



**Diseño e implementación de un medidor autónomo de radio interferencia en la
banda de VHF y UHF basado en SDR**

Daniel Felipe Gómez Bernal

UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.
2024

**Diseño e implementación de un medidor autónomo de radio interferencia en la
banda de VHF y UHF basado en SDR**

Daniel Felipe Gómez Bernal

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de: Ingeniero
Electrónico.

Director:
Sergio Mora Martinez
John Vera Vera

UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ, D.C.
2024

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Convocatoria Anual 2023 para Jóvenes Investigadores de la Universidad ECCI y, en particular, al Centro de Investigación CEINTECCI por su amplio apoyo a este proyecto.

Índice

1. Resumen	5
2. Introducción	6
3. Desarrollo y Caracterización del Medidor de RFI	8
3.1. Criterios de Diseño de la Antena para la Medición de RFI	8
3.1.1. Diseño y Optimización de la Antena Biconica	10
3.2. Sistema de Adquisición de RF	12
3.3. Mejora de la Sensibilidad del Medidor de RFI	16
4. Resultados	16
4.1. Construcción y Evaluación de la Antena Bicónica	16
4.2. Medidor	18
5. CONCLUSIONES	21
6. Trabajos futuros	22

Índice de figuras

1.	General diagram RFI meter	8
2.	Initial biconical antenna.	10
3.	S11 biconical PSO VS Initial	11
4.	Radiation pattern	12
5.	Frequency change flow chart.	13
6.	CSV storage flowchart.	14
7.	Data processing flowchart.	15
8.	Biconical antenna prototype	17
9.	Comparison S_{11} simulation vs prototype measurement (real antenna)	17
10.	(A) Signal captured by the spectrum analyzer (B) Signal captured by the proposed RFI meter (C) Detailed view of the spectrum captured by the RF meter, highlighting significant values	19
11.	Post-processing results of the RFI meter.	19

Índice de tablas

1.	Criterios de diseño de la antena para el medidor de RFI	9
2.	Comparison of initial dimensions and dimensions with PSO.	11

1. Resumen

La exploración del universo a través de radiotelescopios ha ampliado significativamente nuestro conocimiento, permitiendo el estudio de fenómenos astronómicos distantes mediante la captura y el análisis de ondas de radio. Sin embargo, la efectividad de estos telescopios a menudo se ve comprometida por la interferencia de radiofrecuencia (RFI) proveniente de fuentes naturales y artificiales. Para abordar este problema, desarrollamos un medidor de RFI que combina tecnología de Radio Definida por Software (SDR) con software de código abierto para una solución flexible y rentable. El sistema incluye una antena biconica de banda ancha diseñada para operar en las bandas VHF y UHF, una etapa de RF optimizada con amplificadores de bajo ruido y filtros, y la plataforma SDR USRP B200. Los resultados experimentales demuestran la capacidad del medidor para detectar y evaluar con precisión la interferencia, con un rendimiento validado frente a un analizador de espectro profesional. Esta herramienta facilita la identificación precisa de RFI, ayudando en la selección de sitios óptimos para radiotelescopios y contribuyendo al avance de la radioastronomía.

2. Introducción

La exploración del universo a través de radiotelescopios ha expandido significativamente nuestro conocimiento, permitiendo a los científicos estudiar fenómenos astronómicos distantes mediante la captura y el análisis de ondas de radio emitidas por objetos celestes [1]. Estos radiotelescopios convierten las ondas de radio en señales eléctricas que pueden estudiarse para desentrañar los misterios del cosmos. Sin embargo, la efectividad de los radiotelescopios se ve comprometida por la interferencia de radiofrecuencia (RFI), un fenómeno que distorsiona las señales celestes deseadas con ruido generado por fuentes tanto naturales como artificiales. Las fuentes naturales de RFI incluyen fenómenos atmosféricos como tormentas eléctricas, rayos y actividad solar intensa [2], mientras que las fuentes artificiales abarcan transmisiones de radio FM, televisión, comunicaciones móviles, radares y equipos electrónicos industriales [3].

Para asegurar observaciones astronómicas precisas y libres de interferencias, es crucial seleccionar sitios para radiotelescopios con bajos niveles de RFI. Estos sitios, ubicados en entornos remotos o rurales, presentan menor densidad de fuentes potenciales de RFI. La topografía del lugar y ciertas condiciones atmosféricas y geográficas también juegan un papel importante en la reducción de la RFI, haciendo de desiertos, montañas e islas alejadas opciones idóneas [4], [5]. Ejemplos notables incluyen el Parque Astronómico de Atacama en Chile y el Observatorio de Green Bank en Virginia Occidental, ambos reconocidos por sus bajos niveles de RFI [6], [7].

Evaluar la idoneidad de diferentes sitios para la instalación de radiotelescopios requiere desplazarse a varios lugares potenciales y realizar campañas de medición exhaustivas para caracterizar la RFI en cada sitio. Es fundamental conocer el comportamiento del espectro radioeléctrico en estos lugares, identificando las bandas de frecuencia siempre ocupadas y las señales que aparecen esporádicamente. Una caracterización precisa de la RFI permite filtrar las señales constantes y determinar si un lugar es adecuado para la radioastronomía. Para abordar estos desafíos, proponemos un medidor de RFI que combina la tecnología de Radio Definida por Software (SDR) con software libre, destacándose por su flexibilidad y accesibilidad en comparación con los analizadores de espectro tradicionales [8]. La SDR, con su hardware configurable y software programable, permite una detección y caracterización más efectiva de las señales de radio [9]. Además, el uso de software libre como GNU Radio facilita una personalización detallada en el procesamiento de señales, superando las limitaciones de las herramientas comerciales [10], [11].

El medidor de RFI incluye una antena biconica de banda ancha, que proporciona la capacidad necesaria para capturar señales provenientes de todas las direcciones. Esta antena está diseñada para operar en las bandas de VHF y UHF, lo que permite realizar la caracterización en varias bandas de frecuencia según las necesidades del sitio evaluado. Además, el medidor cuenta con una etapa de RF optimizada para la captura y acondicionamiento de señales, mejorando significativamente la capacidad del sistema para abarcar un rango más amplio de frecuencias y aumentar la sensibilidad del receptor.

Estudios previos han demostrado la eficacia de los medidores de espectro basados en SDR, complementados con GNU Radio, como soluciones de bajo costo para la monitorización de

señales de RF en diversos contextos [8, 12, 13]. Estos sistemas han sido efectivos en la práctica, por ejemplo, en la monitorización de señales GSM y transmisiones de FM comerciales, lo que subraya la versatilidad y el potencial de nuestra propuesta [14, 15]. En particular, el uso de SDR permite una detección más amplia y precisa de las señales, mientras que GNU Radio ofrece flexibilidad y personalización en el procesamiento de estas señales, superando las limitaciones de las herramientas comerciales [10, 11, 12].

