

Validación de un sistema móvil de medición de interferencias en radiofrecuencias para uso en  
radioastronomía

Ronal Sebastian Buitrago Parra

Yeison Andres Quiroga Malambo

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico

Director

Julián Rodríguez Ferreira

Doctor en Física – Especialidad Astrofísica

Codirector

Felipe P. Mosquera

Ingeniero Electrónico - Magíster en Ciencias de la Computación

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022



### **Dedicatoria**

Este proyecto se lo dedico de manera muy especial a mi familia por brindarme apoyo durante mi carrera universitaria. A mis padres Marina Malambo y Francisco Quiroga que con su amor, esfuerzo y paciencia me han permitido lograr un nuevo sueño. Gracias por inculcar en mi, ejemplos y valores los cuales me ayudan a crecer cada día como persona. También, quiero agradecerles por brindarme su cariño, comprensión y sobretodo por apoyarme en todo momento. A mis hermanas Naira y Andrea por su cariño y apoyo incondicional, por siempre estar conmigo, en los momentos felices y en las adversidades. A mi sobrino Lian Marquez que con su gran amor, ternura y con sus ocurrencias llena de felicidad a toda la familia.

**Yeison Andres Quiroga Malambo**

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer a todos los profesores que me enseñaron y me formaron durante mi carrera universitaria. Gracias por brindarme sus conocimientos en las diferentes áreas. Agradezco a mi director Julián Rodríguez, a mi codirector Felipe Mosquera y al profesor Efrén Acevedo que con su experiencia, conocimiento, motivación y dedicación nos orientaron en el proyecto de investigación.

**Yeison Andres Quiroga Malambo**

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b>	<b>14</b>
<b>1 Objetivos</b>	<b>17</b>
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos	17
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>18</b>
2.1 Espectro Radioeléctrico	18
2.2 Tecnología SDR (USRP E310)	18
2.2.1 Filtro de Savitzky–Golay	19
2.3 Antenas	20
2.3.1 Características y parámetros de las antenas	20
2.3.2 Antena Bicónica	22
2.4 Características de los radioenlaces	23
2.4.1 Zonas de Fresnel	23
2.4.2 Nivel de recepción o Intensidad de la señal	24
2.4.3 Azimut y Elevación	25
2.5 Enlaces PtP y PtMP	25
2.6 Meteorología	27

<b>3</b>	<b>Características del Sistema</b>	<b>30</b>
3.1	Sistema CASIRI	30
3.2	Subsistemas CASIRI	30
3.2.1	Subsistema de adquisición de imágenes	30
3.2.2	Subsistema estación meteorológica	31
3.2.3	Subsistema adquisición RFI	32
3.2.3.1	Caracterización de antena	32
3.2.3.2	Linealidad del equipo SDR	33
3.2.3.3	Sensibilidad del equipo SDR	34
<b>4</b>	<b>Implementación del Sistema</b>	<b>36</b>
4.1	Arquitectura de software subsistemas CASIRI	36
4.1.1	Subsistema de adquisición de imágenes	36
4.1.2	Subsistema estación meteorológica	38
4.1.3	Subsistema adquisición RFI	40
4.1.4	Control principal	42
4.2	Implementación física subsistemas CASIRI	44
4.2.1	Subsistema de adquisición de imágenes	44
4.2.2	Subsistema estación meteorológica	45
4.2.3	Subsistema adquisición RFI	46
4.2.4	Control principal	47

<b>5 Comunicación Remota</b>	<b>49</b>
5.1 Selección de dispositivos	49
5.2 Diseño de enlaces	51
5.2.1 Primer diseño	51
5.2.1.1 Presupuesto	57
5.2.2 Segundo diseño	59
5.2.2.1 Presupuesto	63
<b>6 Resultados</b>	<b>64</b>
6.1 Análisis de las mediciones	64
6.1.1 Comparación datos de subsistema estación meteorológica	64
6.1.2 Subsistema adquisición de imágenes	64
6.1.3 Puebas de laboratorio subsistema RFI	65
6.1.4 Comparación de tomas de datos subsistema RFI	66
6.2 Elección del diseño de radioenlace	67
<b>7 Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>68</b>
7.1 Conclusiones	68
7.2 Recomendaciones	69
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>71</b>
<b>Anexos</b>	<b>74</b>

**Lista de Figuras**

Figura 1	Patrón de radiación volumétrico y bidimensional de la antena Yagi	22
Figura 2	Ganancia de una antena	22
Figura 3	Primera zona de fresnel	24
Figura 4	Diagrama del enlace punto a punto (PtP)	26
Figura 5	Diagrama del enlace punto a multipunto (PtMP)	26
Figura 6	Parámetro S11 antena bicónica.	33
Figura 7	Respuesta de linealidad.	34
Figura 8	Respuesta de sensibilidad.	35
Figura 9	Diagrama de bloques sistema CASIRI.	36
Figura 10	Comunicación indiserver.	37
Figura 11	Estructura de archivos subsistema adquisición de imágenes.	38
Figura 12	Estructura de archivos estación ambiental.	40
Figura 13	Diagrama de bloques potencia de una señal.	41
Figura 14	Estructura de archivos adquisición RFI.	43
Figura 15	Estructura de archivos control principal.	43
Figura 16	Diagrama de conexión subsistema adquisición de imágenes.	45
Figura 17	Diagrama de conexión subsistema estación ambiental.	46

Figura 18	Diagrama de conexión subsistema adquisición RFI.	47
Figura 19	Diagrama de conexión subsistema adquisición RFI.	48
Figura 20	Rendimiento de la antena sectorial Rocket 5AC Lite	51
Figura 21	Vista del radioenlace en el software Google Earth	53
Figura 22	Simulación del enlace A-B	54
Figura 23	Simulación del enlace B-C	54
Figura 24	Simulación del enlace C-D	55
Figura 25	Simulación del enlace D-E	55
Figura 26	Diagrama de conexión punto de acceso (Nodo A) y estación (Nodo E)	58
Figura 27	Diagrama de conexión por nodos del radioenlace	58
Figura 28	Simulación del radioenlace	61
Figura 29	Vista del radioenlace	62
Figura 30	Diagrama de conexión de equipos	62
Figura 31	Capturas subsistema adquisición de imágenes	65
Figura 32	Potencia de emisoras	66
Figura 33	Medición de RFI Laboratorio vs Páramo de Berlín	67

**Lista de Tablas**

Tabla 1	Características generales del dispositivo SDR.	19
Tabla 2	Características de la Antena Bicónica SAS-542	23
Tabla 3	Calificación de la intensidad de señal según su valor	24
Tabla 4	Características de los sensores de la estación.	28
Tabla 5	Características cámara All-Sky.	31
Tabla 6	Características NVIDIA Jetson Nano.	31
Tabla 7	Características USRP E310.	32
Tabla 8	Elementos subsistema adquisición de imágenes.	44
Tabla 9	Elementos subsistema estación meteorológica.	45
Tabla 10	Elementos subsistema adquisición RFI.	46
Tabla 11	Elementos control principal.	47
Tabla 12	Comparación de antenas direccionales.	50
Tabla 13	Coordenadas de los nodos del radioenlace	52
Tabla 14	Características técnicas del radioenlace	56
Tabla 15	Orientación y altura de las antenas	56
Tabla 16	Consolidado del presupuesto para la implementación del enlace	59
Tabla 17	Coordenadas de los nodos del radioenlace	60

Validación de radiofrecuencias para uso en radioastronomía	11
Tabla 18 Características técnicas del enlace	61
Tabla 19 Consolidado del presupuesto para la implementación del enlace	63
Tabla 20 Comparación de mediciones meteorológicas del 02/04/2022	64

## Abstract

**Title:** Validation of a mobile radio frequency interference measurement system for use in radio astronomy. \*

**Author:** Ronal Sebastian Buitrago Parra, Yeison Andres Quiroga Malambo. \*\*

**Director:** Julián Rodríguez Ferreira Ph.D Physics.

**Keywords:** Radio astronomy, Antennas, Radio frequency interference, Scientific services.

**Description:** The work carried out in 2019 by the Industrial University of , in collaboration with the National Spectrum Agency, is the first phase of this investigation, in which the possible places with the least radio interference were studied, taking measurements in different places in the country. With these results, the Berlin moor was established as one of the best locations to continue with the studies.

This research work proposes to enable the CASIRI system through the development and implementation of the subsystems (RFI acquisition, image acquisition and weather station) and the remote control mechanism, with the aim of establishing the most suitable locations for the future implementation of a radio telescope.

After the implementation of the system, field and laboratory tests were carried out to validate its correct operation. As a result, climatological variables were obtained that were compared with the data from the NASA POWER base, and similarities between them were evidenced; spectra were also observed, where frequencies of local stations are clearly seen. These measurements confirmed the effectiveness of the system (National Aeronautics and Space Administration, 2022).

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

## Resumen

**Título:** Validación de un sistema móvil de medición de interferencias en radiofrecuencias para uso en radioastronomía. \*

**Autores:** Ronal Sebastian Buitrago Parra, Yeison Andres Quiroga Malambo. \*\*

**Director:** Julián Rodríguez Ferreira Ph.D Physics.

**Palabras claves:** Radioastronomía, Antenas, Interferencia en radiofrecuencias, Servicios científicos.

**Descripción:** el trabajo realizado en el año 2019 por la Universidad Industrial de , en colaboración con la Agencia Nacional del Espectro, es la primera fase de la presente investigación, en la cual se estudiaron los posibles lugares con menor radiointerferencia realizando mediciones en distintos lugares del país. Con estos resultados se estableció el páramo de Berlín como uno de las mejores ubicaciones para continuar con los estudios.

Este trabajo de investigación propone habilitar el sistema CASIRI mediante, el desarrollo y la implementación de los subsistemas (adquisición RFI, adquisición de imágenes y estación meteorológica) y el mecanismo de control a distancia, con el objetivo de establecer las locaciones más idóneas para la futura implementación de un radiotelescopio. Luego de la implementación del sistema, se realizaron pruebas de campo y laboratorio para validar el correcto funcionamiento de este. Como resultado, se obtuvieron variables climatológicas que se compararon con los datos de la base NASA POWER, y se evidenciaron semejanzas entre ellos; también se observaron espectros, donde se aprecian claramente frecuencias de emisoras locales. Dichas mediciones corroboraron la efectividad del sistema (National Aeronautics and Space Administration, 2022).

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

## Introducción

La radioastronomía es una disciplina que se encarga de estudiar los objetos celestes y astrofísicos, a partir de señales de radio cósmicas. Estos estudios se remontan al año 1933, cuando el ingeniero Karl Guthe Jansky se interesó por conocer los factores que afectaban las comunicaciones transatlánticas, de tal manera que creó la primer antena, la cual tenía un motor que permitía girarla en diferentes direcciones, para observar las fuentes de ruido provenientes del universo.

Más adelante, en 1940, el ingeniero y radioaficionado Grote Reber continuó los estudios de Jansky y construyó una antena para fines astronómicos, con la cual implementó el primer radiotelescopio (Dorado, 2007); esta antena permitió obtener un mapa radioeléctrico de la bóveda celeste. Con el paso de los años y el avance de la tecnología, se han diseñado antenas robustas con características idóneas para el uso en radioastronomía. Actualmente, existen radiotelescopios con grandes antenas o varias antenas de menor tamaño, que actúan en paralelo para captar señales de radio que, generalmente, son débiles.

Bajo ese entendido, el sistema CASIRI se desarrolla con la finalidad de caracterizar posibles lugares para implementar radiotelescopios en futuros proyectos de investigación. Inicialmente, se contaba con una plataforma IoT, que permitía al usuario consultar información de los subsistemas, analizar los datos recolectados, configurar y operar el sistema; sin embargo, esta plataforma presentó fallas difíciles de solucionar, debido a paquetes que ya no son compatibles entre ellos por la actualización de librerías. Como solución a lo anterior, se cambió la arquitectura a almacenamiento local; para ello, se implementaron algoritmos de programación para la recolección de información

de los subsistemas (adquisición RFI, adquisición de imágenes y estación meteorológica).

El presente trabajo está compuesto por siete capítulos, en los cuales se expone el proceso de ejecución del proyecto: en el Capítulo uno se plantean los objetivos propuestos del presente trabajo de investigación; en el capítulo dos, correspondiente al marco teórico, se describen temas como espectro radioeléctrico, tecnología SDR, antenas, radioenlaces y meteorología, los cuales soportan el desarrollo del trabajo; en los Capítulos tres y cuatro se presenta las características y la implementación del sistema, respectivamente, además de la descripción de los principales parámetros de los dispositivos discriminados por subsistemas. La descripción de la implementación se divide en *hardware* y *software*, donde se observan las conexiones físicas y la ejecución de los *scripts* para la toma de datos de los subsistemas individuales y del sistema en conjunto.

Posteriormente, en el Capítulo cinco, corresponde a la comunicación remota, se presenta el diseño de dos enlaces punto a punto (PtP), junto con su presupuesto para la implementación. La finalidad de los enlaces es comparar la opción más viable, técnica y económicamente, para establecer conexión de internet al servidor ubicado en el sitio de mediciones. Una vez se tenga el servicio, es posible, mediante el software AnyDesk, controlar el dispositivo desde un servidor local.

