos telescopios solo pueden ser usados en noches sin luna.

Por otra parte están las antenas de radio, instaladas por primera vez en los años 60 y la cual basa su funcionamiento en detectar la radiación producida por las partículas en la atmósfera. Estas tienen como principal ventaja el bajo costo de fabricación, comparado con los WCD y FD, el ciclo de funcionamiento es durante las 24 horas de día y por sus características la eficiencia de detección aumenta cuando las lluvias tienen un ángulo cenital superior a 45° .

En este contexto surge este trabajo, el cual tiene como objetivo el diseño de una de las estaciones para el sistema de detección de las señales de radiofrecuencia, entre las frecuencias de 30 MHz hasta los 80 MHz, producidas por astropartículas. Además, se plantea la implementación del sistema y la corroboración mediante mediciones para analizar su comportamiento.

Esta investigación se fundamenta en los trabajos hechos en diferentes observatorios de astro-partículas alrededor del mundo. Y tiene como objetivo la construcción de la estación prototipo para un arreglo de sistemas de radiodetección. Este arreglo sería único en latitudes cercanas al ecuador y el segundo en Latinoamérica.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. LAS ASTROPARTÍCULAS

En la actualidad se define la radiación cósmica como partículas provenientes del espacio, principalmente núcleos atómicos, partículas neutras y fotones. Estas abarcan un rango de energía de aproximadamente $10^8[eV]$ hasta $10^{20}[eV]$. Los objetos astrofísicos capaces de generar estas energías son pulsares, remanentes de supernova o núcleos activos de galaxias.¹

Existen varios observatorios alrededor del mundo que realizan investigaciones en el campo de las astropartículas tales como Pierre Auger Observatory, LAGO² HAWC³, KASCADE⁴, ICECUBE⁵, entre otros. Estas son grandes colaboraciones internacionales que estudian los diferentes fenómenos de este tipo de radiación.

Se utilizan diferentes métodos para detección de astropartículas como: detectores de superficie (SD, por sus siglas en inglés), compuestos de tanques Cherenkov de agua; detectores de fluorescencia (FD, por sus siglas en inglés) que tienen la capacidad de medir la radiación ultravioleta causada por partículas en la atmósfera. También, se encuentran detectores de radio (RD, por sus siglas en inglés), los cuales se componen de arreglos de antenas que junto con otros métodos detectan ondas de radio producidas por la interacción de partículas con el campo magnético terrestre. Este último método lo trataremos más a profundidad en el presente trabajo.

¹ASOREY, Hernán. *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 2012, pág. 8.

²ASOREY, Hernán. «Lago: the latin american giant observatory». En: *PoS* (2016), págs. 7-15.

³DeYOUNG, Tyce; Collaboration, HAWC y col. «The HAWC observatory». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (2012).

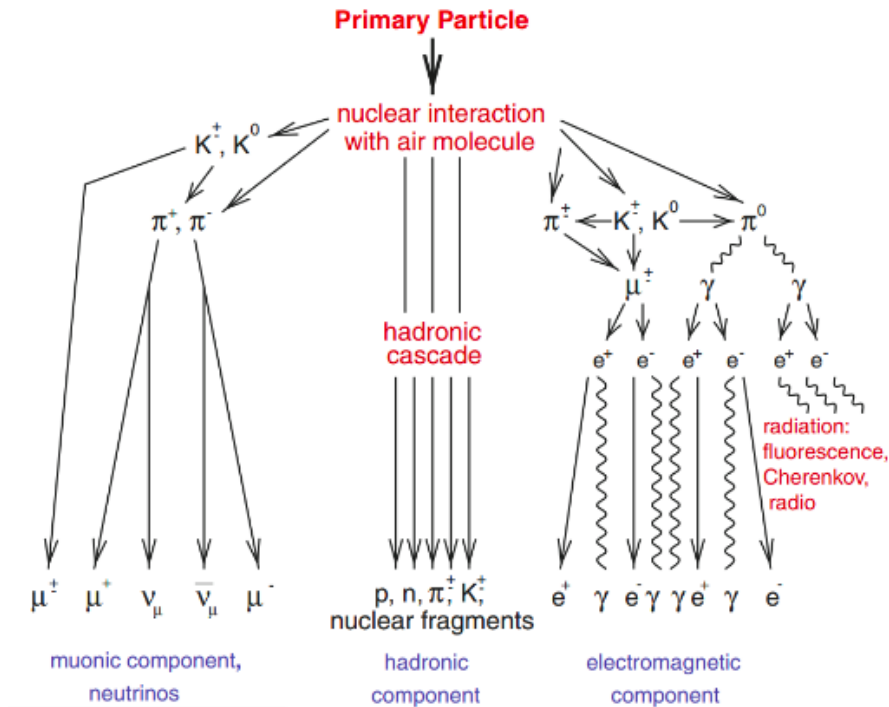
⁴KLAGES, HO; APEL, WD y col. «The KASCADE experiment». En: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* (1997).

⁵AARTSEN, MG; ACKERMANN y col. «The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems». En: *Journal of Instrumentation* (2017).

1.1.1. lluvias atmosféricas extendidas El nombre de lluvias atmosféricas extendidas (EAS, por sus siglas en inglés) se le atribuye a las cascadas de partículas que se generan por la interacción de una partícula primaria con la atmósfera. Durante el recorrido a través de la atmósfera se originan billones de partículas secundarias, o simplemente secundarios.

Las lluvias tienen tres componentes principales: hadrónica, muónica y electromagnética, como se muestra en la figura ???. Este trabajo se concentra en la detección de la componente electromagnética de la lluvia. Las EAS son detectadas con los observatorios en tierra. Con su estudio se busca encontrar entre otros la naturaleza del primario y su origen.⁶

Figura 1: Esquema de componentes de una lluvia de partículas, componente muónica, hadrónica y electromagnética.



Fuente: 6.

⁶HAUNGS, Andreas; REBEL, Heinigerd y ROTH, Markus. «Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays». En: *Reports on Progress in Physics* 66.7 (2003).

1.2. RADIOFRECUENCIAS EN LLUVIAS ATMOSFÉRICAS

A principios de los años sesenta Jelley planteó la emisión de radio producida por *EAS*⁷⁸. En 1956 él hizo mediciones a frecuencias alrededor de los 44[MHz]. En años posteriores al descubrimiento, los avances en el área fueron lentos. debido a las limitaciones de la tecnología de la época. Más tarde, con la llegada de la era digital de la electrónica, el crecimiento del área fue exponencial. En la actualidad se conoce que estas señales de radio pueden observarse en un rango de 2 a 550[MHz].⁹ Existen dos mecanismos de generación de señales de radio producidos por EAS que se describen a continuación.

1.2.1. emisión geomagnética Este fenómeno es el principal mecanismo de emisión de radio de las astropartículas. Este se puede resumir en la interacción de las partículas cargadas con el campo magnético de la tierra¹⁰, las cuales son aceleradas generando radiación que se rige por la fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.1)$$

donde q indica la carga, \vec{v} la velocidad de la partícula y \vec{B} el campo magnético de la tierra. Esta fuerza es la responsable de la separación de cargas opuestas, ver figura 2a, la cual genera radiación dipolo en frecuencias de radio y su dirección de propagación es en la del avance de la lluvia.y

Por otra parte, en la emisión por efecto geomagnético solo los electrones y positrones contribuyen de manera significativa en el proceso de generación de señal de radio. Se le atribuye más del 80% de la emisión total de radio de una lluvia.

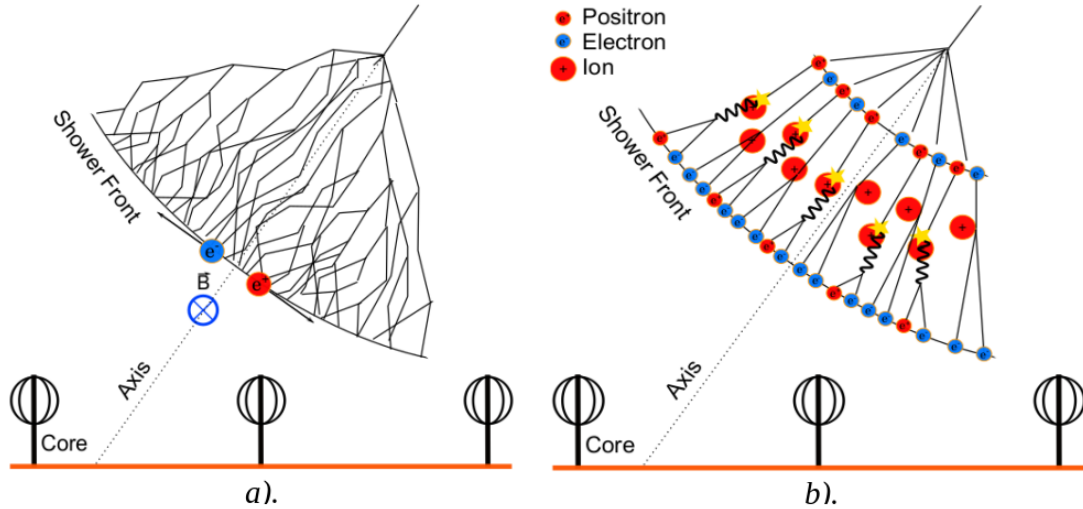
⁷ASKAR'YAN, G.A. «Excess negative charge of an electron-photon shower and its coherent radio emission». En: *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 14 (1962).

⁸JELLEY, JV y col. «artículo 6 autores Radio pulses from extensive cosmic-ray air showers». En: *Nature* 205.4969 (1965), pág. 327.

⁹HUEGE, Tim. «Radio detection of extensive air showers». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (2017), pág. 207.

¹⁰KAHN, Franz Daniel y LERCHE, I. «Radiation from cosmic ray air showers». En: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 289.1417 (1966), pág. 207.

Figura 2: Representación gráfica de la emisión de radio por efecto geomagnético (a.) y por efecto Askaryan (b.).



Fuente: 11

1.2.2. emisión por exceso de carga Existe un efecto secundario que corresponde a la acumulación de carga negativa en el frente de la lluvia. Este efecto se considera secundario ya que representa entre un 10 % y 20 % de la emisión de radio total.

La causa principal de este efecto se debe a que el medio (aire) es ionizado por las partículas de la lluvia y los electrones de ionización son barridos por la cascada; mientras que los iones positivos mucho más pesados se quedan atrás, ver figura 2b. Se tienen herramientas de simulación que se han desarrollado en investigaciones de las *EAS*, estas permiten visualizar y reconocer las características de las mismas bajo ciertos parámetros. En el caso de la emisión de radio, el código CoREAS¹¹ permite realizar simulaciones de emisiones radioeléctricas mediante el método de Montecarlo.

Por otra parte, las mediciones de este fenómeno tiene características que lo hacen un reto para el diseño electrónico. La duración de los pulsos de radio es de aproximadamente decenas de nanosegundos, por lo tanto, se requiere de una electrónica capaz de muestrear estas señales¹². La incidencia del ruido en la medición de estas señales es crítico, ya sea ruido galáctico, ruido propio del sistema o ruido producido por radio interferencia (RFI, por sus siglas en inglés).

¹¹HUEGE, Tim; LUDWING, Marianne y JAMES, Clancy W. «Simulating radio emission from air showers with CoREAS». En: (2013).

¹²KLEIFGESS, M y col. «Measurement of cosmic ray air showers using MHz radio-detection techniques at the Pierre Auger Observatory». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 718 (2013), pág. 500.

Por esto se requieren técnicas de control y reducción del ruido. También es importante tener en cuenta que las variaciones de campo eléctrico producidas por tormentas eléctricas pueden influenciar las mediciones.¹³ Este fenómeno es abordado por otro trabajo del grupo de investigación, en el cual se desarrollan instrumentos para realizar mediciones de dicha influencia. La detección de astropartículas a través de técnicas de radio detección ha tenido su desarrollo en los últimos 50 años. El estudio de los pulsos de radio producidos en las lluvias considera las siguientes ventajas:

- La emisión de radio es causada por la componente electromagnética de la lluvia, esta no es muy susceptible a las incertidumbres de modelos de interacción hadrónica.¹⁴
- Las mediciones de emisión de radio se pueden hacer de manera continua es decir, el 100 % del ciclo útil.¹⁵
- La atmósfera es transparente a frecuencias de VHF(30 a 300[MHz]), por lo tanto no hay pérdidas relevantes.
- La señal de radio está asociada al desarrollo longitudinal de la lluvia, esta debe ser sensible al un estimador conocido como X_{max} .¹⁶ Este parámetro es de alto interés de investigación en campo de las astropartículas.
- El desarrollo de la era digital de la electrónica y sistemas de bajo costo y consumo, hacen el tratamiento de las señales se facilite a medida que los instrumentos se sofisticuen.¹⁷

Actualmente varias colaboraciones internacionales investigan en el campo de la emisión de radio por EAS tales como AERA¹⁸ (Auger Engineering Radio Array, por sus siglas en inglés),

¹³KRAUSE, Maria. *Calibration of the LOFAR antennas*. Radboud University Nijmegen, Netherlands, 2016, pág. 10.

¹⁴FALCKE, Henio y GORHAM, Peter. «Detecting radio emission from cosmic ray air showers and neutrinos with a digital radio telescope». En: *Astroparticle Physics* 19.4 (2003), págs. 477-494, pág. 33.

¹⁵HUEGE, Tim. «Radio detection of cosmic ray air showers in the digital era». En: *Physics Reports* (2016).

¹⁶Ibíd.

¹⁷Ibíd.

¹⁸FUNCHS, Benjamin; Collaboration, Pierre Auger y col. «The Auger engineering radio array». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 692 (2012), págs. 93-97.

LOFAR¹⁹(Low-frequency Array, por sus siglas en inglés), Tunka-Rex²⁰ (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy), entre otros.

¹⁹Haarlem, Michael P van y col. «LOFAR: The low-frequency array». En: *Astronomy & astrophysics* 556 (2013), A2.

²⁰BEZYAZEEKOV, PA y col. «Measurement of cosmic-ray air showers with the Tunka Radio Extension (Tunka-Rex)». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2015), págs. 89-96.

2. CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ESTACIÓN

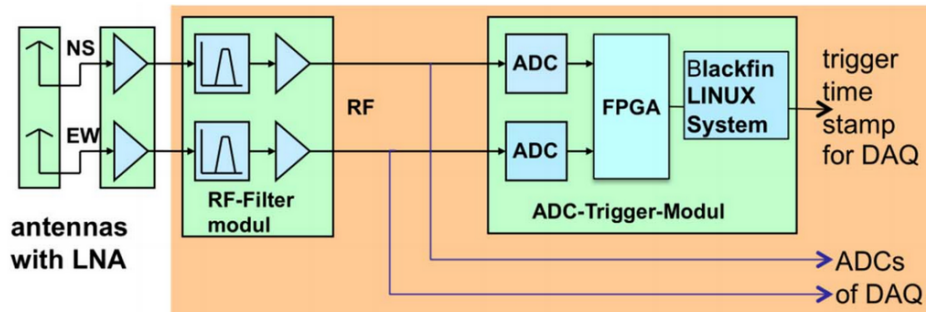
En el capítulo anterior se describió el fenómeno que produce radiofrecuencias debido a EAS, junto con las herramientas teóricas que se manejarán en este trabajo. En este capítulo se darán las pautas para el diseño de la estación de radio detección, es decir, que se mostrarán para cada etapa los parámetros y el proceso de diseño que requieren.

La mayoría de sistemas de detección están formados por un arreglo de varias estaciones, donde cada estación esta compuesta por una antena de detección, un sistema de radiofrecuencia, procesamiento de señales y un sistema de comunicaciones que integre todas las estaciones.

Este trabajo tiene como objetivo colaborar en el diseño de un sistema de detección para lluvias producidas por partículas, basados en los diferentes observatorios mencionados anteriormente. En particular, se realizará el estudio del diseño del sistema de radiofrecuencia.

El desarrollo del diseño para este proyecto, se limita a las etapas de antena y amplificador y se basa en los sistemas ya implementados en las colaboraciones mencionadas anteriormente. Un ejemplo de esquema general se muestra en la figura 3. Existen variaciones entre los detectores de los diferentes observatorios. Sin embargo, se ilustra un modelo de receptor completo con las etapas en cascada.

Figura 3: Esquema general modelo de un observatorio



Fuente: 1.

La recepción y digitalización de las señales involucran sistemas complejos, por simplicidad se plantea el uso de un dispositivo SDR, del inglés *Software Define Radio*. Este último permite la manipulación de señales de radiofrecuencia mediante código, junto con un sistema de recepción de señales de radio embebido. El SDR simplifica el diseño del sistema de radio ya que permite integrar el demodulador junto con la etapa de digitalización y procesamiento de datos.

Antes de examinar las características específicas de cada etapa del sistema¹, se requiere tener en cuenta el proceso de diseño y el contexto en el que se desea hacer el desarrollo. Esto indica que es necesario establecer una línea metodológica de diseño, la cual se muestra a continuación.

- 1 Declaración del problema.
- 2 Diseño conceptual.
- 3 Implementación.
- 4 Verificación.

A partir de esta línea cronológica se trabajó el diseño de la estación, cada etapa posee características diferentes y requiere diferente manejo. Esto se verá en el desarrollo del trabajo.

2.1. REQUISITOS PRELIMINARES

En la definición del problema se describen las características del reto de diseño que se plantea. Esto hace parte de una buena práctica del proceso de diseño en ingeniería.