En las pruebas realizadas, nuestro medidor de RFI ha mostrado una capacidad robusta para identificar y evaluar señales de interferencia. La antena biconica construida, probada y optimizada, demostró un rendimiento superior en la banda UHF, con una excelente adaptación de impedancia y un ancho de banda efectivo amplio. Además, la comparación con un analizador de espectro profesional confirmó la precisión y efectividad del medidor de RFI, destacando su capacidad para detectar picos relevantes en el espectro y registrar eventos intermitentes.

Al integrar estos componentes innovadores, ofrecemos una herramienta económica y adaptable para la identificación y evaluación precisa de la RFI, facilitando una selección más informada de sitios para futuras instalaciones de radiotelescopios. Este enfoque pretende contribuir a la mitigación de la RFI, mejorando la calidad y la fiabilidad de las observaciones astronómicas y promoviendo el avance científico en el campo de la radioastronomía.

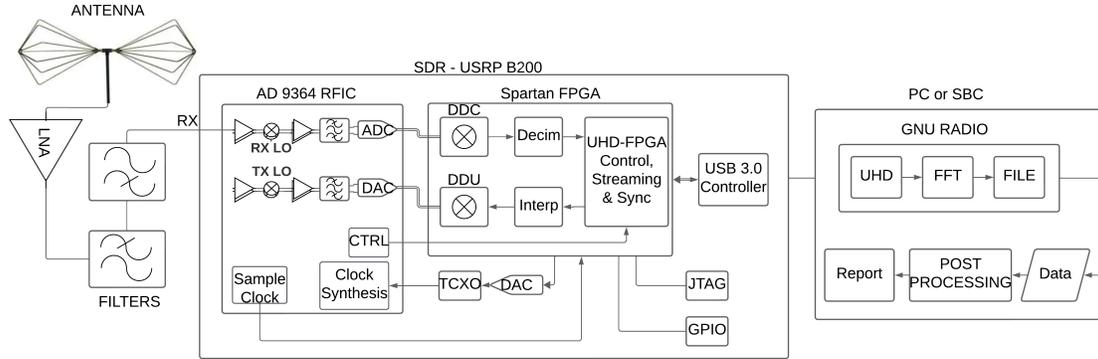


Figura 1: General diagram RFI meter

3. Desarrollo y Caracterización del Medidor de RFI

El medidor de RFI es esencial para la detección y cuantificación de la interferencia electromagnética, permitiendo monitorear las perturbaciones de diversas fuentes. Este estudio se enfoca en las bandas VHF y UHF, las cuales son particularmente susceptibles a una gran cantidad de fuentes de RFI.

El desarrollo del medidor de RFI se fundamenta en la utilización de tecnologías abiertas y accesibles, integrando tanto hardware como software de última generación. En el núcleo del software, empleamos GNU Radio, una plataforma de software libre reconocida por su gran flexibilidad en el procesamiento de señales. Complementando esta capacidad, la tarjeta USRP B200 se destaca por su versatilidad como dispositivo de SDR, permitiendo una adaptación eficiente a diversas necesidades de medición.

En cuanto al hardware, el medidor de RFI está equipado con componentes clave que optimizan su rendimiento. Una antena biconica de banda ancha captura señales en las bandas de frecuencia de interés con una cobertura omnidireccional, esencial para una detección completa de la RFI. Además, un amplificador de bajo ruido (LNA) y filtros de RF se integran para atenuar señales no deseadas, garantizando así una recepción clara y sin interferencias.

El sistema es controlado mediante una computadora o una Single Board Computer (SBC) como la Raspberry Pi, que ofrece ventajas en entornos hostiles sin acceso a la red eléctrica. Python se utiliza para la adquisición y procesamiento de los datos, facilitando una integración eficiente con el hardware y el software de SDR. Esta configuración promueve la adaptabilidad y garantiza una implementación costo-efectiva del medidor de RFI. La Figura 1 ilustra el diagrama general del sistema.

3.1. Criterios de Diseño de la Antena para la Medición de RFI

La eficacia en la detección de señales de RFI depende fundamentalmente de la capacidad de la antena para captar las señales de RF ambientales. Para asegurar un rendimiento óptimo, se establecieron varios criterios de diseño esenciales.

El ancho de banda es crucial para cubrir las bandas de frecuencia de interés, que van desde

30 MHz hasta 3 GHz. Este amplio rango permite que la antena detecte una amplia gama de señales de RFI, asegurando una monitorización completa y detallada del entorno. Al abarcar tanto la banda VHF como la UHF, la antena puede identificar interferencias en las frecuencias más críticas para las observaciones astronómicas.

El VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) debe ser menor o igual a 2 en todo el rango operativo. Un VSWR bajo indica una buena adaptación de impedancia, lo que es esencial para maximizar la transferencia de potencia desde la antena hacia el receptor y minimizar las reflexiones de señal.

El patrón de radiación de la antena debe ser omnidireccional. Este tipo de patrón permite capturar interferencias provenientes de todas las direcciones, asegurando una vigilancia ambiental completa. En un entorno donde las señales de RFI pueden llegar desde múltiples ángulos y fuentes, tener un patrón de radiación omnidireccional garantiza que ninguna señal significativa pase desapercibida.

La Tabla 1 resume estos criterios de diseño:

Criterio de Diseño	Descripción
Ancho de Banda	30 MHz - 3 GHz
VSWR	≤ 2
Patrón de Radiación	Omnidireccional

Tabla 1: Criterios de diseño de la antena para el medidor de RFI

Para nuestro sistema de medición de RFI, seleccionamos la antena bicónica debido a sus superiores atributos técnicos en comparación con otras antenas [16]. Esta antena presenta un amplio ancho de banda operativo que cubre eficazmente las bandas de frecuencia de interés en este estudio, eliminando la necesidad de ajustes adicionales [17]. Su configuración geométrica proporciona un patrón de radiación omnidireccional en el plano horizontal, lo cual es esencial para captar interferencias provenientes de todas las direcciones. Además, la eficiencia en la adaptación de impedancia de la antena optimiza la transferencia de energía y minimiza las pérdidas por reflexión, mejorando así la fidelidad de las mediciones [18]. En contraste, antenas como las dipolo o Yagi, aunque eficaces en aplicaciones específicas, requieren modificaciones o la implementación de múltiples configuraciones para lograr una cobertura de banda comparable.

3.1.1. Diseño y Optimización de la Antena Biconica

La antena bicónica representa una evolución significativa de la estructura básica de un dipolo, introduciendo mejoras en diseño y rendimiento cruciales para la medición de RFI [19]. Esta antena se caracteriza por sus dos elementos conductores en forma de cono, lo que le confiere un patrón de radiación omnidireccional en el plano horizontal y una capacidad para operar eficientemente a lo largo de un amplio rango de frecuencias [20].