Más adelante, en el Capítulo seis, se exponen los resultados obtenidos de los diferentes subsistemas, y se muestran las tomas de señales de RFI, las imágenes del firmamento y los datos meteorológicos. También se realiza el respectivo análisis de las mediciones de radiofrecuencia y se comparan los datos del laboratorio con los registrados en campo. Por último, en el Capítulo siete se evidencian las conclusiones que se obtuvieron a partir de los resultados del proyecto y, además,

algunas recomendaciones para la continuidad de este.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Diseñar el conjunto de protocolos de las pruebas de aceptación para validar el sistema móvil de medición de interferencias en radiofrecuencias CASIRI.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar el conjunto de pruebas y protocolos de aceptación del sistema CASIRI.
- Validar el sistema CASIRI mediante pruebas de laboratorio.
- Analizar los datos del sistema CASIRI obtenidos en salidas de campo.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Espectro Radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es una señal de corriente alterna invisible e intangible, que resulta de gran utilidad para el diario vivir, puesto que se hace uso de él al hablar por celular, escuchar la radio, usar el WIFI, entre otras. Este espectro es el medio que permite todas estas comunicaciones, cuyo rango de frecuencias varía entre 3 KHz a 300 GHz (Álvarez, 2016). Se divide en tres regiones: de 3 KHz a 3 GHz, que se conocen tradicionalmente como radiofrecuencias. Entre 3 GHz y 30 GHz se conocen como microondas; y entre 30 GHz y 300 GHz se conocen como ondas milimétricas, entre las aplicaciones más usadas de las señales de radiofrecuencia se encuentran las radiocomunicaciones, el calentamiento de materiales, la telemetría y la detección remota, los sistemas de radar y, actualmente, se está implementando en el campo de la medicina.

De acuerdo con lo anterior es preciso señalar que en el presente proyecto se usa la antena bicónica SAS 542 para medir señales de radiofrecuencia en el rango de 100 a 200 MHz.

### 2.2. Tecnología SDR (USRP E310)

La Radio Definida por Software (SDR) es un sistema de radiocomunicaciones implementada a través de ordenadores, los cuales están compuestos por un convertidor análogo-digital, precedido por un adaptador de radiofrecuencia; estos sistemas pueden ser de comunicación analógica o digital, y son capaces de corresponder a sistemas actuales, futuros y del pasado (Arslan and Ahmed, 2007). Esta tecnología permite configurar el software con base en la aplicación y también puede reconfigurarse cuando se presenten actualizaciones de los estándares.

En la ejecución de este proyecto, específicamente en el subsistema adquisición RFI, se utiliza el dispositivo USRP E310 para recibir la señal de radiofrecuencia, fabricado por la compañía *Ettus Research*, especialista en sistemas SDR; este dispositivo tiene sistema operativo *OpenEmbedded Linux* con librerías GNU Radio y UHD instaladas, que le permiten operar de forma autónoma. En la Tabla 1 se presentan las características generales del dispositivo SDR, según (Díaz, 2018).

**Tabla 1**

*Características generales del dispositivo SDR.*

<b>USRP E310</b>	
Xilinx Zynq 7020 SoC	ARM Cortex A9 866 MHz con FPGA
Banco de filtros RF	Tx, Rx
UHD	V3.9.1
RFNoC	Si
Audio Jack	Si
2x2 MIMO transceiver	Si
Rango de frecuencias (Rx)	70 MHz –6 GHz
Rango de frecuencias (Tx)	47 MHz –6 GHz
Ancho de banda instantáneo (AD9631 RFIC)	56 MHz
SO	OpenEmbedded Linux, basado en el proyecto YOCTO Linux
Máxima potencia de entrada (Rx)	0 dBm
Máxima potencia de salida (Tx)	15 dBm

El USRP E310 es un dispositivo portable con la capacidad de transmitir y recibir información desde frecuencias en VHF hasta UHF con un piso de ruido de  $-108$  dB, sus características técnicas se mencionan en la Tabla 1

**2.2.1. Filtro de Savitzky–Golay.** Este filtro fue propuesto en 1964 por Abraham Savitzky y Marcel J. E. Golay, y realiza un suavizado con el método de aproximación polinomial

por mínimos cuadrados; a partir de un vector de datos, un tramo y el grado del polinomio, como lo señaló (Quintero, 2009). Este método de procesado tiene la capacidad de conservar las características más significativas como máximos, mínimos y ancho de banda ocupados por los picos, al ser de gran utilidad con señales que presenten alto índice de ruido.

### 2.3. Antenas

Las antenas son dispositivos capaces de emitir y recibir señales en forma de ondas electromagnéticas que viajan a través del espacio. Se clasifican de la siguiente manera: transmisoras, cuya función es transformar la corriente eléctrica en ondas electromagnéticas; receptoras, que actúan de forma inversa. Las ondas electromagnéticas transmitidas contienen información, la cual, en algunos casos, se ve afectada por interferencias u otro tipo de perturbaciones que puedan presentarse. Las antenas están presentes en múltiples aplicaciones como radio, televisión, teléfonos móviles, *routers* inalámbricos, mandos remotos, etc. (Huidobro, 2013).

**2.3.1. Características y parámetros de las antenas.** Todas las antenas tienen características específicas que brindan orientaciones sobre el comportamiento de estas, y se denominan, comúnmente, parámetros de las antenas. Los principales parámetros que describen el comportamiento se presentan a continuación.

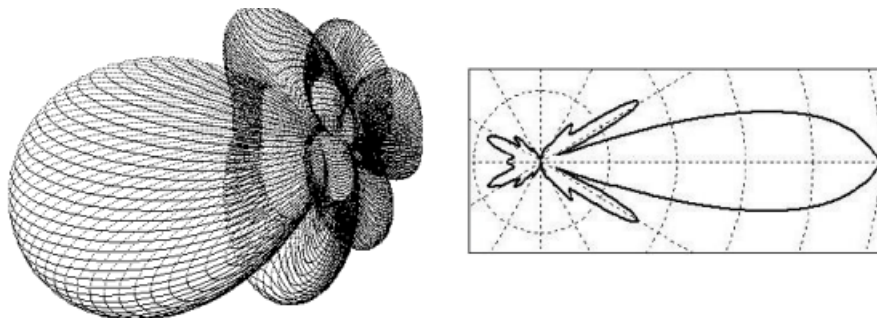
- **Polarización:** la polarización de una antena está dada por la dirección de campo eléctrico, en función del tiempo. Existe tres tipos de polarización: lineal, circular y elíptica (Huidobro, 2013).
- **Patrón de radiación:** es una representación polar bidimensional (2D) o tridimensional (3D),

que muestra la radiación o densidad de potencia radiada de una antena, de acuerdo con las distintas direcciones del espacio. La representación del diagrama 3D se da en coordenadas esféricas y la representación 2D se da en coordenadas polares. En algunos casos, no es necesario obtener el patrón de radiación en 3D, con el diagrama bidimensional es suficiente para representar dicho patrón, puesto que el ángulo representa la dirección del espacio y el radio representa la densidad de potencia radiada (Castellanos, 2005). En la Figura 1 se presenta el patrón de radiación bidimensional y tridimensional de la antena Yagi.

- **Ganancia:** se define como la razón entre la intensidad de campo eléctrico de una antena en un determinado punto y la intensidad de campo eléctrico de una antena isotrópica en el mismo punto y en igualdad de condiciones, como se aprecia en la Figura 2 (Castellanos, 2005).
- **Relación de onda estacionaria (VSWR):** es la relación entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo de una onda estacionaria desarrollada en el puerto de una antena. El VSWR ideal para una transmisión o recepción debe ser de 1:1 (A.H. Systems, 2022a).
- **Ancho de Banda (BW):** se define como el rango de frecuencias donde la relación de onda estacionaria (VSWR) no excede cierto valor predeterminado, y es afectado por parámetros como patrón de radiación polarización y ganancia (Pérez et al., 2007).

**Figura 1**

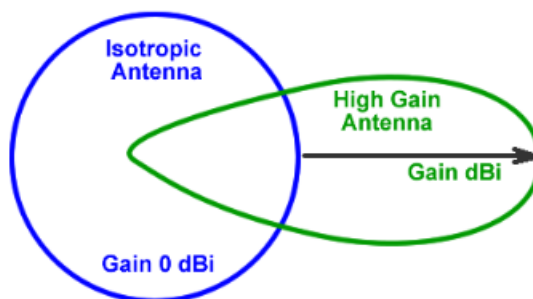
*Patrón de radiación volumétrico y bidimensional de la antena Yagi*



*Nota.* Figura extraída de (Castellanos, 2005).

**Figura 2**

*Ganancia de una antena*



*Nota.* Figura extraída de (A.H. Systems inc., 2022).

**2.3.2. Antena Bicónica.** La antena bicónica plegable SAS-542 fue la primera antena EMC diseñada para aplicaciones portátiles. Los elementos bicónicos se desacoplan y se pliegan para su portabilidad. Esta antena bicónica es la solución ideal para aplicaciones móviles dentro de las cuales se encuentra el reconocimiento de sitio (*site survey*) (A.H. Systems, 2022b).

En la Tabla 2 se presentan las principales características de la Antena Bicónica SAS-542.

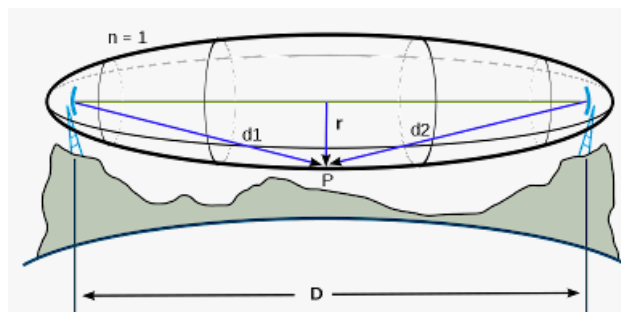
**Tabla 2***Características de la Antena Bicónica SAS-542*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Rango de frecuencia	20 MHz – 330 MHz
Factor de antena	8.5 a 21.5 dB/m
Impedancia	50 $\Omega$ ( <i>nominales</i> )
Ganancia	–22 a 2.8 dBi
Polarización	Omni-directional
VSWR	2.0:1
Conector de salida	Tipo N, hembra
Potencia	1 W

## 2.4. Características de los radioenlaces

Los radioenlaces son sistemas de comunicación inalámbricos que transmiten la información mediante ondas de radio; dichos enlaces pueden ser entre dos o más puntos fijos situados sobre la superficie terrestre. Existen varias características que permiten determinar la calidad y la eficiencia de ellos, las principales se mencionan a continuación.

**2.4.1. Zonas de Fresnel.** Las zonas de fresnel son el espacio que rodea la línea de vista entre la antena transmisora y la antena receptora. Estas zonas tienen forma de elipsoides concéntricos, cuyos focos son los puntos emisor y receptor (Pérez et al., 2007). Se debe verificar que el volumen limitado por la primer zona de fresnel 3 esté libre de obstáculos, puesto que en esta zona se encuentra prácticamente la totalidad de la potencia radiada por la antena transmisora hacia el receptor.

**Figura 3***Primera zona de fresnel*

Nota. Figura extraída de (Mundo teleco, 2022).

**2.4.2. Nivel de recepción o Intensidad de la señal.** En telecomunicaciones el nivel de recepción es una medida que indica la calidad de una señal a determinada distancia de su fuente. La unidad para indicar la intensidad de la señal o nivel de recepción son los decibelios relativos a un milivatio (dBm) y se expresa como un número negativo de 0 a  $-100$ , donde una excelente intensidad son los valores negativos cercanos a 0 (ver Tabla 3).

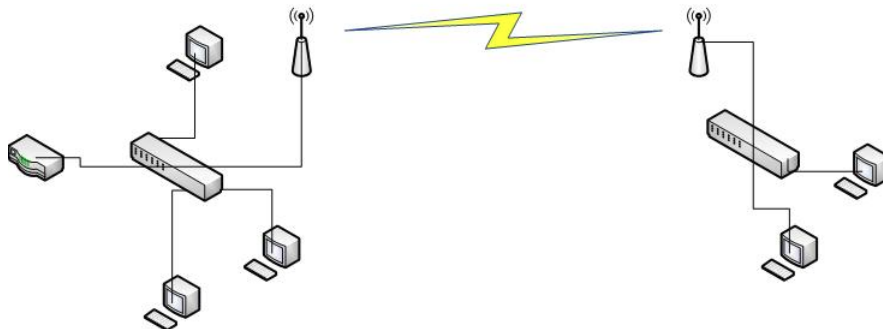
**Tabla 3***Calificación de la intensidad de señal según su valor*

Intensidad de señal	Calificador
$-30$ dBm	Excelente
$-50$ dBm	Excelente
$-65$ dBm	Muy bueno
$-67$ dBm	Muy bueno
$-70$ dBm	Aceptable
$-80$ dBm	Malo
$-90$ dBm	Muy malo
$-100$ dBm	Peor

**2.4.3. Azimut y Elevación.** En la ejecución de un radioenlace, los parámetros azimut y elevación o inclinación son de vital importancia, porque estos indican cómo se deben instalar las antenas o los dispositivos. El azimut es un ángulo formado por la proyección de la luz solar respecto al norte y se mide en sentido de las manecillas del reloj. Por su parte, el ángulo de elevación se mide desde la horizontal (vista del observador) hacia arriba o abajo, donde se encuentre ubicada la antena; si esta se encuentra ubicada abajo de la horizontal se conoce como ángulo de depresión.

