

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN  
PARA LA ATENCIÓN MÉDICA EN ZONAS DE DIFÍCIL ACCESO

Juan Sebastián Ávila Díaz y Paula Lucía Rodríguez Jácome

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico

Director

Omar Javier Tijero Rojas

PhD. Ingeniero Electrónico

Codirector

Efrén Darío Acevedo Cárdenas

Mg. Ingeniero Electrónico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T)

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2026

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Espectro Electromagnético .....	16
2.1.1 Espectro Radioeléctrico .....	16
2.1.2 Espectro TVWS .....	16
2.2 Muestreo en sistemas SDR .....	17
2.2.1 Aliasing en sistemas SDR.....	17
2.2.2 Teorema de Muestreo de Nyquist–Shannon.....	18
2.2.3 Resolución en frecuencia y relación con la FFT.....	18
2.3 Modulaciones Digitales .....	19
2.3.1 Modulación GMSK.....	19
2.3.2 Modulación FSK.....	20
2.4 GNU Radio Companion (GRC).....	20
3. Alcance Proyecto .....	21
4. Metodología .....	22

4.1 Fase 1: Validación instrumental y caracterización de enlace .....	23
4.1.1 Comparación analizador de espectros vs. SDR con señal controlada .....	25
4.1.2 Preprocesamiento y comparación de espectros.....	26
4.1.3 Detección de ocupación espectral.....	28
4.1.4 Caracterización del enlace radioeléctrico mediante Longley–Rice en MATLAB .....	29
4.2 Fase 2: Implementación del sistema SDR .....	32
4.2.1 Configuración espectral y resolución de análisis.....	33
4.2.2 Diseño del barrido espectral.....	33
4.2.3 Adquisición de datos con SDR y analizador de espectro .....	35
4.2.4 Automatización del proceso de barrido .....	35
4.3 Fase 3: Validación del enlace de comunicación mediante simulación y pruebas experimentales .....	37
4.3.1 Arquitectura del protocolo de enlace .....	37
4.3.2 Configuración de parámetros.....	39
4.3.3 Evaluación en simulación con modelado de canal y métrica BER.....	41
4.3.4 Pruebas experimentales con hardware SDR .....	43
4.4 Interfaz Web.....	45
5. Análisis de Resultados .....	46
5.1 Resultados de la validación instrumental y caracterización de enlace .....	46
5.2 Resultados de caracterización del terreno y análisis de enlace.....	51
5.3 Discusión de resultados de la fase 1 .....	53

5.4 Resultados de barrido espectral en la banda TVWS .....	53
5.5 Disponibilidad espectral observada en la banda 470–698 MHz .....	55
5.6 Resultados de la fase 3: Validación del enlace SDR .....	59
5.7 Resultados experimentales: enlace cableado y enlace inalámbrico .....	62
6. Conclusiones .....	63
7. Recomendaciones .....	66
Referencias Bibliográficas .....	68

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Dispositivos utilizados en el proyecto. ....	23
Tabla 2. Elementos utilizados en el proyecto. ....	24
Tabla 3. Coordenadas geográficas del transmisor y receptor para la caracterización de terreno. ....	30
Tabla 4. Parámetros de configuración para esquemas de modulación FSK y GMSK en simulación y pruebas experimentales. ....	39
Tabla 5. Parámetros para Channel Model en el flujograma de GNU Radio.....	42
Tabla 6. Comparación de diferentes percentiles para estimación del piso de ruido. ....	54
Tabla 7. Métricas de los 19 barridos y detección de canales ocupados. ....	56
Tabla 8. BER para los 4 casos simulados .....	60

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Las 4 fases metodológicas empleadas para el desarrollo del proyecto. ....	22
Figura 2. Diagrama de bloques implementado en GNU Radio. ....	26
Figura 3. Esquema de comparación de barridos en frecuencia. ....	27
Figura 4. Flujo del algoritmo de Matlab .....	31
Figura 5. Paquete de frecuencias para el barrido del espectro de la TVWS. ....	34
Figura 6. Diagrama del algoritmo. ....	36
Figura 7. Flujograma modulación FSK o GMSK simulación. ....	41
Figura 8. Diagrama de flujo transmisión/recepción. ....	44
Figura 9. Generador de señales, analizador de espectro, USRP 2920 y Google Colab. ....	46
Figura 10. Comparación del espectro medido con el analizador de espectros vs USRP2920 y detección de ocupación. ....	47
Figura 11. Comparación del espectro medido con el analizador de espectros vs USRP2920 y detección de ocupación. ....	48
Figura 12. Comparación del espectro medido con el analizador de espectros vs USRP2920 y detección de ocupación. ....	48
Figura 13. Mapa de cobertura del enlace de propagación. ....	51
Figura 14. Concatenación de los 19 barridos espectrales. ....	58
Figura 15. Channel Model. ....	61
Figura 16. Montaje del transmisor / receptor. ....	62

## Lista de Apéndices

**Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional.**

Apéndice A. Guía de explicación para la validación instrumental, comparación espectral SDR vs analizador.

Apéndice B. Guía de explicación para la caracterización de terreno, algoritmo MATLAB Longley–Rice.

Apéndice C. Guía de análisis y verificación de espacios libres, procesamiento de 19 barridos TVWS.

Apéndice D. Pruebas de transmisión y recepción con modulación digital, simulación y hardware SDR.

Apéndice E. Guía algoritmo interfaz página web, sistema de monitoreo espectral en tiempo real.

Apéndice F. Manual de usuario, instrucciones de instalación y operación del sistema completo.

Apéndice G. Fundamentos del procesamiento espectral implementado, coeficiente de Pearson y umbral adaptativo.