El diseño se basa en los principios teóricos del dipolo, utilizando la ecuación (1) para determinar la longitud óptima del dipolo central con una frecuencia central (f_c) de 165 MHz. Además, se consideran el ángulo del cono (θ_c) y la distancia entre los conos del dipolo central (R_d), como se describe en las ecuaciones (1) y (3). Inicialmente, se tomó un valor de 25 cm para (R_d), con el fin de determinar (H_b), que representa la longitud del brazo de la antena bicónica.

$$L_C = \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

$$H_b = \sqrt{(L_C)^2 + (R_d)^2} \quad (2)$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{\sin(90^\circ)}{H_b} \cdot R_d\right) \quad (3)$$

Con base en estos cálculos, se establecieron las dimensiones iniciales para el diseño de la antena bicónica. Posteriormente, se realizaron simulaciones electromagnéticas utilizando el software ANSYS HFSS para observar la respuesta en frecuencia del parámetro S_{11} de la antena y su patrón de radiación. La Figura 2 muestra el modelo de la antena en 3D.

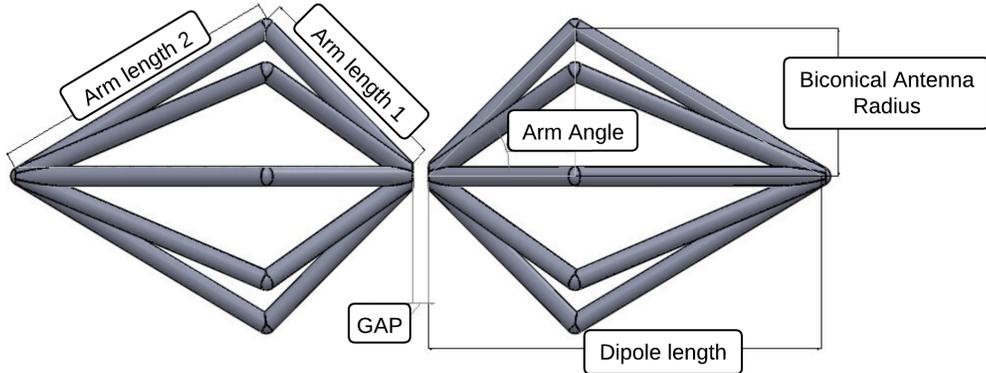


Figura 2: Initial biconical antenna.

Para mejorar el desempeño de la antena, especialmente en términos de adaptación y ancho de banda, se llevó a cabo una optimización del diseño mediante el algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization) [21]. Este algoritmo ajusta las dimensiones de la antena en función de una figura de mérito que evalúa la diferencia entre la frecuencia de operación deseada (f_D) y

el ancho de banda deseado (BW_D) con respecto a los valores obtenidos (f_W y BW_W) durante el proceso de optimización. La figura de mérito utilizada para la optimización se muestra en la ecuación (4).

$$f_{oM} = \left(\frac{f_D - f_W}{f_D} \right)^2 \quad \text{and} \quad \left(\frac{BW_D - BW_W}{BW_D} \right)^2 \quad (4)$$

En la Tabla 2 se presentan las dimensiones de la antena antes y después de la optimización con PSO, calculadas según los criterios establecidos.

Dimension	Initial	PSO
	Value	Value
Dipole Length	45.0 cm	40.1 cm
gap	0.6 cm	1.6 cm
Arm Angle	40.0 θ	45.2 θ
Biconical Antenna Radius	25.0 cm	15.1 cm

Tabla 2: Comparison of initial dimensions and dimensions with PSO.

La Figura 3 muestra la simulación del parámetro S_{11} tanto para la antena inicial como para la antena optimizada mediante PSO, destacando que la antena optimizada logra un ancho de banda que abarca desde 160 MHz hasta 3.66 GHz. Por otro lado, la Figura 4 ilustra el patrón de radiación omnidireccional de la antena optimizada.

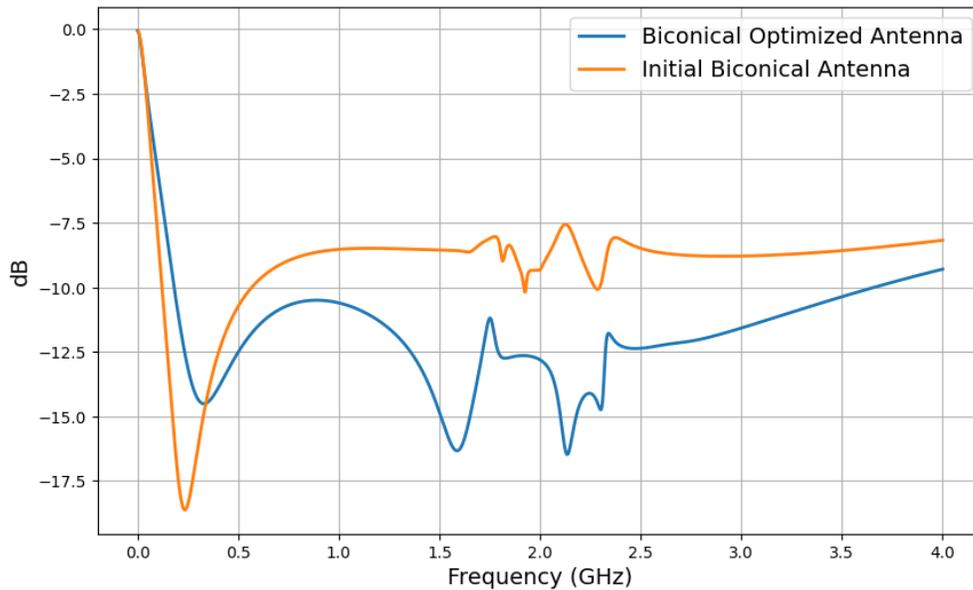


Figura 3: S11 biconical PSO VS Initial

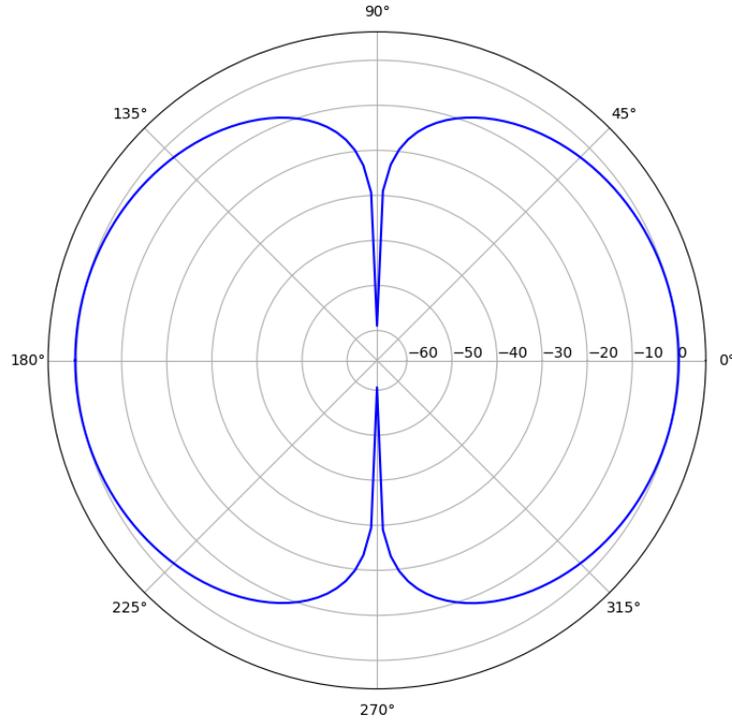


Figura 4: Radiation pattern

Las simulaciones y optimizaciones realizadas demuestran que la antena bicónica optimizada mediante PSO ofrece un rendimiento superior en términos de ancho de banda y adaptación de impedancia.