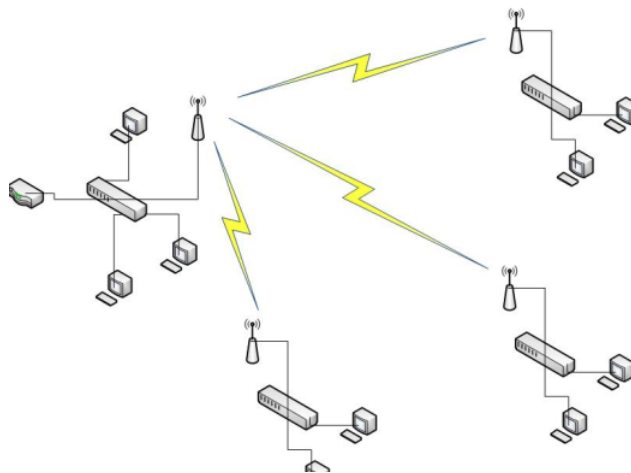
## **2.5. Enlaces PtP y PtMP**

Las comunicaciones de internet a largas distancias, generalmente, se implementan de manera inalámbrica por medio de antenas transmisoras y receptoras; para ello, existen dos maneras de realizar dichas comunicaciones, las cuales son: enlace punto a punto (PtP) y enlace punto a multipunto (PtMP). En los enlaces PtP (ver Figura 4), la comunicación está dada a través de un par de antenas ubicadas y orientadas de tal modo que exista línea de vista entre ellas; además, deben estar enfrentadas para tener un enlace fuerte y sin pérdidas en la potencia. La distancia entre los nodos depende del terreno y de las características de las antenas.

**Figura 4***Diagrama del enlace punto a punto (PtP)*

*Nota.* Figura extraída de (Khrisier, 2022).

En este sentido, a diferencia del enlace PtP, los enlaces PtMP (ver Figura 5) están diseñados para soportar múltiples comunicaciones simultáneamente. En este segundo método, las antenas también deben ubicarse en lugares específicos para tener línea de vista con el punto de acceso (antena transmisora).

**Figura 5***Diagrama del enlace punto a multipunto (PtMP)*

*Nota.* Figura extraída de (Khrisier, 2022).

Para la ejecución de este proyecto, en específico, la finalidad es realizar una conexión de

internet al sitio de mediciones en campo, el cual está ubicado en el páramo de Berlín. Para ello, se requiere de un enlace PtP, al ser la Universidad industrial de Santander el punto de acceso, u otro sitio que cuente con el servicio, en este caso, el restaurante del Refugio Piedra Parada, también ubicado en el Páramo de Berlín.

## 2.6. Meteorología

La meteorología es una ciencia que estudia los fenómenos atmosféricos en un determinado lugar, con el fin de predecir condiciones climáticas y así poder realizar un pronóstico atmosférico. Este proyecto no es la excepción, dado cuenta con el subsistema estación meteorológica, el cual se ejecuta como complemento de las mediciones de radiofrecuencia, para observar en que condiciones climáticas se realizan estas.

Es de mencionar que la estación *Vantage Pro2 Plus* toma datos climáticos y permite enviarlos a la consola *Vantage Pro2* de manera alámbrica e inalámbrica, para la visualización de los registros; además, cuenta con sensores de temperatura, humedad, precipitación, radiación solar, índice UV, dirección del viento, velocidad del viento y presión barométrica (Davis Instruments, 2022). En la Tabla 4 se presentan las características de estos sensores.

A continuación, se presenta una breve definición de estas variables.

- **Temperatura:** es una medida que indica el grado de calor o frío de un cuerpo o de la atmósfera.
- **Humedad:** es una medida que indica la cantidad de vapor de agua presente en el aire, el cual es procedente de la evaporación de los mares, ríos, lagos, océanos y de otros seres vivos.

**Tabla 4***Características de los sensores de la estación.*

Sensor	Resolución	Rango	Presición
Temperatura	0.1 °C	−40 a 65 °C	± 0.3 °C
Humedad	0.01	1 a 100%	± 2%
Precipitación	0.2 mm	0 a 6553 mm	± 4%
Radiación solar	1 w/m2	0 a 1800 w/m2	± 5%
Índice UV	0.1	0 a 16	± 5%
Dirección viento	1°	0° a 360°	3°
Velocidad de viento	0.1 m/s	1 a 80 m/s	± 5%
Presión barométrica	0.1 mm Hg	410 a 820 mm Hg	0.8 mm Hg

- **Precipitación:** la precipitación es la caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo. La cantidad de precipitación es el volumen de lluvia que cae al suelo en un tiempo determinado (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018).
- **Radiación solar:** la radiación solar es la energía emitida por el sol, se propaga en todas las direcciones, a través del espacio mediante ondas electromagnéticas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2022).
- **Índice UV:** es un indicador de la radiación ultravioleta en la superficie de la tierra; también señala la posibilidad de causar lesiones en la piel.
- **Viento:** se le denomina viento al aire en movimiento, se representa mediante un vector que tiene una componente vertical y otra horizontal. La componente vertical es la corriente as-

cedente o descendente, según corresponda; mientras que la corriente horizontal es la que comúnmente se llama viento (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018).

- **Presión Barométrica:** es la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire sobre la superficie de la tierra.

### 3. Características del Sistema

#### 3.1. Sistema CASIRI

El sistema CASIRI está diseñado a partir de tres subsistemas (adquisición RFI, adquisición de imágenes y estación meteorológica), los cuales funcionan de manera conjunta para la caracterización del firmamento, tanto en el espectro radioeléctrico como en el visible. Durante la ejecución de la primera parte del proyecto realizada, en el año 2019, se seleccionaron los componentes que cumplen las características de funcionamiento y se mencionan en este capítulo, junto con sus principales características (Rodríguez, 2019).

#### 3.2. Subsistemas CASIRI

**3.2.1. Subsistema de adquisición de imágenes.** Este subsistema cuenta con una cámara (*Starlight Xpress Oculus all-sky camera*) capaz de realizar capturas de 180 grados. Esta información permite recolectar más datos acerca de las condiciones visibles en el firmamento, como pueden ser los índices de nubosidad o el tránsito aéreo. En la Tabla 5 se evidencian las características más relevantes, y las especificaciones completas están disponibles en el documento de (Starlight Xpress Ltd, 2020).

La cámara *Oculus All-Sky* está diseñada para proporcionar imágenes de la bóveda celeste con alta calidad, para observaciones meteorológicas y de meteoros. El núcleo de la cámara se basa en la *SuperStar* de 1.4 mega píxeles y emplea una lente '*Fish-Eye*' de 1.55 f2 de 180 grados como opción adicional que brinda cobertura de horizonte a horizonte (Davis Instruments, 2022). Las principales características de esta cámara se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5***Características cámara All-Sky.*

<b>Característica</b>	<b>valor</b>
Conexión	Usb 2.0
Rango de observación	180°
Resolución	1392 x 1040 píxeles
Lente	2.5 mm f/2 ojo de pez
Domo de visualización	Policarbonato de alta calidad

Cabe destacar que la información captada por el sensor de la cámara es procesada por la tarjeta nvidia Jetson Nano, con las características de la Tabla 6, de acuerdo con (NVIDIA Corporation, 2019), de modo que fue elegida por sus capacidades de procesamiento y almacenamiento para la cantidad de tomas que se realizan en una campaña de medición.

**Tabla 6***Características NVIDIA Jetson Nano.*

<b>Característica</b>	<b>valor</b>
Sistema operativo	Ubuntu
Almacenamiento SD	128 GB
Memoria ram	4 GB
Potencia consumida	10 W
Conexiones relevantes	Puertos ethernet y usb3.0
Display	Hdmi 2.0

**3.2.2. Subsistema estación meteorológica.** Las variables medidas por la estación ambiental *vantage pro2 plus* acompañan la información del comportamiento y cómo se ven afectadas las señales de RF captadas por el subsistema adquisición RFI, dichas variables caracterizan el clima existente en la zona de campaña para su posterior estudio.

Es preciso indicar que los sensores incorporados en este modelo son temperatura, radiación

solar, presión barométrica, humedad, precipitación, velocidad y dirección del viento; sus características se encuentran en la Tabla 4 extraída de (Davis Instruments, 2022). La frecuencia de toma de datos es definida en el proceso de encendido del subsistema; cabe aclarar que este tema es desarrollado en el Capítulo 4.

**3.2.3. Subsistema adquisición RFI.** Las características de interés en este subsistema se enfocan en el rango de operación de las antenas, la linealidad y la sensibilidad del equipo SDR (radio definida por software), esto con el propósito de obtener datos fieles a los fenómenos radioeléctricos presentados en las mediciones efectuadas en laboratorio y campo.

Para esta sección se tienen en cuenta los resultados obtenidos en la etapa anterior del proyecto (Garzón, L y Ramirez, J, 2020), la tesis de maestría (Mosquera, 2022) y la información dispuesta por los fabricantes de los componentes usados (*datasheet*). En la Tabla 2 se discriminan las características operacionales de la antena bicónica usada en el subsistema adquisición RFI. Las características básicas correspondientes al USRP ETTUS E310 se enuncian en la Tabla 7 son tomadas como el máximo rendimiento para el dispositivo (Company, 2022) .

**Tabla 7**

*Características USRP E310.*

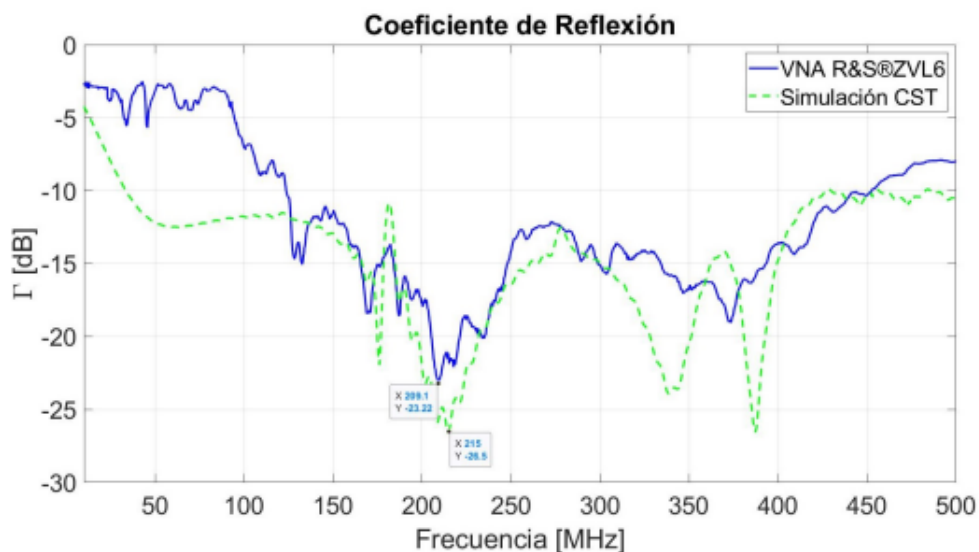
Característica	valor
Canales de transmisión y recepción	2RX, 2TX
Rango de frecuencia	70 MHz a 6 Hz
Ancho de banda máximo	56 MHz

**3.2.3.1. Caracterización de antena.** El parámetro S11 o coeficiente de reflexión en la antena indica las regiones de operación y la frecuencia de resonancia, como se muestra en la

Figura 6. La Caracterización de la antena usada en el proyecto (SAS-542) establece una frecuencia de resonancia de 209.1 MHz y se toma como ancho de banda las frecuencias por debajo de  $-10$  dB (Garzón, L y Ramirez, J, 2020).

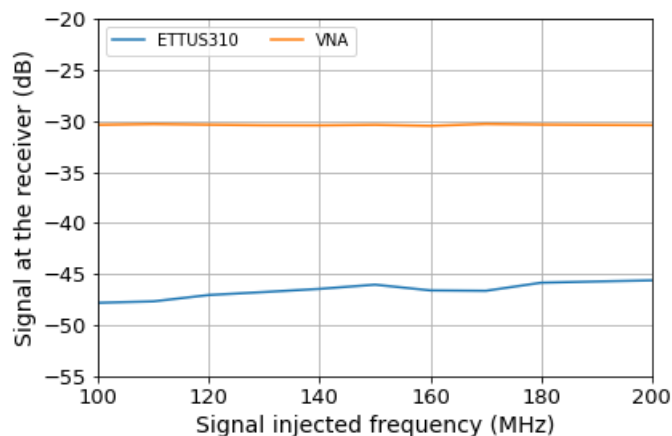
### Figura 6

Parámetro  $S_{11}$  antena bicónica.



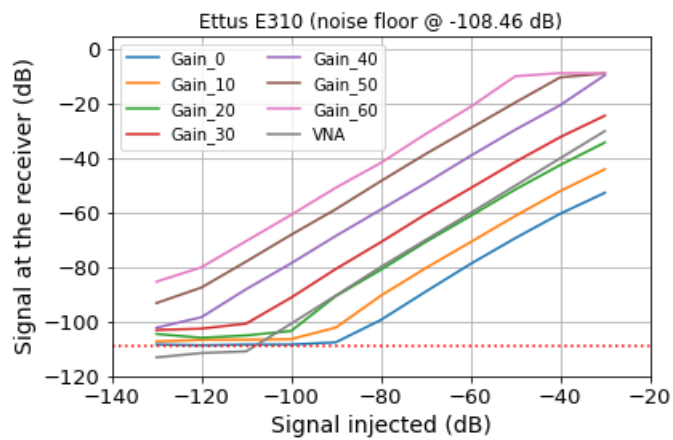
Nota. Recuperado de (Garzón, L y Ramirez, J, 2020).