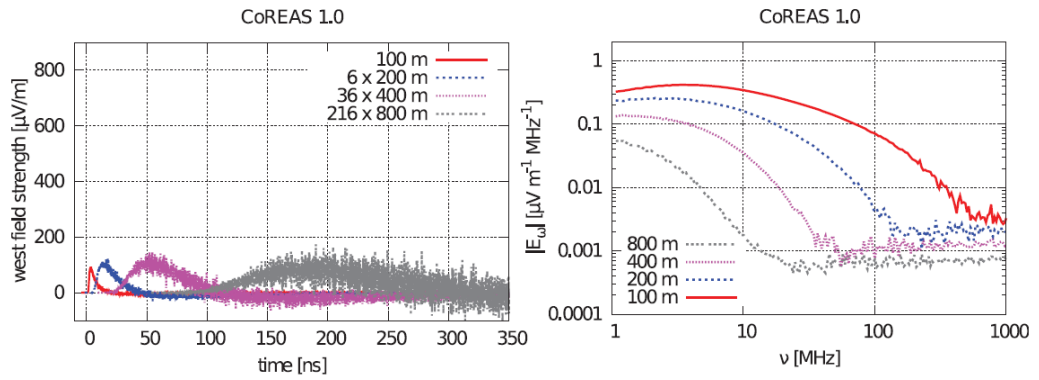
Para efectos de este trabajo, se deben definir los prerrequisitos de la detección de ondas de radio producidas por astropartículas.

Como se mencionó anteriormente, el estudio de EAS se realiza mediante simulaciones donde los modelos empleados se basan en mediciones de distintos experimentos. A continuación se dará una descripción general de los puntos de interés sobre el estudio del desarrollo de las ondas producidas por EAS mediante simulaciones Montecarlo.

¹Gemmeke, Hartmut y col. «Techniques for Radio Detection of Ultra-High Energy Cosmic Rays». En: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56.3 (2009), págs. 1083-1088.

Los parámetros de entrada de las simulaciones son: tipo de partícula primaria, ángulo θ (ángulo del eje de la lluvia con la vertical), altitud a la que se encuentra el detector y posición geográfica. Los parámetros de salida entre otros son: el espectro de frecuencias de radio que produce una EAS y el nivel de señal que llega al detector, es decir magnitud de campo eléctrico $|\vec{E}|$.² Estas simulaciones permiten evaluar con anterioridad los requisitos eléctricos para la detección de las señales deseadas.³ En la figura 4, se muestra la señal de radio y espectro de amplitud simulado con el código con CoREAS⁴, para una lluvia aérea vertical de $10^{17}eV$, inducida por un protón.

Figura 4: Espectro de señales de radio producido por EAS.



Fuente: 5.

Las señales provenientes de las lluvias atmosféricas poseen magnitudes en el orden de las decenas de $\mu V/m$ ⁵. Las frecuencias de las ondas de radio detectadas dependen de la energía del primario. Es por eso que es necesario acotar el intervalo de energías de detección y enmarcar un objetivo de estudio. De la teoría de los mecanismos de producción de radio en EAS, ver sección 1.2, es un factor importante la magnitud del campo magnético terrestre $|\vec{B}|$ en el sitio del detector. La detección se favorece a medida que $|\vec{B}|$ es más intenso según la ecuación 1.1.

²Huege, Tim; Ulrich, R y Engel, R. «Monte Carlo simulations of geosynchrotron radio emission from CORSIKA-simulated air showers». En: *Astroparticle Physics* (2007), págs. 392-405.

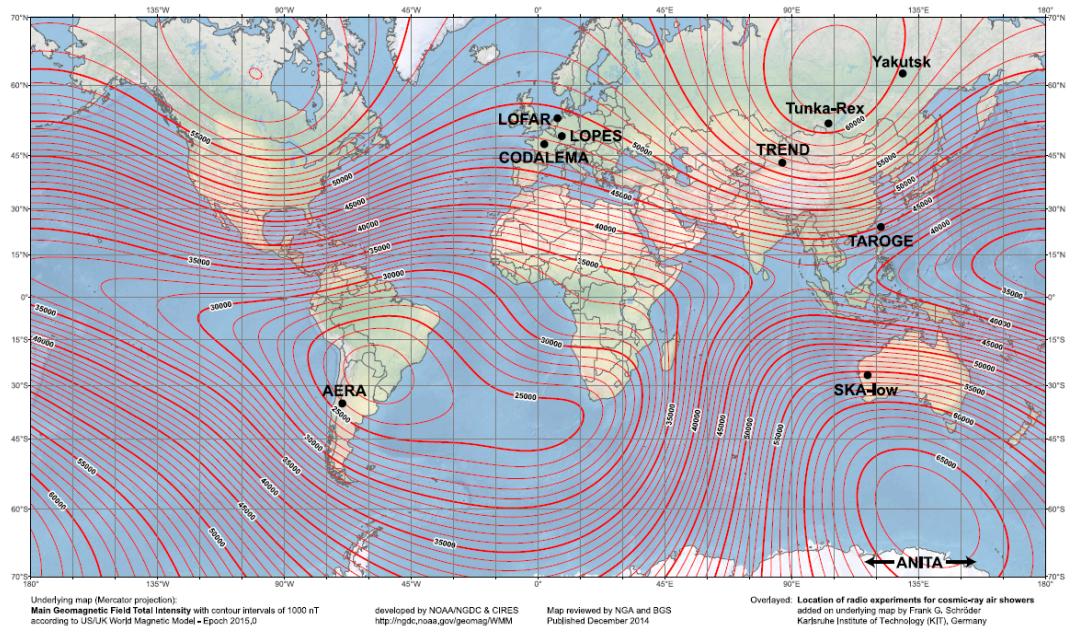
³KRAUSE, RAPHAEL. «Detection of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays with the Auger Engineering Radio Array». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2017).

⁴HUEGE; LUDWING y JAMES, «Simulating radio emission from air showers with CoREAS», óp.cit.

⁵Hiller, Roman. «Radio measurements for determining the energy scale of cosmic rays». En: (2016).

En la figura 5 se muestra la magnitud de campo magnético en los observatorios alrededor del mundo.

Figura 5: Mapa de observatorios y líneas de campo



Fuente:6.

Por otra parte, las señales de radio producidas por EAS cubren el rango de 2 a 550 [MHz], este rango incluye las bandas HF (3–30 [MHz]), VHF (30–300 [MHz]), y una franja de UHF (300 a 3000 [MHz])⁶. Estas bandas son utilizadas con diferentes fines dependiendo de la región. En Colombia ANE (Agencia Nacional del Espectro) es la agencia que rige la distribución del espectro radioeléctrico.⁷ La agencia brinda información detallada de dónde se encuentran las bandas mencionadas y su uso. Con esos datos se puede conocer qué señales se tienen en determinada banda en ciertos lugares, así como los niveles de ruido y señales esperadas tanto por ruido del ambiente (rural y galáctico)⁸. En términos de la temperatura de ruido, para el galáctico es alrededor de 5000 K a 60 [MHz], mientras el rural es de aproximadamente 10000

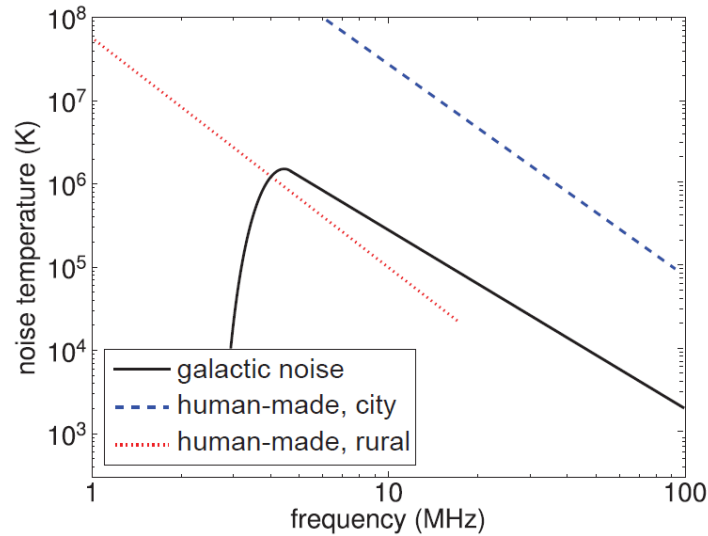
⁶Schröder, Frank. *Instruments and methods for the radio detection of high energy cosmic rays*. Springer Science & Business Media, 2012.

⁷Colombia, Gobierno de. «ANE». En: (2002).

⁸Thompson, A Richard. «ITU-R recommendations of particular importance to radio astronomy». En: *Spectrum Management for Radio Astronomy* 1 (2004), pág. 121.

K a 60[MHz]. En la figura 6 se muestra la temperatura de ruido en función de la frecuencia.⁹

Figura 6: Temperatura de ruido del entorno según ITU.



Fuente: 9.

2.2. DISEÑO DE LA ANTENA

A medida que se han desarrollado detectores se han estudiado las diferentes características para que el sistema tenga una mejor relación costo-eficiencia. En el caso de las antenas, las características son tanto eléctricas (directividad, ganancia, ruido) como estructurales y de costo (materiales, forma, tamaño). Estas últimas ganan importancia a medida que se aumente el número de estaciones en un arreglo de antenas, el sitio donde se ubique o el perfil climático del mismo.

La variedad de características de los sitios en los que se ubican los observatorios y los requisitos de recepción mínimos, hacen que existen diferentes antenas para esta aplicación. A continuación, se describen tres antenas actualmente instaladas y en funcionamiento en diferentes laboratorios alrededor del mundo, con el fin de hacer un sondeo y estudio de las posibilidades de elección.

⁹Hiller, «Radio measurements for determining the energy scale of cosmic rays», óp.cit.

2.2.1. antena tipo lpda La antena LPDA (*Logarithmic Periodic Dipole Antenna*, figura 7, fue adaptada por primera vez en LOPES-STAR¹⁰ y posteriormente en AERA. Se constituye de una serie de dipolos $\lambda/2$ de longitudes diferentes. Los cuales se posicionan en un eje desde el más largo, en la parte inferior, al más corto en la parte superior. Los límites del ancho de banda de esta antena se dan por las frecuencias de resonancia del dipolo más corto y más largo. La distancia entre los dipolos siguen una función logarítmica de la frecuencia. En la implementación de estos experimentos se cubrió el rango de 30[MHz] hasta 80[MHz]. Esta antena integra dos planos independientes en una sola estructura, es decir, dos antenas en un mismo eje dispuestas perpendicularmente una de la otra. Por otra parte, las dimensiones son de $4m \times 4 \times 3,5 m$ con un peso de 20 Kg. Esta antena se considera de patrón unidireccional con el lóbulo principal en sentido del eje¹¹.

Figura 7: Antena LPDA en AERA.



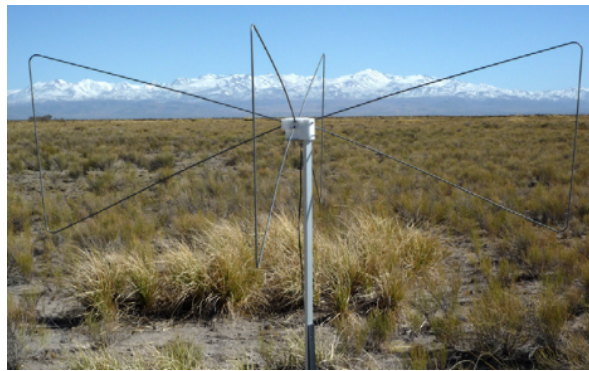
Fuente: 11.

¹⁰HUEGE, Tim y col. «The LOPES experiment—recent results, status and perspectives». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 662 (2012), S72-S79.

¹¹Collaboration, Pierre Auger y col. «Antennas for the detection of radio emission pulses from cosmic-ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory». En: *Journal Of Instrumentation*, 2012, vol. 7, p. P10011-1-P10011-49 (2012).

2.2.2. antena tipo butterfly La antena *butterfly*, figura 8, denominada así por su morfología de mariposa, es un antena activa desarrollada para el observatorio CODALEMA¹². Los brazos de esta antena son triángulos isósceles, hechos de varilla de aluminio de 6 mm de grosor. Los dipolos son conectados directamente a los canales de un amplificador de bajo ruido, lo que hace a esta una antena activa en concepto. Así mismo, su sensibilidad ha sido optimizada, ya que la impedancia de entrada de la antena está diseñada independiente de la impedancia del dipolo en función de la frecuencia, por lo que recibe señal en longitudes de onda mayores a las permitidas dadas sus dimensiones. Su diseño permite detectar frecuencias desde 25[MHz] a 85[MHz]. Esta antena se instala a 1.5 m del suelo, utiliza la onda directa y la reflejada del suelo para mejorar su señal.

Figura 8: Antena Butterfly en Nancay Radio Observatory.



Fuente: 11.

2.2.3. antena tipo salla La antena SALLA por *short aperiodic loaded loop antenna*, figura 9, es una antena de dos espiras perpendiculares de 1,2m de diámetro tipo Beverage¹³. En el diseño de este tipo de antenas la espira tiene dos conexiones, una en la parte inferior donde se unen los dos arcos por medio de una resistencia, y otro en la parte superior donde está la salida al LNA. Para el caso de la SALLA, la resistencia es de 500Ω , esta resistencia modifica el patrón de la antena para darle directividad. Esto hace que el LNA amplifique las señales que inciden desde arriba, mientras las que vienen desde abajo serán disipadas por la

¹²ARDOUIN, D y col. «Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 555.1-2 (2005), págs. 148-163.

¹³BEVERAGE, Harold H. *Antenna*. US Patent 2,247,743. Jul. de 1941.

resistencia. La adaptación de la antena al LNA se realiza por medio de un transformador de línea de transmisión 3:1.

Figura 9: Antena SALLA en Tunka-Rex.

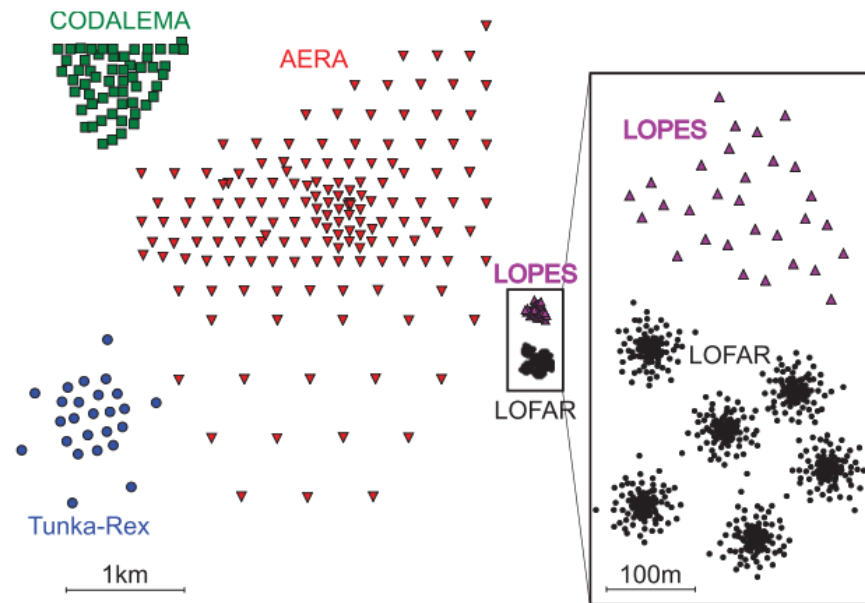


Fuente:11.

2.2.4. selección de la antena Tomando en cuenta las descripciones de las tres antenas en estudio, se realiza un resumen detallado de las características con las cuales se discriminan las antenas. Se plantea una comparación entre la viabilidad del desarrollo de un posible arreglo antenas. Dicha viabilidad depende de la locación donde se disponga el posible arreglo de antenas, ya sea por comodidad de instalación, como por condiciones climáticas. Así mismo, es importante la cantidad de antenas basados en lo descrito anteriormente a mayor número de antenas mejor es la detección, ya que se mejora la relación de señal a ruido y la resolución espacial.

Los arreglos situados alrededor del mundo no solo cuentan con varias antenas sino con alta concentración en poco espacio, es decir, arreglos extensos pero a la vez tupidos de estaciones. Para dar algunos ejemplos: AERA posee 124 estaciones en 6 km^2 , Tunka-Rex tiene 63 estaciones en 1 km^2 y CODALEMA 60 antenas en $1,5 \text{ km}^2$. Las disposiciones de los arreglos se pueden observar en la figura 10:

Figura 10: Distribución de arreglos de detectores



Fuente: 9.

A partir de las características descritas en la tabla 1, se determinan rápidamente la antena más grande, pesada y costosa, sin embargo las demás características dependen de un poco más de análisis. La robustez se da si las antenas son o no resistentes a condiciones adversas (vientos fuertes o variaciones bruscas de temperatura).

Tabla 1: Tabla de parámetros de antenas

	Antenas		
	LPDA	BUTTERFLY	SALLA
Dimensiones [m]	4 x 4 x 3.5	2 x 2 x 1	1.2 \emptyset
Peso [kg]	20	4	2
B [MHz]	30 - 80	25 - 85	30 - 80
Costo [COP]	924.000	550.000	260.000
Robustez	Sí	Sí	No
$\Delta\theta_{-3dB}$ E y H	100° - 160°	No especifica	150° - 150°
$D(\theta, \phi)$ vs f	No	Sí	No

El parámetro $\Delta\theta_{-3dB}$ se conoce como ancho del haz a $-3dB$, y se define como el intervalo angular en el que la densidad de potencia radiada es igual a la mitad de la potencia máxima, lo que indica que entre más ancho es el haz mejor es la recepción para ángulos de incidencia de $45^\circ < \theta < 90^\circ$.¹⁴

Las frecuencias no serían un parámetro de discriminación si no colindaran con bandas declaradas para radiodifusión, esto quiere decir que, entre más cerca a dichas bandas las señales indeseadas son de mayor potencia. También está la independencia de la directividad a la frecuencia, lo que indica si la directividad, ver sección 6, cambia o no cuando la frecuencia varía. Esto es importante para que la antena tenga una respuesta estable en la banda de frecuencias requerida.

