

Diseño y evaluación de un sistema basado en Antenas log-periódicas para la detección de la componente electromagnética de rayos cósmicos

Henry Sebastián Mayorga Pérez^{1*}, Alejandro David Amagua Romero¹, Hugo Oswaldo Moreno Avilés¹

¹Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, Riobamba-Ecuador.

*Autor de correspondencia/ corresponding author: henry.mayorga@espoch.edu.ec

Design and evaluation of a detection system for the electromagnetic component of cosmic rays using log-periodic antennas

Resumen

Este estudio presenta el diseño y la evaluación de un sistema para la detección de la componente electromagnética de las lluvias cósmicas extensas (EAS por sus siglas en inglés) generadas por rayos cósmicos ultraenergéticos. Se propone el uso de antenas log-periódicas y un sistema de radio definida por software (SDR por sus siglas en inglés) para la adquisición y análisis de señales en el rango de 20-80 MHz. Se realizaron simulaciones utilizando ANSYS y pruebas experimentales con un analizador de redes vectoriales, obteniendo coeficientes de reflexión menores a -10 dB. La adquisición de datos se llevó a cabo mediante SDR, con un sistema de disparo automático y filtrado digital. Se recolectaron datos durante 47 días con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Los resultados mostraron la detección de señales en el rango de 40-60 MHz, con variabilidad horaria y patrones que sugieren la presencia de eventos asociados a rayos cósmicos. Sin embargo, la validación cruzada con detectores de partículas es necesaria para confirmar estos hallazgos. Este trabajo demuestra la viabilidad de la detección por radio de lluvias cósmicas y plantea la necesidad de integrar estos sistemas con arreglos de detectores de partículas para mejorar la discriminación de eventos.

Palabras clave: rayos cósmicos ultra energéticos (UHECRs), lluvias cósmicas extensas (EAS), radio definida por software, detección de rayos cósmicos, antena log-periódica de dipolos, sistema de disparo automático, detección por radio de rayos cósmicos.

Abstract

This study presents the design and evaluation of a detection system for the electromagnetic component of Extensive Air Showers (EAS) generated by ultra-high energy cosmic rays (UHECRs). The proposed approach employs log-periodic antennas and a software-defined radio (SDR) system for signal acquisition and analysis in the 20-80 MHz frequency range. Simulations were performed using ANSYS, and experimental tests with a vector network analyzer, yielding reflection coefficients below -10 dB. Data acquisition was performed via an SDR-based system, incorporating an automatic triggering mechanism and digital filtering. Data were collected over 47 days with a sampling frequency of 1 Hz. The results indicate the detection of signals in the 40-60 MHz range, showing temporal variability and patterns that suggest the presence of



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Dennis Cazar

Recibido /
Received:
24/04/2025

Aceptado /
Accepted:
14/08/2025

Publicado en línea /
Published online:
28/01/2026



cosmic-ray-induced events. However, cross-validation with particle detectors is required to confirm these findings. This work demonstrates the feasibility of radio-based cosmic shower detection and highlights the necessity of integrating such systems with particle detector arrays to enhance event discrimination.

Keywords: ultra high energy cosmic rays (UHECRs), extensive air showers (EAS), software-defined radio (SDR), cosmic ray detection, log-periodic dipole array antenna (LPDA), radio detection of cosmic rays.

INTRODUCCIÓN

Los rayos cósmicos son partículas elementales de altísima energía compuestas principalmente por protones (aproximadamente el 90 %), núcleos pesados (aproximadamente el 9 %) y fotones de muy alta energía [1]. Las lluvias cósmicas extensas (EAS, por sus siglas en inglés) generadas por las interacciones entre los rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECRs, por sus siglas en inglés) y la atmósfera terrestre, están compuestas por tres componentes principales [2]:

- La componente electromagnética, que incluye fotones, electrones y positrones, se origina principalmente por procesos de radiación de frenado conocidos como bremsstrahlung y por la producción de pares electrón-positrón a partir de fotones.
- La componente hadrónica, constituida por protones, neutrones y piones cargados que resultan de las colisiones inelásticas de los nucleones de los rayos cósmicos primarios con los núcleos de la atmósfera. Esta es la componente más energética, aunque se atenúa rápidamente en la atmósfera debido a interacciones secundarias y al decaimiento de piones y kaones.
- La componente muónica, formada principalmente por muones (μ^+ , μ^-) originados en la desintegración de piones y kaones de la componente hadrónica. Es la menos afectada por la absorción atmosférica y puede penetrar grandes espesores de material, siendo clave en la detección en experimentos subterráneos.

La componente electromagnética de las EAS genera señales de radiofrecuencia principalmente a través de dos mecanismos [3, 4]:

- Emisión geomagnética: producida por la deflexión de electrones y positrones en el campo magnético terrestre debido a la fuerza de Lorentz. Este es el mecanismo dominante; la intensidad de la señal electromagnética depende del ángulo geomagnético (α), es decir, del ángulo entre la dirección de la lluvia y el campo magnético terrestre.
- Efecto Askaryan: emisión debido a la separación de cargas en el frente de la lluvia. Este efecto es más relevante en medios densos como el hielo, y menos significativo en la atmósfera.



El experimento LOPES (LOFAR PrototypE Station) [5] implementó un arreglo de antenas para detección de rayos cósmicos. LOPES operó entre 2003 y 2013 dentro del experimento KASCADE-Grande, en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT), Alemania. Su objetivo principal fue evaluar la viabilidad de la detección digital de lluvias de rayos cósmicos mediante antenas de radio en un entorno con alto ruido electromagnético. LOPES desarrolló métodos innovadores de análisis interferométrico para reconstruir la dirección de llegada de las EAS, la energía del evento, entre otros [6]. Este experimento implementó una red de 30 antenas dipolo en forma de "V" invertida, alineadas en direcciones este-oeste y norte-sur, que operaban en el rango de 40-80 MHz, con un ancho de banda efectivo de 43-74 MHz. El sistema de adquisición de datos estaba sincronizado con los detectores de partículas de KASCADE-Grande, lo que permitía correlacionar directamente la señal de radio con la detección de partículas provenientes de las EAS.

LOPES fue el primer experimento digital que demostró la viabilidad de la detección de EAS mediante radiofrecuencia, validando los resultados previos obtenidos con detectores analógicos. Se observó una correlación directa entre la intensidad de la señal y el seno del ángulo geomagnético. Experimentos sucesivos, como LOFAR y AERA [7], han logrado mejorar la precisión de la técnica, la cual se ha consolidado como un método complementario a los detectores de partículas y telescopios ópticos, como en el Observatorio Pierre Auger [8].

El experimento CODALEMA (Cosmic Ray Detection Array with Logarithmic Electromagnetic Antennas por sus siglas en inglés) ha desarrollado un sistema autónomo para la detección de rayos cósmicos utilizando antenas logarítmicas periódicas. De este modo, se elimina la necesidad de un sistema de detección de partículas co-localizado, introduciendo algoritmos de auto-disparo (self-triggering) que maximizan la eficiencia del sistema a la hora de identificar eventos cósmicos [9].

Desde el 2012, el Observatorio Pierre Auger empezó con la detección de la componente electromagnética de fuentes externas usando antenas. Para este cometido se desarrollaron 3 prototipos [10]. El primer experimento desarrolló una antena en forma de lazo, de bajo coste de producción, pero también de baja recepción. A partir de este diseño, el dipolo se modificó a una adaptación tipo mariposa (butterfly antenna), optimizando así la recepción de la onda directa proveniente del sistema y de la onda reflejada, mejorando la detección. Esta adaptación permitió incrementar la sensibilidad y la capacidad de discriminación de las señales. Finalmente, se determinó que un único dipolo no era suficiente, y se construyeron antenas logarítmicas en las que cada elemento radiante contiene una porción del ancho de banda [10, 11].

Si bien diversos experimentos han demostrado que los arreglos de antenas de radiofrecuencia pueden ampliar la capacidad de detección de rayos cósmicos de ultra alta energía (UHECRs) de los detectores de superficie especializados en la componente muónica, como los del Observatorio Pierre Auger, aún no se ha determinado si esta técnica puede ofrecer resultados equivalentes en un arreglo descentralizado de detectores instalados en diferentes latitudes y, por tanto, expuestos a distintas características del campo magnético terrestre, como es el caso de los detectores Cherenkov de agua (WCD, por sus siglas en inglés) de la Colaboración LAGO [12].



Otro aspecto que requiere investigación es el impacto que podrían tener los nuevos sistemas digitales de detección de ondas, como la radio definida por software (SDR) [13], en el desempeño de los sistemas de detección de lluvias atmosféricas extensas (EAS) basados en antenas, en comparación con las cadenas de procesamiento de señal analógicas utilizadas en los experimentos mencionados en esta sección.