**3.2.3.2. Linealidad del equipo SDR.** Como lo manifestó (Mosquera, 2022) las mediciones necesarias para la obtener el comportamiento del SDR respecto a su linealidad se realizan con el establecimiento de una ganancia de  $-30$  dB y variando la frecuencia; estos datos indican cómo interactúan la ganancia con las diferentes frecuencias, con una variación de 2,19 dB en este rango de operación. En la Figura 7 se muestra la respuesta en linealidad para el SDR ETTUS E310 en el rango de frecuencia de 100 a 200 MHz

**Figura 7***Respuesta de linealidad.*

*Nota.* Extraído de (Mosquera, 2022).

**3.2.3.3. Sensibilidad del equipo SDR.** Para registrar el comportamiento radioeléctrico de las señales de interés en radioastronomía, se debe tener un piso de ruido bajo, debido a que estas señales son de baja amplitud. Con este fin, (Mosquera, 2022) realizó la tarea de identificar experimentalmente el piso de ruido del equipo, como se muestra en la Figura 8. En ella se establece un piso de ruido en  $-108$  dB, lo cual indica que el dispositivo es capaz de registrar amplitudes de señal que superen ese umbral; también se aprecia que la ganancia que mejor se acopla a los datos de referencia es de 20 dB.

**Figura 8***Respuesta de sensibilidad.**Nota.* Extraído de (Mosquera, 2022).

#### 4. Implementación del Sistema

La implementación del sistema CASIRI requiere tener en cuenta la composición de cada subsistema (adquisición de imágenes, adquisición de RFI y estación meteorológica) (ver Figura 9), tanto de manera individual como a nivel de *software* y *hardware*; las conexiones entre los elementos, la descripción y ejecución de los archivos *python*, para realizar tomas de datos conjuntas de los subsistemas. En este capítulo se describe la totalidad de acciones referentes al funcionamiento del sistema CASIRI.

##### Figura 9

Diagrama de bloques sistema CASIRI.



#### 4.1. Arquitectura de software subsistemas CASIRI

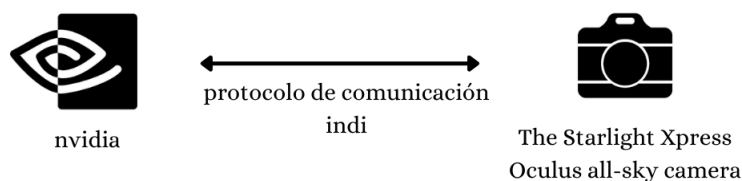
Cada subsistema está compuesto por algoritmos en lenguaje *python* escritos y organizados jerárquicamente para la recolección de información. Cada archivo realiza acciones específicas dentro de la adquisición global de datos.

**4.1.1. Subsistema de adquisición de imágenes.** En el desarrollo del subsistema de adquisición de imágenes se emplea el protocolo de comunicación indi (ver Figura 10), encargado

de realizar acciones a control remoto y la herramienta específica para el uso de cámaras Ekos, la cual controla los parámetros relacionados con la toma de imágenes (tiempo de exposición, formato y tamaño) mediante conexión USB al dispositivo (*The Starlight Xpress Oculus all-sky camera*), como se ve en (INDI Core Library Repository, 2003).

### Figura 10

*Comunicación indiserver.*



Ahora bien, se desarrollo la siguiente estructura de archivos para las funciones del subsistema, corriendo sobre la versión 3.8 de *python*:

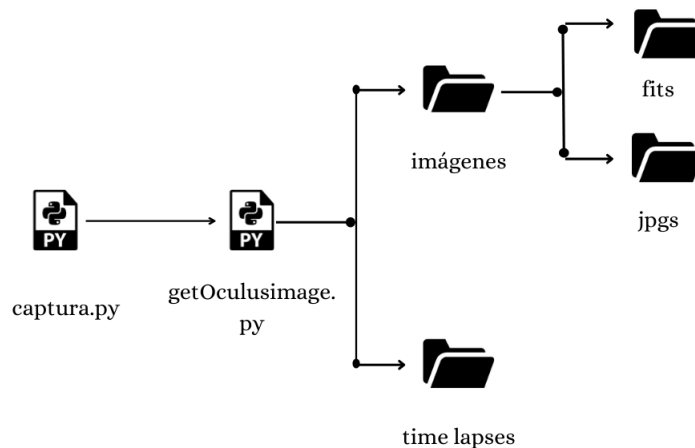
- **getOculusimage.py**, cuya función es establecer la conexión con el servidor **indiserver**, tiempo de exposición y espera durante la ejecución y el almacenamiento de una imagen en formato **.fits** y otra en **.jpg**.
- **captura.py**, encargado de realizar la preparación de los directorios, con la eliminación de las imágenes de tomas anteriores, para luego ejecutar el *script* **getOculusimage.py** tantas veces como se requiera, para la toma de datos y la creación de un vídeo (*timelapse*), a partir de las imágenes en formato jpg existentes en el directorio de imágenes.

Seguidamente, en la Figura 11, se esquematiza la estructura, orden de ejecución de los archivos y los directorios donde se guardan las imágenes en los formatos mencionados y el *timelapse*,

para su posterior exportación al computador principal.

### Figura 11

*Estructura de archivos subsistema adquisición de imágenes.*



**4.1.2. Subsistema estación meteorológica.** Para obtener las variables meteorológicas suministradas por la consola de la estación ambiental **vantagepro2** se utiliza la librería diseñada por el laboratorio *ISTerre Grenoble* para establecer comunicación, y cuadro archivos de tipo *python* ejecutados en el entorno virtual **estacion\_ambiental** en la versión 3.6 de *python* (Harrach, 2012). Los archivos necesarios para la adquisición, la organización y la centralización de la información se describen a continuación:

- **estacion.py** comprende dos funciones encargadas de recopilar y centralizar las variables en un archivo tipo json, capaz de mantener un registro histórico de todas las mediciones realizadas.
- **testCSV.py** tiene como objetivo dar un formato adecuado a los datos almacenados con el propósito de proporcionar un archivo json organizado para su posterior tratamiento por los

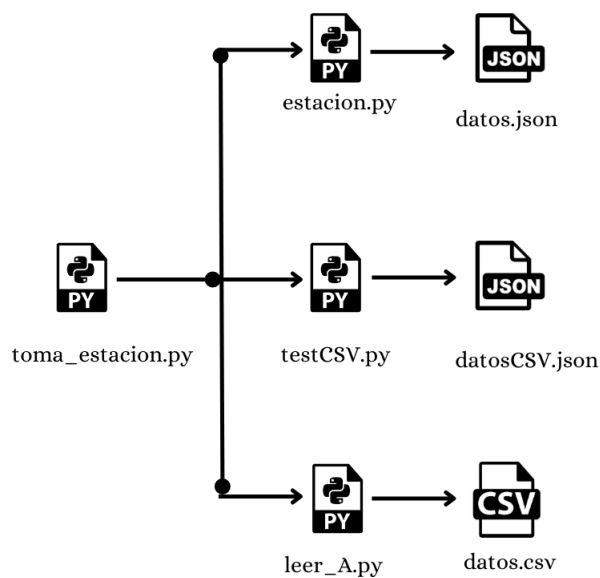
scripts subsiguientes.

- **leer\_A.py** realiza la conversión de las variables medidas que se encuentran en formato json al formato csv, para proporcionar un archivo mas fácil de interpretar y realizar tratamiento de datos, desde una interfaz gráfica con la ayuda de programas como Excel de Microsoft o Calc de Libre Office.
- **toma\_estacion.py** este archivo ejecuta los *scripts* mencionados, a partir de ellos se obtiene datos.json, datosCSV.json y datos.csv, respectivamente. El primero contiene la información almacenada inicialmente, el segundo genera datos organizados para realizar la conversión y, por último, se entrega la visualización final.

Así pues, el esquema representado en la Figura 12 muestra la jerarquía establecida para la generación de cada uno de los archivos contenedores de información; la existencia del archivo datos.json es obligatoria dado que es directorio inicial donde se agrega la nueva información.

**Figura 12**

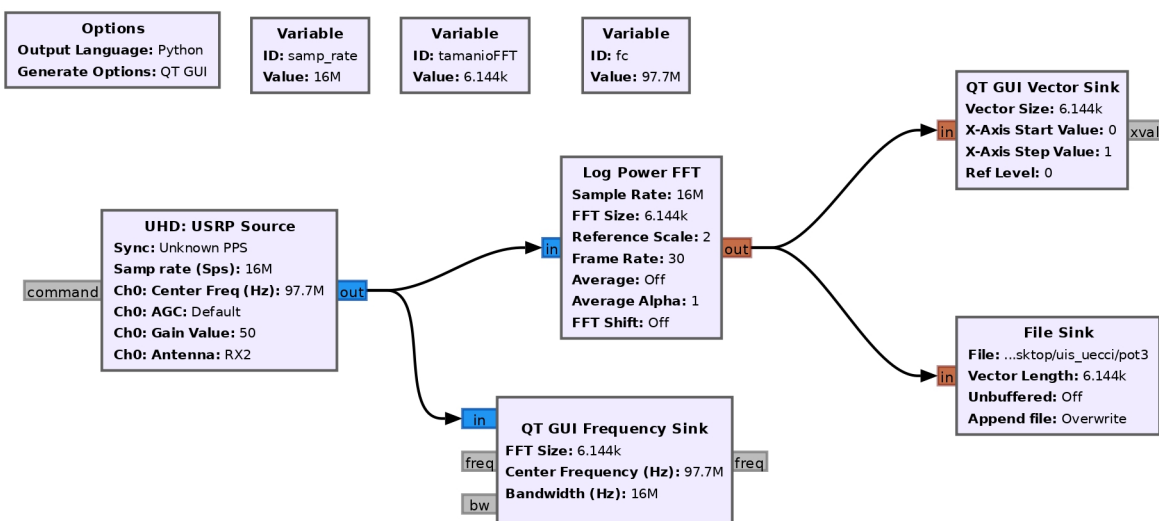
*Estructura de archivos estación ambiental.*



**4.1.3. Subsistema adquisición RFI.** El subsistema fue diseñado a partir de un diagrama de bloques en el software GNURadio, como se muestra en la Figura 13, capaz de sincronizarse con el USRP E310, con el protocolo de comunicación SSH para el acceso remoto.

**Figura 13**

Diagrama de bloques potencia de una señal.



En ese orden de ideas, los *scripts* escritos para obtener un vector con la información del espectro, el uso de los archivos provenientes de GNURadio y el tratamiento para el posterior almacenamiento de los datos se menciona a continuación:

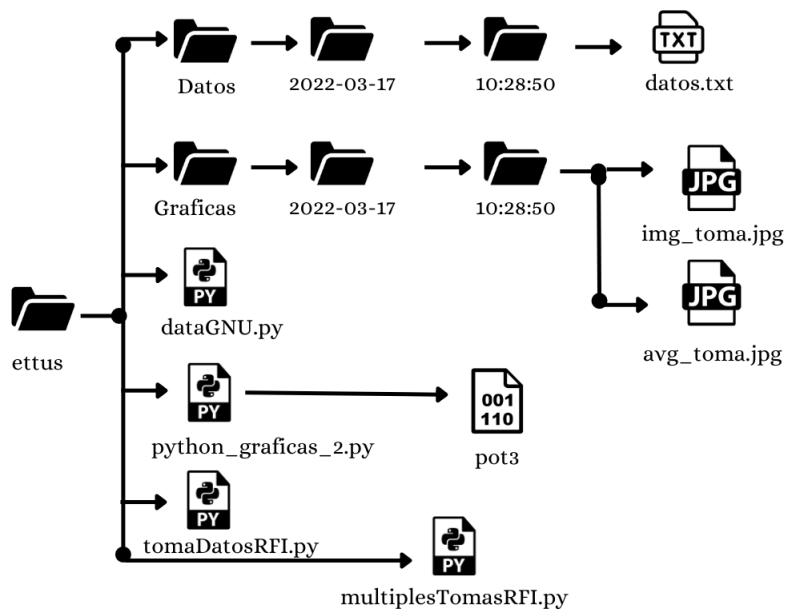
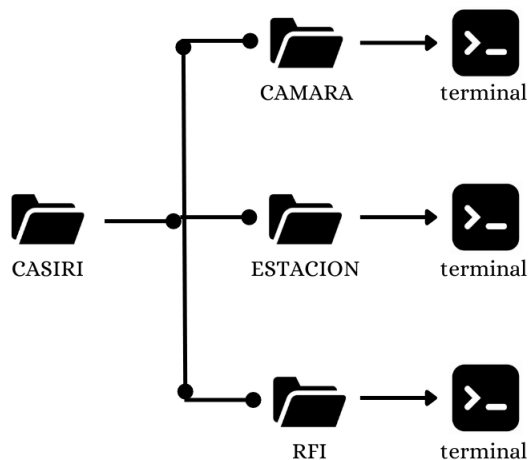
- **python\_graficas\_2** es generado a partir del diagrama de bloques, donde se encuentran las variables (tamaño de fft, ganancia, frecuencia de muestreo y frecuencia central), las cuales se van a reasignar durante el proceso de toma de datos. Este archivo tiene modificaciones dentro de su ejecución para permitir la correcta recolección de la información.
- **dataGNU.py** es el encargado de controlar las variables mencionadas para realizar las mediciones. Se establece una ventana de 16 MHz directamente relacionada con la frecuencia de muestreo dividida en 6144 puntos, a fin de no perder información por baja cantidad de muestras. La frecuencia central es modificada para obtener un espectro más amplio. Durante

la ejecución se genera un archivo tipo **binario** que contiene la información codificada; estos datos son interpretados y posteriormente graficados por la parte final del código.