3.2. Sistema de Adquisición de RF

Una vez seleccionada la antena adecuada, se procedió a elegir la tarjeta SDR para la adquisición de señales de RF. Se evaluaron varias opciones, incluyendo la LimeSDR y la USRP, considerando factores como el ancho de banda, las frecuencias de operación y la facilidad de integración con tecnologías como GNU Radio. También se valoró la compatibilidad con diversos sistemas operativos, incluidos Windows, Linux y sistemas embebidos.

A pesar de que ambas tarjetas son populares, se optó por la USRP debido a su versatilidad, adaptabilidad y sus destacadas características en términos de figura de ruido, rango dinámico, pureza espectral RX/TX, potencia de salida de TX y tasa de error de modulación del transmisor [22]. La USRP ha demostrado un rendimiento excepcional en estudios de RF, destacándose por su capacidad de adaptarse a diversas aplicaciones SDR y su rendimiento de recepción [23].

Se utilizó la tarjeta USRP B200, que ofrece cobertura de RF continua desde 70 MHz hasta 6 GHz y un ancho de banda de 200 KHz a 56 MHz [24]. Sin embargo, dado que esta tarjeta no puede capturar todo el ancho de banda deseado para la caracterización de RFI de una sola vez, se implementó un método de barrido de frecuencia. Este método divide el espectro

en varias ventanas de tamaño fijo, cada una con una frecuencia central específica. De esta forma, se ajusta el número de ventanas y se realiza un barrido continuo de frecuencia según el rango de frecuencias que se desea capturar.

Para implementar el barrido de frecuencia, se desarrolló un bloque personalizado en Python que se comunica con la tarjeta USRP a través de GNU Radio. Este bloque permite cambiar la frecuencia, la ganancia y otros parámetros mediante mensajes, facilitando la operación del sistema. El bloque envía instrucciones de configuración a intervalos regulares, ajustando la frecuencia central para permitir un barrido continuo y automático durante la adquisición de señales de RF. Los parámetros iniciales incluyen frecuencia inicial (Hz), frecuencia final (Hz), tiempo de cambio (s) y ancho de banda (Hz), como se ilustra en la Figura 5.

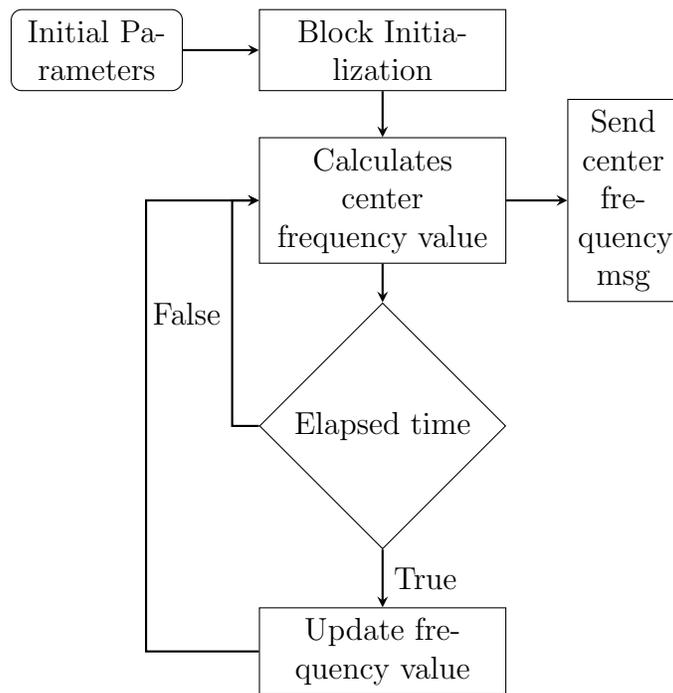


Figura 5: Frequency change flow chart.

Durante la adquisición de señales, la tarjeta USRP toma muestras de RF en intervalos regulares de 1024 muestras por cada intervalo de tiempo y barrido de frecuencia. Estos datos son luego procesados por el bloque FFT (Transformada Rápida de Fourier) dentro de GNU Radio, el cual calcula la DFT (Transformada de Fourier Discreta) de la secuencia de números complejos. La DFT de una secuencia de números complejos x_0, x_1, \dots, x_{N-1} se define como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi nk/N} \quad (5)$$

Where:

- $X[k]$ is the signal in the frequency domain.
- $x[n]$ is the input signal in the time domain.
- N is the total number of signal samples.
- k is the frequency index.

Para cuantificar la magnitud de la señal en decibelios (dB), se aplica una transformación logarítmica. Esta conversión, detallada en la Ec. (6), es esencial para el análisis espectral debido a la amplia gama dinámica de las señales de RF. En GNU Radio, la conversión a decibelios se aplica a la magnitud al cuadrado de la FFT ($|FFT|^2$), proporcionando una representación precisa de la energía en las diferentes componentes frecuenciales de la señal.

$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10}(|FFT|^2) \quad (6)$$

La conversión a decibelios se realiza inmediatamente después de la aplicación de la FFT en GNU Radio, asegurando que los datos en el dominio de frecuencia sean precisos y optimizados para detectar señales débiles en presencia de ruido.

Para almacenar estos datos para su posterior análisis, se desarrolló un bloque personalizado que guarda los datos en un archivo CSV (Comma-Separated Values). GNU Radio no tiene esta funcionalidad integrada, por lo que este bloque fue creado específicamente para esta tarea. El bloque organiza los valores de frecuencia y potencia y almacena las 1024 muestras en un archivo CSV, como se muestra en la Figura 6.