Todas las investigaciones mencionadas comparten un aspecto en común: no se enfocan en el diseño de la antena en sí, lo que genera confusión o proporciona información incompleta al lector que desee replicar los experimentos bajo otras condiciones. Del mismo modo, tampoco se detalla claramente cómo debe realizarse el tratamiento de las señales registradas.

El objetivo de esta investigación es el de realizar un prototipo de antena especializada para la detección de la componente electromagnética de rayos cósmicos, basado en los diseños del Observatorio Pierre Auger, y modificar el sistema de procesamiento y adquisición de señales usando dispositivos definidos por software.

Sistemas SDR

Los sistemas SDR han revolucionado múltiples campos de la tecnología al permitir la transmisión y recepción de señales de radio de muy diversas características, sin necesidad de modificar el hardware, lo que los hace altamente adaptables a múltiples aplicaciones [14]. En el ámbito de las telecomunicaciones inalámbricas, son esenciales para el desarrollo de tecnologías emergentes como 5G, ya que facilitan la experimentación con distintos protocolos de comunicación y la optimización del uso del espectro radioeléctrico. Asimismo, son clave en la implementación de redes de radio cognitiva, permitiendo la detección y uso eficiente de bandas de frecuencia disponibles para mejorar la conectividad en entornos de alta demanda [15].

En el sector de la defensa y seguridad, los sistemas SDR han demostrado ser herramientas esenciales en guerra electrónica, proporcionando capacidades avanzadas para el análisis y bloqueo de señales hostiles en tiempo real. Además, su uso en radares de vigilancia y sistemas de inteligencia de señales (SIGINT) ha permitido la detección de transmisiones sospechosas y la mejora en la seguridad de infraestructuras críticas. En el ámbito de la navegación y geolocalización, han sido empleados en el desarrollo de receptores Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) reconfigurables, lo que posibilita el estudio y mejora de la optimización de sistemas de posicionamiento satelital y su integración en aplicaciones como vehículos autónomos y navegación aérea [16].

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de la antena

El diseño de una antena de dipolo periódica logarítmica se sustenta en la estrecha relación entre sus parámetros electromagnéticos y su geometría física. En la Tabla 1 se presentan los parámetros electromagnéticos necesarios para una detección correcta:

TABLA 1. Parámetros de diseño de la antena implementada.

Ancho de banda BW (MHz)	(20 – 80) +/- 10%
Coefficiente de reflexión S_{11} (dB)	< -10.
Ganancia G (dB)	> 6
Impedancia: Z (Ω)	75

La Tabla 2 resume los parámetros geométricos derivados del proceso de diseño. El método de diseño de la antena se basa en el descrito en [17,18]. De forma general, una antena logarítmica se define a partir de la ganancia, la cual está en función de los parámetros de factor de escala (τ) y espaciado relativo (σ). A partir de esto y de las fórmulas predeterminadas se generan los parámetros de diseño, que, junto con las dimensiones de los elementos y las distancias entre ellos, se detallan en las Tablas 2 y 3.

TABLA 2. Parámetros fundamentales para el diseño de una antena de dipolo periódica logarítmica.

Parámetro	Valor
Factor de escala (τ)	0.8
Espaciado relativo (σ)	0.143
Ángulo de triangulación superior (α)	19.27°
Ancho de banda región activa (B_{ar})	1.98
Ancho de banda deseado (B)	4.98
Ancho de banda designado (B_d)	9.68
Número de elementos (N)	11
Altura final de antena (m)	4.64

Estos parámetros geométricos fueron determinados mediante métodos analíticos estándar en el diseño de antenas logarítmicas, buscando optimizar la cobertura del rango de frecuencias especificado en BW, cumpliendo simultáneamente con las condiciones de ganancia y adaptación requeridas.

TABLA 3. Longitud de los dipolos y distancia entre los elementos de la LPDA obtenidos usando los parámetros de la Tabla 1.

Identificador del dipolo	Longitud (m)	$d(i, i+1)$ (m)
l_1	8.33	2.34
l_2	6.66	1.86
l_3	5.33	1.50
l_4	4.26	1.19
l_5	3.41	0.95
l_6	2.73	0.77
l_7	2.18	0.60
l_8	1.75	0.49
l_9	1.40	0.41
l_{10}	1.11	0.31
l_{11}	0.89	-

Estos resultados fueron verificados utilizando el software libre Log-Periodic Dipole Array Calculator [19], el cual permite diseñar una antena LPDA a partir de parámetros de frecuencia, impedancia y constantes τ y σ , corroborando así los cálculos realizados previamente.

Simulación de la antena

Para la simulación de la antena se utilizó el software ANSYS [20]. La Figura 1 presenta la antena modelada a partir de las longitudes de la Tabla 3, colocada en un ambiente de vacío (sin interferencias electromagnéticas), excitada a una impedancia de 75Ω .

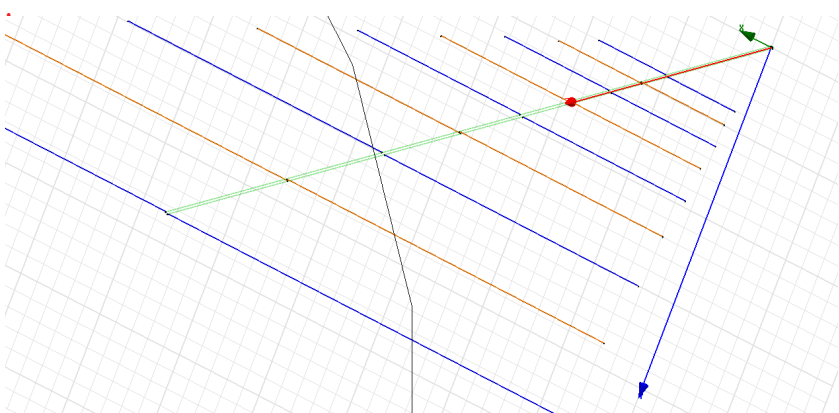


FIGURA 1. Modelamiento de la antena logarítmica en ANSYS.



La Figura 2 muestra los resultados del coeficiente de reflexión que tiene la antena simulada. Para que una frecuencia funcione, este parámetro se debe encontrar por debajo de los -10 dB. Por este motivo, al analizar la imagen, entre 20 y 110 MHz, la antena se encuentra óptima para que funcione.

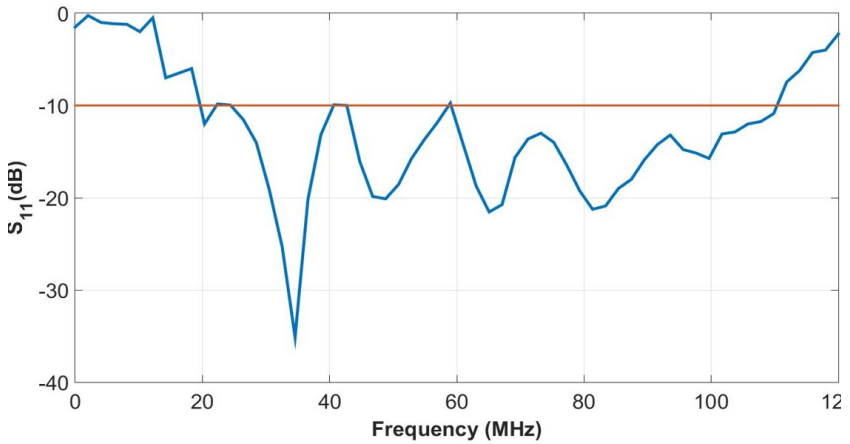


FIGURA 2. Coeficiente de reflexión S_{11} obtenido en simulación.

La Figura 3 muestra la impedancia característica que posee cada frecuencia. Dadas las características de las líneas de transmisión disponibles en el mercado, la antena ha sido diseñada para operar a 75 Ω , de modo que este parámetro se aproxima tanto en su parte real como en la imaginaria.

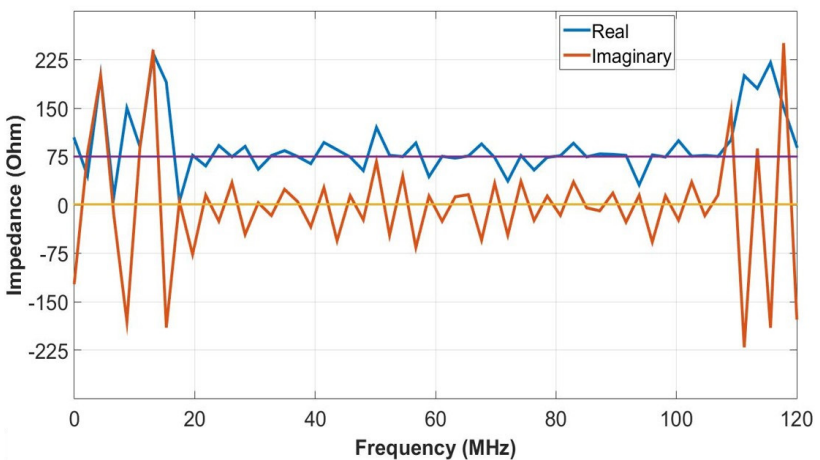


FIGURA 3. Impedancia característica de la antena.