- **tomasDatosRFI.py** tiene como finalidad llamar el *script* dataGNU.py y variar la frecuencia central, tanto como sea necesario, para obtener el espectro deseado, restablecer la frecuencia central a su valor inicial, para una siguiente toma de datos y organizar las tomas realizadas por fecha y hora, para su posterior interpretación y estudio.
- **multiplesTomasRFI.py** fue escrito para realizar jornadas de campaña, con el objetivo de estudiar el comportamiento de la banda de frecuencia del archivo tomasDatosRFI.py en las diferentes condiciones que se presenten durante el día.

A continuación, en la Figura 14 se visualizan los directorios de almacenamientos de la información, los ejecutables y el archivo tipo binario necesarios para la centralización de la información.

**4.1.4. Control principal.** Este subsistema tiene como objetivo dar inicio a la captación de información de los demás subsistemas, para lo cual se establece una estructura (ver Figura 15), en donde se abre una ventana terminal por cada directorio, para posteriormente ejecutar con la instrucción *python* más el nombre del archivo principal de los subsistemas.

**Figura 14***Estructura de archivos adquisición RFI.***Figura 15***Estructura de archivos control principal.*

## 4.2. Implementación física subsistemas CASIRI

Para iniciar la toma de datos se necesita que todos los periféricos se encuentren conectados de manera correcta, dado que, de lo contrario, el *software* desarrollado no podrá ejecutarse y se verá afectada la información que se desea recopilar. En la presente sección, se especifican las conexiones entre cada elemento y subsistema (ver Figura 9).

**4.2.1. Subsistema de adquisición de imágenes.** Dentro del proceso para el correcto funcionamiento del subsistema de adquisición de imágenes se implementaron conexiones entre la cámara, la cual realiza las capturas y la tarjeta Jetson Nano, que se encarga del procesado y la creación de *timelapses* a través de cable usb; mediante el uso del protocolo de comunicación SSH se establece la conexión desde el computador principal a la tarjeta; con estas acciones es posible operar el subsistema individualmente. En la Tabla 8 se relacionan los elementos, el nombre de inventario y las conexiones a realizar para operar el subsistema de adquisición de imágenes.

**Tabla 8**

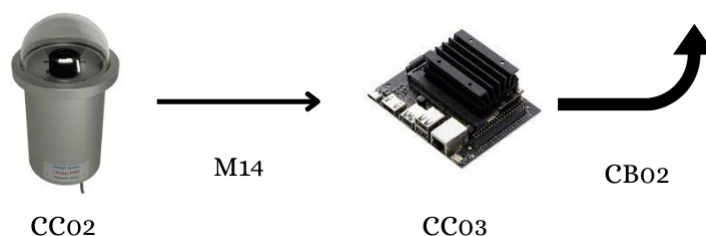
*Elementos subsistema adquisición de imágenes.*

Elemento	Inventario	Conexión
Cámara all sky	CCO2	-
Cable usb	M14	Camara a Jetson Nano
Jetson Nano	CC03	-
Cable ethernet	CB02	Jetson nano a switch

Las conexiones se encuentran representadas en la Figura 16, siguiendo la nomenclatura del inventario y el orden de conexión, al ser la ultima al computador principal.

**Figura 16**

*Diagrama de conexión subsistema adquisición de imágenes.*



**4.2.2. Subsistema estación meteorológica.** La implementación de este subsistema requiere que se realice la conexión de los sensores individualmente al panel que se encuentra anclado al pluviómetro por medio de cables cuatro hilos; posteriormente, para la visualización se conecta el panel a la consola; finalmente, se comunica la consola mediante el puerto serial ttyUSB0 y se establece la tasa de baudios en 19200, para así establecer la comunicación y la transferencia de datos. En la Tabla 9 se encuentran los elementos y conexiones necesarias para el correcto funcionamiento del subsistema desde el computador principal.

**Tabla 9**

*Elementos subsistema estación meteorológica.*

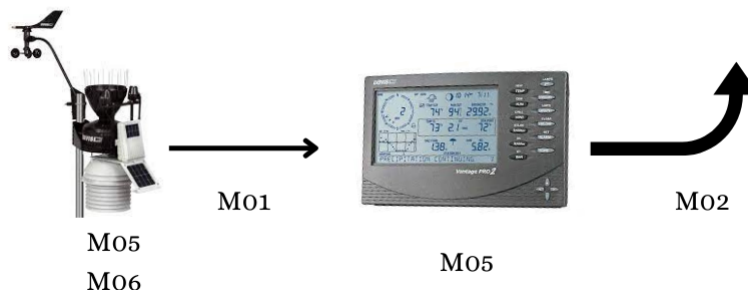
Elemento	Inventario	Conexión
Pluviómetro	M05	-
Veleta	M06	-
Consola estación	M07	-
Cable utp 4 hilos	M01	Panel de pluviómetro a consola
Cable usb	M02	Consola a laptop

En este punto, la representación de la Figura 17 esquematiza el orden de las conexiones existentes entre los periféricos del subsistema, donde la última se conecta con el computador prin-

cipal.

### Figura 17

Diagrama de conexión subsistema estación ambiental.



#### 4.2.3. Subsistema adquisición RFI.

En el montaje del subsistema se conecta la antena bicónica por medio del cable LMR-400 al dispositivo ursp E310, el cual recibe e interpreta las señales captadas por la antena; para la toma de datos se conecta el computador principal al USRP con un cable *Ethernet*, usando el protocolo de comunicación SSH. Finalmente, luego de estas conexiones el subsistema está habilitado para la toma y la clasificación de la información. En la Tabla 10 se listan los componentes a conectar para garantizar el correcto funcionamiento del subsistema y establecer la conexión por SSH.

**Tabla 10**

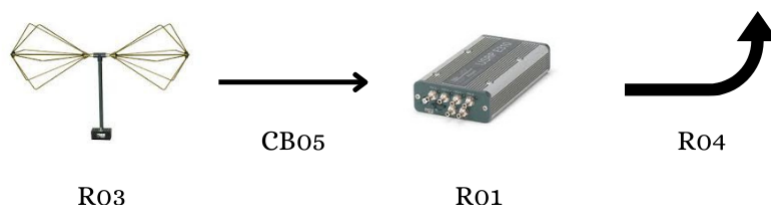
*Elementos subsistema adquisición RFI.*

Elemento	Inventario	Conexión
Antena bicónica	R03	-
USRP E310	R01	-
Cable LMR-400	CB05	Antena bicónica a USRP E310
Cable <i>Ethernet</i>	R04	USRP E310 a switch

El esquema de la Figura 18 muestra las conexiones de los cables especificados en la tabla anterior, el sentido y la ultima flecha es la conexión al computador principal.

**Figura 18**

*Diagrama de conexión subsistema adquisición RFI.*



**4.2.4. Control principal.** Las conexiones a través de un *switch* de los subsistemas adquisición RFI y adquisición de imágenes a la red local etus100 establece el medio para hacer el ingreso por SSH, mientras el subsistema faltante va directamente al computador principal por protocolo serial . Los equipos y cables presentados en la Tabla 11 indican las conexiones necesarias para establecer comunicación completa entre todos los subsistemas.

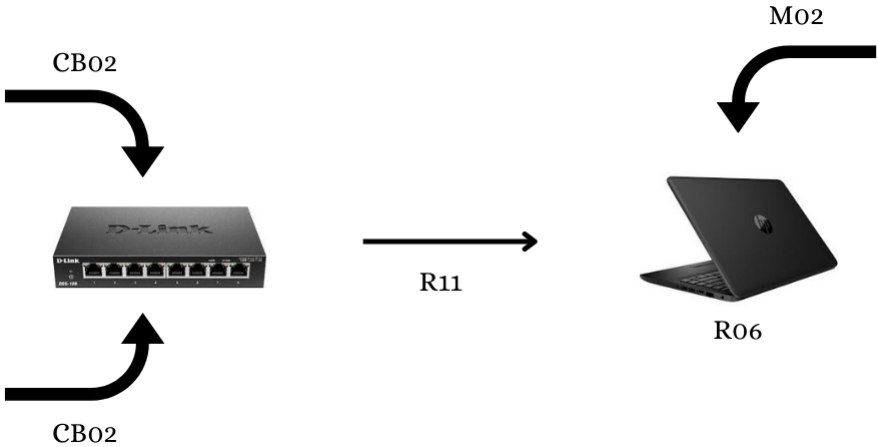
**Tabla 11**

*Elementos control principal.*

Elemento	Inventario	Conexión
Cable ethernet	CBO2	Jetson nano a switch
Cable ethernet	R04	USRP E310 a switch
Switch d-link	R08	-
Cable ethernet	R11	Switch a laptop
Laptop hp	R06	-

La representación de la Figura 19 es el esquema general de conexión al cual llegan dos cables *Ethernet* y un usb para tener el control de todos los subsistemas.

**Figura 19**  
*Diagrama de conexión subsistema adquisición RFI.*



## 5. Comunicación Remota

Las comunicaciones remotas, actualmente, son herramientas sumamente útiles que permiten manipular dispositivos desde un servidor local, sin necesidad que exista una conexión física entre ellos; para dicha tarea, se requiere que los dos equipos tengan acceso a internet.

El sistema CASIRI se desarrolló con el propósito de realizar mediciones de radiofrecuencia, a fin de obtener observaciones para identificar lugares con bajos niveles o libres de interferencia. Estos sitios, al estar alejados de la civilización, no cuentan con servicio de internet, el cual es indispensable para la comunicación remota del sistema; de tal forma el objetivo del control a distancia es diseñar un enlace PtP para conectar a internet el equipo ubicado en el sitio de mediciones. El servidor local desde el cual se monitorean las mediciones estará ubicado en la Universidad Industrial de Santander (UIS) y contará con el servicio de internet de la institución.

De acuerdo con lo anterior, en el presente capítulo se presentan algunos diseños de enlaces PtP para brindar el servicio de internet al equipo ubicado en campo, la selección de equipos y el presupuesto de cada diseño, para comparar y definir la opción más viable.

### 5.1. Selección de dispositivos

Existe gran variedad de antenas fabricadas para realizar enlaces PtP y PtMP, diseñadas con diferentes características como frecuencia de operación, ganancia, potencia de transmisión, velocidad inalámbrica, entre otras. Es tarea del usuario seleccionar el dispositivo que responda de manera eficiente según la aplicación. En la Tabla 12 se presenta cinco antenas, todas direccionales ideales para enlaces PtP, los cuales son de interés para el presente trabajo investigativo; estos dispositivos

tienen características similares, sin embargo, las antenas PBE M5 400 y LBE 5AC LR se destacan por su ganancia de 25 y 26 dBi, respectivamente. Este parámetro es de gran importancia para la eficiencia del enlace y es por esa razón que la antena seleccionada para esta aplicación es la LBE 5AC LR de la marca Ubiquiti.

**Tabla 12**

*Comparación de antenas direccionales.*

Modelo	Tipo de antena	Marca	Frecuencia de Operación (GHz)	Ganancia (dBi)	Velocidad Inalámbrica (Mbps)	Alcance (Km)
CPE09	Direccional	Tenda	5	23	867	25
PBE M5 400	Direccional	Ubiquiti	5	25	150	12
LBE M5 23	Direccional	Ubiquiti	5	23	100	30
LBE 5AC GEN2	Direccional	Ubiquiti	5	23	450	5
LBE 5AC LR	Direccional	Ubiquiti	5	26	450	20

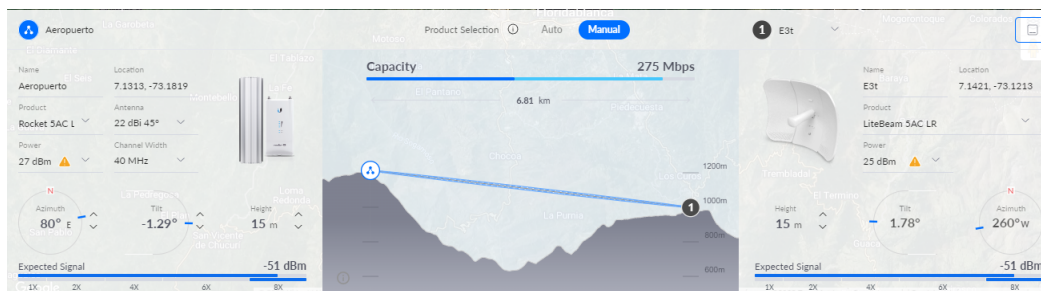
Además de antenas direccionales, también se necesitan antenas sectoriales, las cuales se ubican en los nodos intermedios del primer diseño para que actúen como repetidoras. Al momento de diseñar este radioenlace en el *software Airlik*, se probaron las siguientes antenas:

- LTU-Rocket -56
- Rocket Prism 5AC -55
- Rocket 5AC Lite -51
- LiteAP AC -58

Resulta pertinente señalar que, de estas antenas la que mostró mejor rendimiento fue la Rocket 5AC Lite y, por tal motivo, fue la que se seleccionó para el diseño. En la Figura 20 se presenta una simulación con la antena seleccionada, donde se aprecia su óptimo desempeño.