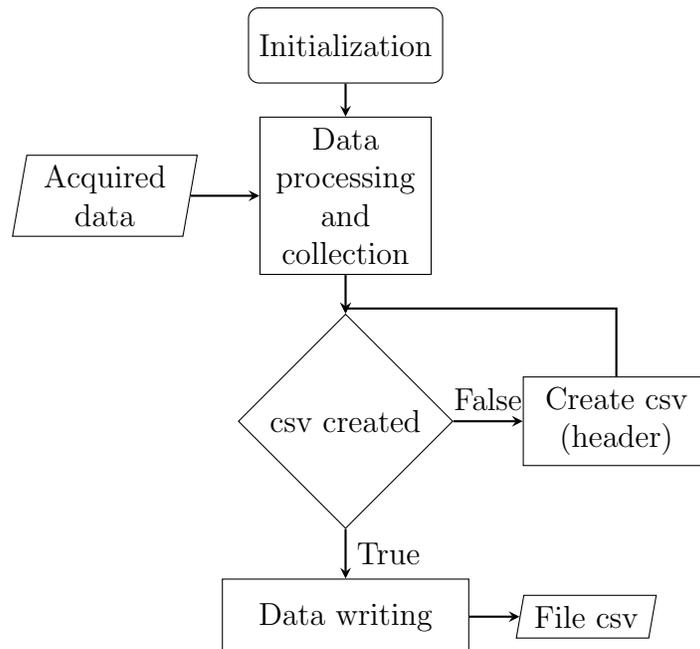


Figura 6: CSV storage flowchart.

Una vez completada la adquisición y almacenamiento de datos, se procede al post procesamiento. En esta fase, las múltiples muestras obtenidas se consolidan en un solo archivo CSV, organizando los valores en conjuntos de 1024 muestras y filtrando datos vacíos o erróneos, como frecuencias duplicadas. Se desarrolló un programa para visualizar los resultados después de generar el archivo CSV.

El piso de ruido, que representa el promedio de dB durante la captura de RF, se muestra en esta interfaz de visualización. Además, se puede agregar un punto de referencia que indica y resalta los valores que superan un umbral de referencia en la gráfica. La interfaz permite también una vista detallada de una sección específica de la gráfica y la generación de un reporte con los valores que superaron el umbral, junto con otros datos relevantes.

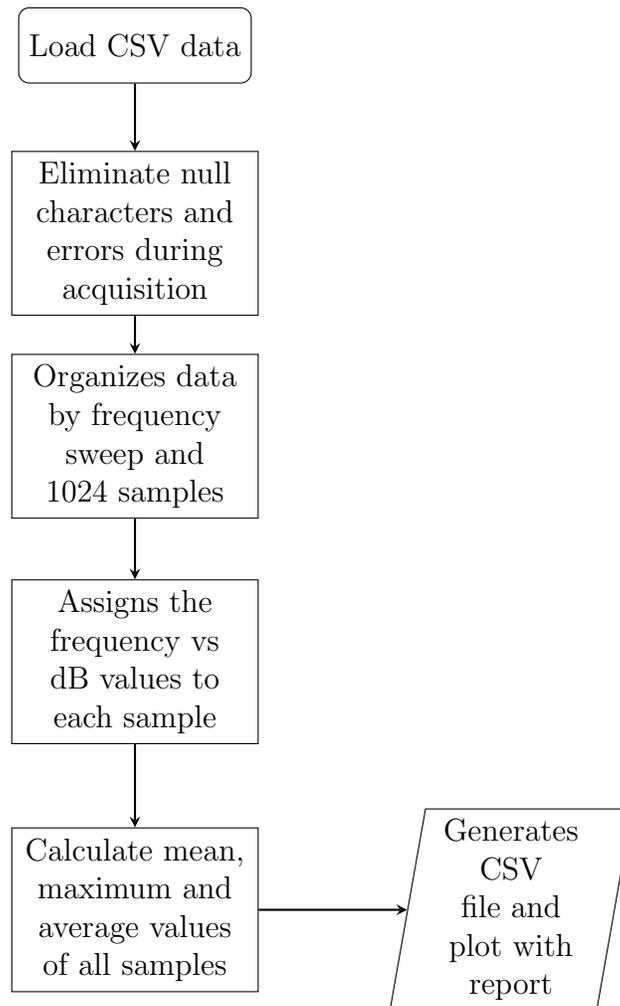


Figura 7: Data processing flowchart.

La implementación del sistema de adquisición de señales de RF utilizando la tarjeta USRP B200 y el método de barrido de frecuencia, junto con la personalización de bloques en GNU Radio, permite una caracterización eficiente y precisa de las interferencias de RF en un amplio rango de frecuencias.

3.3. Mejora de la Sensibilidad del Medidor de RFI

Para garantizar la captura precisa de señales de RFI, es fundamental contar con un sistema de alta sensibilidad. Este objetivo se logró mediante la inclusión de componentes clave como un amplificador de bajo ruido (LNA), un filtro pasaaltas y un filtro pasabajas.

El amplificador de bajo ruido seleccionado para este trabajo es el ZFL-500+, debido a su capacidad para amplificar señales débiles con un mínimo de ruido añadido, lo cual es crucial para la detección de RFI. Este amplificador opera en un amplio rango de frecuencias, mejorando significativamente la sensibilidad del sistema en todo el espectro de interés y aumentando la capacidad de detección de señales débiles.

Para asegurar la pureza de la señal y mejorar la precisión de las mediciones de RFI, se integraron un filtro pasaaltas ZFHP-1R2-S+ y un filtro pasabajas SLP-250+. El filtro pasaaltas elimina eficazmente las señales de baja frecuencia, evitando interferencias con las señales relevantes. Simultáneamente, el filtro pasabajas suprime las señales de alta frecuencia por encima de 3 GHz. Esta configuración garantiza una alta atenuación de señales no deseadas, permitiendo que el sistema se concentre en las frecuencias críticas para la detección de RFI.

La Figura 1 ilustra las conexiones y configuraciones de estos componentes, destacando su integración para optimizar la captura de señales de RFI.

4. Resultados

En esta sección, se presenta una evaluación detallada del desempeño de la antena bicónica construida, enfocándose en su respuesta en frecuencia. Además, se describe la implementación y validación del medidor de RFI, comparando su rendimiento con el de un analizador de espectros profesional.

4.1. Construcción y Evaluación de la Antena Bicónica

La antena bicónica se construyó siguiendo las dimensiones especificadas en la Tabla 2. Se utilizaron tubos de aluminio de 3/4 de pulgada y un soporte adicional fabricado en PLA mediante impresión 3D. Este soporte sostiene los conos de la antena, además facilita la instalación del balun y de los conectores tipo N. La Figura 8 muestra la antena bicónica construida.