Apéndice H. Dispositivos y elementos utilizados en el proyecto, especificaciones técnicas completas.

Apéndice I. Calibración del sistema de medición para el barrido espectral, procedimiento de ajuste USRP-2920.

### Glosario

BER (Bit Error Rate): métrica de desempeño en sistemas de comunicación digital definida como la relación entre el número de bits erróneos recibidos y el número total de bits transmitidos durante un intervalo de tiempo determinado. (Proakis & Salehi, 2008)

Bin (FFT bin): intervalo discreto de frecuencia obtenido como resultado de una Transformada Discreta de Fourier o una FFT. Cada bin representa la energía de la señal en una banda de frecuencia específica, cuya anchura depende de la frecuencia de muestreo y del número de puntos de la FFT. (Oppenheim & Schaffer, 2010)

DFT (Discrete Fourier Transform): transformada matemática que convierte una señal discreta en el dominio del tiempo en una representación discreta en el dominio de la frecuencia, permitiendo analizar su contenido espectral. (Oppenheim & Schaffer, 2010)

FFT (Fast Fourier Transform): algoritmo computacional eficiente para calcular la Transformada Discreta de Fourier, reduciendo significativamente el número de operaciones necesarias respecto a un cálculo directo de la DFT. (Oppenheim & Schaffer, 2010)

Json: es un formato ligero y basado en texto para el intercambio de datos estructurados. Utiliza pares nombre-valor y estructuras como objetos ({} ) y arreglos ([]). Posee gran facilidad en la comprensión y escritura, rápido análisis por parte de las máquinas, y ampliamente usado en aplicaciones web y móviles como formato estándar de datos. (Python Software Foundation, 2025)

Matplotlib: es una biblioteca de visualización de datos en Python, utilizada para crear gráficos estáticos, interactivos y animados. Permite generar una amplia variedad de gráficos como diagramas de líneas, dispersión, barras, histogramas y más, de forma sencilla y flexible. (Matplotlib, 2025)

Numpy: es una biblioteca esencial en Python para computación científica. Proporciona estructuras de datos de arreglos multidimensionales (ndarray) y funciones eficientes para operaciones matemáticas, álgebra lineal, transformadas de Fourier, estadísticas y entre otras. (NumPy, 2025)

RF: en comunicaciones inalámbricas, RF se refiere al rango de frecuencias electromagnéticas utilizadas para transmitir información sin cables. En el caso de TV White Spaces, el término RF se aplica a las bandas de frecuencia que antes estaban asignadas a la televisión analógica pero que quedaron sin uso después de la transición a la TV digital. (Proakis & Salehi, 2008)

RX: abreviatura comúnmente usada en comunicaciones para referirse al receptor. En el contexto de SDR y GNU Radio, designa el bloque o flujo de señal que captura datos de RF y los procesa para recuperar información transmitida. (Proakis & Salehi, 2008)

Sample Rate (Frecuencia de muestreo): número de muestras tomadas por segundo de una señal continua para su representación digital, expresada en muestras por segundo (S/s). (Oppenheim & Schaffer, 2010)

SDR (Software Defined Radio): arquitectura de radio en la cual funciones tradicionalmente implementadas en hardware se realizan mediante software, permitiendo flexibilidad en la configuración y adaptación del sistema de comunicaciones. (Oppenheim & Schaffer, 2010)

TX: abreviatura de transmisor, también muy común en telecomunicaciones. En un sistema SDR, corresponde al bloque o cadena que toma datos digitales, los modula y los envía como señal de radiofrecuencia. (Proakis & Salehi, 2008)

UHD (USRP Hardware Driver): conjunto de controladores y librerías que permiten la configuración y operación de dispositivos USRP en sistemas SDR, facilitando la transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia. (Oppenheim & Schafer, 2010)

UHF: las siglas representan Ultra High Frequency o Frecuencia Ultra Alta. Se trata del rango del espectro electromagnético entre aproximadamente 300 MHz y 3 GHz. Esta banda es utilizada ampliamente en televisión UHF, comunicaciones móviles, Wi-Fi, Bluetooth y sistemas SDR, entre otros. (Proakis & Salehi, 2008)

Unidad de Datos de Protocolo (PDU): una PDU es la unidad básica de intercambio entre entidades que se comunican mediante un protocolo de red específico. Cada PDU incluye un encabezado con información de control, como direcciones de origen y destino, una carga útil que transporta los datos reales y, en algunos casos, un tráiler que puede contener información de verificación o control de errores. (Oppenheim & Schafer, 2010)

## Resumen

**Título:** Diseño e implementación de prototipo de un sistema de comunicación para la atención médica en zonas de difícil acceso \*

**Autor:** Juan Sebastián Ávila Díaz y Paula Lucía Rodríguez Jácome \*\*

**Palabras Clave:** Radio definida por software, TVWS, UHF, GNU Radio, USRP-2920, HackRF One, GMSK.

### Descripción:

El acceso a comunicaciones confiables en zonas rurales de difícil acceso continúa siendo un reto debido a limitaciones de infraestructura, costos de despliegue y condiciones topográficas que afectan la propagación radioeléctrica. Este trabajo presenta un prototipo de sistema de comunicación basado en Radio Definida por Software (SDR), orientado a operar en el espectro UHF bajo el enfoque de TVWS, con el fin de aprovechar canales con baja ocupación e interferencia.