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO

De forma general, al implementar antenas logarítmicas es habitual que ciertos dipolos no participen activamente en la radiación o recepción, debido a su falta de resonancia respecto a la frecuencia de operación. Para esta investigación se optó por omitir los elementos l_1 , l_2 , l_{10} y l_{11} , ya que no contribuyen significativamente a la radiación efectiva dentro de la banda de operación. Este enfoque es consistente con estudios previos, los cuales indican que la optimización del número de dipolos en la región activa puede mejorar la eficiencia de la antena sin comprometer su rendimiento [21]. Las Figuras 4, 5 y 6 presentan los resultados de la simulación de la antena optimizada, en lo que compete al coeficiente de reflexión, impedancia y ganancia.

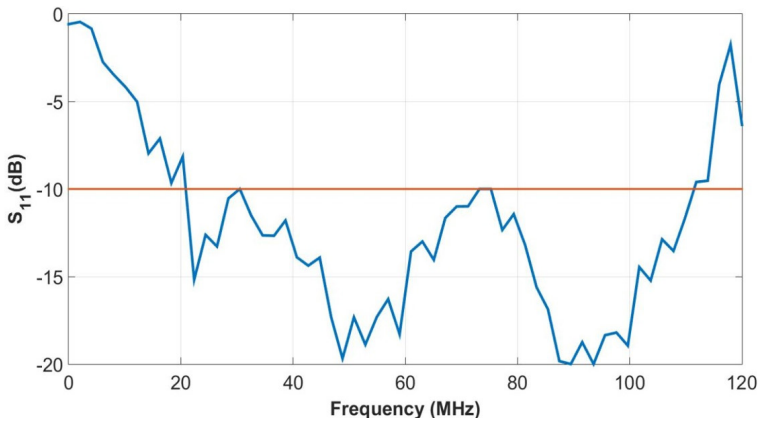


FIGURA 4. Coeficiente de reflexión S_{11} de la antena optimizada a 7 dipolos.

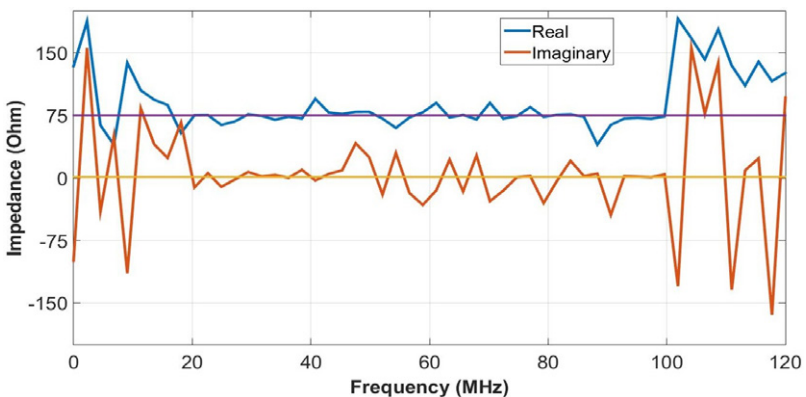


FIGURA 5. Impedancia característica de la antena optimizada en simulación.

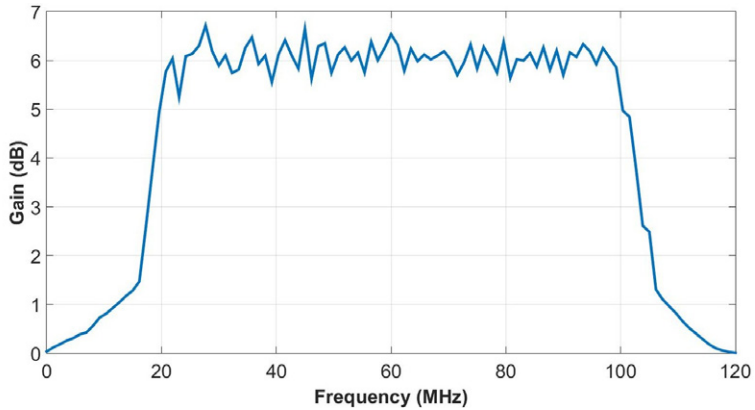


FIGURA 6. Ganancia de la antena en simulación.

Las dimensiones de los dipolos implementados y las distancias entre ellos se presentan en la Tabla 4.

TABLA 4. Dimensiones de los dipolos para la LPDA optimizada y distancia entre los elementos, con $i = 1 \dots 6$.

Número de dipolo	Longitud (m)	$d(i, i+1)$ (m)
l_1	5.00	1.26
l_2	4.00	1.00
l_3	3.2	0.80
l_4	2.56	0.64
l_5	2.00	0.53
l_6	1.56	0.43
l_7	1.28	-

Construcción e instalación de la antena

Instalamos la antena en la Facultad de Informática y Electrónica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Riobamba, Ecuador), con coordenadas geográficas de latitud y longitud de -1.655423 , -78.676594 .

En la Figura 7 se muestra el trabajo final de la antena instalada capturando muestras en tiempo real.



FIGURA 7. Instalación de la antena logarítmica y pruebas iniciales de funcionamiento.

Pruebas de funcionamiento

El analizador de espectros Anritsu permite visualizar la respuesta en frecuencia de la señal recibida por la antena LPDA. Dado que su rango de operación se encuentra entre 20 y 80 MHz, se observa interferencia causada por los servicios de radio y televisión que operan en la misma banda de frecuencias. La Figura 8 muestra la primera medición del espectro obtenida con la antena instalada.

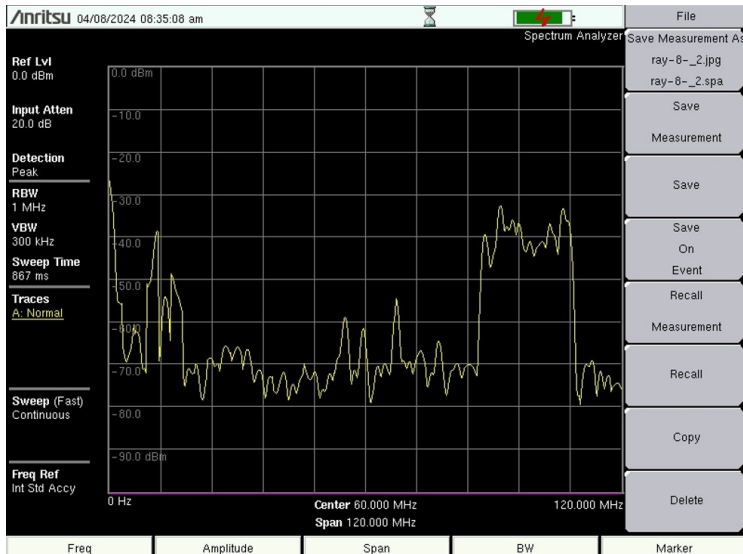


FIGURA 8. Espectro de recepción de la antena LPDA.

Adquisición de datos con el sistema SDR

El sistema de adquisición de señales se basa en un receptor USRP N310 que se conecta a la antena mediante un cable coaxial con conectores SMA. Este microprocesador es responsable de recibir, amplificar y filtrar las señales de la antena antes de su digitalización en tiempo real. Finalmente, a través de MATLAB se aplica la herramienta de auto-disparo (self-triggering) con el fin de poder detectar picos relevantes para su posterior análisis. La Figura 9 ilustra la arquitectura del sistema.

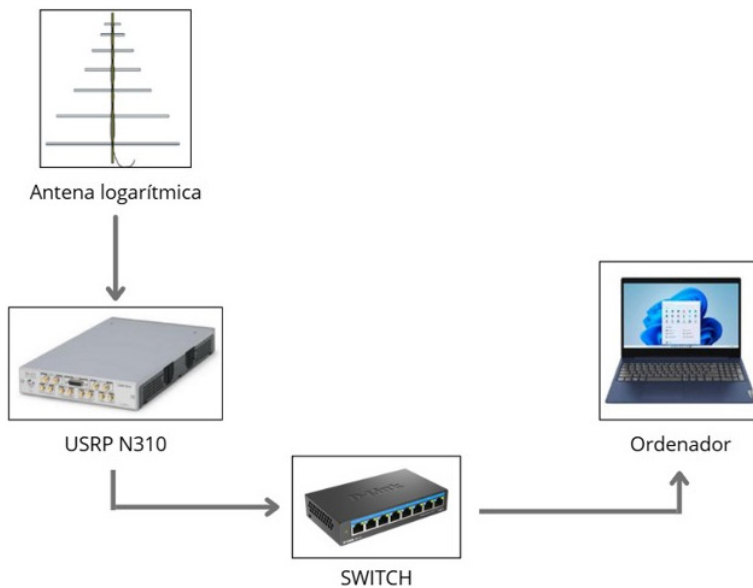


FIGURA 9. Sistema de adquisición automatizada de datos.