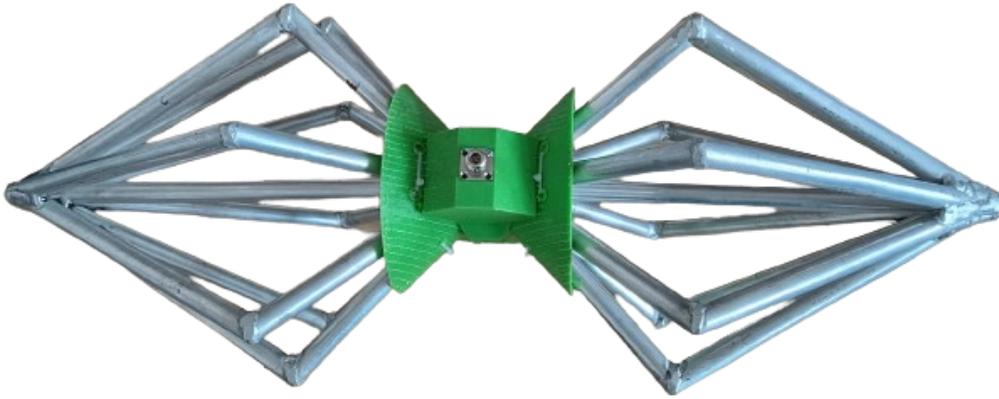


Figura 8: Biconical antenna prototype

Una vez construida la antena, se realizaron pruebas para medir el parámetro S_{11} en función de la frecuencia, evaluando su desempeño comparado con las simulaciones. Los resultados de estas mediciones indicaron que, aunque la antena fue diseñada para operar en ambas bandas VHF y UHF, su rendimiento fue superior en la banda UHF. En la Figura 9 se presenta una comparación del parámetro S_{11} entre las mediciones y las simulaciones.

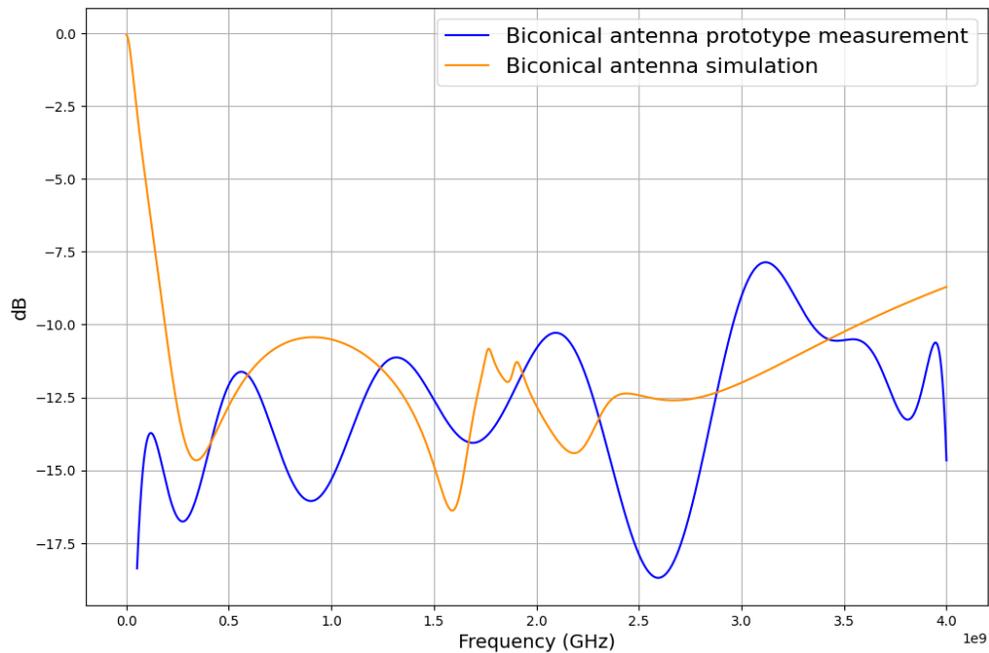


Figura 9: Comparison S_{11} simulation vs prototype measurement (real antenna)

La antena mostró un desempeño superior en la banda UHF, con valores de S_{11} menores a -10 dB en el rango de frecuencias de 0.5 GHz a 2.945 GHz, lo que indica una buena adaptación de impedancia y garantiza un VSWR inferior a 2. Esto sugiere que la antena tiene un ancho de banda efectivo de aproximadamente 2.445 GHz. Además, se observó un incremento de casi 2 dB en S_{11} desde 2.945 GHz hasta 3.382 GHz, seguido de una disminución a valores menores de -10 dB, extendiendo el ancho de banda más allá de los 4 GHz. Las discrepancias en los resultados pueden atribuirse a las propiedades de los materiales utilizados y a la precisión en la construcción del prototipo.

4.2. Medidor

Con todas las partes del medidor de RFI ensambladas, incluyendo la antena, la etapa de RF, la tarjeta SDR y los paquetes computacionales desarrollados para este propósito, se procedió a validar su funcionamiento. Para esta validación, se utilizó el analizador de espectro Keysight N9322C equipado con una antena UWB como instrumento patrón. Tanto el medidor de RFI desarrollado como el analizador de espectro debían capturar las mismas señales de RF, configurados con un rango de frecuencias idéntico de 400 MHz a 470 MHz. Ambos equipos debían detectar las señales presentes en esa banda. Adicionalmente, se agregó una fuente de RF emitiendo una señal de 433 MHz para utilizarla como referencia, lo que permitió evaluar la precisión y efectividad del medidor de RFI comparado con el analizador de espectro.

La Figura 10 muestra la comparación de las señales captadas por el medidor de RFI y el analizador de espectros. Los resultados revelaron una concordancia significativa entre ambos instrumentos, lo que confirma la precisión y efectividad del medidor de RFI. Ambos gráficos presentan un pico destacado alrededor de los 433 MHz, indicando que ambos dispositivos capturaron con éxito la señal de referencia.