### Figura 20

*Rendimiento de la antena sectorial Rocket 5AC Lite*



*Nota.* Simulación realizada en AirLink (*software libre*).

## 5.2. Diseño de enlaces

Para el diseño de estos enlaces se hizo uso de diferentes programas como *Google Earth*, *AirLink* y *Radio Mobile*; los dos últimos son *software* de simulación de radioenlaces PtP y PtMP. *Radio mobile* usa datos de elevación del terreno, producidos por la misión *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* de la NASA (Rivera et al., 2021) y con ellos genera un perfil del trayecto entre un emisor y un receptor. Para la simulación se ingresan características de los equipos, alturas de las antenas y sensibilidad del receptor, entre otros; estas simulaciones generan resultados a nivel técnico y económico.

**5.2.1. Primer diseño.** Para el desarrollo de este diseño se plantea utilizar el servicio de internet de la Universidad Industrial de Santander y, por medio de un radioenlace, establecer conexión en el lugar de mediciones, en este caso, el páramo de Berlin. Para ello, mediante el

*software Google Earth* se realizó un estudio de la zona, a fin de definir los puntos (nodos) más altos para ubicar las torres, teniendo en cuenta que entre ellos debe existir línea de vista y considerar el comportamiento de la primera zona de Fresnel (ver Tabla 13).

**Tabla 13**

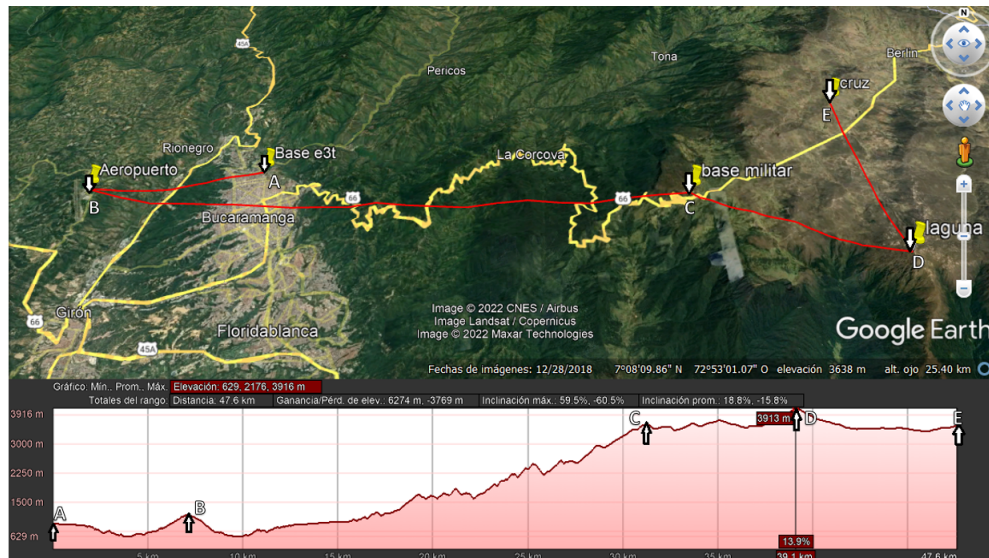
*Coordenadas de los nodos del radioenlace*

<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altura (m)</b>
A	E3T (UIS)	7°8'31.54" N	73°7'16.61" O	986.1
B	Aeropuerto	7°7'52.73" N	73°10'54.95" O	1189.3
C	Base militar	7°6'33.16" N	72°58'20.49" O	3500.7
D	Laguna	7°4'52.04" N	72°54'38.79" O	3913.6
E	Refugio (Cruces)	7°9'18.21" N	72°54'52.79" O	3479.4

Ahora bien, para garantizar que el enlace sea satisfactorio y, por las condiciones topográficas de la zona, es necesario establecer cinco nodos ubicados estratégicamente, como se observa en la Figura 21. El nodo A es el punto de acceso, el nodo E es la estación donde se quiere establecer conexión y los nodos B, C y D son puntos intermedios donde se ubican antenas repetidoras de internet.

**Figura 21**

Vista del radioenlace en el software *Google Earth*



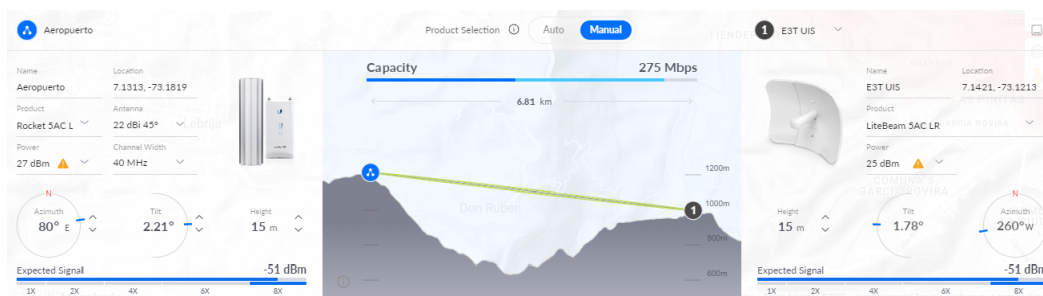
*Nota.* Visualización del radioenlace en *Google Earth* (software libre).

El diseño de este radioenlace se llevó a cabo en el software *AirLink de Ubiquiti Networks*. Esta aplicación web permite hallar la cobertura de red inalámbrica, además de la distancia entre los enlaces, la zona forestal, el perfil del terreno, la intensidad de la señal, la altura necesaria de las torres y el rendimiento aproximado de cada equipo. Los dispositivos seleccionados son: dos antenas LiteBeam 5AC LR (una configurada como antena transmisora y la otra como receptora) y cuatro Rocket 5AC Lite (configuradas como antenas repetidoras). En los enlaces, si se usa más de un dispositivo, es necesario que exista compatibilidad entre ellos, por lo que se seleccionaron dos dispositivos con tecnología AC.

A continuación, en las Figuras 22, 23, 24 y 25 se observan las simulaciones por nodos, en las cuales se evidencian las características técnicas del radioenlace, tipo, altura, orientación de la antena, entre otros. Esta información se recopila en las Tablas 14 y 15, donde se aprecian

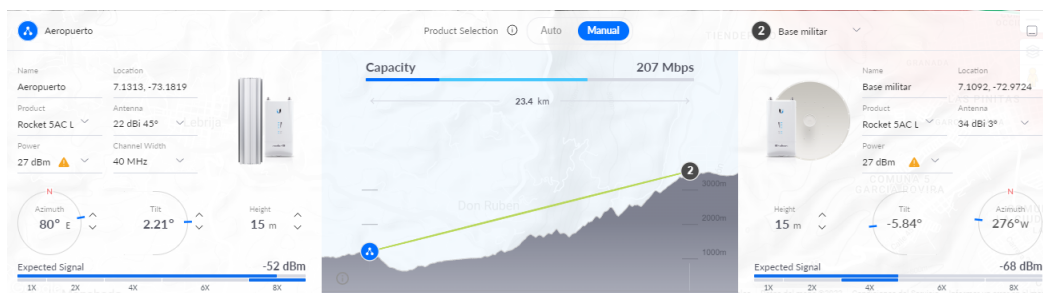
e interpretan los datos de manera más sencilla. En cuanto a los resultados obtenidos del diseño propuesto, el nivel de enlace o intensidad de la señal varía entre  $-51$  y  $-68$  dBm; estas medidas son óptimas para un radioenlace, como se evidencia en en la Tabla 3. Vale la pena resaltar que, al existir una excelente línea de vista entre nodos, las zonas de Fresnel no se encuentran obstruidas por árboles o montañas, situación que contribuye a que el radioenlace sea fuerte y viable para su implementación.

**Figura 22**  
*Simulación del enlace A-B*



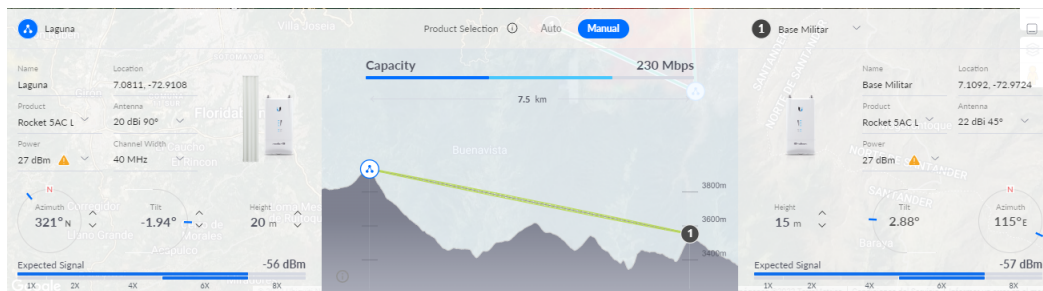
*Nota.* Simulación realizada en AirLink (software libre).

**Figura 23**  
*Simulación del enlace B-C*



*Nota* Simulación realizada en AirLink (software libre).

**Figura 24**  
*Simulación del enlace C-D*



*Nota.* Simulación realizada en AirLink (software libre).

**Figura 25**  
*Simulación del enlace D-E*



*Nota* Simulación realizada en AirLink (software libre).

**Tabla 14***Características técnicas del radioenlace*

Enlace	Distancia (Km)	Velocidad de transferencia de información (Mbps)	Intensidad de la señal antena emisora (dBm)	Intensidad de la señal antena receptora (dBm)
A-B	6.81	275	-51	-51
B-C	23.4	207	-52	-68
C-D	7.5	230	-57	-56
D-E	8.26	230	-55	-57

**Tabla 15***Orientación y altura de las antenas*

Nodo	Nombre	Azimut	Elevación	Altura (m)
A	E3T (UIS)	260° W	1.78°	15
B	Aeropuerto	80° E	2.21°	15
C	Base militar	276° W	-5.84°	15
C	Base Militar	115° E	2.88°	15
D	Laguna	321° N	-1.94°	20
E	Refugio (Cruces)	177° S	2.95°	15

Más adelante, en las Figuras 26 y 27, se evidencian el diagrama de conexión de equipos desde el Nodo A hasta el nodo E, los cuales son punto de acceso y punto estación, respectivamente. En los nodos intermedios se ubican antenas repetidoras orientadas de tal manera que el patrón de radiación cubra la zona de las antenas de donde proviene y hacia donde se transmite la señal. En los nodos B y D se hace uso de una sola antena repetidora, pero en el nodo C no fue posible establecer cobertura con una sola antena y, por este motivo, es necesario ubicar dos dispositivos en la misma torre. Además de las antenas, también es indispensable el uso de protectores contra sobretensiones,

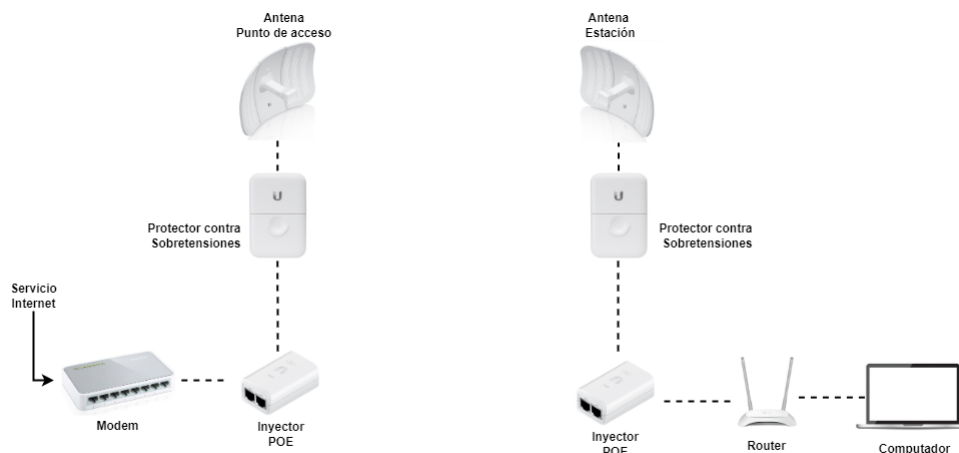
Inyectores POE, *Modem* y *Router*. El uso de estos dispositivos se describe a continuación.

- **Modem:** es el dispositivo desde el cual se adquiere el servicio de internet, para conectar la antena configurada como punto de acceso.
- **Inyector POE:** el inyector POE (*Power over Ethernet*) es el encargado de alimentar a la antena por medio de un puerto *Ethernet*. En la Figura 26 se puede observar un inyector a cada lado del enlace.
- **Protector contra sobretensiones:** es indispensable el uso de estos dispositivos para proteger las redes que se encuentran a la intemperie, dado que este absorbe todas las sobretensiones que puedan presentarse y las descarga al suelo protegiendo los otros equipos.
- **Antenas directivas:** en la Figura 26 se presentan dos antenas; una configurada como punto de acceso y la otra como estación.
- **Antena repetidora:** este dispositivo actúa como receptor y transmisor, capta la señal de internet de una antena y la dirige a otra.
- **Router:** este dispositivo, también conocido como enrutador, es el encargado de distribuir el internet a los ordenadores, por medio de cable UTP o mediante WiFi.