En resumen, las tres antenas cumplen con los requisitos eléctricos, ya que han sido diseñadas en los observatorios para esta aplicación, sin embargo, difieren en las características mostradas en la tabla 4. De acuerdo a lo anterior, se seleccionó la antena SALLA por su construcción compacta debido a su tamaño, implementación y mantenimiento sencillo, buen ancho de recepción, robustez y bajo costo.

¹⁴HUEGE, «Radio detection of cosmic ray air showers in the digital era», óp.cit.

2.3. DISEÑO DEL LNA

El diseño del amplificador de bajo ruido tiene como principal misión mantener una buena relación entre la señal y el ruido. Para esto, primero se deben evaluar los requerimientos de la aplicación, luego se hace una selección de componentes y por último un diseño de circuito impreso teniendo en cuenta técnicas de reducción de ruido e interferencia en radiofrecuencia (RFI *Radio Frequency Interference*), soportándose en la compatibilidad electromagnética (EMC *Electromagnetic Compability*).

El LNA es la primera etapa del receptor, por lo tanto el manejo de la figura de ruido y de la ganancia resulta de gran importancia, tal como se muestra en la ecuación 19. Con base en la ecuación de Friis 19, la ganancia debe ser superior a $10dB$, esto para que la figura de ruido de todo el sistema sea dominada por la del LNA.

Por otra parte, los LNA diseñados para esta aplicación se plantean a medida, es decir, con las condiciones propias de cada detector como lo son estructura, tamaño, tolerancia a determinadas temperaturas, etc. Por ejemplo, para las antenas LPDA usadas en AERA, se diseñó un LNA de un canal (canal por antena), estructura acoplada a la antena como se muestra en la figura 11 (izquierda). Mientras que para la antena SALLA utilizada en Tunka-Rex, fue un LNA de doble canal, estructura anti RFI ver figura 11 (derecha), además de utilizar ASIC (*Application-Specific Integrated Circuit*) para estos diseños.

Figura 11: Modelos de LNA implementaos.



Fuente:14.

Para efectos de este trabajo, se propone un diseño similar al hecho para la antena SALLA, un LNA doble canal. Las características eléctricas de frecuencia para la detección, la necesidad

de bajo ruido y alta ganancia ya se han mencionado anteriormente. En resumen, se proponen los siguientes valores como parámetros de diseño para el LNA.

Tabla 2: Parámetros de diseño de LNA.

Parámetro	Valor
Ganancia de potencia mínima	15 dB
Frecuencia central	50[MHz]
Ancho de banda	60[MHz]
Figura de ruido máxima	1,5 dB

3. METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE LA ESTACIÓN

En el capítulo anterior se mostraron las características de la estación, así como los parámetros de diseño a tener en cuenta en el desarrollo. En este capítulo se mostrará la metodología implementada para el diseño de la estación, es decir, las técnicas de diseño que se utilizaron y los resultados obtenidos por las simulaciones, tanto para la antena SALLA como para el LNA.

El proceso de diseño de este trabajo fue desarrollado en parte durante una pasantía de investigación, la cual se realizó en el Instituto de Tecnologías en Detección de Astropartículas (ITEDA), en la ciudad de Buenos Aires, Argentina. Este instituto pertenece a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) de Argentina. Algunos de los resultados del trabajo durante la estadía en el instituto se se mostraran a continuación y en capítulos siguientes.

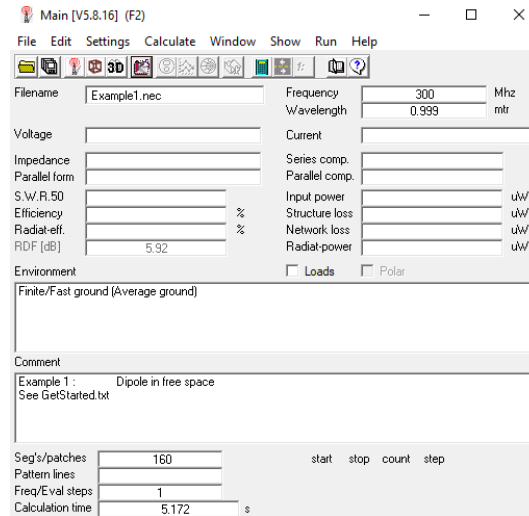
3.1. *4NEC2* SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Para la simulación de las antenas se utilizó el software *4NEC-2*, este es un programa totalmente público para la creación, visualización, optimización y comprobación de las estructuras geométricas de las antenas de estilo 2D y 3D. Está desarrollado para sistemas operativos Windows, aunque también es posible ejecutarlo sistemas Linux por medio de la capa de compatibilidad Wine. Este software implementa simulaciones con base a NEC (*Numerical Electromagnetics Code*), un sistema de modelado de antenas escrito en FORTRAN en la década del 70, y desde entonces a evolucionado en varias versiones hasta *NEC-2* la última versión pública.

El software *4NEC-2* ya ha sido utilizado para la simulación de antenas para detección de EAS, en este trabajo se usará para simular la antena SALLA. Esto permite hacer las simulaciones consistentes con las realizadas para el observatorio Tunka-Rex.¹ En dichas simulaciones describen los parámetros de la antena, el plano E y sus implicaciones en recepción.

¹BEZYAZEEKOV y col., «Measurement of cosmic-ray air showers with the Tunka Radio Extension (Tunka-Rex)», óp.cit.

Figura 12: Pantalla principal de 4NEC-2



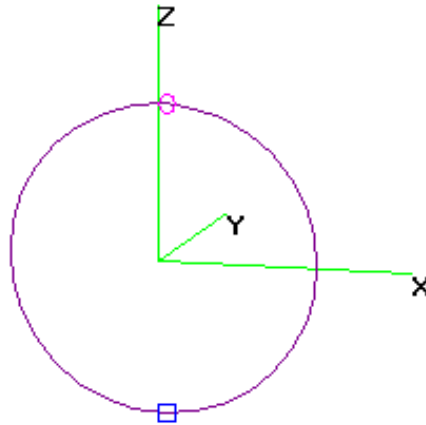
Además, este software de simulación permite modificar la geometría por medio de herramientas visuales y numéricas, así como entradas de texto (por especificaciones de comando) y cargar archivos de configuración.

3.2. SIMULACIÓN DE LA ANTENA

La antena SALLA posee dos espiras de aluminio de 1.2 metros de diámetro perpendiculares entre sí. Posee dos terminales, una inferior más cercana al suelo para la conexión de una resistencia de carga y otra en la parte superior para la salida al LNA.

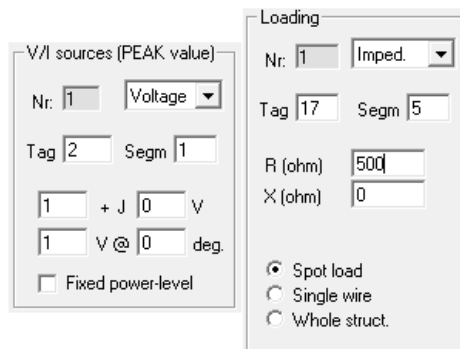
Como proceso de diseño, primero se va a utilizar el modelo con los parámetros ideales, esto quiere decir que, se pondrá la antena en el espacio libre con una espira de conductor perfecto y con resistencia de carga ideal. Esto con el fin de aumentarle complejidad al modelo paulatinamente para observar y analizar las variaciones que le causan las no idealidades al mismo, hasta llegar a la aproximación más real que permita el software.

Figura 13: Esquema de simulación de la antena en espacio libre.



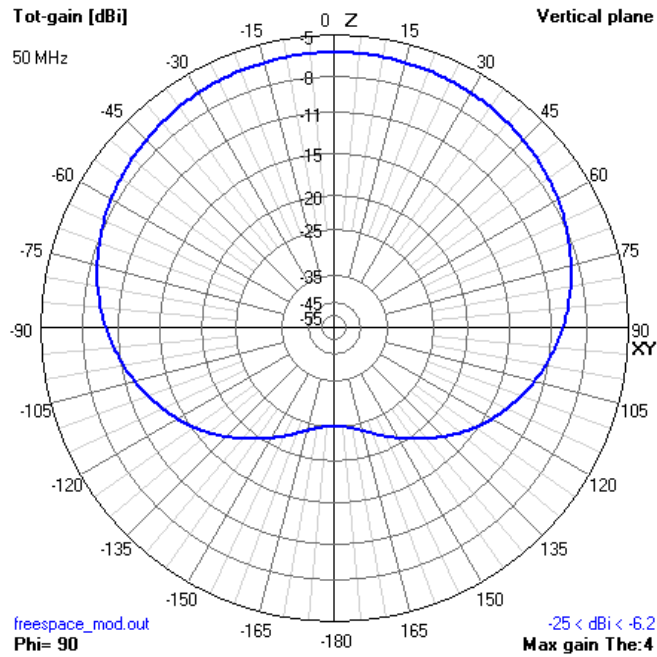
En la figura 13 el círculo superior es la terminal de prueba y el cuadro inferior es la resistencia. El software permite ajustar los parámetros de entrada, de tal forma que se pueda ir modificando según los requerimientos.

Figura 14: Ajuste de parámetros en NEC



Las simulaciones se realizaron a una frecuencia de 50 MHz a menos de que sea especificado. Se analizó el plano E de la antena para observar su ganancia en dBi . Esto muestra también las variaciones de la directividad a medida que se reajustan los parámetros. Para el modelo ideal en espacio libre se tiene que el plano E:

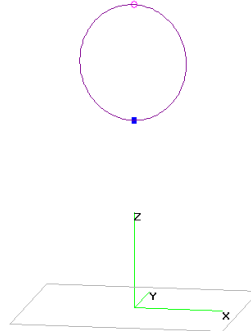
Figura 15: Plano E de la antena en espacio libre



3.2.1. efecto de la tierra Existen diferentes no idealidades que afectan el comportamiento de las antenas, uno de ellos es el efecto que tiene la tierra en el patrón de radiación de una antena. Este fenómeno es causado por las reflexiones de las señales en el suelo hacia la antena. Por esta razón se deben tener en cuenta las características de conductividad de la tierra. Estas se describen de acuerdo a². Por lo cual se debe tener en cuenta la distancia a la que se encuentra la antena de la tierra.

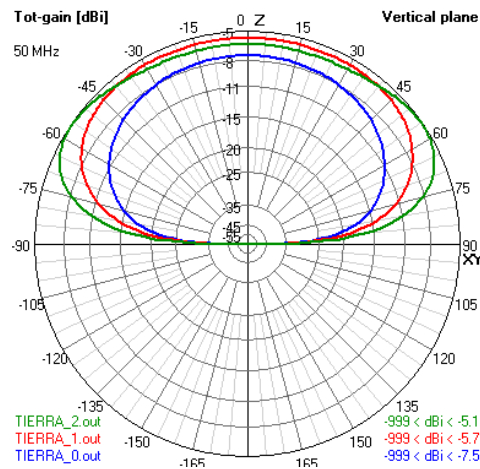
²Thompson, «ITU-R recommendations of particular importance to radio astronomy», óp.cit.

Figura 16: Esquema de la simulación con plano de tierra



Para modelar los efectos dados por la tierra, *4NEC-2* permite simular planos de tierra con diferentes características, como las mencionadas en³. A continuación se muestra una simulación de la antena SALLA de la figura 13 con un plano de tierra de conductividad promedio a diferentes distancias. En la figura 17 La línea verde muestra la respuesta de la antena a una altura de 2 metros de la tierra, la línea roja muestra la respuesta a una altura de 1 metro y la línea azul es con la antena sobre el plano de la tierra.

Figura 17: Variación de distancia a tierra.



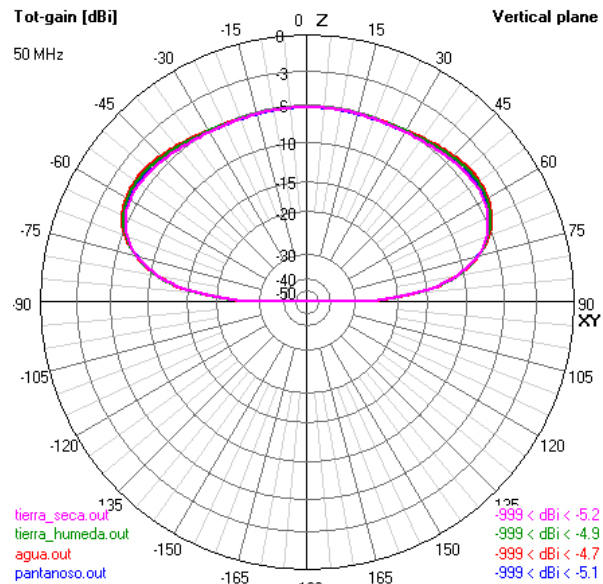
Como se mencionó en el capítulo anterior, en el diseño de la antena se busca la detección en

³Ibíd.

los ángulos superiores a 45°. Se deduce a partir de la figura 17 que la antena debe estar a una distancia entre 1 y 2 metros del suelo, donde no pierde mucha directividad en el eje z y sí amplía la directividad en los ángulos mencionados. Por efectos de instalación se propone poner la antena a una distancia de 1.6 metros.

De la misma forma si se cambia la conductividad de la tierra, es decir su composición, se debería encontrar que la antena es poco sensible a dichos cambios, en este sentido, la antena sería robusta. Para esta simulación se utilizaron las conductividades dadas en *4NEC-2* para tierras de tipo seca, húmeda, agua y pantanosa. Manteniendo la tierra a una distancia fija de 1.6 metros del suelo se obtuvo el siguiente resultado:

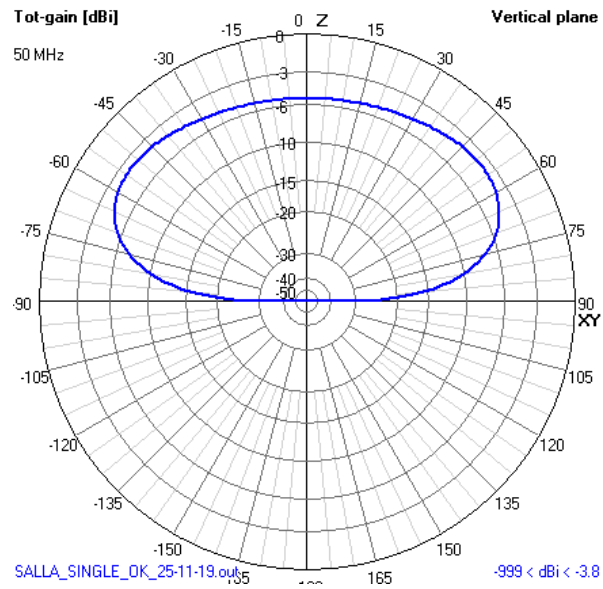
Figura 18: Variaciones de tipo de tierra en antena.



donde el patrón rosado es el correspondiente al obtenido con tierra seca, el patrón verde al de tierra húmeda, el patrón rojo al de tierra con alto mayor porcentaje de agua y por último el patrón azul correspondiente al de tierra pantanosa.

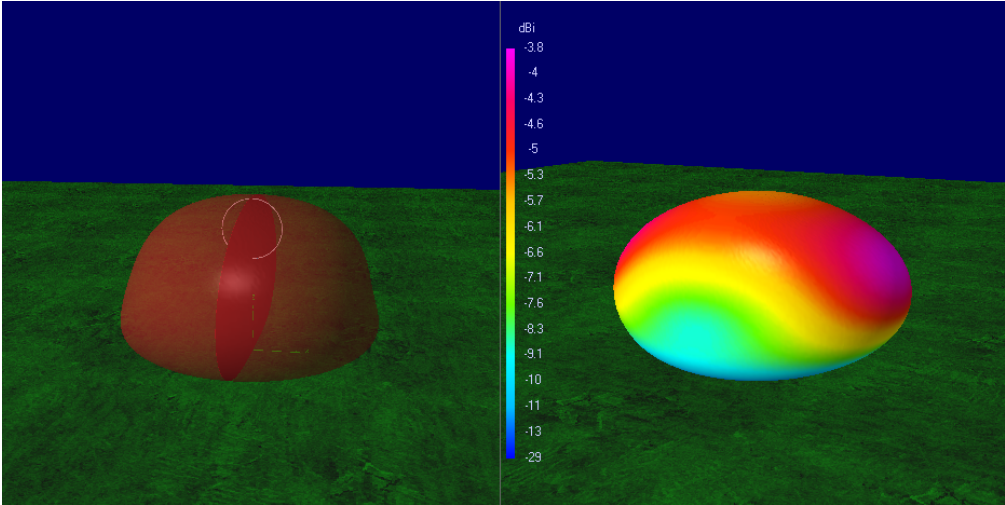
3.2.2. modelo de la antena Se eligió entonces el modelo de la antena a 1,6– metros de distancia del suelo, esto debido a los resultados de simulación de las variaciones de altura. Se simula una espira como parámetro de evaluación, ya que ambas son exactamente iguales. El modelo resultante se simula con una tierra promedio, de conductividad 1×10^{-3} y constante dieléctrica 10, con el fin de obtener un modelo aproximado de las características de los diferentes planos de tierra. En las figuras 19, 20, 21 y 22 muestran los resultados de las simulaciones realizadas vistos desde diferentes planos.