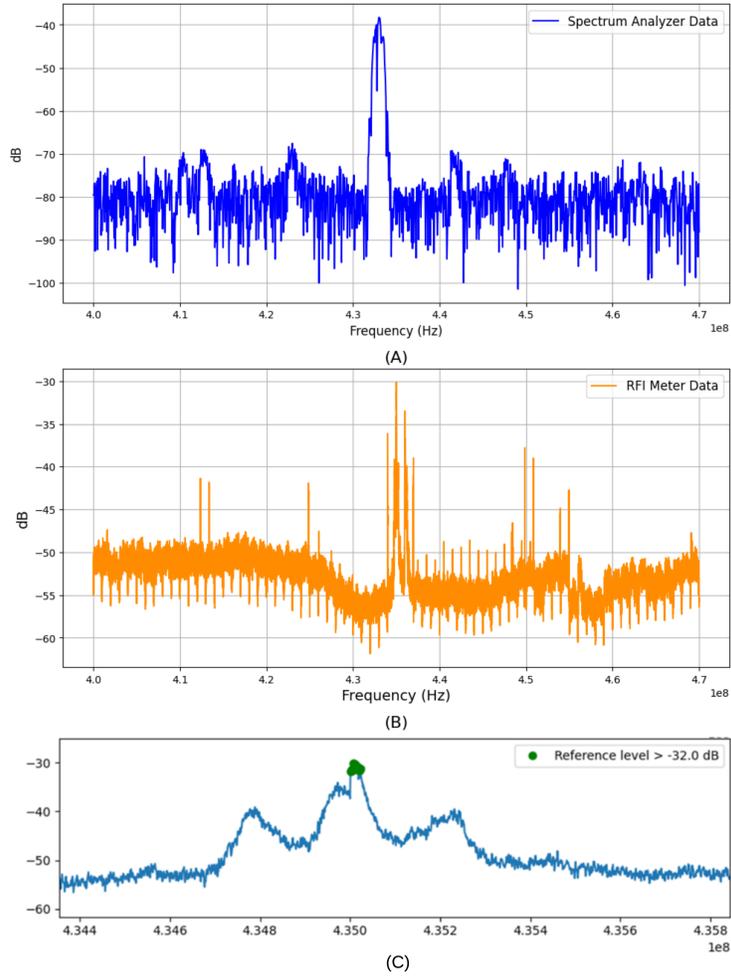


Figura 10: (A) Signal captured by the spectrum analyzer (B) Signal captured by the proposed RFI meter (C) Detailed view of the spectrum captured by the RF meter, highlighting significant values

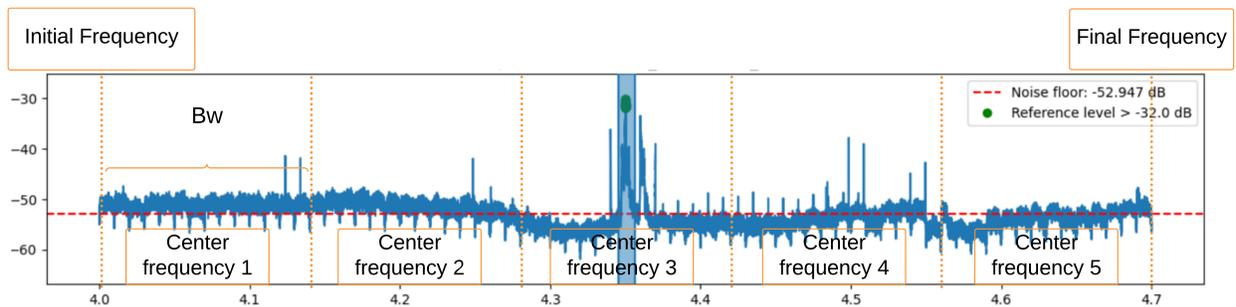


Figura 11: Post-processing results of the RFI meter.

El espectro capturado por el analizador de espectros ofrece una mayor precisión y menos ruido en comparación con el medidor de RFI, que aunque es menos preciso, es adecuado para

detectar picos en el espectro y registrar estos eventos. Se observó una diferencia notable en el piso de ruido registrado por ambos equipos, siendo el analizador de espectros más sensible.

Además, el medidor de RFI permite identificar los valores máximos de cada frecuencia, almacenarlos y registrar la duración de su presencia en la medición, lo cual es útil para la detección de señales intermitentes. Las diferencias en la sensibilidad de los resultados se atribuyen a la calidad y resolución de los instrumentos utilizados.

La Fig. 10(C) ofrece una vista detallada del espectro captado por el medidor de RFI, resaltando las frecuencias que superan un umbral de referencia, configurado en -32 dB y marcado con un punto verde. Esta ampliación, parte de la interfaz gráfica del medidor de RFI, permite identificar con mayor claridad los picos relevantes en una región específica del espectro, destacando los picos importantes y ayudando a identificar valores de amplitud que superan dicho umbral. Además, es importante destacar que este umbral, relativo al piso de ruido, es completamente configurable por el usuario del medidor de RFI.

La Figura 11 muestra los resultados del posprocesamiento de los datos generados por el medidor de RFI. En ella aparece el espectro RF captado, vale la pena anotar que debido a las limitaciones para tomar medidas continuas mediante la SDR, se realizaron adquisiciones de datos en varias secciones de frecuencia, cada una representada por saltos de frecuencia. Estos saltos permiten al medidor capturar y analizar segmentos del espectro de manera más detallada. Además, aparece indicado el promedio del piso de ruido, el cual fue de -52.9 dB y se indicó con la línea roja.

La Figura 11 muestra los resultados del posprocesamiento de los datos generados por el medidor de RFI. En esta figura se observa el espectro RF captado, dividido en varias secciones de frecuencia debido a las limitaciones para tomar medidas continuas mediante la SDR. Cada sección se representa por saltos de frecuencia, permitiendo al medidor capturar y analizar segmentos del espectro de manera más detallada. Además, se indica el promedio del piso de ruido, que fue de -52.9 dB.

La interfaz también permite generar un reporte que incluye las frecuencias que exceden el umbral de referencia junto con otros datos relevantes. Este reporte se guarda en un archivo CSV, facilitando la documentación y el análisis posterior de los datos obtenidos. En este caso, el umbral se centró en el análisis de la señal de referencia de 433 MHz, indicando su potencia y presencia durante toda la medición. Sin embargo, al relajar el umbral, el medidor capturaré más picos, indicando de igual forma su potencia, frecuencia y duración de aparición.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, desarrollamos y evaluamos un medidor de interferencia de radiofrecuencia (RFI) basado en SDR, diseñado para evaluar la interferencia de radiofrecuencia en diversos entornos. El sistema integra una antena bicónica de banda ancha, una etapa de RF optimizada y la plataforma SDR USRP B200, combinada con software de código abierto para un procesamiento de señales flexible y detallado. La antena bicónica, optimizada para las bandas VHF y UHF, demostró una superior adaptación de impedancia y un amplio ancho de banda efectivo. La validación frente a un analizador de espectro profesional confirmó la precisión y efectividad del medidor de RFI en la detección y evaluación de señales de interferencia.

Este medidor de RFI versátil y rentable ofrece una herramienta robusta para la identificación y mitigación precisa de la interferencia de radiofrecuencia, facilitando la selección de sitios óptimos para radiotelescopios y otras aplicaciones críticas como telecomunicaciones, gestión del espectro y guerra electrónica. El trabajo futuro se centrará en mejorar las capacidades del sistema y explorar aplicaciones adicionales en diferentes entornos, contribuyendo en última instancia a mejorar la calidad y la fiabilidad de las observaciones astronómicas.

6. Trabajos futuros

Como continuación de este proyecto de investigación, existen diversas líneas de desarrollo abiertas que pueden optimizar su funcionalidad y rendimiento. A continuación, se sugieren algunas áreas específicas para futuros trabajos.