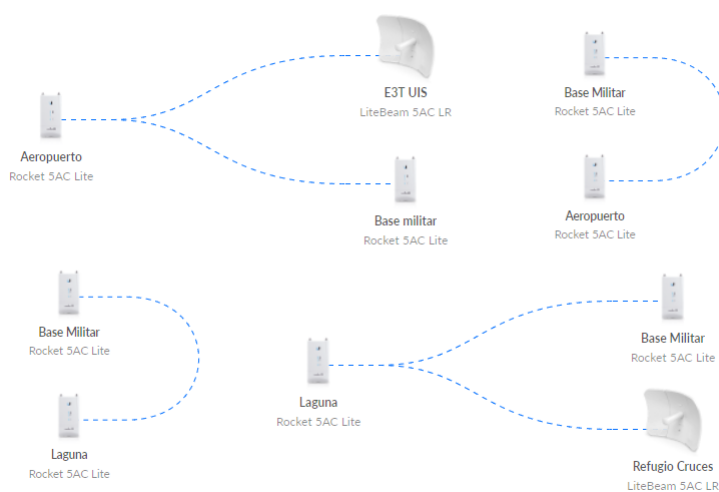
**5.2.1.1. Presupuesto.** Dentro del presupuesto se encuentran los equipos, los suministros necesarios para la implementación del enlace y la mano de obra. Este se consolidó en un

**Figura 26**

*Diagrama de conexión punto de acceso (Nodo A) y estación (Nodo E)*

**Figura 27**

*Diagrama de conexión por nodos del radioenlace*



documento excel el cual se encuentra en los anexos como *Presupuesto Primer Diseño*. Para tener una mejor organización y visualización se creo la Tabla 16, con el consolidado de los totales dividido por nodos. La implementación del radioenlace tiene un costo de \$ 43.090.852.

**Tabla 16***Consolidado del presupuesto para la implementación del enlace*

<b>Descripción</b>	<b>Total equipos</b>	<b>Total materiales</b>	<b>Total mano de obra</b>	<b>Total</b>
Instalación equipos y suministro Nodo A	\$2.476.335,00	\$74.872,00	\$300.000,00	<b>\$2.851.207,00</b>
Instalación y suministro de torre con equipos Nodo B	\$787.511,00	\$6.989.435,00	\$2.130.000,00	<b>\$9.906.946,00</b>
Instalación y suministro de torre con equipos Nodo C	\$1.500.142,00	\$6.989.435,00	\$2.130.000,00	<b>\$10.619.577,00</b>
Instalación y suministro de torre con equipos Nodo D	\$787.511,00	\$7.760.561,00	\$2.130.000,00	<b>\$10.678.072,00</b>
Instalación y suministro de torre con equipos Nodo E	\$1.055.615,00	\$6.559.435,00	\$1.420.000,00	<b>\$9.035.050,00</b>
-	<b>\$6.607.114,00</b>	<b>\$28.373.738,00</b>	<b>\$8.110.000,00</b>	<b>\$43.090.852,00</b>

**5.2.2. Segundo diseño.** El segundo diseño plantea realizar un enlace con dos nodos. El primer nodo, ubicado en el restaurante del Refugio Piedra Parada, será el punto de acceso (de donde se adquiere el servicio de internet), y el otro nodo se ubica en la parte alta del cerro (punto estación); como se observa en la Figura 29. Inicialmente, por medio del *software Google*

*Earth* se identificaron las coordenadas de los nodos, como se pueden apreciar en la Tabla 17.

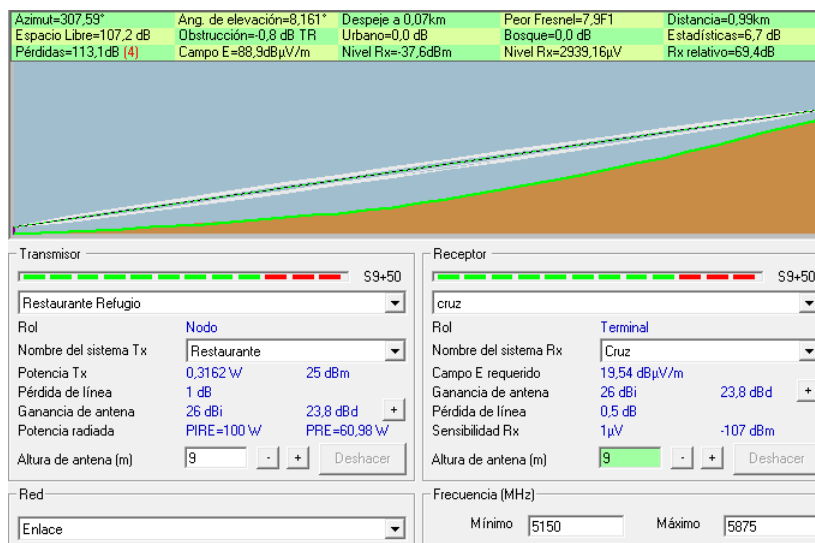
**Tabla 17**

*Coordenadas de los nodos del radioenlace*

<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altura (m)</b>
A	Restaurante (Refugio)	7°8'58.6" N	72°54'27.1" O	3334.5
B	Cruces (Refugio)	7°9'18.21" N	72°54'52.79" O	3479.4

Posteriormente, se realizó el diseño, a partir de las características técnicas (ganancia, potencia de transmisión y frecuencia de operación), de la antena LiteBeam 5AC LR; además, se definió una altura de nueve metros para ambas antenas, con el propósito de garantizar una excelente línea de vista. El resultado de esta simulación se observa en la Figura 28, en la cual se presenta el perfil topográfico, los datos radioeléctricos de propagación y las características del radioenlace.

**Figura 28**  
*Simulación del radioenlace*

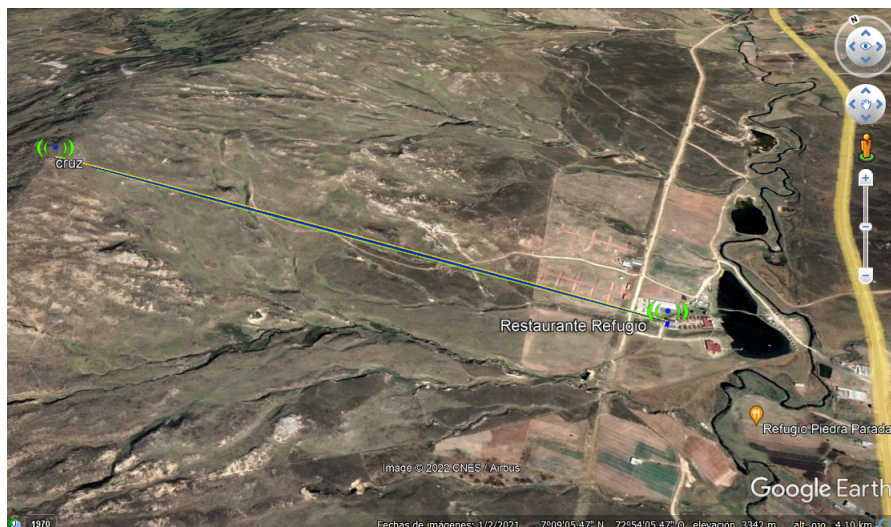


*Nota Simulación realizada en el software Radio Mobile*

**Tabla 18**  
*Características técnicas del enlace*

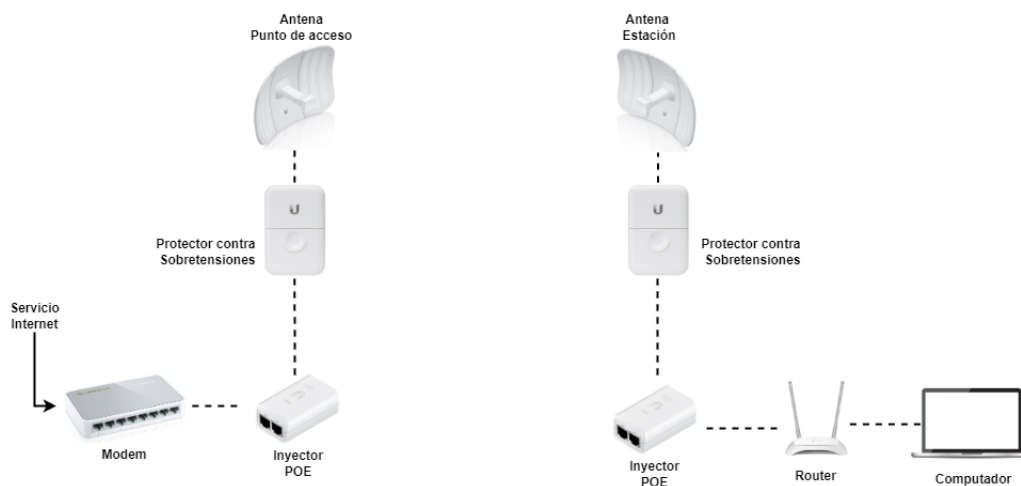
Enlace	Distancia (Km)	Peor Fresnel	Nivel de enlace (dBm)
A-B	0,99	7,9	-37,6

Cabe anotar que dentro de las principales características que definen la calidad del radioenlace se encuentra el nivel de recepción y las zonas de fresnel. Como resultado de las simulaciones realizadas, se obtuvieron  $-37,6$  dBm y  $7,9$  F1, respectivamente; estos valores indican que el diseño es viable, técnicamente, para su implementación.

**Figura 29***Vista del radioenlace*

*Nota.* Visualización en el software *Google Earth*

Seguidamente, en la Figura 30 se presenta el diagrama de conexión de los equipos necesarios para la implementación (antenas, inyectores POE, protector contra sobre tensiones, *modem* y *router*).

**Figura 30***Diagrama de conexión de equipos*

**5.2.2.1. Presupuesto.** En este punto, se expone, en la Tabla 19 el consolidado del presupuesto.

**Tabla 19**

*Consolidado del presupuesto para la implementación del enlace*

<b>Descripción</b>	<b>Total equipos</b>	<b>Total materiales</b>	<b>Total mano de obra</b>	<b>Total</b>
Instalación y suministro Nodo A (Restaurante Refugio)	\$2.455.615,00	\$5.691.927,00	\$920.000,00	<b>\$9.067.542,00</b>
Instalación y suministro Nodo B (Cruces Refugio)	\$1.133.274,00	\$5.726.927,00	\$920.000,00	<b>\$7.780.201,00</b>
-	<b>\$3.588.889,00</b>	<b>\$11.418.854,00</b>	<b>\$1.840.000,00</b>	<b>\$16.847.743,00</b>

De esta manera, al sumar los costos de equipos, materiales y mano de obra se obtiene un estimado de \$16'847.743, valor que contempla la implementación del segundo diseño (Ver anexo Presupuesto Segundo Diseño).

## 6. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones. Cada subsistema es examinado individualmente, se establece su funcionamiento con pruebas de laboratorio y se cotejan los datos existentes, como reportes de estaciones meteorológicas y espectro de emisoras en la ciudad de Bucaramanga.

### 6.1. Análisis de las mediciones

**6.1.1. Comparación datos de subsistema estación meteorológica.** La adquisición de las variables (temperatura, presión, velocidad y dirección del viento), tomadas cada segundo durante una hora en promedio, se comportan como muestra la Tabla 20; dicha información es cotejada con los datos extraídos de (National Aeronautics and Space Administration, 2022), disponibles en la página web NASA POWER.

**Tabla 20**

*Comparación de mediciones meteorológicas del 02/04/2022*

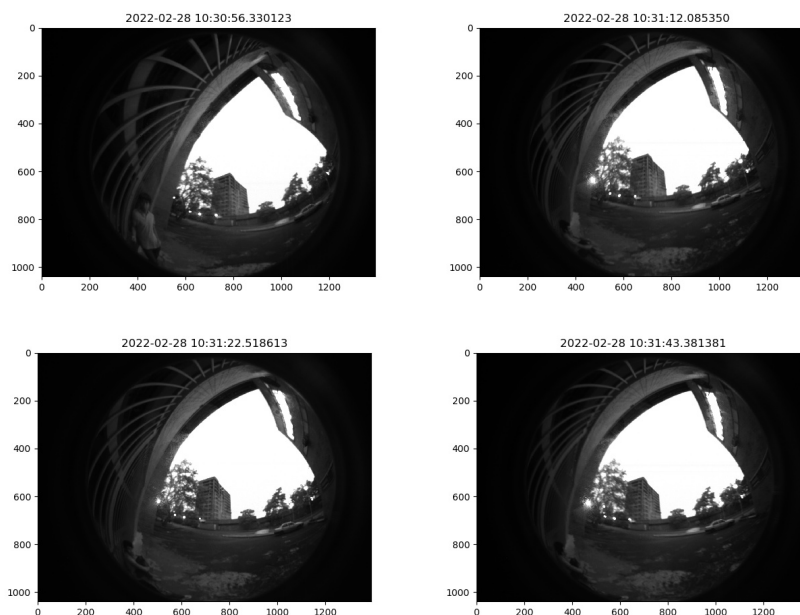
Parámetro	Medición CASIRI	Medición NASA
Velocidad del viento	3.47 m/s	2.5 m/s
Dirección del viento	84,63 °	316,77 °
Temperatura	11.19 °C	18.98 °C
Barómetro	76.22 kPa	83.99 kPa
Humedad	79.71 %	89.25 %

**6.1.2. Subsistema adquisición de imágenes.** Las tomas realizadas para verificar la captura de imágenes, el correcto almacenamiento y la creación de los *timelapses* se encuentran en la Figura 31; estas imágenes fueron capturadas durante un minuto, conforme a los argumentos

ingresados en el terminal correspondiente a este subsistema.