Figura 19: Plano E de la antena en dBi.



Con el visualizador 3D se puede observar el patrón de radiación.

Figura 20: Patrón de radiación de la antena sencilla 3D en dBi.



Para la antena completa se utiliza el mismo plano de tierra y las características de la antena sencilla.

Figura 21: Plano E de la antena SALLA dBi

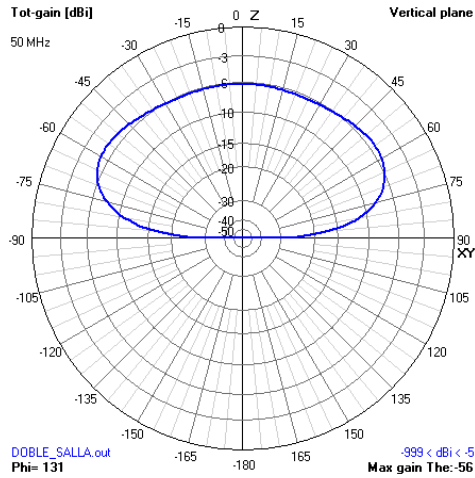
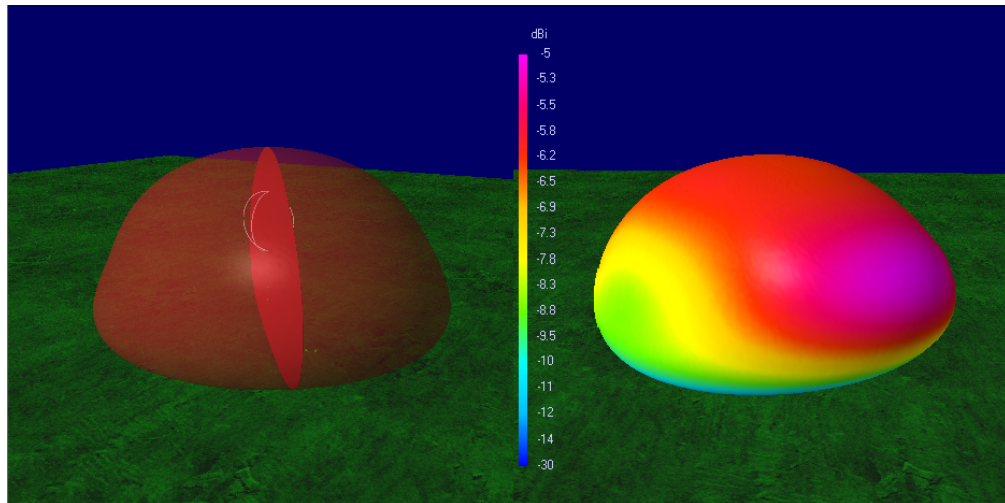


Figura 22: Patrón de radiación de la antena SALLA en dBi.



Las simulaciones se han podido corroborar con las realizados por el observatorio Tunka-Rex⁴, tales como simulaciones de directividad y ganancia que posee la antena SALLA.

3.3. SIMULACIÓN DEL LNA

Para el diseño del LNA se plantearon unos requerimientos generales. En consecuencia, fue necesario estudiar topologías de amplificadores y analizar su respuesta en frecuencia, filtros de entrada y salida, red de realimentación y acoplamiento.

3.3.1. selección del transistor Existen varios tipos de tecnologías como BJT, HBT, HEMT, MESFET y FET, que permiten manejar señales de radio frecuencia y bajos niveles de ruido. Para la selección del transistor se consideraron parámetros como figura de ruido mínimo, alta ganancia, bajo costo y bajo consumo de potencia. Debido a que no es posible conseguir la figura de ruido mínima y la máxima ganancia del transistor, las técnicas

⁴BEZYAZEEKOV y col., «Measurement of cosmic-ray air showers with the Tunka Radio Extension (Tunka-Rex)», óp.cit.

de diseño deben encontrar un equilibrio entre ambos parámetros.

Tabla 3: Tabla de características de transistores.

Transistor	Características			
	NF_{min} [dB]	Ganancia máx	Polarización máx	Costo [COP]
BFP740ESD	0.65 [dB]	25.5 [dB]	3 V	4.300
BFP843F	1.1 [dB]	18	1.8 V	2.133
BFP720	0.7 [dB]	20 [dB]	3 V	2.016
BFU710F]	1.45 [dB]	14 [dB]	3 V	2.102
BFU760F	0.5 [dB]	22 [dB]	2V	3.732

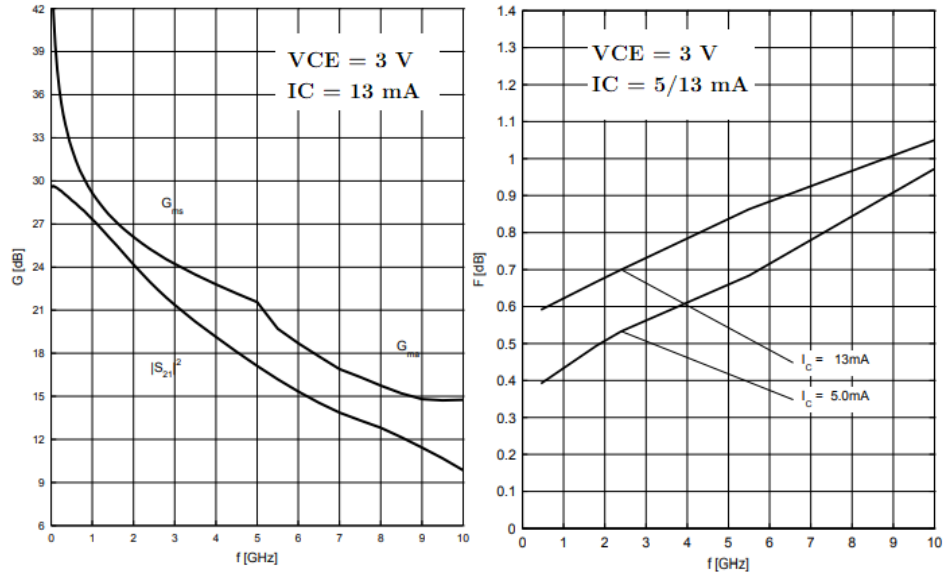
De esta selección se escogió el transistor BFP720, con tecnología HBT, de la marca *Infenion*, su figura de ruido que se acomoda a las necesidades, alta ganancia, fácil polarización y bajo costo. Este transistor cuenta con una hoja de datos proporcionada por el fabricante que adjunta los parámetros S, los cuales permiten hacer simulaciones del dispositivo con alta fidelidad, además proporcionan topologías recomendadas, ver⁵.

3.3.2. red de polarización Basado en los datos del fabricante el transistor se polariza con una tensión de 3.5 V. Se diseñó un circuito de alimentación con un LDO (*Low Dropout*) referencia LP2981, de la marca Texas Instruments, que es muy utilizado en campo de RF para polarización de circuitos de bajo ruido debido a características como ausencia de ruido de conmutación, empaquetados pequeños y eficiencia.

El circuito de polarización del transistor se muestra en la figura 24,a polarización nos da la corriente I_c , la cual va a determinar la máxima ganancia y la figura de ruido del mismo. En las gráficas dadas por el fabricante se observa cómo es la dependencia de la ganancia y la figura de ruido a la corriente I_c .

⁵Technologies, Infenion. *BFP720*. url<https://www.infineon.com/cms/en/product/rf-wireless-control/rf-transistor/ultra-low-noise-sigec-transistors-for-use-up-to-12-ghz/bfp720/>. 1999.

Figura 23: Ganancia y factor de ruido, datos del fabricante



Fuente: 5.

Por esta razón se implementa una corriente mayor a 5 mA y menor a 13 mA , figura 23 izquierda, para proporcionar una figura de ruido menor a 1 dB y una ganancia mayor 20 dB . Así se eligió polarizar el circuito a 8 mA .

Para lograr esto se realiza el cálculo analizando el circuito, el cual se describe por las siguientes ecuaciones:

$$V_{cc} - (I_b + I_c) \times R_1 - I_c \times R_3 - v_{ce} = 0$$

$$V_{cc} - (I_b + I_c) \times R_1 - I_b \times R_2 - v_{be} = 0$$

$$I_c = \beta \times I_b$$

Despejando se obtiene que:

$$I_c \cong \frac{v_{cc} - v_{be}}{R_1 + R_1/\beta} \quad (3.1)$$

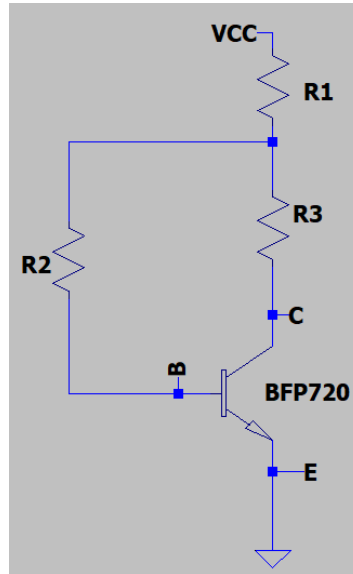
$$v_{ce} = v_{cc} - I_c (R_1 + R_2) \quad (3.2)$$

Donde asignándole los valores para R_1 , R_2 y R_3 :

$$I_c = \frac{3,3 - 0,8}{18 + \frac{72000}{250}} = 8,16\text{mA}$$

$$v_{ce} = 3,3 - 8,16 \times 10^{-3}(36) = 3,006V$$

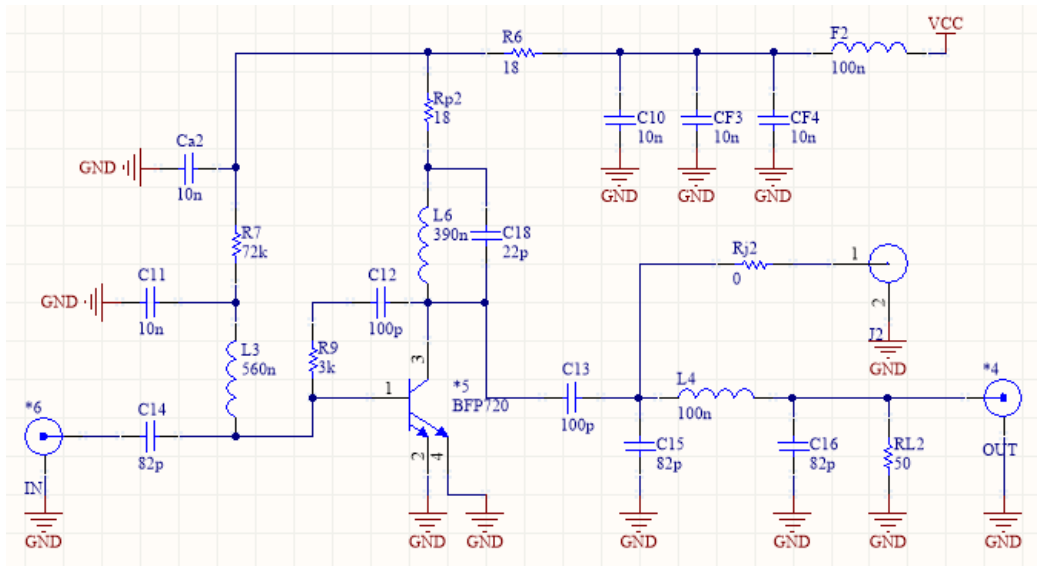
Figura 24: Circuito de polarización.



3.4. TOPOLOGÍA DEL CIRCUITO

El diseño del LNA se realizó como se muestra en la figura 25, esta topología fue diseñada de acuerdo a las notas de aplicación del fabricante Infenion.

Figura 25: Circuito de LNA.



El circuito consta de un filtro de entrada y un filtro de salida. Estos filtros permiten tener señal de mayor ganancia en las frecuencias de 30 a 80 MHz. Además, está constituido de: red de realimentación, capacitancias de desacople para una señal más limpia y sin efectos de DC, circuito tanque de sintonización y resistencias de adaptación a las salidas de señal.

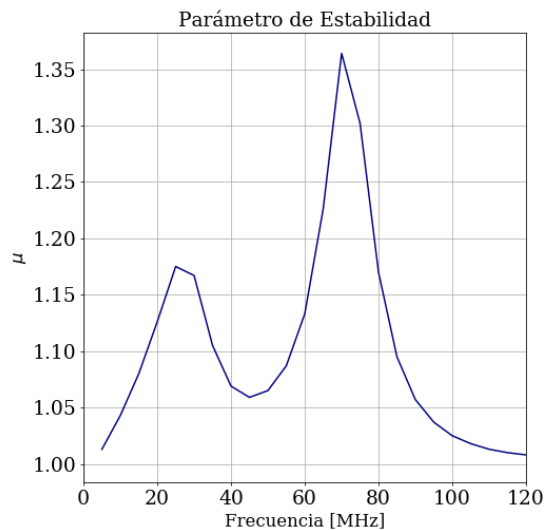
3.4.1. simulaciones del circuito. Tanto los elementos pasivos como el transistor cuentan con parámetros S dados por el fabricante, los cuales fueron utilizados en su simulación para analizar la respuesta del circuito.. Debido a la frecuencia de trabajo del circuito, señales menores a los 100 MHz, los elementos se modelizan como elementos de constantes concentradas, por ese motivo la líneas que conectan a los elementos no se consideran.

Lo primero en estudiar fue la estabilidad, ya que una vez se determina, se puede tratar el circuito como un amplificador, siguiendo por la ganancia y por último el ruido.

Para las simulaciones del circuito se utilizó un script en python con los datos de los parámetros S de los elementos, librerías de cálculo numérico (numpy, pandas) y de análisis de circuitos RF como scikit-rf.

3.4.2. estabilidad Como se trató en la sección 6, se propusieron dos métodos para el estudio de la estabilidad. Ambos métodos utilizan los parámetros S, pero por facilidad utilizaremos el método del cálculo de μ . La variación del parámetro μ en función de la frecuencia se muestra en la siguiente figura:

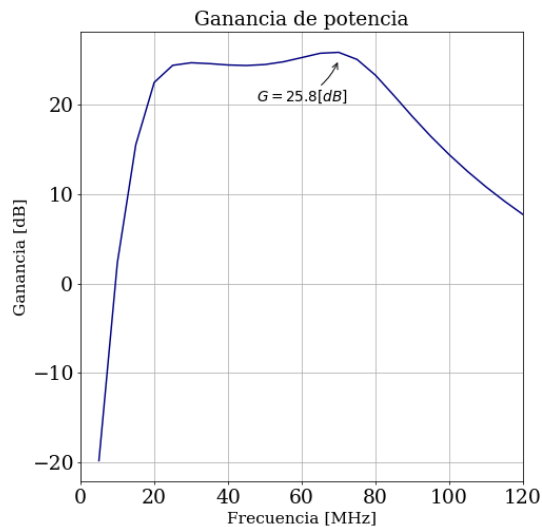
Figura 26: Simulación de la estabilidad del LNA.



a única condición para declarar la estabilidad incondicional, es que $\mu > 1$. Ya que esta condición se cumple para las frecuencias de estudio se puede decir que el LNA es incondicionalmente estable.

3.4.3. ganancia Como se había mencionado la regla de oro es que la ganancia del LNA (primera etapa de receptor) debe ser mayor a 10 dB para que dominara el ruido del receptor. Por lo tanto, como parámetro se estableció un mínimo de 15 dB, mientras mayor sea la ganancia mejor. En la siguiente figura se muestra $G = |S_{21}|^2$.

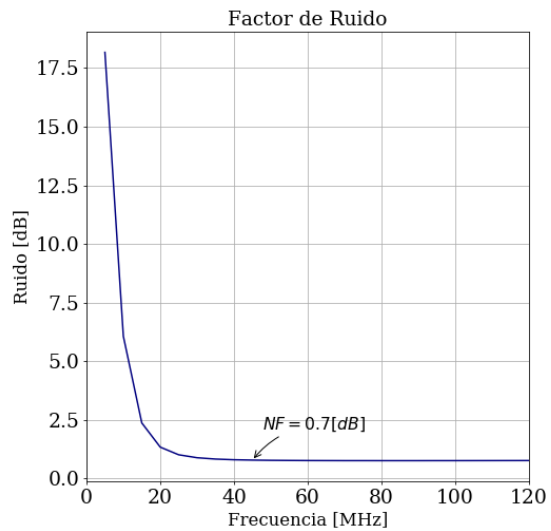
Figura 27: Simulación de la ganancia del LNA.



Se observa que la ganancia de la banda de 30 a 80 MHz supera los 20 dB y decae 10 dB cada 10 MHz en ambos bordes de la banda, de tal forma que se filtre y evite el ruido de otras bandas de frecuencia.

3.4.4. ruido Para el estudio del ruido se hace redundante el que sea menor a 1 dB y que su ganancia se alta, es decir, superior a 10 dB, esto dado por la ecuación de Friis. Debido a las características del transistor para las frecuencias entre 1 MHz y 1 GHz el ruido es bajo, como se muestra en la figura 23, lo cual hace que se favorezca el diseño. La gráfica de ruido respecto a la frecuencia se puede observar en la siguiente figura:

Figura 28: Simulación de la figura de ruido del LNA.



En resumen, fueron analizadas y simuladas tanto la antena como el amplificador. Para la antena se estudió la directividad y la ganancia de esta, observando las afectaciones del medio y proponiendo soluciones a estas. Por parte del amplificador de bajo ruido, se realizó un diseño propio basado en los disponibles actualmente, utilizando herramientas de diseño para obtener, figura de ruido de 0.7 dB junto con ganancia mayor a 20 dB. A partir de estos resultados de diseño conceptual se propone la implementación de la estación.

4. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN

Posterior al diseño conceptual y la simulación de la estación se plantea la implementación. En este capítulo se muestra el proceso de la construcción de la antena y el LNA. Se continuó la línea de diseño y se analizó los parámetros estructurales necesarios para el correcto funcionamiento.

4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA ANTENA

El diseño de la antena SALLA requiere de una estructura metálica. Como se mencionó en capítulos anteriores, la antena se compone de dos espiras de aluminio de 1.2 metros de diámetro. Para conseguir esto se requiere darle forma al tubo de aluminio comercial, este tubo tiene un grosor de 3/4" in. Se requiere maquinaria de metalúrgica tanto para doblar como para cortar los tubos, debido a que pequeñas variaciones en el radio de la antena harían que esta cambie su respuesta en frecuencia. Se cortan dos semicircunferencias para formar una espira y ambas se añaden a la estructura posteriormente. A continuación se muestra como se realizó este proceso:

Figura 29: Doblado de tubo antena SALLA.



El proceso de adquisición de materiales (tubos, tornillos y soportes), así como la fabricación de la estructura de la antena se realizó con empresas locales.

En primer lugar, por facilidad de implementación y caracterización se construyen las espiras por separado. El proceso es exactamente igual para ambas espiras. Se consideran las dimensiones mencionadas unidas con dos cajas, una inferior y otra superior, para darle resistencia mecánica a la antena. Además, las cajas protegen los puntos de conexión de la intemperie y permite que sean aseguradas a la estructura. La espira sencilla de la antena SALLA se muestra en la siguiente figura.

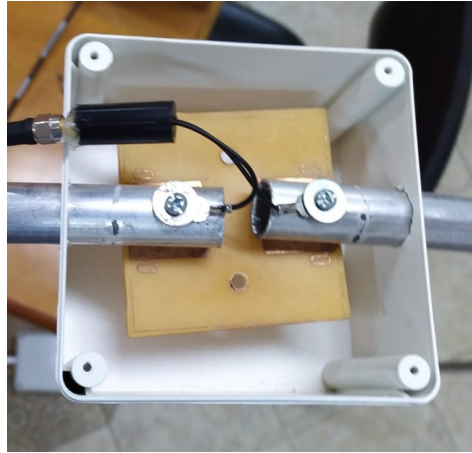
Figura 30: Espira de antena SALLA.



En el siguiente capítulo se mostrará como se utilizan las espiras sencillas en la caracterización de la estación.

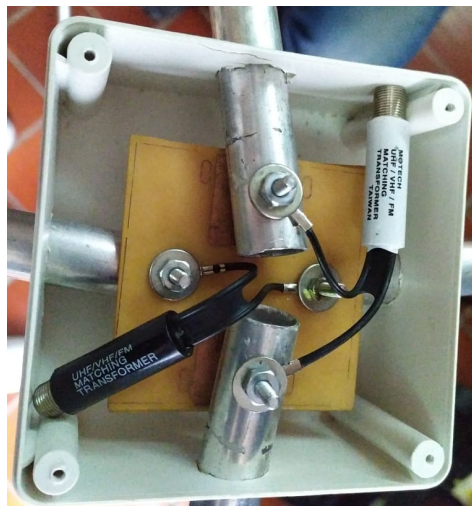
Las conexiones de la parte superior e inferior son diferentes. Ambas conexiones se realizan con soportes de PCB, *Printed Circuit Board*. En la parte inferior se debe instalar la resistencia de carga de la antena, la cual es soldada a la PCB que tiene conexión óhmica directa con la espira, y es fijada con tornillos de acero inoxidable. En la parte superior se fija la espira con tornillos a una PCB y se conecta con el balun. Esta última conexión es la que va a dar al puerto de entrada del LNA. Las conexiones se muestran a continuación:

Figura 31: Conexiones superior e inferior de la espira sencilla.



Por último, se construyó la estructura de la antena SALLA uniendo las dos espiras. Las conexiones superior e inferior se observan a continuación.

Figura 32: Conexiones antena SALLA.



La antena es instalada en la terraza del edificio de ciencias humanas en la Universidad Industrial de Santander, junto al tanque Cherenkov del Grupo Halley. Se fija a un tubo de PVCa

una altura de 1.6 metros del suelo, esto es debido a las condiciones de seguridad de la locación. Sin embargo para fines de la caracterización es completamente funcional.

Figura 33: Antena SALLA instalada.



4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL LNA

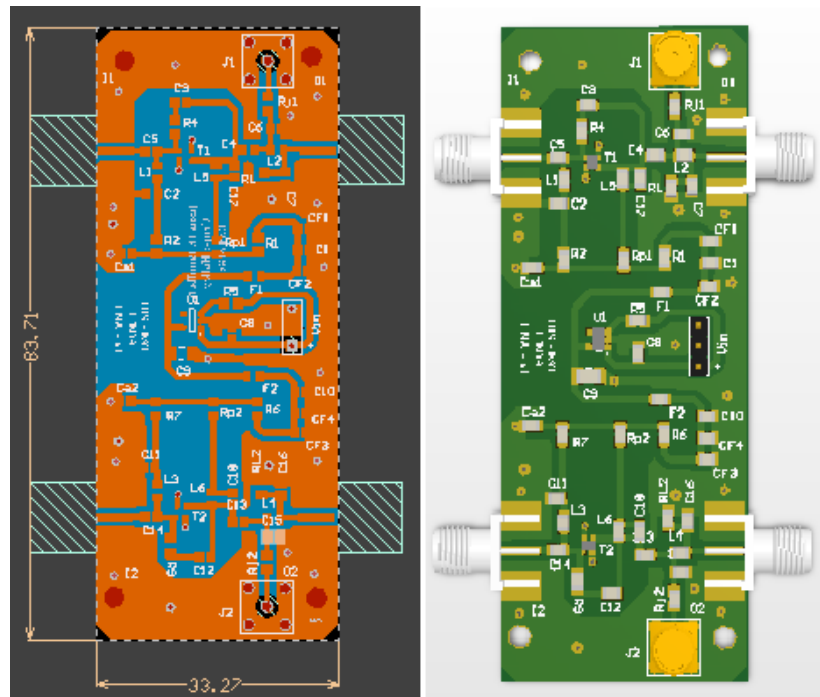
Del capítulo anterior se conoce el diseño conceptual del LNA. Para el diseño de la PCB se utilizó el software *CircuitMaker*, una herramienta de diseño electrónico gratuito desarrollado por *Altium*. Además de su amplio espectro de facilidades de diseño dadas por la reconocida marca de *Altium*, también permite manejar los proyectos en una nube, siendo una herramienta que permite diseñar crear una red de desarrollo electrónico mundial. Por medio de este software se diseña la PCB teniendo en cuenta las técnicas de reducción de ruido.

Para circuitos de RF se tiene una serie de recomendaciones que deben tenerse en cuenta a la hora del diseño de la PCB: cercanía entre componentes de señal débil, planos de tierra, separación entre pistas, bancos de condensadores para evitar ruido de la polarización, vías entre planos de tierra y evitar las derivaciones.

Todos estas recomendaciones se hacen con el fin de realizar un diseño con gran EMC que cumpla con los requerimientos de diseño. Mientras menor sea la probabilidad de interferencias mejor es el diseño. A medida que se le da complejidad al diseño se tienen más probabilidades de tener señales impuras.

Para este diseño se utilizaron dos capas (TOP y BOTTOM). Los conectores de entrada y salida de la señal son SMA que tolera señales de hasta 18 GHz. La entrada para polarización se hace con pines Molex. Se perforan hueco de 5mm de diámetro en las cuatro esquinas para la instalación. El diseño de la PCB se puede ver a continuación.

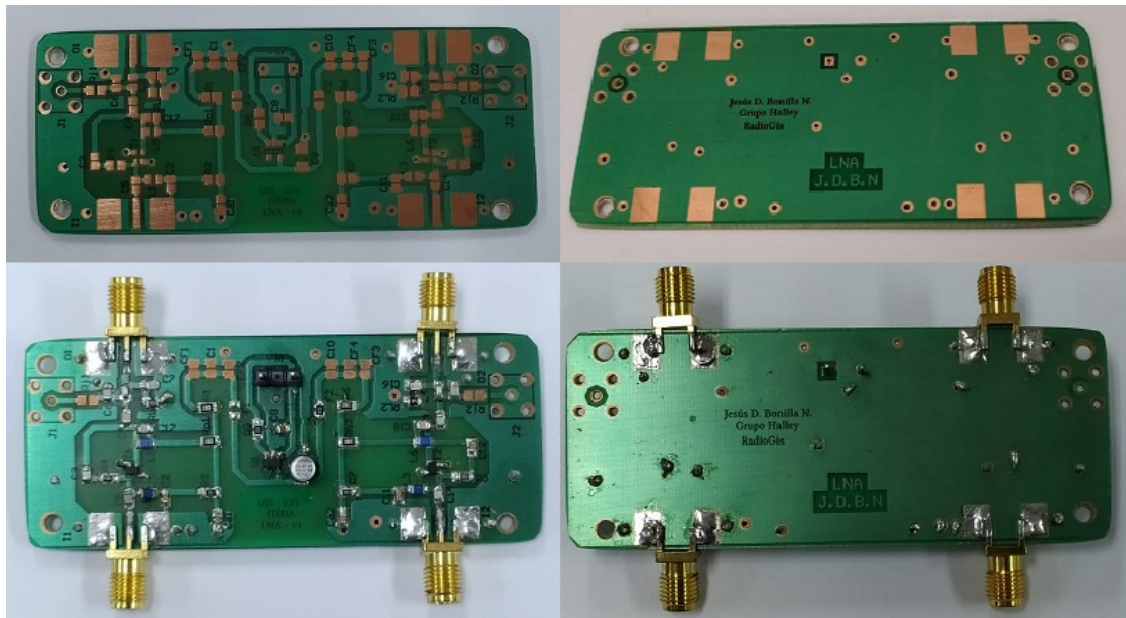
Figura 34: Diseño de la PCB del LNA.



En la figura 34 (izquierda) se observa el en-rutado del LNA junto con las dimensiones de la placa en milímetros. En la figura de la derecha se muestra el modelo 3D de la PCB. Esta visualización es una herramienta que posee el software CircuitMaker, se obtiene a partir de los modelos 3D de los elementos seleccionados.

La fabricación de la PCB se realiza con una baquelita FR-4. Esta a su vez posee características que favorecen el diseño de RF y la resistencia mecánica de la placa. Esta fabricación se hizo a nivel semiprofesional a modo de prueba, como primer acercamiento a la construcción de la estación final. El resultado de la fabricación de la PCB se realizó con una empresa local y se observa en la siguiente figura.

Figura 35: PCB del LNA, superior sin componentes, inferior con componentes LNA.



El circuito impreso con los respectivos componentes soldados se observa en la parte inferior de la figura 35.

Finalmente, una vez se tienen los dispositivos implementados se procede a realizar las pruebas que corroboran el correcto funcionamiento. Cabe resaltar que esta implementación se realizó a modo de prueba piloto, el cual propondrá los lineamientos de desarrollos futuros en esta aplicación.

5. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTACIÓN

Una vez se tiene implementada la antena y el LNA se procede a caracterizar el sistema y verificar su funcionamiento. Para esto se propone una serie de pruebas que corroboren que la idea conceptual se implementó de manera correcta. Por esta razón se deben cumplir los parámetros de diseño planteados y ante todo el objetivo principal de la estación.

Teniendo en cuenta la teoría de sistemas de radiofrecuencia se plantean unas pruebas de laboratorio para cada uno de los componentes de la estación. Primero se analizaran los componentes por separado y su respuesta, posteriormente se acoplarán y se realiza la prueba en conjunto. Las pruebas se enumeran a continuación a continuación.

Pruebas para la antena.

1. Respuesta en frecuencia.
2. Emisión y recepción.

Pruebas para el LNA.

1. Prueba de estabilidad.
2. Amplificación del LNA.
3. Análisis de respuesta en frecuencia.
4. Consumo de potencia.

Prueba para la estación.

1. Recepción.

Las pruebas anteriores requieren de equipos especializados en el estudio de sistemas RF. Para este trabajo se requirió de los siguiente equipos:

- Analizador de espectros. ROHDE & SCHWARZ - HMS-X.
- Generador de señales. Marconi Instruments - 2023.
- Osciloscopio. Tektronix - TBS 2000.
- Analizador vectorial de espectros. MiniVNA Tiny.
- Radio definida por software. National Instruments. USRP 2920

Cada uno de estos instrumentos posee unas características específicas que son de utilidad en la búsqueda de parámetros. El analizador de espectros permite conocer la potencia de una señal a determinada frecuencia, es decir, observar el espectro de potencias de la señal que entra al puerto del analizador.

Por otra parte el generador de señales, utilizado para la aplicación de este trabajo, debe tener la capacidad de producir señales de bajas potencias, es decir, menores a los mW, en frecuencias de 30 a 80 MHz. Así mismo el osciloscopio de resolución 1 G sample/s permite observar señales con mejor precisión.

El analizador vectorial de espectros (VNA), utiliza la matriz S para caracterizar redes eléctricas que funcionan en altas frecuencias. De esta forma permite estudiar dispositivos tanto en reflexión como en transmisión. En el anexo A, se muestran las características del VNA utilizado.

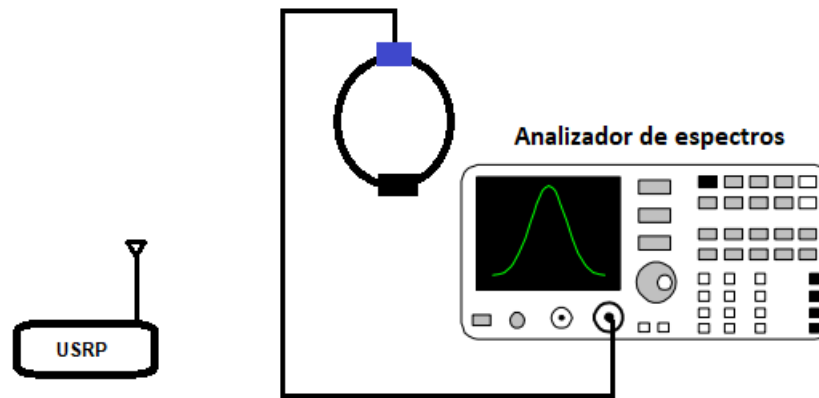
En cuanto a el SDR, se utilizó el USRP-2920, el cual se programa por medio de GNU-Radio. Esta es una herramienta de software libre que permite la creación de sistemas RF por medio de diagramas de bloques. También es posible crear y modificar estructuras por medio de la creación de bloques en el lenguaje python.

5.1. PRUEBAS DE LA ANTENA

En principio se estudia que la antena responda en la frecuencia a la que fue diseñada. Para esto se propone el esquema de la figura 36, en el cual se realiza una transmisión de señales RF

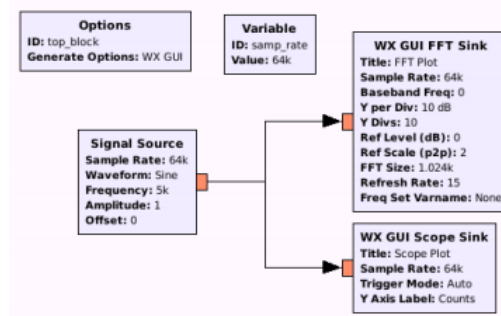
desde el USRP-2920 a la antena SALLA sencilla, esta a su vez está conectada al analizador de espectros que muestra la potencia de la señal captada por la antena.

Figura 36: Se emiten pulsos a diferentes frecuencias y se observa la respuesta de la antena en el analizador de espectros.



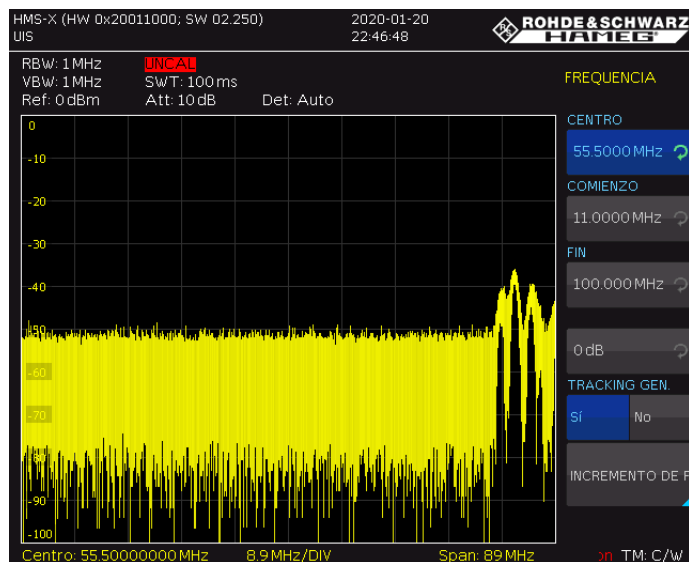
Las antenas son consideradas filtros y por lo tanto poseen la características de permitir o no el paso de señal a determinadas frecuencias. En el caso de la antena SALLA es necesario que las frecuencias de 30 a 80 MHz sean recibidas. La antena recibe señales por la parte superior como se analizó en el capítulo 2. Se realizó un código en GNU-Radio para generar señales de 10 a 100 MHz. Esta transmisión se hace con la antena del USRP.