En primer lugar, se propone investigar varios tipos de estructuras y formas de antenas para determinar aquellas que ofrezcan el ancho de banda y la adaptabilidad más efectivos. El objetivo es identificar antenas con un parámetro S_{11} superior al actual, lo que permitiría una mejor adaptabilidad y rendimiento en la recepción de señales de radiofrecuencia.

Para mejorar la eficiencia y la experiencia del usuario, se sugiere integrar todas las funcionalidades en un único sistema, eliminando la necesidad de abrir GNU Radio externamente. Al incorporar todas las funcionalidades necesarias directamente en el mismo programa, se facilitará una operación más fluida y eficiente del sistema de medición de RFI.

Además, la conversión de los resultados del posprocesamiento, actualmente almacenados en archivos CSV, a formato JSON podría traer varios beneficios. Este cambio reduciría el espacio de almacenamiento y mejoraría la eficiencia en el manejo de datos, permitiendo una manipulación más rápida y sencilla.

La interfaz gráfica actual, diseñada con Tkinter, podría beneficiarse significativamente de una actualización a Qt. Qt ofrece mayores posibilidades de personalización y funcionalidad, lo que mejoraría la experiencia del usuario y aumentaría la versatilidad del medidor de RFI.

Finalmente, se sugiere agregar una funcionalidad para registrar la duración de una señal específica. Esto permitirá determinar cuánto tiempo se mantiene un dato de potencia en una frecuencia específica, dado que el medidor realiza múltiples pasadas para capturar datos. Incluir esta información en el reporte proporcionará una visión más detallada del comportamiento de las señales de interferencia.

Estas propuestas no solo mejorarán el rendimiento del sistema actual, sino que también ampliarán su capacidad para enfrentar nuevos desafíos en la detección y análisis de interferencias de radiofrecuencia.

ANEXOS

Referencias

- [1] J. M. Ford y K. D. Buch, “RFI mitigation techniques in radio astronomy”, en 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014, pp. 231–234.
- [2] Radio frequency interference best practices guidebook”, Cisa.gov. [En línea]. Disponible en: https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/safecom-ncswic_rf_interference_best_practices_guidebook_2.7.20.-_final_508c.pdf. [Consultado: 22-abr-2024].
- [3] G. F. Forte, A. Camps, J. M. Tarongi, y M. Vall-llossera, “Study of radio frequency interference effects on radiometry bands in urban environments”, en 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012, pp. 1069–1072.
- [4] C. Wilson, M. Storey, y T. Tzioumis, “Protection and self-protection of the Murchison Radio-astronomy Observatory from radio frequency interference”, en 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, 2011, pp. 1–3.
- [5] W. van Driel, “Radio quiet zones and the square kilometre array”, en 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, 2011, pp. 1–2.
- [6] R. Bustos, M. Rubio, A. Otárola, y N. Nagar, “Parque astronómico de Atacama: An ideal site for millimeter, submillimeter, and mid-infrared astronomy”, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, vol. 126, núm. 946, pp. 1126–1132, 2014.
- [7] C. Beaudet, J. Ford, T. Minter, M. McCarty, K. O’Neil, y R. Prestage, “Radio frequency interference management efforts at the National Radio Astronomy Observatory Green Bank site”, en 2013 US National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRS), 2013, pp. 1–1.
- [8] M. B. Perotoni y K. M. G. dos Santos, “SDR-based spectrum analyzer based in open-source GNU radio”, *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 20, núm. 3, pp. 542–555, 2021.
- [9] E. Grayver y S. Olsen, “A software-defined radio tool for interference analysis”, en 2018 IEEE Aerospace Conference, 2018, pp. 1–9.
- [10] M. Mishra, A. Potnis, P. Dwivedy, y S. K. Meena, “Software defined radio based receivers using RTL — SDR: A review”, en 2017 International Conference on Recent Innovations in Signal processing and Embedded Systems (RISE), 2017.
- [11] J.-M. Friedt, “GNURadio as a digital signal processing environment: Application to acoustic wireless sensor measurement and time & frequency analysis of periodic signals”, en 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), 2013.
- [12] M. B. Perotoni and K. M. G. dos Santos, “SDR-Based Spectrum Analyzer Based in Open-Source GNU Radio,” *SciELO Brazil*, 2017.

- [13] M. Mishra and A. Potnis, “Wireless transmission detection and monitoring system using GNU Radio and multiple RTL-SDR receivers,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 7, pp. 70–76, 2017.
- [14] M. Mishra y D. A. Potnis, “Wireless transmission detection and monitoring system using GNU radio and multiple RTL – SDR receivers”, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 07, núm. 07, pp. 70–76, 2017.
- [15] T. Dyson, H. Chiang, E. Egan, N. Ghazi, T. Menard, R. Monsalve, T. Moso, J. Peterson, J. Sievers, and S. Tartakovsky, “Radio-Frequency Interference at the McGill Arctic Research Station,” *J. Astron. Instrum.*, vol. 10, no. 10, 2021. DOI: 10.1142/S2251171721500070.
- [16] S. S. Zhekov, A. Tatomirescu, y G. F. Pedersen, “Modified biconical antenna for ultrawideband applications”, en 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2016.
- [17] F. F. Dubrovka, S. Piltyay, M. Movchan, y I. Zakharchuk, “Ultrawideband compact lightweight biconical antenna with capability of various polarizations reception for modern UAV applications”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 71, núm. 4, pp. 2922–2929, 2023.
- [18] C. Zhang, X. Liang, X. Bai, J. Geng, y R. Jin, “An UHF tree-like biconical antenna with both conical and horizontal omnidirectional radiations”, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 187–189, 2015.
- [19] A. D. M. Africa, R. R. M. Tagabuhin, y J. J. S. D. Tirados, “Dipole antenna with biconical and pyramidal horn design in radio frequency identification simulations”, *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, núm. 1, p. 181, 2022.
- [20] I. Gordion y C. Blair, “Parametric design and simulation of a biconical antenna: Admittance, directivity, and far field radiation”, en 2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI), 2022.
- [21] H. Yama et al., “Optical alignment method for the PRIME telescope”, *J. Astron. Instrum.*, vol. 12, núm. 03, 2023.
- [22] “A comprehensive lab comparison between multiple software defined radios”, *rtl-sdr.com*, 30-mar-2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.rtl-sdr.com/a-comprehensive-lab-comparison-between-multiple-software-defined-radios/>. [Consultado: 13-mar-2024].
- [23] A. Martian, F. Lucian Chiper, O. Mohammed Khodayer Al-Dulaimi, M. Jalal Ahmad Al Sammarraie, C. Vladeanu, y I. Marghescu, “Comparative analysis of software defined radio platforms for spectrum sensing applications”, en 2020 13th International Conference on Communications (COMM), 2020.

- [24] Ettus Research y a National Instruments Brand, “USRP B200 USB software defined radio (SDR)”, Ettus Research. [En línea]. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/ub200-kit/>. [Consultado: 07-mar-2024].