Parámetros de configuración iniciales

En el ordenador, es necesario cambiar la dirección IP de asignación automática a manual, debido a que la USRP N310 viene con una dirección IP predeterminada (generalmente 192.168.10.x).

En MATLAB, se busca por nombre el soporte "Wireless Testbench Support Package for NI USRP Radios", como se visualiza en la Figura 10.

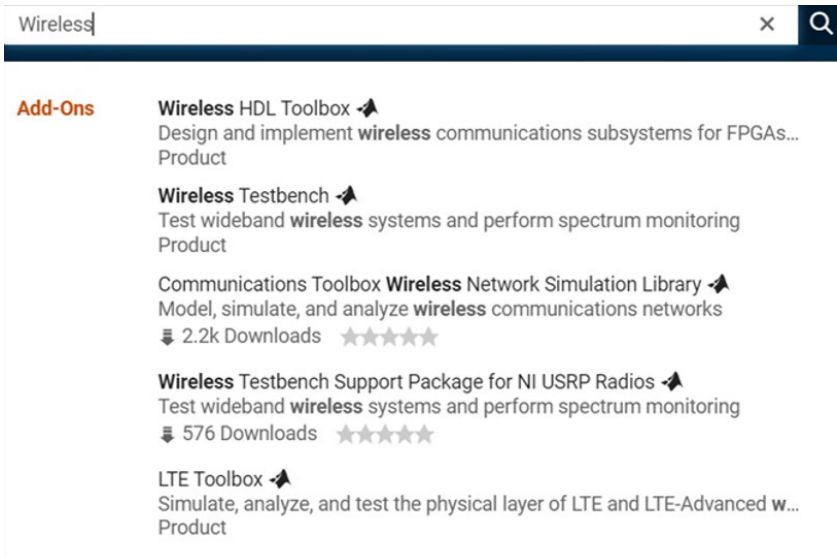


FIGURA 10. Soporte de radio para USRP.

Una vez realizados todos los pasos del proceso de instalación, se comprueba que todos los marcadores aparezcan en color verde para la verificación correcta de todos los componentes, como se indica en la Figura 11. Este proceso toma unos minutos dependiendo de las características de procesamiento del ordenador.

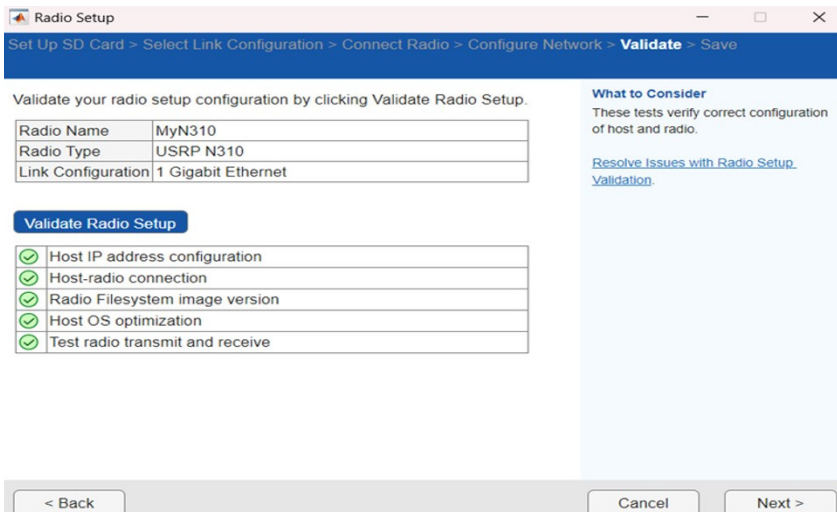
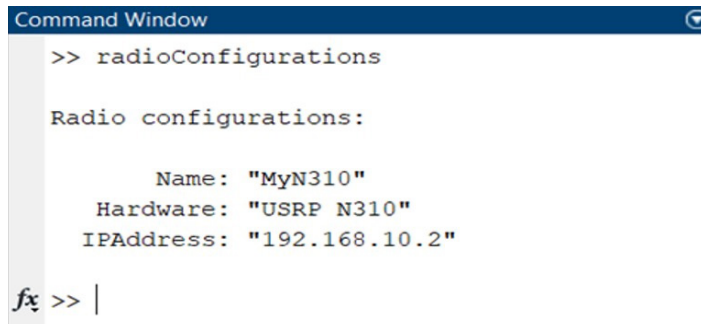


FIGURA 11. Validación de componentes de radio.

Una vez instalada la extensión para la interconexión entre Matlab y la USRP N310, se puede escribir en la pestaña de comandos "radioConfigurations" como se muestra en Figura 12. Este paso verifica que la USRP N310 está siendo reconocida correctamente por el entorno de Matlab.



```
Command Window  
>> radioConfigurations  
  
Radio configurations:  
  
    Name: "MyN310"  
    Hardware: "USRP N310"  
    IPAddress: "192.168.10.2"  
  
fx >> |
```

FIGURA 12. Comando "radioConfigurations".

Umbral de detección

Con base en la señal que se recibe en tiempo real, en investigaciones previas y en la capacidad de muestreo de la USRP, se definió un umbral de recepción de -35 dB. Por tanto, los valores inferiores a este, corresponden a ruido Gaussiano, el cual está siempre presente en todo el espectro electromagnético, además de interferencias de baja intensidad que no aportan información significativa al análisis.

Tiempo de detección

Los datos recopilados por el sistema se almacenaron dentro de un periodo de 3 meses, desde el jueves 13 de octubre de 2024 hasta el 17 de diciembre de 2024 durante 24 horas y con una frecuencia de muestreo de 1 segundo, descartando fines de semana, días festivos y periodos de descanso institucional. En total, se obtuvieron muestras correspondientes a 47 días de medición.

La Figura 13 muestra el diagrama de flujo del programa. En la etapa de análisis se identifican los picos en el espectro que superan un umbral de -35 dB.

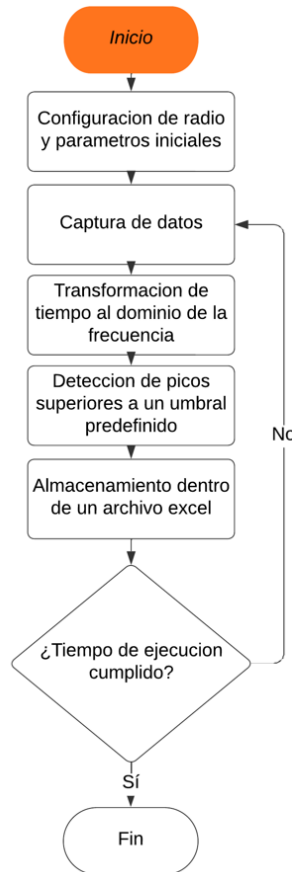


FIGURA 13. Diagrama de flujo del algoritmo para la toma de datos.

DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

Fase 1: Configuración inicial del sistema

- Se recuperan las configuraciones guardadas del dispositivo de radio.
- Se define la banda de frecuencia de operación: 20 MHz a 120 MHz.
- Se calcula la frecuencia central para centrar el receptor en la mitad del ancho de banda.
- Se inicializa el objeto *basebandReceiver* (*bbrx*) si no existe, con parámetros como:
 - Frecuencia central
 - Tasa de muestreo de 125 MHz
 - Ganancia de radio de 30 dB
 - Selección de antena



Fase 2: Definición de parámetros de captura

- Se establece la duración de operación: 8 horas.
- Se define la cantidad máxima de picos a capturar: $picos_por_hora * duracion_horas$.
- Se crea una tabla preasignada para almacenar los picos detectados.
- Se definen las siguientes variables de control:
 - Hora de inicio y fin del monitoreo.
 - Intervalo de guardado en disco (1 minuto).
 - Intervalo de reconexión del receptor (1 hora).

Fase 3: Preparación del entorno de almacenamiento

- Se genera el nombre del archivo Excel usando un *timestamp* basado en la hora de inicio.
- Se verifica la existencia del directorio de destino, y se lo crea si no existe.

Fase 4: Bucle principal de adquisición

- Se ejecuta un bucle *while* hasta que se cumpla el tiempo límite o se alcance el número máximo de picos.
- Dentro del bucle:
 1. Se realiza una reconexión periódica de bbrx cada hora para evitar errores acumulativos.
 2. Se capturan los datos con *capture* (bbrx, bufferSize) dentro de un bloque *try-catch* para gestionar posibles errores.
 3. Se calcula el espectro de potencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).
 4. Se genera un gráfico del espectro en tiempo real.

Fase 5: Detección y almacenamiento de picos

- Se aplica la función *findpeaks* al espectro con un umbral mínimo de -30 dB explicado anteriormente.
- Se filtran los picos que se encuentren entre 20 y 58 MHz.
- Si hay espacio en la tabla, los datos de frecuencia y potencia de cada pico se almacenan junto con:
 - Fecha y hora del evento en formato *string*.