Figura 37: Se emiten pulsos a diferentes frecuencias y se observa la respuesta de la antena en el analizador de espectros.



El esquema utilizado para la generación de señales en GNU-Radio es descrito en la figura . Este sistema permite estudiar si la antena recibe señales en la frecuencia deseada, además que los niveles de la señal pueden determinar la ganancia de la misma. . Se muestra a continuación como se comporta la antena conectada al analizador de espectros.

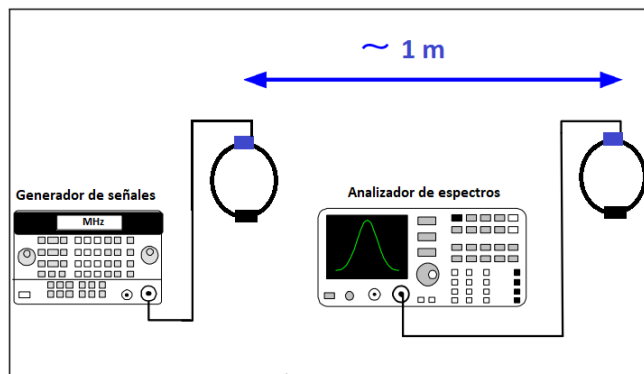
Figura 38: Espectro de potencia de la antena en el analizador de espectros. Se puede observar el sistema en recepción. Las Señales con mayor potencia se deben a la presencia de transmisión de Radio FM.



En la figura 38 se observa el espectro de la señal recibida por la antena de 10 a 100 MHz. Se

logra observar las potencias de las señales FM. Que van desde los 82 MHz. Existen además usos en las bandas de los 50 a 60 MHz y los 10 a 30 MHz. Por la debilidad de la señal y la relación con la ganancia de la antena no es posible distinguirlas. Es entonces cuando entra en acción la necesidad de tener un amplificador que pueda hacer que las señales tenues eleven su potencia en recepción. Ver figura 40. Debido al diseño de la antena tipo SALLA, las espiras se pueden utilizar tanto en recepción como en emisión. Se planteo el siguiente esquema para corroborar la recepción y emisión de las antenas emitiendo pulsos de 13 dBm con una espira, mientras se recibe con la otra espira.

Figura 39: Respuesta de una espira en recepción. Pulsos de señal enviados con espira de antena SALLA



La implementación de esta prueba se realizó en el laboratorio de comunicaciones de la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander. Este laboratorio está equipado con los instrumentos necesarios para esta prueba y la disposición de ellos.

Figura 40: Pruebas de laboratorio para la antena SALLA (sencilla), laboratorio de comunicaciones E3T.

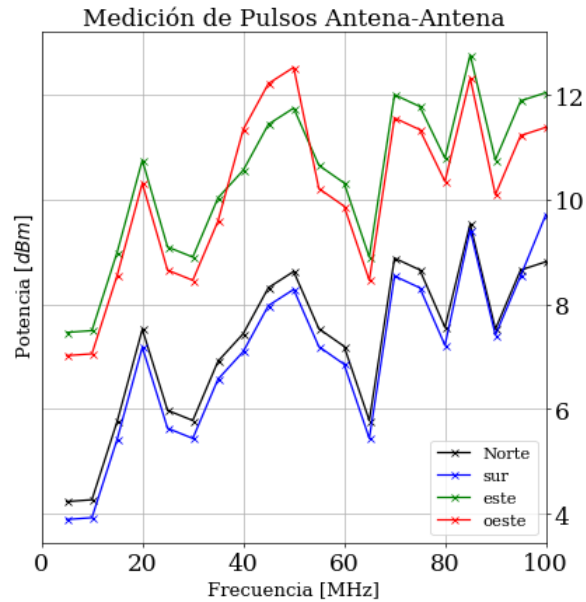


Todo este montaje en conjunto permite ver que tan fiable es la antena recibiendo, de esta forma se puede hacer una aproximación del patrón de detección al observar en qué dirección del espacio recibe mejor.

Esta medición se realizó teniendo en cuenta la posición de la antena que recibe y emite, la receptora se deja fija, de tal manera que el plano vertical de la antena se dispone en el sentido norte/sur, mientras la antena emisora cambia de posición. En esta prueba se utilizaron cuatro mediciones cada una en posiciones diferentes de antena emisora.

En la figura 41, se muestra el resultado de la medición, donde se compara las potencias de recepción en función de la posición de la emisión, así mismo se denota según la posición al norte (negro), sur (azul), este (verde) y oeste (rojo).

Figura 41: Respuesta de una espira en recepción. Con pulsos de 13 dBm.

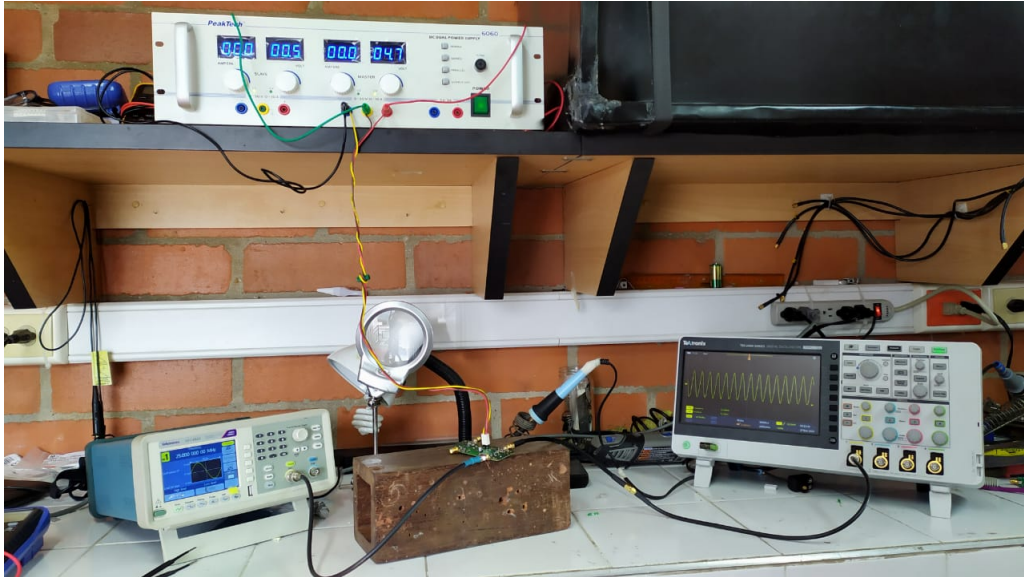


Es importante resaltar que el resultado que refleja la gráfica es una notable diferencia en recepción. Esto se debe al comportamiento de la antena que fue simulado en el capítulo 3. Los detalles de la prueba realizada anteriormente se pueden ver en el ANEXO C.

5.2. PRUEBAS DEL LNA

Una regla de oro antes de caracterizar el LNA es comprobar la estabilidad del mismo, esto quiere decir que el amplificador no genere oscilaciones indeseadas a la salida. Una vez esto se determina se puede mirar su ganancia y demás características. Se propuso un banco de pruebas para el LNA, donde se polariza y se observa la señal de salida del mismo. Ver figura 42.

Figura 42: Montaje de prueba de estabilidad del circuito del LNA. Se testean ambos canales y se verifica que no existan oscilaciones indeseadas ni RFI.



La reproducción de las señales del LNA deben tener la menor interferencia posible y no deformar mucho la información. Se puede observar en la figura 43 que la señal amplificada es un seno de 25 MHz de frecuencia, tal como la señal de entrada. Esto indica que el circuito posee una buena implementación y no hizo falta modificaciones en el diseño para su funcionamiento. Por otra parte también se puede determinar la ganancia de voltaje del circuito, la cual fue estudiada en el capítulo 1. A partir de la señal voltaje incidente y el voltaje de salida se puede determinar la ganancia de voltaje a partir de la ecuación:

$$G_v = 10 \log \left(\frac{V_o}{v_i} \right) \quad (5.1)$$

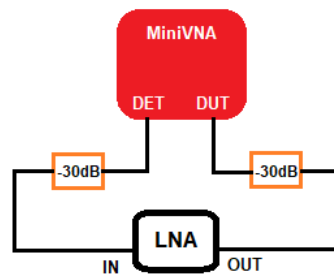
De ahí se determina la ganancia de voltaje es $G_v \simeq 30dB$.

Figura 43: Respuesta de voltaje del LNA. Señal de entrada sinusoidal de amplitud 1 mV.



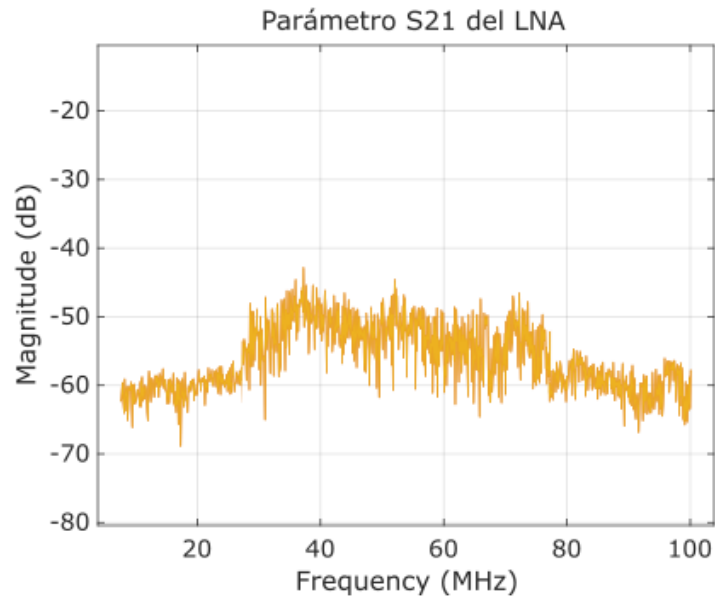
Para este trabajo es de interés el parámetro S_{21} , el cuál indica la ganancia en transmisión directa, tal como se mencionó en capítulo 1. El esquema de prueba se muestra en la figura 44. Se utilizan atenuadores para proteger los puertos del VNA, los cuales son muy sensibles a la potencia. Este parámetro permite conocer la ganancia de potencia en función de la frecuencia que posee el amplificador.

Figura 44: Esquema para la medición del parámetro S_{21} con el VNA.



El software que da el fabricante del VNA permite analizar los parámetros de transmisión, exportando los archivos en formato CSV.

Figura 45: Medición del parámetro S21 del LNA, utilizando esquema de la figura anterior.



El LNA fue caracterizado para analizar su ganancia. También, es bien sabido que debido a imperfecciones en los procesos de fabricación tanto de elementos circuitales, como de la placa de circuito impreso, no se tiene un sistema exactamente igual al simulado. Siempre se trabaja para lograr una aproximación lo más cercana posible. A continuación se muestra los valores de potencia del LNA en la tabla 4, así como el valor de ganancia en [dB].

Tabla 4: Tabla con datos de la caracterización del LNA.

F [MHz]	P [dBm]	P [W]	G [dB]
10	-63.6	4.365×10^{-10}	9.39
20	-56.3	2.344×10^{-9}	16.7
30	-55.57	2.773×10^{-9}	17.42
40	-54.35	3.672×10^{-9}	18.65
50	-52.55	5.55×10^{-9}	20.5
60	-50.84	8.241×10^{-9}	22.16
70	-51.34	7.345×10^{-9}	21.66
80	-50.75	8.413×10^{-9}	22.25
90	-55.24	2.992×10^{-9}	17.76
100	-60.12	9.727×10^{-9}	12.88

Esta tabla 4 se determinó con la fuente de entrada a $P_i = -73$ dBm, es decir, al rededor de $P_i = 50$ pW ó $50 \mu V_{rms}$. El analizador de espectros da las potencias en $P_{O[dBm]}$. La potencia en escala líneal se obtiene a partir de:

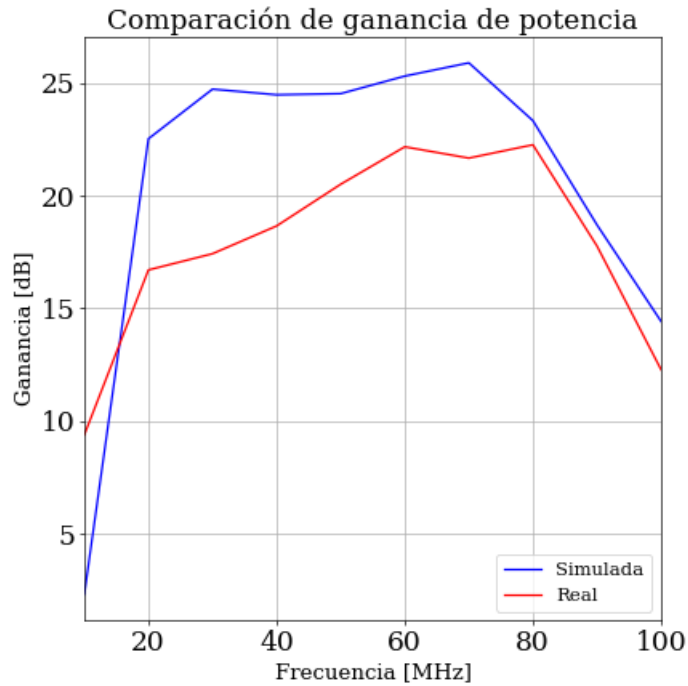
$$P = \frac{10^{\frac{P(dBm)}{10}}}{1000} \quad (5.2)$$

Para poder determinan la relación de la ganancia en dB se utiliza:

$$G_{[dB]} = 10 \log \left(\frac{P_o}{P_i} \right) \quad (5.3)$$

Los resultados completos de este análisis del LNA se muestran en el anexo B. A continuación, en la figura 46, se muestra una comparación de las ganancias simulada y la obtenida a la hora de probar la PCB del LNA.

Figura 46: Comparación entre la ganancia del LNA simulada y la ganancia medida.



5.3. PRUEBAS DE LA ESTACIÓN

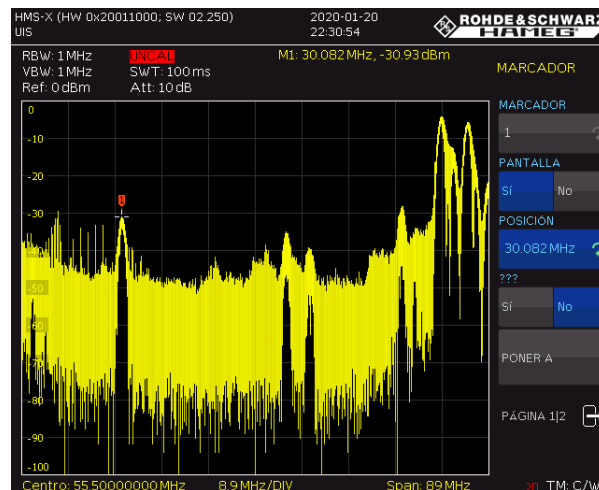
Para la prueba de la estación se realizó la adecuación de la antena y el LNA, es decir se realiza la conexión de ambos componentes por medio del balun. Para esto se utilizó la estructura mostrada en el capítulo 3. Se realizó un barrido en frecuencia para corroborar que el sistema posee las características necesarias para la recepción, de esta forma se puede observar que tanto antena como LNA cumplen su misión en el sistema.

Figura 47: Esquema de detección para análisis del sistema (antena y LNA)



En el esquema de la figura 47, la antena y el LNA están acoplados en la caja superior azul. La antena se posiciona a 1.6 metros del suelo. Se utiliza un cable RG58 para la transmisión de la señal. El resultado de la prueba se observa en la siguiente figura:

Figura 48: Espectro de potencias de la estación. Señales recibidas por la antena amplificadas por el LNA. Banda de 10 a 100 MHz.



Es pertinente analizar el resultado de la figura 48 comparándolo con la figura 38. Comenzando por las señales menores a 30 MHz, se logra observar líneas de espectro con alta potencia, estas bandas son utilizadas para comunicaciones aeronáuticas. Posteriormente en la banda de 50

a 60 MHz se tiene la banda de radio aficionados. Por último, en la banda cercana a los 100 MHz se encuentra la radio FM. Las señales que no son visibles en la figura 38 se observan con mucha mayor claridad en la figura 48, esto se debe a la presencia del LNA. Además, para evidenciar el correcto funcionamiento del sistema se envió un pulso a 30 MHz, con el fin de que pudiera ser observado en el analizador.

Los resultados de este capítulo corroboran que la implementación del diseño conceptual de la estación cumplió con los requisitos de diseño planteados en el capítulo 2. Los detalles de las mediciones se encuentran en los anexos,

6. CONCLUSIONES

En síntesis, en este trabajo se logró diseñar, simular e implementar un sistema de radiofrecuencia compuesto de una antena receptora y un amplificador de bajo ruido. La antena se planteó para la banda de los 30 a los 80 MHz, se estudiaron antenas ya implementadas en esta aplicación y se seleccionó aquella que mediante simulaciones, ver sección 3.2, mostró las mejores características y mayor facilidad de implementación, ver tabla 4. Se diseñó un amplificador de bajo ruido con ganancia superior a las 15 dB en la banda ya mencionada.

Se consiguió implementar la antena receptora SALLA (*Shot Aperiodic Loaded Loop Antenna*), que posee dos espiras de aluminio de 3/4" perpendiculares entre sí, cada una con un diámetro de 1.2 metros. Se utilizó un balun 3:1 comercial para la adaptación de la antena al amplificador. Así mismo el amplificador de bajo ruido se implementó utilizando los parámetros de diseño preestablecidos, superando los 15 dB de ganancia y la respuesta en frecuencia de mayor de 30 a 80 MHz. Una vez implementado, el sistema fue instalado en la terraza del Grupo Halley. El proceso de fabricación de los dispositivos se llevó a cabo con empresas locales.