La metodología se estructuró en tres fases principales: (i) validación experimental de la cadena de medición y caracterización del entorno mediante la comparación entre mediciones obtenidas del analizador de espectro y dispositivos SDR, complementada con modelado del terreno usando Longley-Rice; (ii) implementación del sistema SDR para exploración espectral en el rango de frecuencias de 470–698 MHz, realizando un barrido solapado en 19 ventanas con configuración de muestreo que permite resolución compatible con instrumentos del laboratorio; y (iii) pruebas de transmisión y recepción para verificar la integridad de datos (texto e imagen) evaluando modulaciones FSK y GMSK en simulación y validando su funcionamiento, además de confirmar la viabilidad funcional del enlace digital. Este prototipo sienta bases metodológicas y experimentales para futuras pruebas de comunicación en escenarios rurales.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Físico Mecánicas. Escuela de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Omar Javier Tijero Rojas. Doctor en Ingeniería. Codirector: Efrén Darío Acevedo Cárdenas. Magister en Ingeniería Electrónica.

### Abstract

**Title:** Design and implementation of a prototype communication system for medical care in hard-to-reach areas \*

**Author:** Juan Sebastián Ávila Díaz y Paula Lucía Rodríguez Jácome \*\*

**Key Words:** software defined radio, TVWS, UHF, GNU Radio, USRP-2920, HackRF One, GMSK.

### Description:

Access to reliable communications in hard-to-reach rural areas remains a challenge due to infrastructure limitations, deployment costs, and topographic conditions that affect radio-wave propagation. This work presents a prototype communication system based on Software-Defined Radio (SDR), designed to operate in the UHF spectrum under the TVWS approach in order to exploit channels with low occupancy and interference.

The methodology was structured in three main phases: (i) experimental validation of the measurement chain and environment characterization by comparing measurements obtained from a spectrum analyzer and SDR devices, complemented with terrain modeling using Longley–Rice; (ii) implementation of the SDR system for spectral exploration in the 470–698 MHz frequency range, performing an overlapping sweep across 19 windows with a sampling configuration that provides resolution compatible with laboratory instruments; and (iii) transmission and reception tests to verify data integrity (text and image) by evaluating FSK and GMSK modulations in simulation and validating their performance, as well as confirming the functional viability of the digital link. This prototype establishes methodological and experimental foundations for future communication trials in rural scenarios.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Omar Javier Tijero Rojas, PhD in Engineering. Co-director: Efrén Darío Acevedo Cárdenas, Master in Electronic Engineering.

## Introducción

La atención médica en regiones rurales y de difícil acceso enfrenta limitaciones debido a falta de conectividad que impiden un oportuno servicio. En estos entornos, la ausencia o inestabilidad de infraestructura de telecomunicaciones obstaculiza tareas críticas como el envío de reportes clínicos y la transmisión de información esencial entre centros de salud y pacientes. Esta situación no solo impacta la eficiencia operativa de los servicios, sino que puede traducirse en demoras en la toma de decisiones y en una menor capacidad de respuesta.

Diversos enfoques han buscado mitigar este problema mediante redes celulares, enlaces satelitales o soluciones de radio convencionales; sin embargo, en escenarios rurales estas alternativas suelen estar limitadas por cobertura, costos, consumo energético o dependencia de infraestructura externa. Adicionalmente, las condiciones geográficas influyen de forma determinante en la propagación radioeléctrica, reduciendo la confiabilidad del enlace y haciendo necesario incorporar análisis de terreno para dimensionar adecuadamente la comunicación.

En este contexto, la Radio Definida por Software (SDR) se plantea como una alternativa tecnológica pertinente debido a su flexibilidad para implementar y ajustar sistemas de comunicación mediante software, modificando parámetros de transmisión, esquemas de modulación y estrategias de procesamiento sin cambiar el hardware base. Bajo ese enfoque el aprovechamiento de TVWS ofrece una oportunidad para operar en segmentos del espectro con baja ocupación, siempre que se realice una identificación de disponibilidad espectral. No obstante, el uso efectivo de estas bandas exige un proceso metodológico que conecte: (i) la caracterización

del entorno de propagación, (ii) la detección de canales con baja ocupación, y (iii) la validación experimental de transmisión y recepción con preservación de integridad de datos.

Por lo anterior, este trabajo aborda la pregunta sobre el potencial de un sistema basado en SDR para habilitar comunicación confiable en zonas de difícil acceso, orientada al intercambio de mensajes y datos críticos entre pacientes y centro de salud. Para responderla, se desarrolla un prototipo y se estructura un procedimiento de evaluación por fases que incluye la caracterización del entorno y estudio del espectro, la implementación del sistema SDR y la realización de pruebas de transmisión y recepción bajo algunas condiciones de canal. En conjunto, se busca generar evidencia técnica y experimental que sustente decisiones de diseño como selección de frecuencias y configuración del sistema, con visión a escenarios reales donde la conectividad es un factor limitante para la atención oportuna.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un prototipo de sistema de comunicación para evaluar su potencial en la mejora de la atención médica en regiones de difícil acceso, permitiendo el envío y recepción de mensajes y datos críticos entre centros de salud y hospitales. Este prototipo busca responder a la pregunta sobre las capacidades de la Radio Definida por Software (SDR) en contextos rurales con infraestructura limitada.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Analizar los canales libres en el espectro radioeléctrico mediante pruebas de caracterización del terreno para ajustar los parámetros de transmisión del SDR, evaluando la viabilidad de comunicación en zonas rurales seleccionadas.

Configurar y validar la funcionalidad básica del sistema SDR para la transmisión y recepción de datos médicos esenciales, verificando la integridad y calidad de los mensajes transmitidos en condiciones de campo.