### Figura 31

*Capturas subsistema adquisición de imágenes*



*Nota.* Imágenes tomadas en la Universidad Industrial de Santander

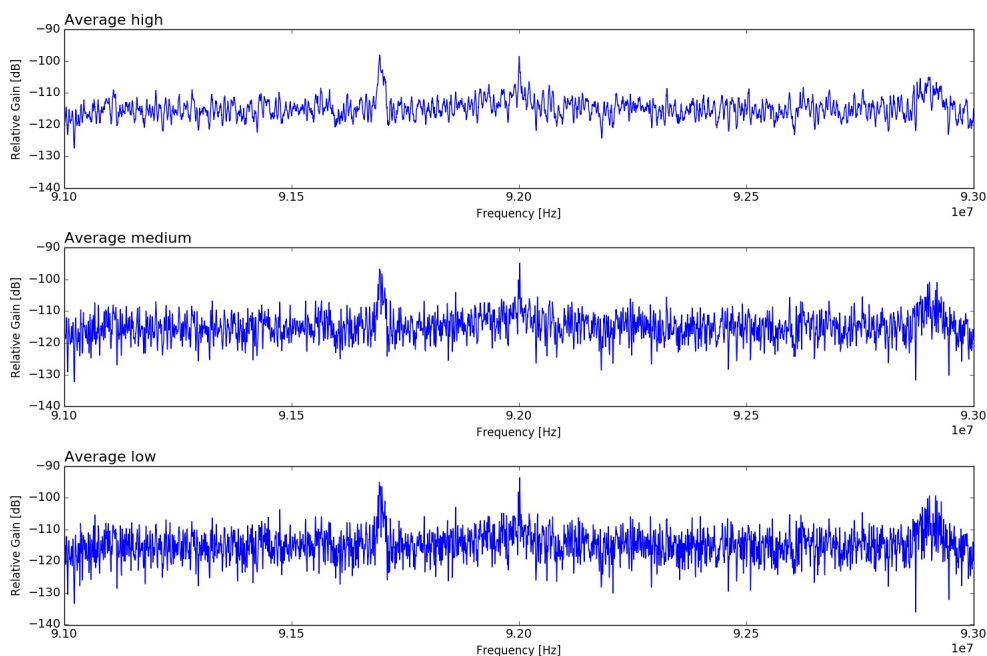
Es preciso aclarar que, para capturar estas imágenes se deben asegurar condiciones de baja luminosidad, debido a la sensibilidad del sensor, como se muestra en la Tabla 5. La creación exitosa del vídeo indica que todos los procesos intermedios fueron completados con éxito. Estas imágenes son accesibles hasta el momento en que se inicie una nueva toma de datos, mientras que el histórico de los vídeos siempre se encuentra disponible.

**6.1.3. Puebas de laboratorio subsistema RFI.** Para probar el funcionamiento del subsistema, se modificó la frecuencia central del *script* `tomasDatosRFI.py` a 92 MHz, para observar el espectro e identificar las emisoras que se encuentran en el rango de 91 a 93 MHz. En la Figura 32 se aprecian las potencias de las emisoras Radio Policía Nacional y Colombia Estéreo cuyas

frecuencias corresponden a 91,7 y 92,9 MHz, respectivamente.

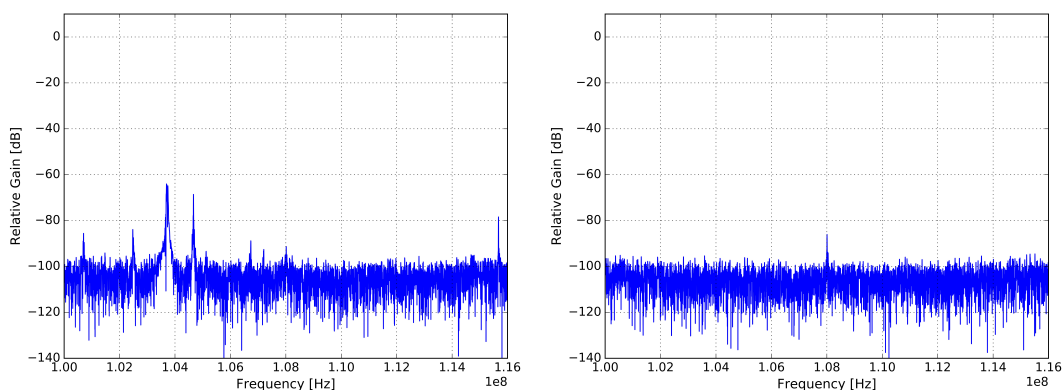
En ese sentido, debido a la cantidad de datos obtenidos se aplica el filtro Savitzky Golay con una ventana fija de 23 muestras y grados polinomiales de 3, 6 y 9, en orden descendente, para hacer más evidente el comportamiento de las potencias.

**Figura 32**  
*Potencia de emisoras*



*Nota* Espectros captados en el laboratorio radiogis (UIS) con la antena bicónica SAS-542

**6.1.4. Comparación de tomas de datos subsistema RFI.** En la Figura 33 se observa a la izquierda el espectro obtenido en laboratorio y a la derecha el obtenido en el páramo de Berlín. Estas mediciones comprenden la ventana de 100 MHz a 116 MHz, fueron tomadas con los mismos equipos (antena bicónica y USRP E310) y los valores no están promediados.

**Figura 33***Medición de RFI Laboratorio vs Páramo de Berlín*

*Nota.* Espectro en laboratorio (izquierda), espectro en el páramo de Berlín (derecha)

En estas gráficas se aprecia que ambas tienen el piso de ruido en  $-100$  dB; no obstante, la medición realizada en el laboratorio presenta mayor cantidad de picos y más pronunciados. Este fenómeno se debe a que en el laboratorio existe mayor interferencia, debido a redes domésticas y dispositivos electrónicos.

**6.2. Elección del diseño de radioenlace**

Si bien el diseño de los dos radioenlaces son óptimos para su implementación, existen factores técnicos y económicos que permiten elegir la mejor opción. En el primer diseño (sección 5.2.1) se requieren cinco nodos ubicados estratégicamente; mientras que en el segundo (sección 5.2.2) se plantea con dos nodos únicamente. En términos técnicos, ambos diseños son viables para su implementación, pero, debido a que el segundo diseño es más corto, la intensidad de la señal es más fuerte. Es por esta razón que se elige el segundo diseño, teniendo en cuenta términos técnicos y económicos.

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

Con la implementación de los tres subsistemas se entrega información de datos meteorológicos, imágenes, vídeos y radiointerferencia (ver Capítulo 6). El sistema CASIRI está parametrizado para realizar tomas con la frecuencia, intervalos temporales entre muestras, ventana espectral y ganancia que el usuario considere, mediante el uso de los terminales ejecutados en el computador principal.

Después de desarrollar el sistema se realizó una fase de pruebas en el laboratorio, con la ejecución de los subsistemas de forma independiente. Para el subsistema de estación meteorológica se obtuvieron las variables (temperatura, presión, humedad velocidad y dirección del viento ) y se organizaron en un archivo csv, para asegurar que estos valores se guarden y establecer las unidades en que se entregan. En el subsistema adquisición de imágenes con baja luminosidad se realizó una fotografía desde el computador principal, con las características que expone en la Figura 31); con esto se establece el funcionamiento del subsistema. Para el subsistema adquisición RFI se ubicaron señales conocidas (ver Figura 32) para garantizar la posición del espectro. De este modo, a través de estas pruebas, se garantiza el funcionamiento de los subsistemas de forma independiente.

Además, los datos meteorológicos obtenidos por el sistema se comparan con la base de datos de NASA POWER (National Aeronautics and Space Administration, 2022) (ver Tabla 20) y se encuentra cercanía en los valores tomados el 2 de abril de 2022 desde las 4:00 p. m. a 5:00 p. m. El espectro generado por el subsistema adquisición RFI con frecuencia central de 92 MHz y ancho

de banda de 2 MHz evidencia la presencia de las emisoras Radio Policía Nacional (91,7 MHz) y Colombia Estéreo (93 MHz) (ver Figura 32), mientras que el subsistema adquisición de imágenes además de realizar la toma de fotos (ver Figura 31); también genera un archivo en formato mp4 a partir de las fotografías. Estos resultados y comparaciones demuestran la veracidad de los datos obtenidos y el correcto funcionamiento del sistema en conjunto.

Por otro lado, para la comunicación del sistema a larga distancia se diseñaron dos radio-enlaces PtP y se obtuvieron resultados técnicos óptimos para su implementación. Sin embargo, el segundo diseño (sección 5.2.2) presenta una intensidad de señal más fuerte, debido a su corto trayecto entre nodos y al existir línea de vista, en comparación con el diseño 1 (sección 5.2.1). por lo anterior, se elige el diseño número dos como la opción viable para la implementación, teniendo en cuenta términos técnicos y económicos.

Para terminar, aunque este proyecto aún necesita mejoras para obtener un sistema más completo y robusto, los resultados obtenidos son favorables y se cumplieron los objetivos propuestos. Después de un estudio detallado, se garantiza que el sistema CASIRI queda operativo para la caracterización de lugares en los cuales se puedan implementar radiotelescopios por medio de futuros proyectos de investigación.

## **7.2. Recomendaciones**

- La centralización de la información compilada en las pruebas de campo con el sistema CASIRI en diferentes locaciones requiere la reimplementación de la plataforma IoT, para realizar comparaciones automáticas de la base de datos.

- Para garantizar el funcionamiento del estado actual del proyecto se sugiere mantener la integridad de los equipos Jetson Nano y ETTUS E310 (configuración de las memorias microSD). Igualmente, es necesario no modificar los *scripts* generados para cada uno de los subsistemas ni actualizar las librerías y sistemas operativos actuales.

### Referencias Bibliográficas

A.H. Systems, i. (2022a). Practical overview of antenna parameters.

A.H. Systems, i. (2022b). <https://www.ahsystems.com/catalog/SAS-542.php>, consultado 26 de mayo de 2022.

A.H. Systems inc. (2022). Practical overview of antenna parameters.

Arslan, H. and Ahmed, S. (2007). Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems.

Castellanos, A. L. (2005). <https://www.inaoep.mx/aluna/antenas.pdf>.

Company, N. I. (2022). *USRP™ E310 Portable and Stand-alone*. National Instruments Company.

Davis Instruments (2022). *Estación alámbrica vantage pro2 plus 6162 c*. Davis Instruments.

Diaz, L. (2018). Inhibición de servicios de radiodifusión sonora en la banda de FM usando la tecnología Software Defined Radio (SDR) e Internet of the Things (IoT). Master's thesis, Universidad Industrial de Santander.

Dorado, D. (2007). Grote reber. 70 años del primer radiotelescopio.

Garzón, L y Ramirez, J (2020). Caracterización de las antenas + amplificador de bajo ruido (Ina) para un sistema de interferencias de radio frecuencias (rfi) con capacidad de adquisición de

señales radioeléctricas en el rango de frecuencias de 50 a 250 [mhz] para ser utilizado en aplicaciones de radio astronomía.

Harrach, S. (2012). <https://pyvantagepro.readthedocs.io/en/latest/>, 25 de Abril de 2020.

Huidobro, J. M. (2013). Antenas de telecomunicaciones. *Revista Digital de ACTA*.

INDI Core Library Repository (2003). <https://github.com/indilib/indi>, 20 de Abril de 2020.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018). Documento metodológico estadísticas variables meteorológicas. *metodología de la operación estadística variables meteorológicas*.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2022). Características de la radiación solar.

Khriesier (2022). <https://khriesier.wordpress.com/2013/07/05/creando-un-enlace-ptp-o-pmp/>.

Mosquera, F. (2022). Front-end and Back-end of a 100-200 MHz radio telescope focused on the cosmological study of the Epoch of Reionization. Master's thesis, Universidad Industrial de Santander. (En revisión).

Mundo teleco (2022). Zona de fresnel.

National Aeronautics and Space Administration (2022). <https://power.larc.nasa.gov/>.

NVIDIA Corporation (2019). *NVIDIA jetson nano developer kitthe low-cost ai computer for all.*

NVIDIA Corporation.

Pérez, R., Zamanillo, J., and Casanueva, A. (2007). *Sistemas de Telecomunicación.* 1 edition.

Quintero, L. (2009). *Reducción de ruido en señales de espectroscopia Raman.* PhD thesis. Copyright - Database copyright ProQuest LLC; ProQuest does not claim copyright in the individual underlying works; Última actualización - 2021-05-14.

Rivera, M., Campanioni, S., and Bacallao, J. (2021). radio mobile: descripción y breves instrucciones para su empleo.

Rodríguez, J. (2019). *Diseño y definición de los requerimientos técnicos y soluciones tecnológicas del sistema de recolección de datos que permita caracterizar el cielo en términos de señales de Radio Frecuencia.* Universidad industrial de santader.

Starlight Xpress Ltd (2020). *Handbook for the SX 'Oculus' high resolution all-sky camera.* Starlight Xpress Ltd.

Álvarez, C. L. (2016). Espectro radioelÉctrico, derechos humanos y competencia. *radio spectrum , human rights and competition.*