Fase 6: Almacenamiento periódico de datos

- Cada minuto (*intervalo_guardado*), la tabla de picos se escribe en un archivo Excel.
- Se actualiza la variable de tiempo *siguiente_guardado* para la próxima escritura.

Fase 7: Finalización

- Una vez cumplido el tiempo o el número máximo de muestras, el bucle se detiene.
- Se muestra un mensaje de cierre: 'El proceso ha finalizado o se ha alcanzado el límite de capacidad.'



La Figura 14 muestra el espectro de la señal capturada en el rango de frecuencias de 20 MHz y 120 MHz. La potencia de la señal es expresada en decibeles (dB). En primera instancia, se observa una variabilidad significativa en la amplitud a lo largo de las bandas de frecuencia, lo que sugiere la presencia de diferentes fuentes de emisión y posibles interferencias en el entorno de medición.

En la banda de 20 MHz a aproximadamente 70 MHz, se identifica una disminución progresiva de la magnitud, alcanzando valores por debajo de -50 dB, lo que indica una menor presencia de señales en este rango. Sin embargo, a partir de los 80 MHz se evidencia un incremento abrupto en la magnitud de la señal, alcanzando valores cercanos a -25 dB, con una alta densidad de picos. Esto se debe a la presencia de emisoras de radio que utilizan las bandas de frecuencias que van desde 87 MHz hasta los 108 MHz.

Por lo tanto, al comparar las Figuras 8 y 14, se confirma que el sistema está configurado correctamente.

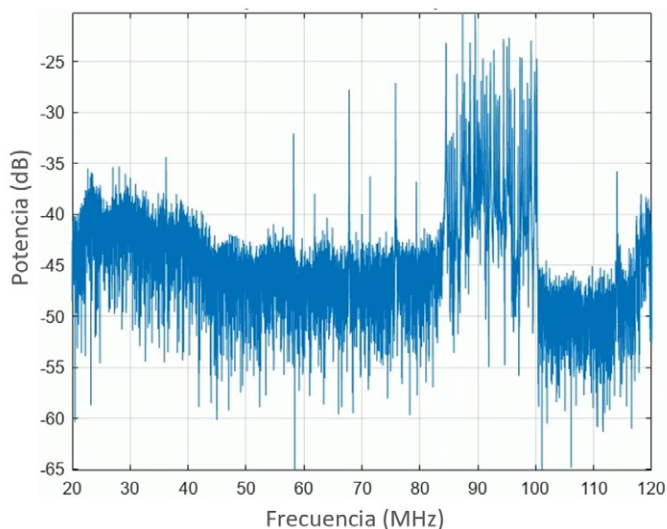


FIGURA 14. Espectro de recepción de la antena procesada con MATLAB.

RESULTADOS

Como primeros resultados preliminares se puede observar en la Figura 15 el espectro que se está receptando en el ancho de banda de 0 a 120 MHz, con una frecuencia central de 60 MHz, y una tasa de muestreo de 120 MHz. Una vez que se ha realizado una primera recepción de datos es necesario discriminar las bandas de trabajo ya reservadas.

A partir de los 70 MHz se visualiza una porción de ancho de banda funcionando, ya que son las frecuencias correspondientes a las bandas emisoras de FM, Banda I de TV o Radioaficionados. Dado que el estudio se encuentra en el rango de los 20 a 80 MHz, se

pueden observar ligeros picos de potencia a 55.42 MHz aproximadamente, indicando cómo se está recepcionando la componente electromagnética de fuentes no intencionales.

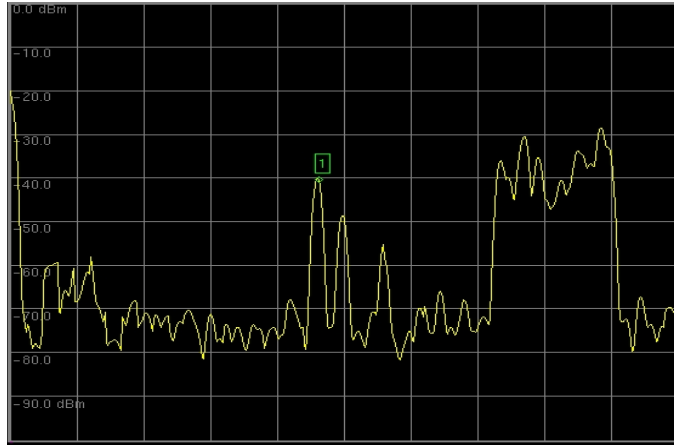


FIGURA 15. Primera toma del espectro de 0 – 120 MHz.

Sin embargo, para una correcta validación de los resultados, es necesario tomar mediciones del espectro en un tiempo establecido y determinar en qué horario y a qué frecuencia se detectó la componente. Para este trabajo de investigación se recolectaron muestras durante la semana del 8 al 12 de abril 2024, desde las 8h00 am hasta las 19h00, en periodos de 30 minutos de forma manual. La Figura 16 muestra el espectro captado del 8 de abril a las 10:06 am.

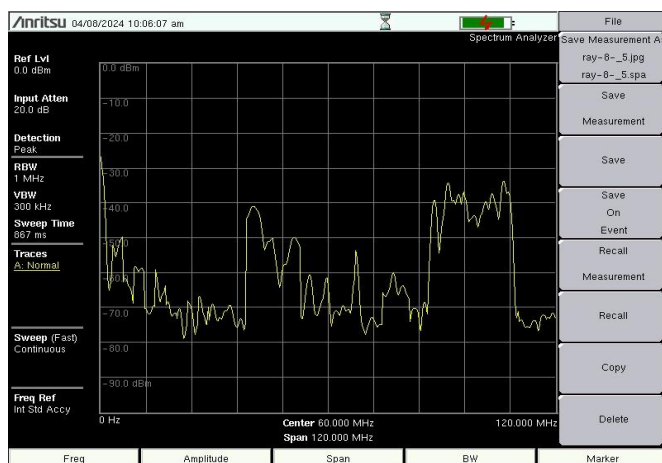


FIGURA 16. Toma periódica del espectro.



Al comparar el espectro de la Figura 15 con el de la Figura 16, se observa la aparición de una fuente no intencional en torno a los 40 MHz, por lo que se concluye que estas muestras no son constantes, sino que presentan cortos períodos de tiempo durante los cuales pueden visualizarse y registrarse.

Para una mejor interpretación de los datos, estos se tabularon en gráficos de barras. A continuación, se muestran los resultados en las Figuras 17, 18, 19 y 20 representando la cantidad de muestras obtenidas por hora, por ancho de banda y por potencia respectivamente, adicionalmente de realizar una relación del promedio de la potencia recibida en función del ancho de banda.

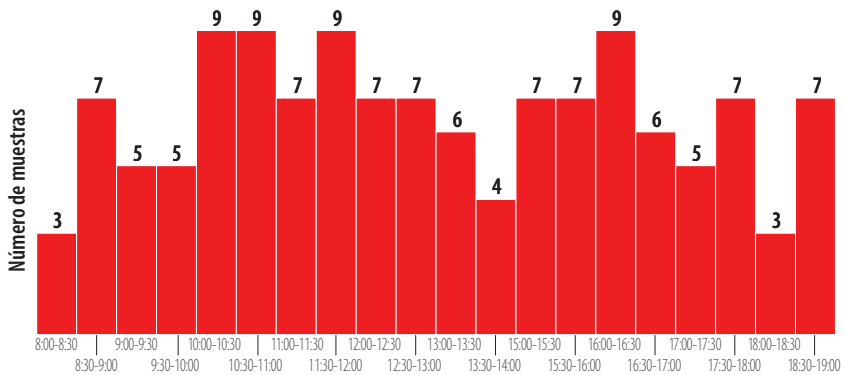


FIGURA 17. Cantidad de muestras obtenidas por hora.

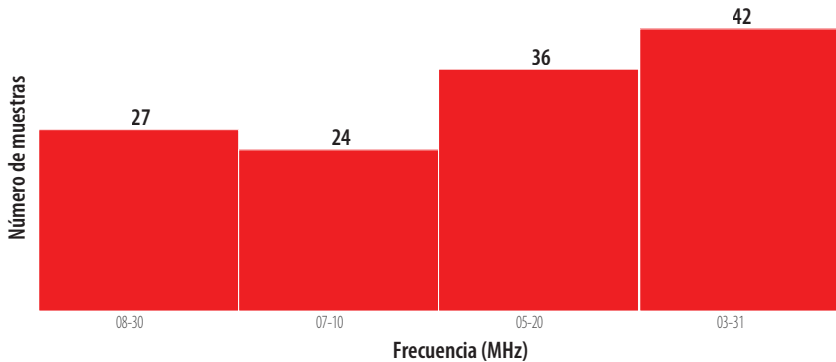


FIGURA 18. Cantidad de muestras obtenidas por ancho de banda.