Comprobar la operatividad del sistema en el entorno rural durante la fase de pruebas, asegurando que funcione dentro de los límites de ancho de banda y frecuencia disponibles.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Espectro Electromagnético**

Conjunto de todas las frecuencias posibles de la radiación electromagnética, desde campos estáticos y ondas de radio hasta infrarrojo, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos  $\gamma$ . Estas ondas son oscilaciones acopladas de campos eléctricos y magnéticos que se propagan en el vacío (y en medios materiales) a la velocidad de la luz. Por razones científicas y técnicas, el espectro se divide en regiones de frecuencia con propiedades y usos diferenciados como comunicaciones inalámbricas, teledetección y astronomía, diagnóstico y terapia médica, entre otros (Couch, 2013).

#### ***2.1.1 Espectro Radioeléctrico***

El espectro radioeléctrico es el conjunto de ondas electromagnéticas, aproximadamente entre 3 kHz y 300 GHz, que se propagan por el espacio sin guía artificial. Es un bien público, estratégico y escaso, cuyo uso exige planificación, asignación y control técnico para evitar interferencias y maximizar el bienestar social mediante un uso eficiente. En Colombia, la gestión se realiza de forma coordinada por el MinTIC y la ANE (Couch, 2013).

#### ***2.1.2 Espectro TVWS***

Se refiere a porciones del espectro radioeléctrico inicialmente destinadas a la radiodifusión televisiva, pero que se encuentran sin uso en una zona geográfica determinada. Estas bandas se sitúan principalmente entre 470 MHz y 698 MHz, dentro del rango UHF, y pueden ser

aprovechadas por equipos de comunicación sin licencia siempre que no interfieran con los servicios de televisión activos ni otros usuarios primarios (Agencia Nacional del Espectro, s.f.).

## **2.2 Muestreo en sistemas SDR**

En un sistema de Radio Definida por Software (SDR), la señal capturada por la antena es una señal analógica, continua en el tiempo. Para poder procesarla digitalmente, el receptor emplea un conversor analógico–digital (ADC) que realiza muestreo, es decir, toma mediciones de la señal a intervalos regulares de tiempo. La cantidad de muestras tomadas por segundo se denomina tasa de muestreo o *sample rate* y se representa como  $f_s$  (Hz). El resultado del muestreo es una secuencia discreta  $x[n]$  que conserva la información de la señal original, siempre y cuando la tasa de muestreo sea adecuada para el contenido espectral presente en la señal (Oppenheim & Schaffer, 2010).

### **2.2.1 Aliasing en sistemas SDR**

Es un efecto del muestreo que ocurre cuando la señal analógica contiene componentes de frecuencia superiores al límite que puede representar el sistema digital. En ese caso, dichas componentes no desaparecen: se reflejan o se pliegan hacia frecuencias más bajas dentro del espectro digital, generando componentes aparentes que pueden interpretarse erróneamente como señales reales. Es crítico en aplicaciones de monitoreo de espectro, como TVWS, porque puede producir ocupación espectral falsa o distorsionar la magnitud de señales existentes (Oppenheim & Schaffer, 2010).

### 2.2.2 Teorema de Muestreo de Nyquist–Shannon

El fundamento matemático que formaliza el muestreo es el Teorema de Nyquist–Shannon. Este establece que, si una señal está limitada en banda y su máxima frecuencia es  $f_{max}$ , entonces para reconstruirla sin ambigüedad debe muestrearse a una tasa que se calcula a partir de:

$$f_s > 2f_{max} \quad (1)$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo y  $f_{max}$  es la frecuencia máxima, la ecuación 1 garantiza que el espectro de la señal muestreada no se solape consigo mismo, evitando el aliasing en el caso ideal de filtrado perfecto. En SDR, esta relación es clave para justificar la elección de  $f_s$  y la necesidad de filtrado, especialmente cuando se realizan barridos por ventanas de ancho fijo, como  $+\frac{f_s}{2}$  o  $-\frac{f_s}{2}$  alrededor de una frecuencia central (Oppenheim & Schaffer, 2010).

### 2.2.3 Resolución en frecuencia y relación con la FFT

Para analizar el espectro de una señal muestreada, se utiliza la Transformada Discreta de Fourier (DFT), implementada de forma eficiente mediante la FFT. Si se toman N muestras a tasa  $f_s$ , la FFT divide el espectro en N contenedores o *bins* (Oppenheim & Schaffer, 2010). La separación entre *bins*, llamada resolución en frecuencia se aproxima por la ecuación 2:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2)$$

donde  $\Delta f$  es la resolución,  $f_s$  la frecuencia de muestreo y N el número de muestras. En consecuencia, aumentar N mejora la resolución espectral (*bins* más estrechos), pero también implica observar la señal durante un intervalo de tiempo mayor, para poder calcular tal intervalo se utiliza la ecuación 3:

$$T = \frac{N}{f_s} \quad (3)$$

donde  $T$  es el periodo,  $N$  el número de muestras y  $f_s$  la frecuencia de muestreo. En mediciones reales, además de  $\Delta f$ , la resolución efectiva depende del tipo de ventana utilizada y del promediado, y por eso en los analizadores de espectro se suele seleccionar un RBW (Resolution Bandwidth) del mismo orden de magnitud que  $\Delta f$  para asegurar coherencia entre mediciones realizadas con instrumentos distintos (Oppenheim & Schaffer, 2010).

## 2.3 Modulaciones Digitales

Procesos mediante los cuales una señal digital se mapea a un conjunto finito de formas de onda variando uno o más parámetros de una portadora sinusoidal, amplitud, fase y/o frecuencia, para transmitir información a través de un canal físico. El esquema de modulación define la constelación (conjunto de símbolos), la tasa de símbolos, el ancho de banda ocupado y el desempeño en tasa de error de bit (BER); Se evalúan por su eficiencia espectral, robustez al ruido y a la interferencia, y complejidad de implementación (Proakis & Salehi, 2008).