El sistema fue sometido a pruebas para evaluar su comportamiento y analizar el correcto funcionamiento. Se realizaron pruebas individuales a la antena para comprobar su recepción, así como la directividad que posee. Así mismo pruebas para el amplificador de bajo ruido donde se verificó su ganancia superior a 15 dB y su respuesta en frecuencia. Finalmente se integraron los dispositivos en la estación completa y se realizaron pruebas de recepción y se analizó la banda que estaba en estudio.

El desarrollo de este trabajo se realizó de manera exploratoria en la implementación de sistemas para detección de radiofrecuencias producidas por astropartículas en Colombia. De esta forma el trabajo se abordó como estudio para la viabilidad de un arreglo de estaciones de radio detección, para lo que se requieren trabajos futuros que se puedan realizar tomando en cuenta los análisis presentados aquí.

Este trabajo fue realizado en colaboración con el Instituto de Tecnologías en Detección de

Astropartícula (ITEDA) en la ciudad de Buenos Aires, Argentina. Este instituto pertenece a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) - Argentina. Los resultados de este trabajo fueron presentados en la semana de la ciencia de la Universidad Industrial de Santander. Así mismo en la cátedra de electrónica aplicada III en la Universidad Tecnológica Nacional sede Buenos Aires, Argentina. De igual forma se presentó en el VI Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica, en la ciudad de Medellín, Colombia.

ANEXO A. FUNDAMENTOS ELECTRÓNICOS

FUNDAMENTOS ELECTRÓNICOS

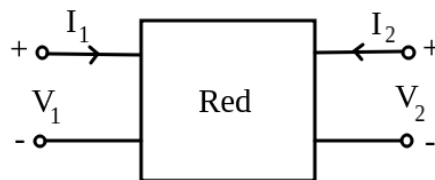
Las técnicas de radio detección de lluvias de astropartículas han ido evolucionando en paralelo al avance tecnológico. En la actualidad, se pueden utilizar múltiples técnicas de procesamiento de radiofrecuencias para poder obtener señales provenientes de EAS. Los sistemas de radio-detección son más eficientes respecto a los desarrollados en décadas pasadas y dan mejores relaciones costo-beneficio.

A continuación, se muestran los conceptos que serán de utilidad para el desarrollo de este trabajo.

LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Algunos circuitos electrónicos pueden ser representados por redes de dos puertos como se muestra en la figura 49. Esto representa la conexión de una red o circuito a dos puertos entrada y salida, los cuales presentan voltajes y corrientes en sus terminales.

Figura 49: Representación de una red de dos puertos

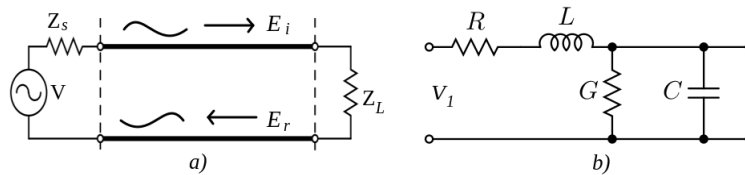


En el estudio de los circuitos existe una relación entre el tamaño de los componentes y la longitud de onda (λ) a la que operan. A frecuencias bajas λ es mucho más grande que los componentes, a medida que se aumenta la frecuencia λ se hace comparable con el tamaño de los elementos.

Una relación comúnmente utilizada es cuando la longitud de los dispositivos o conexiones

supera ($\lambda/50$), las leyes de Kirchhoff para nodos y mallas dejan de ser válidas. Por lo tanto se debe utilizar la teoría de líneas de transmisión.¹ Este concepto hace referencia a la transmisión de señales en sistemas de alta frecuencia. Se utiliza una representación como se muestra en la figura 50a, donde se tiene una fuente de potencia V , una impedancia de la fuente Z_s , y una impedancia de carga Z_L . Así mismo una parte de la onda incidente en la carga es reflejada dependiendo de la semejanza de Z_L con la impedancia característica de la línea Z_o . En general, los valores estándares para la impedancia característica suelen ser 50Ω , 75Ω o 300Ω , esto depende de la aplicación que se le dé y los requerimientos de diseño que se tengan.

Figura 50: Modelos línea de transmisión



El modelo de la línea de transmisión uniforme se puede representar como se muestra en la figura 50b y puede obtener una impedancia equivalente de la línea. Donde R es la resistencia, L la inductancia, C la capacitancia y G la conductancia, todo por unidades de longitud. Por otra parte, en el ámbito matemático se definen las relaciones de voltaje, corriente, onda incidente y reflejada de la siguiente manera:

$$V_t = V_{in} + V_{ref} \quad I_t = \frac{V_{in} - V_{ref}}{Z_o} \quad (1)$$

A partir de estas expresiones se derivan las relaciones de uso común para los análisis de las líneas de transmisión. Una de estas relaciones es el coeficiente de reflexión, Γ . Este coeficiente es una medida de la intensidad de una onda reflejada respecto a una onda incidente. Es una cantidad fasorial por lo tanto suele representarse con magnitud y fase.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (2)$$

Se puede concluir que, cuando se da la relación $Z_L = Z_o$, se da el acoplamiento sin reflexiones, es decir, no hay onda reflejada, por lo tanto la onda incidente es totalmente absorbida por la

¹Clark, ALAN Robert. «A Study Guide for Electromagnetics». En: (2004).

carga. En los sistemas de RF se busca este acople de impedancias para obtener las menores pérdidas posibles.²

PARÁMETROS DE DISPERSIÓN

Los parámetros S por *Scattering* o de dispersión son los más utilizados en el análisis de alta frecuencia, ya que se representan a partir de potencias observadas en los terminales, más no a partir de corto circuito o circuito abierto.³ Los parámetros S son cuatro y denotan lo que se conoce como matriz-S, estos se definen de la siguiente forma:

- S_{11} : Este parámetro indica la cantidad de potencia que se refleja en comparación con la cantidad de potencia que incide en el puerto 1. También es conocido como coeficiente de reflexión de puerto de entrada o Γ .
- S_{12} : Este parámetro representa la potencia que incide en el puerto 1 en comparación con la generada en el puerto 2. También se le conoce como coeficiente de transmisión inversa.
- S_{21} : Este parámetro representa la potencia que incide en el puerto 2 en comparación con la que se genera por el puerto 1. También se le conoce como coeficiente de transmisión directa.
- S_{22} : Este parámetro indica la potencia reflejada en el puerto 2 en comparación con la potencia que incide. También se le conoce como coeficiente de reflexión del puerto de salida.

Las relaciones matemáticas de los parámetros S se denotan como:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} & S_{12} &= \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \\ S_{21} &= \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} & S_{22} &= \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \end{aligned} \quad (3)$$

²Pozar, DAVID M. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.

³Technologies, Agilent. «Agilent AN 154S-Parameter DesignApplication Note». En: (2000).

Donde $a_n = E i_n / \sqrt{Z_0}$. Los parámetros S son muy útiles en la caracterización de una antena o dispositivos de alta frecuencia, por lo cual serán utilizados en este trabajo con ese fin. El analizador vectorial de espectros o VNA (por sus siglas en inglés, *Vector Network Analyzer*), utiliza la matriz S para caracterizar un dispositivo de RF.

PARÁMETROS DE ANTENAS

Según el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), las antenas son dispositivos capaces de recibir o transmitir ondas electromagnéticas, dicho de otra forma las antenas sirven como transductor de ondas viajeras a ondas guiadas.

Se resalta la importancia de la caracterización las antenas y para esto se da una serie de parámetros que permiten evaluar su aplicación y rendimiento en determinado sistema. Aún mejor, estos parámetros se utilizan para especificar el comportamiento requerido de una antena y así realizar una construcción acorde con determinado sistema.⁴

patrón de radiación Una de las principales características de una antena, que es de gran utilidad, es conocer la cantidad de energía que puede radiar o recibir en determinada dirección en el espacio. Entonces, el patrón de radiación es una representación gráfica de la energía que la antena es capaz de radiar en cualquier dirección. Para esto es necesario definir la intensidad de radiación como la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido. Debido a que la onda electromagnética radiada posee tanto campo eléctrico \vec{E} como campo magnético \vec{H} , con ambas magnitudes vectoriales se puede obtener la densidad de flujo por unidad de superficie dada por:

$$\vec{S}(\theta, \phi) = \text{Re} \left(\vec{E} \times \vec{H}^* \right) \quad \text{W/m}^2 \quad (4)$$

La intensidad de radiación está dada por la potencia radiada en un ángulo sólido, está expresada por:

$$U(\theta, \phi) = r^2 |\vec{S}|(\theta, \phi) \quad (5)$$

⁴Aznar, Angel CARDAMA y col. *Antenas*. Vol. 3. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.

También es posible definir la potencia total radiada en todas las direcciones del espacio, que se da por:

$$P_r = \iint_{4\pi} \vec{\rho}(\theta, \phi) r^2 d\Omega \quad (6)$$

Donde $d\Omega$ es el diferencial de ángulo sólido en esteroradianes, usualmente está dado en coordenadas esféricas $d\Omega = ds/r^2 = \text{sen } \theta d\theta d\phi$.

También es importante resaltar dos cortes perpendiculares en dirección al punto de máxima radiación, el plano E que es el plano del campo eléctrico y plano H, el plano de campo magnético. Ambos planos se cruzan en la dirección de máxima radiación. El patrón de radiación se puede discriminar mediante una característica propia de cada antena que se conoce como la directividad. Este concepto se basa en el planteamiento de una relación entre la intensidad radiada por la antena y la intensidad radiada por una antena isotrópica a la misma distancia. Es decir, comparar la potencia radiada por la antena en estudio con una antena ideal, que emite radiación en todas las direcciones del espacio. De aquí, se logra abstraer la necesidad de posicionar o apuntar, una antena en determinada dirección para obtener mayor recepción o transmisión. En términos matemáticos se define así:

$$D(\theta, \phi) = \frac{\vec{\rho}(\theta, \phi)}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (7)$$

ganancia de antena El término ganancia es comúnmente atribuido a elementos activos que aplican un aumento en los niveles de determinada señal, sin embargo para el caso de las antenas, siendo elementos pasivos, se suele hablar de ganancia no en la definición habitual. Este concepto de ganancia se atribuye a una relación entre la potencia entregada a la antena y la que es radiada al espacio. De esta manera es posible tener en cuenta las pérdidas de la antena. Se expresa de la siguiente forma:

$$G(\theta, \phi) = 4\pi r^2 \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_{\text{entregada}}} \quad (8)$$

También se puede analizar la relación entre la ganancia y la directividad que está dada por la eficiencia. Este parámetro es el que sirve como indicativo de pérdidas y caracteriza una antena en relación a la potencia radiada y la potencia entregada. Se expresa de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{\text{radiada}}}{P_{\text{entregada}}} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (9)$$

temperatura de ruido de antena El ruido es una magnitud inherente a la recepción de señales electromagnéticas en una antena. Está presente tanto en antenas como en circuitos electrónicos y se define como una perturbación o señal indeseada que afecta la nitidez de la información. Existen muchas fuentes de ruido, generalmente en radiofrecuencias se habla de ruido galáctico, ruido producido por radiocomunicaciones y ruido por interferencia electromagnética.⁵ El término temperatura de ruido hace referencia a la temperatura a la que debería estar una resistencia para producir ruido de la misma potencia. En términos matemáticos se expresa de la siguiente forma:

$$P_N = \frac{V_N^2}{4R} = kT_r B \quad (10)$$

donde P_N es la potencia de ruido en los terminales de la antena, V_N es la tensión rms en circuito abierto, B es el ancho de banda, R la resistencia, k la constante de Boltzmann y T_r la temperatura de ruido.

Para expresarlo en términos espaciales es necesario asociar una temperatura de brillo de la antena, que ayuda a generalizar la potencia de ruido incidente por unidad ángulo sólido. Se da entonces la expresión en términos de la directividad y la temperatura de brillo de las siguiente forma:

$$T_r = \frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} T_b(\Omega) D(\Omega) d\Omega \quad (11)$$

La relación señal a ruido es muy utilizada en sistemas de rf, que relaciona las potencias de la señal que incide y la potencia de ruido. Esta se da en decibelios y que se define así:

$$S/N = \frac{P_S}{P_N} \quad (12)$$

AMPLIFICADOR DE BAJO RUIDO

Conocidos por sus siglas en inglés LNA, *Low Noise Amplifier*, son amplificadores comúnmente utilizados en aplicaciones de radiofrecuencias. Existen tres características fundamentales que manejan los amplificadores, estabilidad, ganancia y factor de ruido. Se muestra a continuación una breve descripción de cada uno.

⁵Pozar, *Microwave engineering*, óp.cit.

estabilidad de Ina Es de vital importancia que el circuito amplificador no presente oscilaciones, ya que esto puede afectar el funcionamiento correcto, por tanto se analiza la estabilidad en el diseño del amplificador. Se puede clasificar la estabilidad en dos tipos, condicional o incondicional. Para la estabilidad condicional se da una región de acotamiento en valores de fuente y carga, en las cuales el sistema es estable. Mientras en la estabilidad incondicional, la más recomendada en el diseño, es la que mantiene la estabilidad para cualquier valor de fuente o carga.

Existen métodos de evaluación para corroborar la estabilidad incondicional, se utilizan los parámetros de dispersión vistos en la sección 6. El primer método se conoce como $k - \Delta$, o condición de Rollet, que establece unas restricciones para estabilidad incondicional a través de:

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}S_{21}|} > 1 \quad (13)$$

donde Δ es el parámetro auxiliar dado por:

$$|\Delta| = |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}| < 1 \quad (14)$$

Teniendo que $|S_{11}| < 1$ y $|S_{22}| < 1$, si se cumplen las condiciones de K y Δ , se dice que el amplificador es incondicionalmente estable. Sin embargo, existe otra prueba propuesta más recientemente, llamada prueba μ , que permite evaluar la estabilidad incondicional a partir de:

$$\mu = \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{22} - \Delta S_{11}^*| + |S_{12}S_{21}|} > 1 \quad (15)$$

Además de determinar con $\mu > 1$ que el amplificador es incondicionalmente estable, se puede decir que a medida que μ es mayor el amplificador se hace más estable.

ganancia de Ina En términos de la ganancia se tienen tres tipos de ganancias en función de los parámetros S: ganancia de potencia, ganancia disponible y ganancia de potencia del transductor. En este trabajo nos concentraremos en la ganancia de potencia del transductor, debido a que es la relación entre la potencia entregada a la carga y la potencia disponible de la fuente. Está dada por:

$$G_T = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_S|^2) (1 - |\Gamma_L|^2)}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2 |1 - S_{22} \Gamma_L|^2} \quad (16)$$

Especialmente, cuando los coeficientes de reflexión de entrada son cero, es decir $\Gamma_L = \Gamma_S = 0$, se reduce la ganancia a la magnitud del parámetro de transmisión directa. $G_T = |S_{21}|^2$.

factor de ruido El ruido procede de diferentes fuentes y varía según la aplicación del sistema. En la mayoría de los sistemas de radiofrecuencia se utiliza un LNA como primera etapa del receptor, sus niveles de ruido se deben conocer y caracterizar, para eso se utilizan una serie de parámetros.