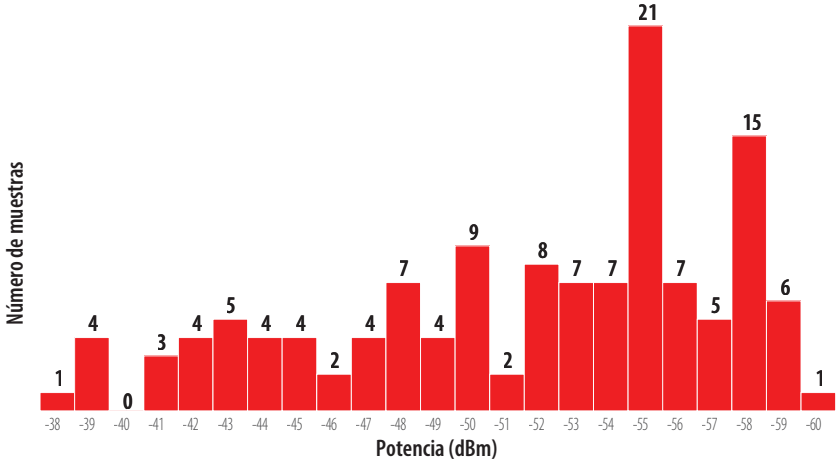


FIGURA 19. Cantidad de muestras obtenidas por potencia.

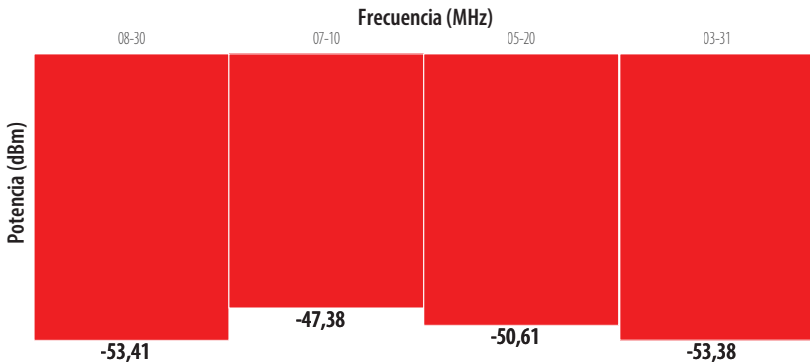


FIGURA 20. Potencia promedio obtenida por ancho de banda.

Al analizar las muestras obtenidas con el analizador de espectros, se observa que la detección de partículas en el rango de 20–40 MHz es escasa. Solo se registró una muestra el primer día, coincidiendo los horarios de 10:00–11:00 a.m. y 5:00 p.m. como los periodos con mayor actividad. El 10 de abril fue el día con mejores resultados, obteniéndose cuatro muestras, aunque bastante separadas entre sí.

En cambio, en el rango de 40–60 MHz se aprecia una diferencia notable, ya que se comienza a observar una mayor concentración de rayos cósmicos durante la mayor parte del tiempo. Los intervalos de 10:00–11:00 a.m. y 4:00–5:00 p.m. fueron los periodos en los que se registraron detecciones de forma consistente en todos los días de medición.

Resultados de la automatización de tomas de datos

El sistema se ejecutó durante 47 días, desde el 13 de octubre hasta el 17 de diciembre de 2024, operando de forma continua las 24 horas del día con una frecuencia de muestreo de 1 segundo. El objetivo fue registrar posibles eventos astronómicos previstos, como llamaradas solares o la lluvia de meteoros Gemínidas. En la Figura 21 se muestra en detalle la cantidad de muestras recolectadas por día.

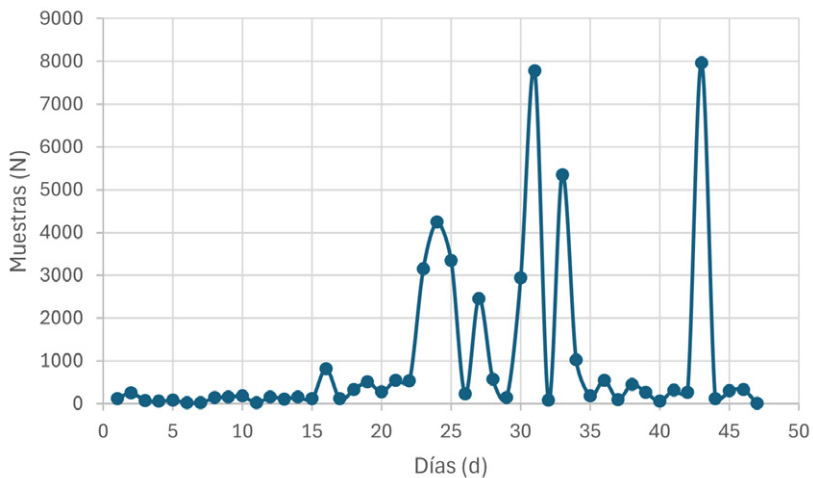


FIGURA 21. Fechas y cantidad de datos recolectados.

Una vez concluida la recolección de datos durante el periodo de tiempo definido, se ejecuta el análisis estadístico con la ayuda de tablas y gráficos dinámicos en Excel para una mayor agilidad y precisión en el método de tabulado.

La Figura 22 indica en un diagrama de barras las muestras agrupadas en función a la hora en las que fueron registradas. De manera gráfica se puede afirmar que las horas con más presencia de rayos cósmicos son de entre 11:00 am y 12 pm, con un total de 6956 y 6157 picos respectivamente. En las horas de la mañana existe menos radiación en comparación a las de la noche.

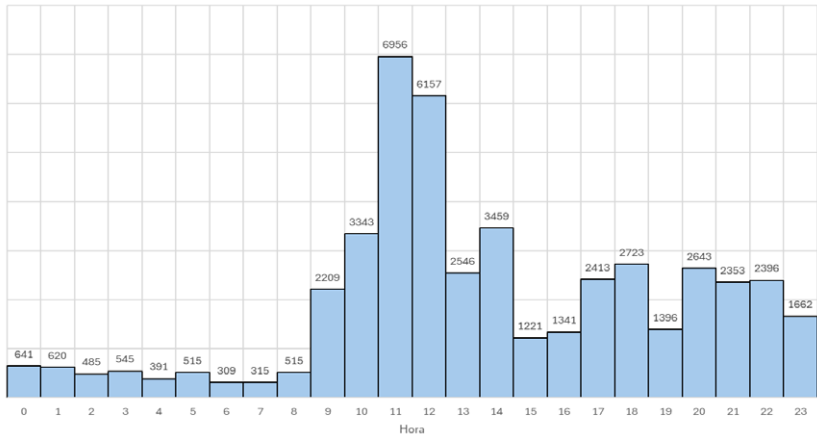


FIGURA 22. Número de muestras por hora.

A continuación, se analizan los datos en función a la frecuencia en la que fueron registradas. En la Figura 23 se aprecia que las bandas de frecuencias más frecuentes son de entre 20-21 MHz y 23-24 MHz con valores de 7 407 y 9 071 muestras respectivamente. En las de 21-22, 24-27 MHz hay una relativa similitud aparente en la caída de rayos. Las bandas de 28 a 31 MHz y 33 a 36 MHz registraron poca presencia de radiación. La banda de 32 MHz presenta una subida respecto a sus bandas vecinas y el resto de las bandas de 37 a 55 MHz no recibieron más información, por ello no fueron consideradas.

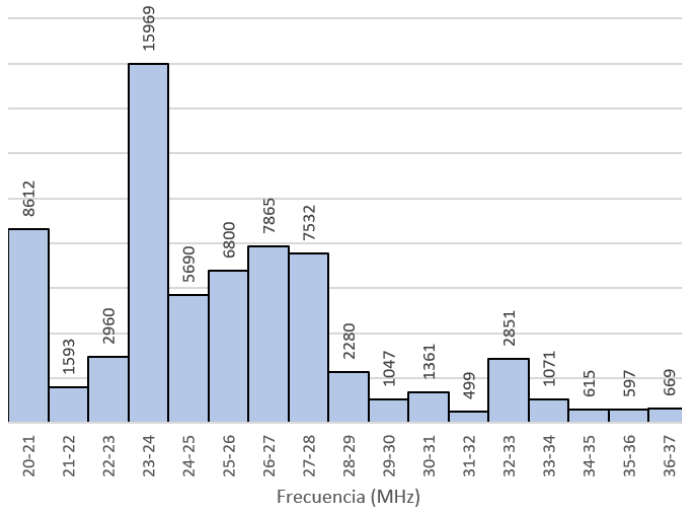


FIGURA 23. Número de muestras por frecuencia (MHz).