### 2.3.1 Modulación GMSK

La modulación GMSK es una técnica de modulación digital basada en el esquema de Minimum Shift Keying (MSK), la aplicación de un filtro paso bajo con respuesta gaussiana a la señal de datos antes de la modulación. Este filtro suaviza las transiciones de la señal, reduciendo la energía en las bandas laterales y mejorando la eficiencia espectral del sistema. Una característica clave de GMSK es que es una modulación de fase continua, lo que significa que no presenta

discontinuidades de fase, lo que la hace menos susceptible a interferencias y más eficiente en términos de uso del espectro. Esta modulación es especialmente adecuada para aplicaciones que requieren una transmisión eficiente de datos en entornos con limitaciones de ancho de banda y potencia, como en comunicaciones móviles y sistemas de comunicación en áreas rurales o de difícil acceso (Proakis & Salehi, 2008).

### ***2.3.2 Modulación FSK***

La modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) es una técnica de modulación digital en la que la información se transmite variando la frecuencia de la señal portadora, asignando diferentes frecuencias a cada símbolo de datos. Es una de las formas más simples de modulación digital, utilizada en aplicaciones como sistemas de comunicación de módems, radio digital y el estándar GSM. Su principal ventaja es su robustez frente al ruido, ya que permite mantener una amplitud constante, lo que la hace adecuada para entornos con interferencias (Proakis & Salehi, 2008).

### **2.4 GNU Radio Companion (GRC)**

Es una interfaz gráfica para diseñar y configurar sistemas de radio definidos por software (SDR) mediante diagramas de flujo (flowgraphs). Se construye una cadena de procesamiento conectando bloques funcionales como filtros, FFT, moduladores/demoduladores, decimadores/interpoladores y bloques para hardware como USRP 2920. Cada bloque incluye parámetros configurables como frecuencia de muestreo, ganancias, frecuencias centrales, anchos de banda, entre otros, lo que permite prototipar, modificar y depurar rápidamente aplicaciones de

recepción, transmisión y análisis de espectro. Una vez diseñado el flowgraph, GRC lo traduce automáticamente a un script ejecutable (normalmente en Python) que utiliza las librerías de GNU Radio para ejecutar el procesamiento en tiempo real o en modo offline (GNU Radio, 2025).

### **3. Alcance Proyecto**

El alcance de este proyecto se centra en el diseño e implementación de un prototipo de un sistema de comunicación basado en Radio Definida por Software, SDR, para la transmisión de información en canales libres del espectro de TVWS, con el propósito de ofrecer una alternativa de conectividad a comunidades rurales con infraestructura limitada. En este contexto, el prototipo se orienta a el envío de datos médicos, como mensajes de texto o imágenes, entre un lugar rural remoto y un centro hospitalario de referencia, haciendo uso de recursos del espectro y equipamiento SDR.

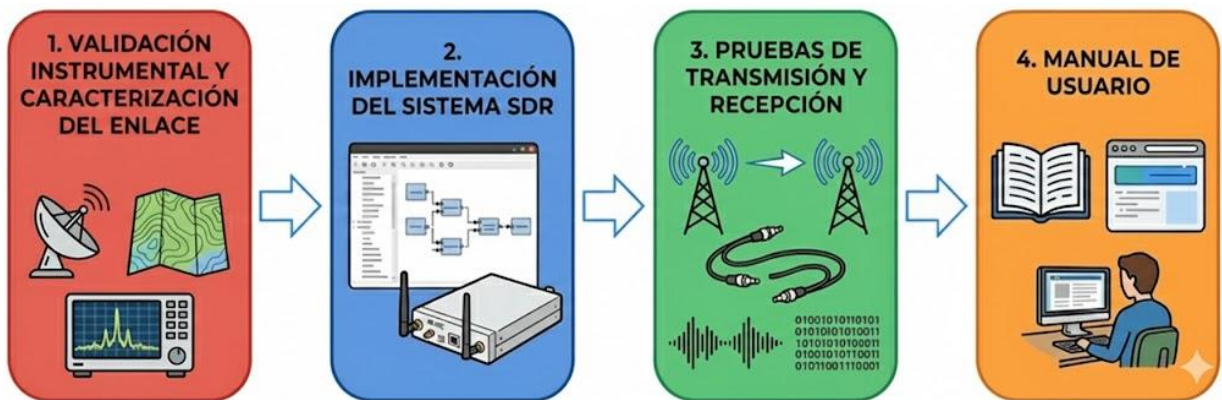
Para ello, el proyecto abarca la identificación y análisis de canales libres en TVWS, la configuración y validación de un enlace SDR y la evaluación de su desempeño mediante pruebas de transmisión y recepción tanto en simulación como con hardware real con ayuda de USRP-2920 y HackRF One. Dentro de este marco, se considera la comparación de dos tipos de modulación como parte del proceso de validación, centrándose exclusivamente en demostrar la funcionalidad y la viabilidad técnica del prototipo en entornos experimentales controlados. No se incluyen en esta etapa actividades de despliegue a escala, integración operativa con sistemas clínicos ni estudios regulatorios exhaustivos; dichas líneas de trabajo quedan planteadas como trabajos de continuación o fases futuras del proyecto.

### 4. Metodología

La Figura 1 sintetiza las cuatro fases desarrolladas en el trabajo. En la fase 1, se verificó la coherencia entre las mediciones obtenidas con instrumentos del laboratorio y el sistema SDR, garantizando la confiabilidad del análisis espectral. La fase 2 abordó la identificación de canales mediante barridos espectrales en la banda TVWS y detección de ocupación. La fase 3 comprendió la implementación y validación del sistema SDR en simulación y en pruebas reales, evaluando el desempeño del enlace mediante modulaciones FSK y GMSK. Finalmente, la fase 4 se enfocó en el desarrollo de la interfaz web con su respectivo manual de usuario, facilitando la operación, comprensión y replicabilidad del prototipo. Cada etapa constituyó un hito de control crítico asegurando el cumplimiento de los objetivos planteados.