La figura de ruido se conoce como NF por sus siglas en inglés de *Noise Figure* dado en decibelios.

$$NF = 10 \log_{10}(F) \quad (17)$$

Donde F es el factor de ruido dado en escala lineal, y se define como la relación entre la temperatura de ruido del ambiente, comúnmente $T_0 = 290K$, y la temperatura de ruido del sistema T_s , se denota por:

$$F = 1 + \frac{T_s}{T_0} \quad (18)$$

Para un sistema de RF con varias etapas en cascada es posible conocer su factor de ruido, se calcula por medio de la ecuación de Friis:

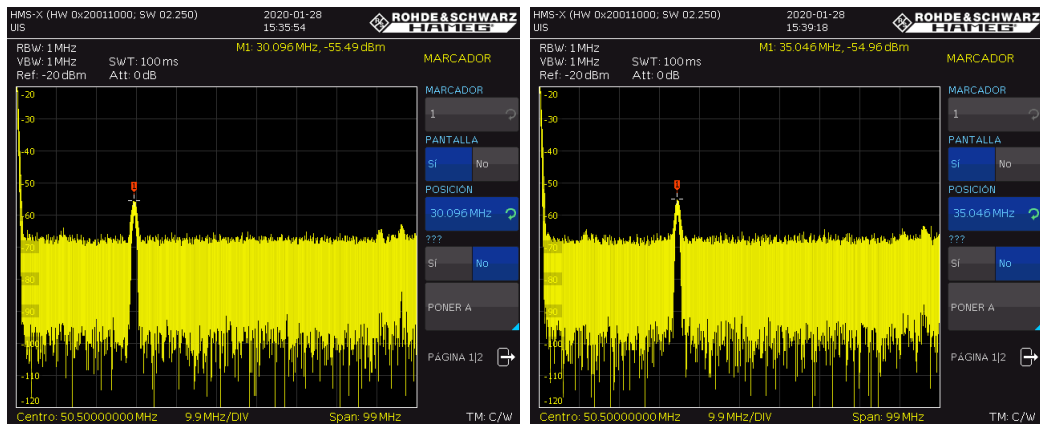
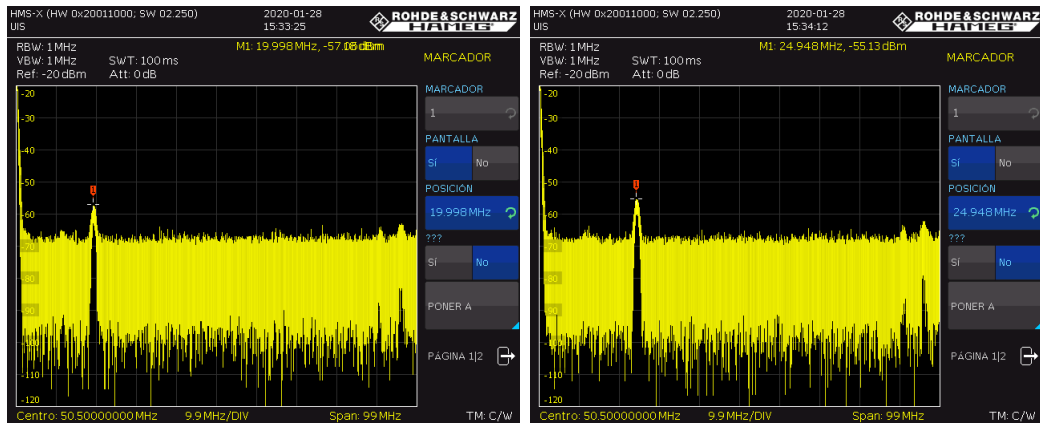
$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - 1}{g_1} + \frac{F_3 - 1}{g_1 g_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{g_1 g_2 \dots g_{n-1}} \quad (19)$$

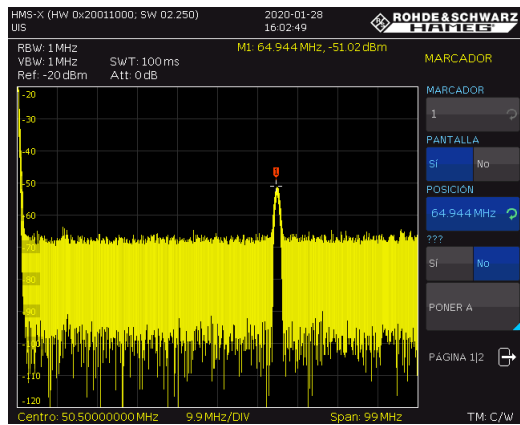
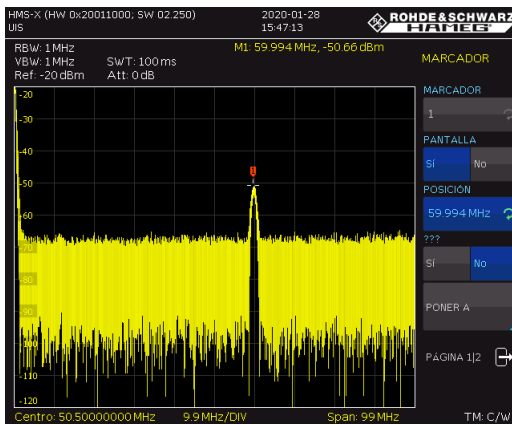
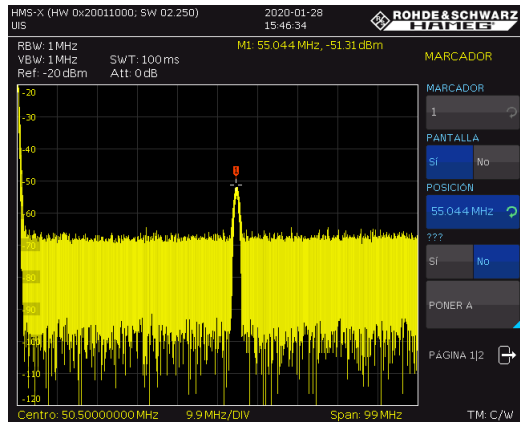
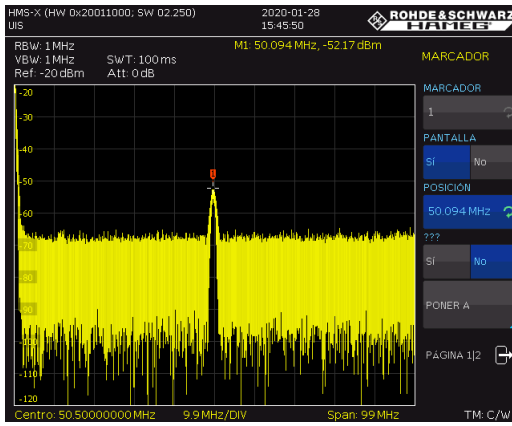
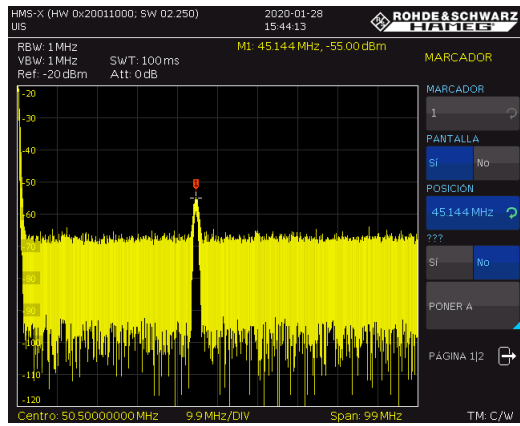
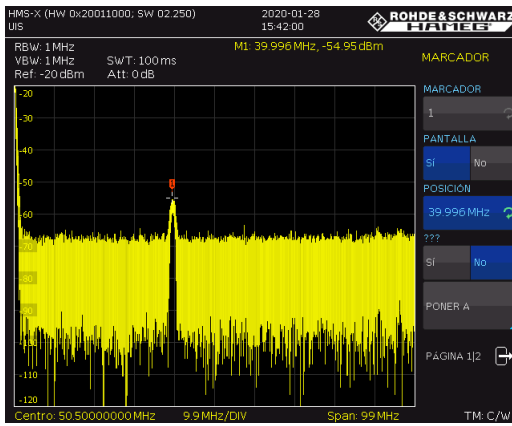
donde F_T es el factor de ruido total de un sistema en cascada, F_1 es el factor de ruido del LNA y el factor predominante del sistema. También los g_n son los valores de las ganancias de las respectivas etapas en escala lineal.

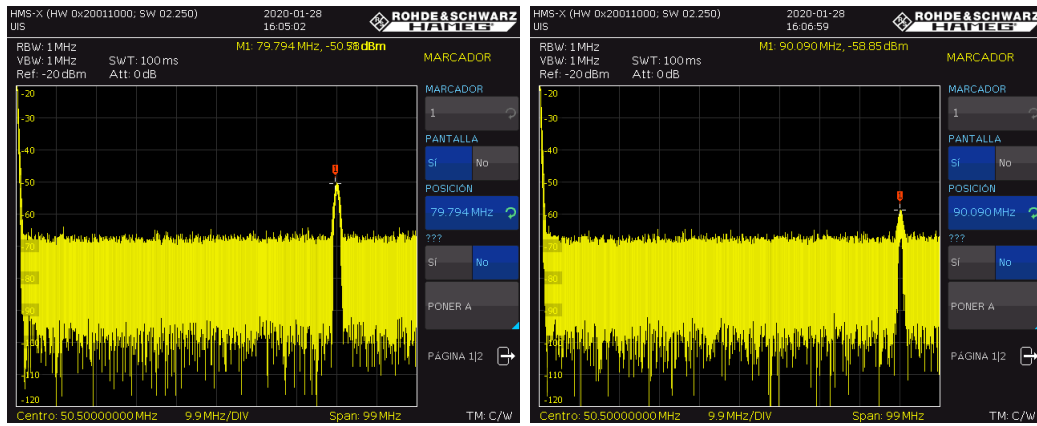
Es por esa razón que si F_1 es pequeño el factor de ruido total va a tender a ser pequeño, ya que las demás contribuciones de las etapas siguientes son menores.

ANEXO B PRUEBAS DE LA ANTENA

Gráficas de las pruebas del LNA, ganancia y respuesta en frecuencia:



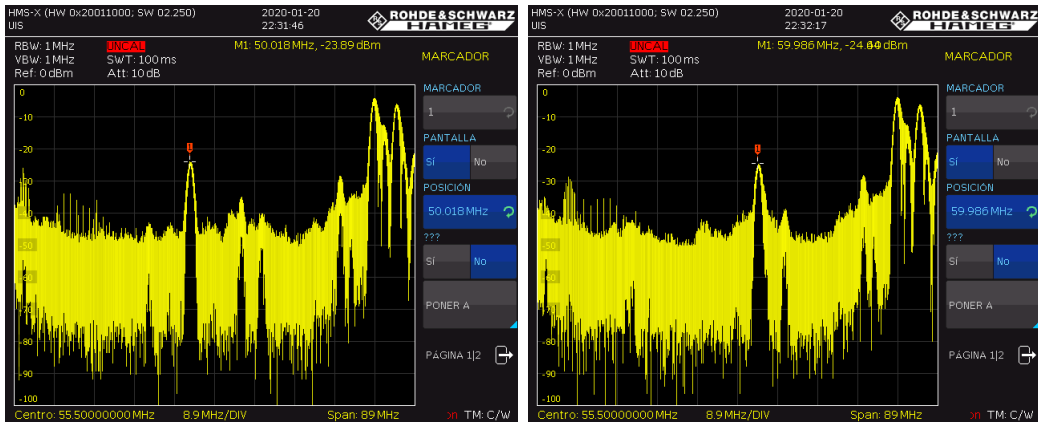
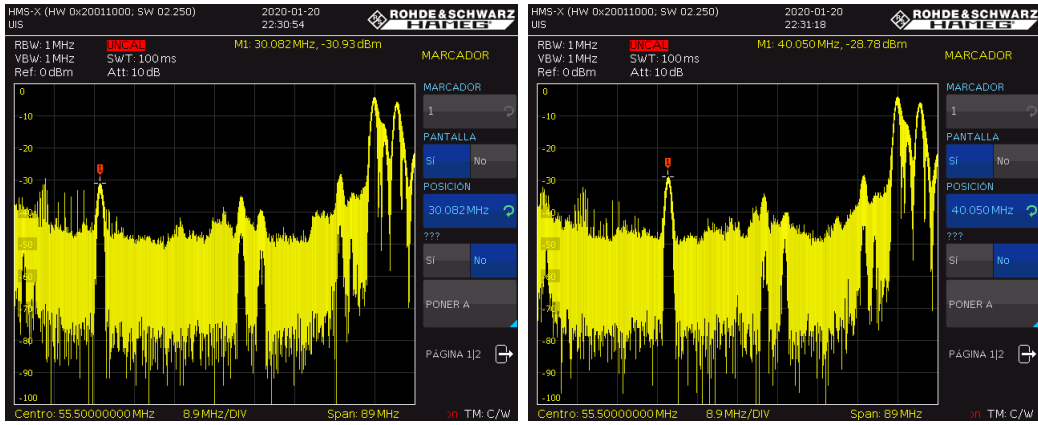


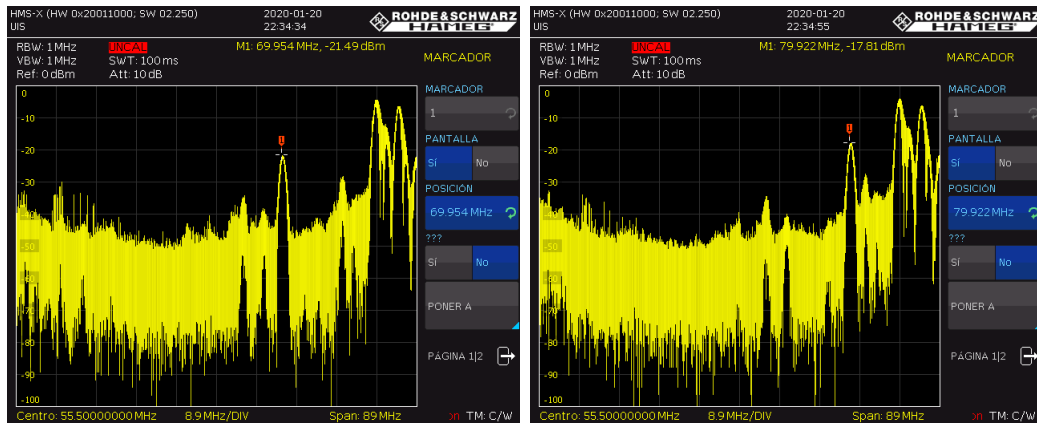


Las mediciones anteriores fueron tomadas en el laboratorio de comunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

ANEXO C PRUEBAS DEL SISTEMA

Pruebas del sistema, antena y amplificador de bajo ruido:





Las mediciones anteriores fueron tomadas en el laboratorio de comunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

BIBLIOGRAFÍA

AARTSEN, MG; ACKERMANN y col. «The IceCube Neutrino Observatory: instrumentation and online systems». En: *Journal of Instrumentation* (2017).

ARDOUIN, D y col. «Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA experiment». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 555.1-2 (2005), págs. 148-163.

ASKAR'YAN, G.A. «Excess negative charge of an electron-photon shower and its coherent radio emission». En: *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 14 (1962).

ASOREY, Hernán. «Lago: the latin american giant observatory». En: *PoS* (2016), págs. 7-15.

— *Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, 2012.

AZNAR, Angel CARDAMA; ROBERT, Jordi Romeu; CASALS, Juan Manuel Rius; ROCA, Lluís Jofre; BORIS, Sebastián Blanch y BATALLER, Miguel Ferrando. *Antenas*. Vol. 3. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.

BEVERAGE, Harold H. *Antenna*. US Patent 2,247,743. Jul. de 1941.

BEZYAZEEKOV, PA; BUDNEV, NM; GRESS, OA; HAUNGS, A; HILLER, R; HUEGE, T y col. «Measurement of cosmic-ray air showers with the Tunka Radio Extension

(Tunka-Rex)». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2015), págs. 89-96.

CLARK, ALAN Robert. «A Study Guide for Electromagnetics». En: (2004).

COLLABORATION, Pierre Auger y col. «Antennas for the detection of radio emission pulses from cosmic-ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory». En: *Journal Of Instrumentation*, 2012, vol. 7, p. P10011-1-P10011-49 (2012).

COLOMBIA, Gobierno de. «ANE». En: (2002).

DEYOUNG, Tyce; COLLABORATION, HAWC y col. «The HAWC observatory». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (2012).

FALCKE, Henio y GORHAM, Peter. «Detecting radio emission from cosmic ray air showers and neutrinos with a digital radio telescope». En: *Astroparticle Physics* 19.4 (2003), págs. 477-494.

FUNCHS, Benjamin; COLLABORATION, Pierre Auger y col. «The Auger engineering radio array». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 692 (2012), págs. 93-97.

GEMMEKE, Hartmut; ASCH, Thomas; BORMANN, Dietmar; KROMER, Oliver; MANEWALD, Merlin; PETZOLD, Lars y SCHMIDT, Adrian. «Techniques for Radio Detection of Ultra-High Energy Cosmic Rays». En: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56.3 (2009), págs. 1083-1088.

HAARLEM, Michael P van y col. «LOFAR: The low-frequency array». En: *Astronomy & astrophysics* 556 (2013), A2.

HAUNGS, Andreas; REBEL, Heinigerd y ROTH, Markus. «Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays». En: *Reports on Progress in Physics* 66.7 (2003).

HILLER, Roman. «Radio measurements for determining the energy scale of cosmic rays». En: (2016).

HUEGE, Tim. «Radio detection of cosmic ray air showers in the digital era». En: *Physics Reports* (2016).

— «Radio detection of extensive air showers». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (2017).

HUEGE, Tim; LUDWING, Marianne y JAMES, Clancy W. «Simulating radio emission from air showers with CoREAS». En: (2013).

HUEGE, Tim; ULRICH, R y ENGEL, R. «Monte Carlo simulations of geosynchrotron radio emission from CORSIKA-simulated air showers». En: *Astroparticle Physics* (2007), págs. 392-405.

HUEGE, Tim y col. «The LOPES experiment—recent results, status and perspectives». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 662 (2012), S72-S79.

JELLEY, JV; FRUIN, JH; PORTER, NA; WEEKES, TC; SMITH, FG y PORTER, RA. «artículo 6 autores Radio pulses from extensive cosmic-ray air showers». En: *Nature* 205.4969 (1965), pág. 327.

KAHN, Franz Daniel y LERCHE, I. «Radiation from cosmic ray air showers». En: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 289.1417 (1966).

KLAGES, HO; APEL, WD y col. «The KASCADE experiment». En: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* (1997).

KLEIFGESS, M y col. «Measurement of cosmic ray air showers using MHz radio-detection techniques at the Pierre Auger Observatory». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 718 (2013).

KRAUSE, Maria. *Calibration of the LOFAR antennas*. Radboud University Nijmegen, Netherlands, 2016.

KRAUSE, RAPHAEL. «Detection of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays with the Auger Engineering Radio Array». En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2017).

POZAR, DAVID M. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.

SCHRÖDER, Frank. *Instruments and methods for the radio detection of high energy cosmic rays*. Springer Science & Business Media, 2012.

TECHNOLOGIES, Agilent. «Agilent AN 154S-Parameter DesignApplication Note». En: (2000).

TECHNOLOGIES, Infenion. *BFP720*. url<https://www.infineon.com/cms/en/product/rf-wireless-control/rf-transistor/ultra-low-noise-sigec-transistors-for-use-up-to-12-ghz/bfp720/>. 1999.

THOMPSON, A Richard. «ITU-R recommendations of particular importance to radio astronomy». En: *Spectrum Management for Radio Astronomy* 1 (2004), pág. 121.