La Figura 24 muestra la distribución de la cantidad de muestras por potencia medida en decibelios. Se observa que el rango de potencia entre -30 y -29 dBm tiene la mayor



cantidad de muestras, con un pico de 17 707, seguido del rango entre -32 y -31 dBm con 14 952 muestras. A medida que la potencia se aleja de estos valores centrales hacia ambos extremos, la cantidad de muestras disminuye significativamente, lo que sugiere que las señales más comunes están concentradas en un rango intermedio de potencias. Los valores extremos, tanto más bajos (-35 a -34 dBm) como más altos (-19 a -18 dBm), presentan una frecuencia considerablemente menor, con apenas unas decenas de muestras. Esto indica que las señales con potencias fuera del rango central son menos representativas en este conjunto de datos.

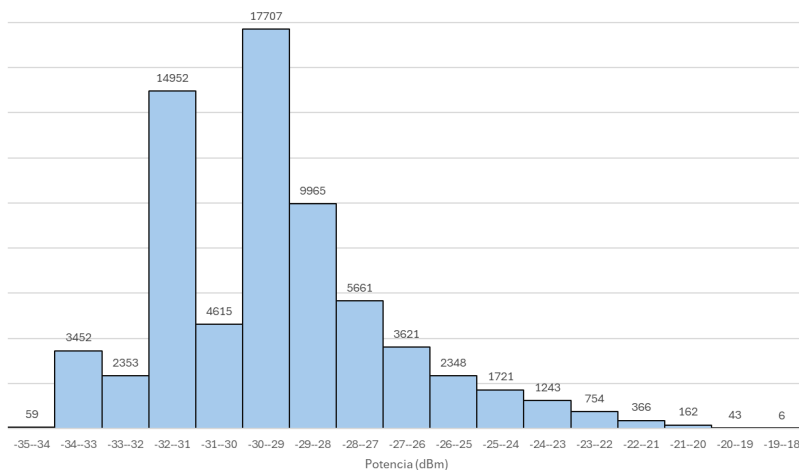


FIGURA 24. Número de muestras por potencia (dBm).

El gráfico de la Figura 25 muestra el promedio de la intensidad de potencia, medida en decibelios (dB), para cada banda de frecuencia entre 22 MHz y 37 MHz, rango en el cual se registró una cantidad significativa de muestras. Se identifican picos máximos en las bandas de 28–29 MHz, 30–31 MHz y 32–33 MHz, con valores de potencia de -29.11 dB, -28.98 dB y -28.29 dB, respectivamente. Estos resultados evidencian la presencia de regiones con una mayor concentración de potencia dentro del espectro analizado.

De manera opuesta, los mínimos relativos se observan en los rangos de 25–26 MHz (-30.10 dB), 26–27 MHz (-29.98 dB), 28–29 MHz y 35–36 MHz (-30.17 dB), lo que indica una menor recepción de potencia en dichas bandas de frecuencia.

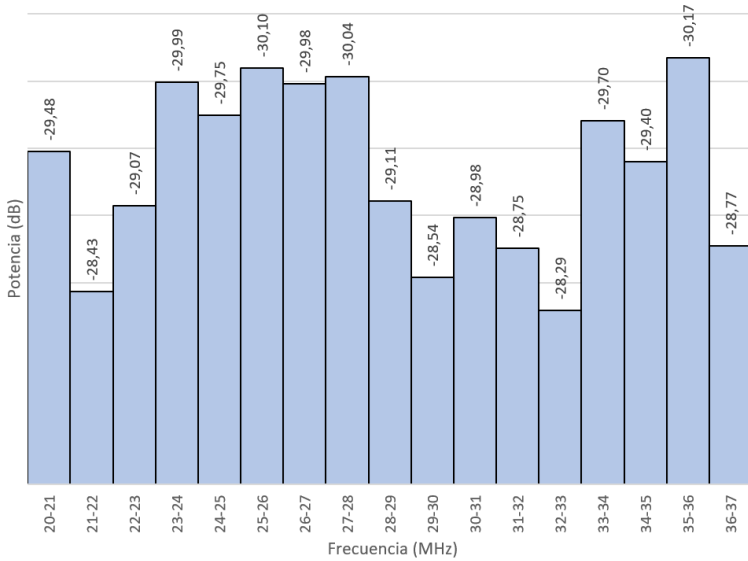


FIGURA 25. Potencia en función a la frecuencia.

DISCUSIÓN

Al analizar las antenas empleadas en el Observatorio Pierre Auger, se observó que sus dimensiones son significativamente mayores en comparación con las diseñadas en la presente investigación. En dichas antenas, los dipolos se instalan de forma cruzada, es decir, orientados en ambos sentidos, mientras que en este trabajo se optó por una orientación unidireccional.

Asimismo, se identificó que la ganancia de las antenas del Observatorio Pierre Auger no se mantiene uniforme a lo largo de todo el ancho de banda. En contraste, en el diseño propuesto en esta investigación se logró una ganancia estable dentro del rango de operación, tal como se muestra en la Figura 6, optimizando así el desempeño de la antena. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos en la simulación [22].

Con base en los estudios desarrollados previamente por otros grupos de investigación, se observó que uno de los aspectos más relevantes que suelen omitirse es la falta de un criterio claro para determinar si la señal capturada proviene de una fuente intencional o no intencional. La presente investigación representa un primer avance en la definición de un método para el tratamiento de la componente electromagnética de los rayos cósmicos y en el establecimiento de un umbral de detección adecuado. Cabe destacar que, tanto al emplear el analizador de espectros como la radio definida por software (SDR), las señales registradas resultan casi imperceptibles; por ello, el hecho de haber logrado un muestreo exitoso con tiempos de captura tan reducidos constituye un avance significativo en la detección de estos espectros de baja intensidad.



Análisis comparativo con otros estudios

Este artículo se centra en la detección de rayos cósmicos de ultra alta energía a partir del estudio de las señales de radio emitidas por las lluvias atmosféricas extensas que se generan cuando un rayo cósmico impacta la atmósfera. A diferencia de los métodos tradicionales de detección, que se basan en telescopios de fluorescencia y detectores de partículas en superficie, como los utilizados en el Observatorio Pierre Auger en Argentina, la detección por radio permite una observación continua, independiente de las condiciones climáticas, y ofrece una cobertura geográfica mucho más amplia.

En este contexto, se propone un enfoque de automatización de la detección mediante un sistema de auto-disparo, en el que el detector de radiofrecuencia analiza de manera continua el entorno y decide almacenar datos cuando detecta señales que cumplen ciertos criterios predefinidos, como una intensidad anómala o un patrón específico en la frecuencia. Este sistema tiene como objetivo principal filtrar en tiempo real las señales relevantes y discriminar el ruido electromagnético, permitiendo la adquisición autónoma de datos. No obstante, la validación de los eventos requiere información adicional recopilada por detectores de partículas. Los datos obtenidos se almacenan en hardware embebido, lo que facilita su procesamiento posterior en servidores centralizados.

A continuación, en la Tabla 5 se muestra la comparación con puntos clave entre cada uno de los sistemas mencionados.

TABLA 5. Comparación de las características principales de los sistemas de detección de partículas basados en antenas y el prototipo desarrollado.

Criterio comparativo	Soluciones basadas en hardware especializado	Infraestructura LOFAR y procesamiento	Propuesta del presente estudio
Método de detección	FPGA con auto-disparo y validación con detectores de partículas	Algoritmo de auto-disparo optimizado para antenas LOFAR	SDR con filtrado digital en MATLAB
Estrategia de muestreo y disparo	Activación solo cuando hay eventos detectados	Disparo en tiempo real basado en picos de intensidad	Toma de datos cada 1 segundo.
Procesamiento de señal	FPGA con filtrado pasivo de alto orden	Filtrado de RFI basado en coincidencias de antenas y umbrales	MATLAB con FFT y análisis en PC estándar
Almacenamiento de datos	En hardware embebido especializado	En servidores LOFAR con acceso centralizado	En PC estándar, archivos Excel, accesible
Tipo de antenas	LPDA y SALLA (más costosas y requieren calibración constante)	LOFAR LBA (requiere una infraestructura extensa y costosa)	Logarítmicas diseñadas localmente (económicas y eficientes)
Costo de implementación	Alto	Muy alto por estación LOFAR	Bajo



Criterio comparativo	Soluciones basadas en hardware especializado	Infraestructura LOFAR y procesamiento	Propuesta del presente estudio
Mantenimiento	Alto, necesita ajustes en FPGA y sensores de partículas	Muy alto, depende de infraestructura LOFAR	No requiere calibraciones constantes
Flexibilidad y escalabilidad	Depende de FPGA y sensores de partículas	Solo funciona en LOFAR	Adaptable a distintos entornos y bajo costo
Adaptabilidad a otros entornos	Difícil, requiere hardware especializado	Solo aplicable a LOFAR, difícil de trasladar a otros sistemas	Fácil de replicar y adaptar

CONCLUSIONES

En esta investigación se determinó que las antenas logarítmicas desarrolladas permiten una cobertura de recepción adecuada para fuentes no intencionales dentro del ancho de banda analizado, comprendido entre 20 y 80 MHz. Durante las mediciones realizadas con el analizador de espectros se excluyeron las frecuencias asignadas a usos comerciales, como las de televisión y radio. En el rango restante se identificaron componentes electromagnéticas asociadas a los rayos cósmicos, principalmente entre 40 y 60 MHz. Estos resultados confirman el correcto funcionamiento y la eficacia de las antenas diseñadas.