**Figura 1**

*Las 4 fases metodológicas empleadas para el desarrollo del proyecto.*







*Nota: Estructura metodológica del proyecto: Fase 1 valida la cadena de medición SDR y caracteriza el enlace mediante Longley–Rice; Fase 2 implementa el barrido espectral automatizado en TVWS; Fase 3 valida el enlace FSK/GMSK en simulación y con hardware real; Fase 4 desarrolla la interfaz web tipo chat y el manual de usuario.*

**4.1 Fase 1: Validación instrumental y caracterización de enlace**

Esta primera fase tuvo como objetivo establecer una base confiable para el análisis del sistema SDR, Software Defined Radio, abordando dos aspectos complementarios: (i) la validación instrumental del equipo de adquisición espectral, y (ii) la caracterización del enlace radioeléctrico en un entorno rural representativo. Se utilizaron los dispositivos y elementos que se muestran en la Tabla 1 y la Tabla 2 respectivamente.

**Tabla 1**





*Dispositivos utilizados en el proyecto.*

Dispositivos				
Nombre	USRP-2920	HackRF One	R&S SMB100A	R&S FPC1000
Tipo de dispositivo	Transceptor SDR dúplex	Transceptor SDR half-dúplex	Generador de señales RF	Analizador de Espectros
Rango de frecuencia RF	50 MHz – 2,2 GHz	1 MHz – 6 GHz	9 kHz – 6 GHz	5 kHz – 1 GHz
Ancho de banda	20 MHz	Hasta 20 MS/s de muestreo	N/A	Depende del SPAN configurado
Maximum I/Q sample rate	25 MS/s 16-bit	20 MS/s 8-bit	N/A	N/A
Resolución	16 bits (I/Q)	8 bits (I/Q)	0.01 Hz y 0.01 dB	1 Hz a varios MHz

*Nota: Dispositivos utilizados en el proyecto: transceptores SDR (USRP-2920 y HackRF One) para adquisición y transmisión; generador de señales R&S SMB100A para validación; analizador de espectros R&S FPC1000 como instrumento patrón de referencia.*

**Tabla 2**

*Elementos utilizados en el proyecto.*

Elemento	Referencia modelo	Atenuación	Rango de frecuencia	Impedancia	Longitud
Cable coaxial 	LMR400	26.70 dB	Hasta 6 GHz	50 Ω	24.38 m
Cable coaxial 	R&S ZV-Z191	< 1 dB	Hasta 18 GHz	50 Ω	610 mm
Atenuador 	VAT-30	30 dB	Aplicación en RF	50 Ω	N/A
Antena (TX/RX) 	Omnidireccional		400 MHz a 1 GHz	50 Ω	N/A

*Nota: Componentes de la cadena RF con sus respectivas contribuciones al presupuesto de enlace. El LMR400 fue seleccionado por su bajo factor de atenuación relativo (26.7 dB en 24.38 m) adecuado para frecuencias UHF. El atenuador de 30 dB protege el receptor cumpliendo la recomendación del fabricante. Las antenas omnidireccionales cubren el rango TVWS completo (470–698 MHz).*

En primer lugar, se realizó una verificación en el laboratorio mediante la comparación entre mediciones obtenidas con el analizador de espectros que se muestra en la Tabla 1, este fue el instrumento patrón y aquellas adquiridas a través del sistema SDR, empleando señales controladas

generadas en tres frecuencias dentro de la banda TVWS. Este procedimiento permitió comprobar la coherencia entre ambos instrumentos y validar la cadena de adquisición implementada.

Posteriormente, con el fin de contextualizar el desempeño esperado del sistema en un escenario real de operación, se llevó a cabo una caracterización del enlace mediante simulación computacional. Para ello se empleó el modelo de propagación Longley–Rice, considerando un enlace representativo en el municipio de Mogotes, Santander, lo cual permitió estimar las pérdidas de trayecto asociadas al terreno y fundamentar la selección de parámetros operativos del sistema como frecuencia y potencia.

#### ***4.1.1 Comparación analizador de espectros vs. SDR con señal controlada***

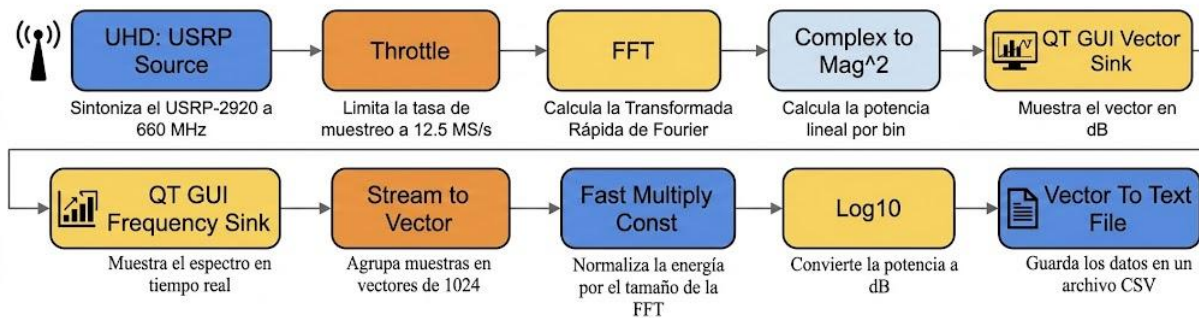
Con el propósito de validar la capacidad del sistema SDR para adquirir y reconstruir correctamente el espectro radioeléctrico, se diseñó una prueba en laboratorio bajo condiciones controladas. Se transmitió una señal portadora de prueba mediante el generador de señales, seleccionando tres frecuencias representativas dentro de la banda TVWS, 500 MHz, 590 MHz y 660 MHz. Estas frecuencias fueron elegidas para cubrir puntos distribuidos a lo largo del rango de la banda de interés. La señal generada se dirigió simultáneamente hacia dos rutas de medición independientes:

- Ruta A (referencia): Medición directa con analizador de espectros. Se configuró un Resolution Bandwidth (RBW) apropiado y la traza espectral se exportó en archivo CSV.
- Ruta B (SDR): La misma señal se conectó al USRP-2920, realizando la adquisición mediante un flujograma implementado en GNU Radio (Figura 2) y los vectores de

magnitud espectral se almacenaron en formato CSV para reconstrucción posterior del espectro. (GNU Radio, s.f.)

**Figura 2**

*Diagrama de bloques implementado en GNU Radio.*



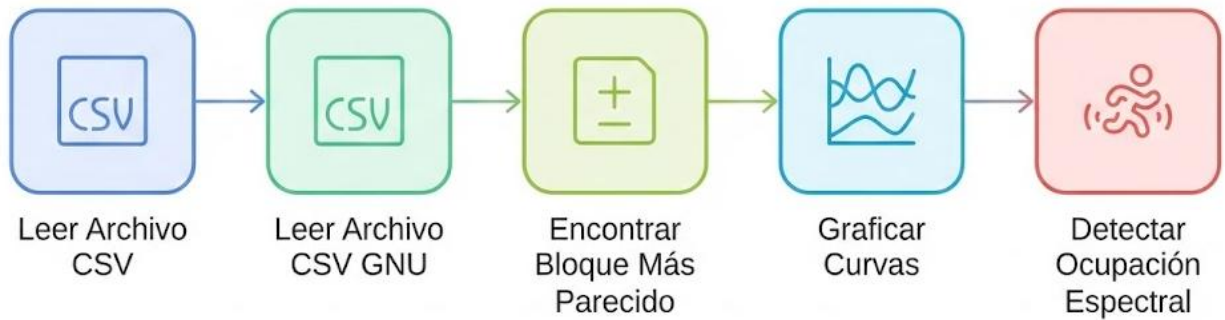
*Nota: Implementación en GNU Radio del sistema de validación instrumental descrito en la sección 4.1.1. La cadena procesa la señal del USRP-2920 (12.5 MHz, 1024 FFT) y genera vectores de magnitud espectral comparables con el analizador R&S FPC1000. Los archivos CSV generados se procesaron mediante el script de Python para calcular correlación de Pearson.*

#### 4.1.2 Preprocesamiento y comparación de espectros

Para el análisis se implementó un script de procesamiento en Python (Google Colab), que se resume en el esquema de la Figura 3, orientado a comparar la traza del analizador (Ruta A) con los vectores espectrales reconstruidos desde la adquisición SDR (Ruta B), descritos en la sección 4.1.1.

**Figura 3**

*Esquema de comparación de barridos en frecuencia.*



*Nota: Algoritmo de posprocesamiento para validación instrumental. Lectura de archivos CSV (analizador y SDR), selección del bloque más correlacionado (coeficiente de Pearson), gráfica superpuesta de espectros para verificación visual y aplicación de umbral adaptativo para detección de ocupación espectral.*

El flujo de trabajo se ejecutó por cada frecuencia evaluada e incluyó:

- Lectura y limpieza del CSV del analizador: Se identificó automáticamente la fila de inicio de datos (marcador "Frequency"), se extrajeron las columnas de frecuencia [Hz] y magnitud [dBm], y se eliminaron entradas vacías o no numéricas.
- Normalización de magnitud: Se estandarizó de la traza del analizador (media cero y varianza unitaria) para habilitar comparaciones robustas frente a cambios de escala.
- Extracción de metadatos del archivo SDR: Del archivo generado por GNU Radio durante el barrido se extrajeron la frecuencia central  $f_c$ , la tasa de muestreo  $f_s$  y la longitud del vector N. Como la captura corresponde a una señal compleja en banda base, obtenida al

sintonizar el receptor en  $f_c$  y centrar su eje de frecuencias en 0 Hz, el espectro calculado con la FFT queda en el rango  $-\frac{f_s}{2}$ ,  $+\frac{f_s}{2}$ . Para expresarlo en frecuencia absoluta (RF) se desplazó ese eje sumando  $f_c$ , reconstruyendo así un vector equiespaciado entre  $f_c - \frac{f_s}{2}$  y  $f_c + \frac{f_s}{2}$ .

- Selección del bloque representativo mediante correlación de Pearson: Se normalizó cada bloque y se calculó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre cada bloque.
- Generación de salidas gráficas comparativas: Se generaron gráficos superpuestos (Ruta A vs. Ruta B) para inspección visual de la concordancia espectral.

El fundamento teórico del coeficiente de correlación de Pearson y su aplicación en la selección de bloques representativos se presenta en detalle en el (Apéndice G).