La implementación de un sistema de adquisición de datos automático permitió recolectar un volumen de muestras significativamente mayor al que se podría obtener mediante registros manuales. Este sistema no solo incrementa la cantidad de información disponible, sino que también mejora la precisión de los parámetros de tiempo, amplitud y frecuencia, garantizando una operación continua y estable durante periodos prolongados.

La información obtenida a partir del análisis de las señales detectadas por las antenas constituye una herramienta valiosa para aumentar la capacidad de discriminación de eventos en los detectores de partículas, como los tanques Cherenkov instalados en la ESPOCH. En una siguiente etapa de la investigación se tiene previsto realizar una campaña conjunta de adquisición de señales entre las antenas y los detectores Cherenkov (WCD), con el objetivo de distinguir de manera más efectiva las señales provenientes de rayos cósmicos respecto de otras fuentes electromagnéticas no intencionales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Electrónica e Informática de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) por brindarnos las facilidades de uso de equipos y materiales para el desarrollo de este trabajo.



CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Henry Mayorga Pérez: recursos, investigación, validación (encargado de la manufacturación de la antena, participó en la implementación y verificación física del dispositivo). Amagua Romero: software, curación de datos, visualización (encargado de la automatización de los datos, desarrollo del sistema de adquisición y procesamiento). Hugo Moreno Avilés: conceptualización, metodología, análisis formal (responsable del diseño teórico de la antena y planteamiento del modelo base de funcionamiento).

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, los autores no utilizaron ningún uso de tecnologías de IA generativa y asistida de redacción.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos están disponibles previa solicitud al autor correspondiente, en casos excepcionales.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés en relación con la publicación de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Auger, P., Abraham, J., Abreu, P., Aglietta, M., Aguirre, C., J. A. E., Allard, D., Allekotte, I., Allen, J., Alvarez-Muñiz, J., Ambrosio, M., Anchordoqui, L., Andringa, S., Anzalone, A., Aramo, C., Arganda, E., Argirò, S., Arisaka, K., Arneodo, F., & Arqueros, F. (2025). *The cosmic ray energy spectrum and related measurements with the Pierre Auger Observatory*. *arXiv:0906.2189*. <https://arxiv.org/abs/0906.2189>
- [2] Huege, T. (2016). Radio detection of cosmic ray air showers in the digital era. *Physics Reports*, 620, 1–52. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.02.001>
- [3] Falcke, H., Apel, W. D., Badea, A. F., Bähren, L., Bekk, K., Bercuci, A., Bertaina, M., Biermann, P. L., Blümer, J., Bozdog, H., Brancus, I. M., Buitink, S., Brüggemann, M., Buchholz, P., Butcher, H., Chiavassa, A., Daumiller, K., De Bruyn, A. G., De Vos, C. M., . . . & Zimmermann, D. (2005). Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers. *Nature*, 435(7040), 313–316. <https://doi.org/10.1038/nature03614>
- [4] Schröder, F. G. (2017). Radio detection of cosmic-ray air showers and high-energy neutrinos. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 93, 1–68. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2016.12.002>
- [5] Huege, T., Apel, W. D., Arteaga, J. C., Asch, T., Bähren, L., Bekk, K., Bertaina, M., Biermann, P. L., Blümer, J., Bozdog, H., Brancus, I. M., Buchholz, P., Buitink, S., Cantoni, E., Chiavassa, A., Daumiller, K., de Souza, V., Doll, P., Engel, R., . . . & Zensus, J. A. (2012). The LOPES experiment—Recent results, status and perspectives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 662. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.11.081>
- [6] Apel, W. D., Arteaga-Velázquez, J. C., Bähren, L., Bekk, K., Bertaina, M., Biermann, P. L., Blümer, J., Bozdog, H., Cantoni, E., Chiavassa, A., Daumiller, K., De Souza, V., Di Piero, F., Doll, P., Engel, R., Falcke, H., Fuchs, B., Gemmeke, H., Grupen, C., . . . Zensus, J. A. (2021). Final results of the LOPES radio interferometer for cosmic-ray air showers. *The European Physical Journal C*, 81(2). <https://doi.org/10.1140/epjcs/s10052-021-08912-4>
- [7] Hörandel, J. R., on behalf of the LOFAR Key Science Project Cosmic Rays and the Pierre Auger Collaboration Radio. (2016). *Radio detection of air showers with LOFAR and AERA*. In *Proceedings of the International Symposium for Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2014)*. JPS Conference Proceedings, 9, 010004. <https://doi.org/10.7566/JPSCP9.010004>
- [8] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Ahn, E. J., Al Samarai, I., Albuquerque, I. F. M., Allekotte, I., Allison, P., Almela, A., Alvarez Castillo, J., Alvarez-Muñiz, J., Alves Batista, R., Ambrosio, M., Aminaei, A., Anastasi, G. A., Anchordoqui, L., Andringa, S., Aramo, C., Arqueros, F., . . . Zuccarello, F. (2016). Nanosecond-level time synchronization of autonomous radio detector stations for extensive air showers. *Journal of Instrumentation*, 11(1). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/P01018>
- [9] Lautridou, P., & Codalema Collaboration. (2009). Results of the radio-detection experiment CODALEMA. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, 604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.164>
- [10] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Al Samarai, I., Albuquerque, I. F. M., Allekotte, I., Almela, A., Castillo, J. A., Alvarez-Muñiz, J., Anastasi, G. A., Anchordoqui, L., Andrada, B., Andringa, S., Aramo, C., Arqueros, F., Arsene, N., Asorey, H., Assis, P., Aublin, J., . . . Zuccarello, F. (2017). Calibration of the logarithmic-periodic dipole antenna (LPDA) radio stations at the Pierre Auger Observatory using an octocopter. *Journal of Instrumentation*, 12(10). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/T10005>
- [11] Pont, B. (2021). A large radio detector at the Pierre Auger Observatory: Measuring the properties of cosmic rays up to the highest energies. *Proceedings of Science*, 358. <https://doi.org/10.22323/1.358.0395>
- [12] Mantilla, C., Audelo, M., Calderon, M., Carrera, E., Cazar, D., Martinez, O., Quishpe, R., Vargas, S., & Vasquez, N. (2015). Implementing a WCD detector system in Ecuador as part of the LAGO Project. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 267–269, 430–432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.143>
- [13] Lind, F. D., Erickson, P. J., Coster, A. J., Foster, J. C., Marchese, J. R., Berkowitz, Z., & Sahr, J. D. (2013). Intercepted signals for ionospheric science. *Radio Science*, 48(3). <https://doi.org/10.1002/rds.20034>



- [14] Palán Murillo, J. D. (2024). *Guías de prácticas de laboratorio interdisciplinarias para sistemas de comunicaciones utilizando radio definida por software* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Digital UTA. <https://repositorio.uta.edu.ec/items/c5de48fc-43f0-47f3-bc31-2f79f547a37fcx>
- [15] Wray Castle. (2024). *Comprensión de la radio definida por software: una guía para principiantes*. Wray Castle Blog. <https://wraycastle.com/es/blogs/knowledge-base/software-defined-radio>
- [16] Per Vices. (2022). *Using SDRs for Signals Intelligence (SIGINT)*. <https://www.mpdigest.com/2022/08/22/using-sdrs-for-signals-intelligence-sigint/>
- [17] Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4th ed.). Wiley.
- [18] Carrel, R. L. (1961). *The design of log-periodic dipole antennas*. In *IRE National Convention Record, Part I* (pp. 61–75). Institute of Radio Engineers. <https://doi.org/10.1109/IRECON.1961.1151016>
- [19] Stroobandt, S., & McCue, M. (2020). *Log-Periodic Dipole Calculator* (v20180914) [Sitio web]. Hamwaves. <https://hamwaves.com/lpda/>
- [20] ANSYS design software (student version). *Antenna design & modelling software* <https://www.ansys.com/applications/antenna-design-and-placement>
- [21] Gozal, N. R., & Mukhlis, Y. (2019). Design and manufactured of log-periodic dipole array antenna at 400 MHz. *Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science*, 2(2), 25–30. <https://doi.org/10.26905/jeemecs.v2i2.3126>
- [22] Abreu, P., Aglietta, M., Ahlers, M., Ahn, E. J., Albuquerque, I. F. M., Allard, D., Allekotte, I., Allen, J., Allison, P., Almela, A., Castillo, J. A., Alvarez-Muñiz, J., Batista, R. A., Ambrosio, M., Aminaie, A., Anchordoqui, L., Andringa, S., Antičić, T., Aramo, C., ... Seeger, O. (2012). Antennas for the detection of radio emission pulses from cosmic-ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory. *Journal of Instrumentation*, 7(10). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/10/P10011x>