#### ***4.1.3 Detección de ocupación espectral***

Como parte del posprocesamiento, se implementó un detector de ocupación espectral basado en detección de energía con un umbral adaptativo. Este método permite identificar automáticamente qué segmentos del espectro están ocupados por señales reales y cuáles corresponden únicamente a ruido de fondo (Gorcin & Arslan, 2010). Se realizó lo siguiente:

- Suavizado mediante promedio móvil, cada punto se promedió con sus vecinos para reducir ruido y se utilizó padding reflectado para evitar distorsión en los extremos.
- Estimación del piso de ruido usando un porcentaje de las muestras de menor magnitud, calculando su promedio  $\mu_{\text{ruido}}$  y su desviación estándar  $\sigma_{\text{ruido}}$ .
- Cálculo de un umbral adaptativo definido como:

$$\text{umbral } \lambda = \mu_{\text{ruido}} + k\sigma_{\text{ruido}} \quad (4)$$

donde  $\mu_{\text{ruido}}$  es el promedio,  $\sigma_{\text{ruido}}$  desviación estándar y  $k=2.5$  es el factor de confianza, el cual ayuda a detectar señales débiles y evita clasificar ruido como canal ocupado, con un nivel de confianza del 98.76%. Dirigirse al (Apéndice G) para abordar más el tema.

- Agrupación y filtrado de canales ocupados, se identificaron segmentos consecutivos cuya magnitud supera el umbral, descartando detecciones con ancho menor a 2MHz, ya que picos estrechos corresponden a interferencias puntuales no a canales ocupados.

#### ***4.1.4 Caracterización del enlace radioeléctrico mediante Longley–Rice en MATLAB***

Con el fin de contextualizar el desempeño esperado del sistema SDR en un entorno de operación realista, se llevó a cabo una caracterización del enlace radioeléctrico mediante simulación computacional. Esta actividad complementó la validación instrumental realizada en laboratorio descrita en la sección 4.1.3, permitiendo establecer un marco de referencia para la selección de parámetros operativos del sistema en un escenario rural representativo. El objetivo fue estimar la pérdida de trayecto (**PL**), definida como la atenuación total en (dB) que experimenta la señal al propagarse desde el transmisor hasta el receptor. Esta pérdida se calcula considerando los efectos del terreno como topografía, distancia de enlace, alturas relativas y condiciones atmosféricas y del suelo. El análisis permitió fundamentar decisiones sobre potencia de transmisión, ganancia y márgenes de enlace necesarios para garantizar la viabilidad del sistema en condiciones reales.

El estudio se realizó sobre un enlace representativo en el municipio de Mogotes, Santander, entre un transmisor ubicado en la zona de “*El Medio*” y un receptor situado en el “*ESE Hospital*”

*San Pedro Claver*”. Las coordenadas geográficas de ambos sitios se definieron previamente para su uso en la simulación, garantizando una representación fiel del entorno real, como se puede observar en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Coordenadas geográficas del transmisor y receptor para la caracterización de terreno.*

Sitio	Latitud	Longitud	Altura de antena sobre el terreno [m]
Tx – El Medio, Mogotes	6.4658438	-72.99195608148587	30
Rx – Hospital San Pedro Claver	6.4784848	-72.97264000422128	10

*Nota: Ubicaciones geográficas para caracterización de propagación con Longley–Rice (Fase 1). TX en zona rural El Medio y RX en Hospital San Pedro Claver, Mogotes, Santander.*

La distancia del enlace entre ambos sitios se calculó mediante la función “*distance*” de MATLAB, empleando el elipsoide de referencia WGS84 (World Geodetic System 1984). Este modelo considera la forma elipsoidal de la tierra, garantizando mayor precisión que aproximaciones esféricas (MathWorks, 2024).

$$d = distance(\varphi_{TX}, \lambda_{TX}, \varphi_{RX}, \lambda_{RX}, WGS84) \quad (3)$$

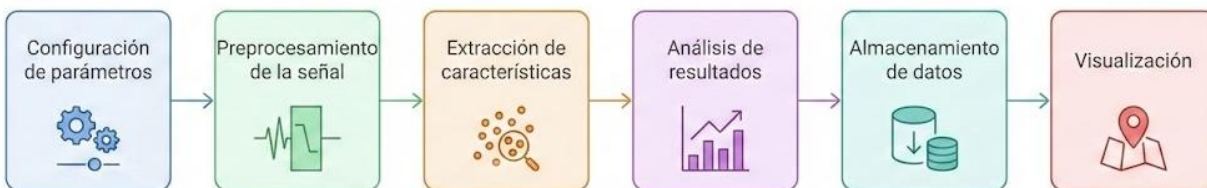
donde  $d$  es la distancia en metros [m],  $\varphi_{TX}, \lambda_{TX}$  son la latitud y longitud del transmisor,  $\varphi_{RX}, \lambda_{RX}$  son la latitud y longitud del receptor y WGS84 que es el elipsoide de referencia. Esta distancia representa el trayecto de la sección de elipse que debe recorrer la señal entre TX y RX, considerando la curvatura de la Tierra. Es importante destacar que la distancia del enlace ( $d$ ) no

es lo mismo que la pérdida de trayecto ( $PL$ ), la primera es una magnitud geométrica en kilómetros, mientras que la segunda es una magnitud energética en decibelios que cuantifica la atenuación de la señal al recorrer esa distancia en un entorno específico.

La caracterización del canal se realizó mediante el modelo de propagación Longley–Rice, implementado en MATLAB a través de la función `propagationModel`, el algoritmo implementado se puede resumir en el esquema de la Figura 4 (MathWorks, 2024).

**Figura 4**

*Flujo del algoritmo de Matlab*



*Nota: Algoritmo MATLAB para Longley–Rice: configuración del enlace Mogotes (Tabla 3), procesamiento con GMTED2010, cálculo de pérdida  $PL$ , almacenamiento de resultados y visualización de mapa de cobertura.*

Este modelo permite estimar la pérdida de trayecto ( $PL$ ) considerando los efectos de terreno integrando datos de elevación del terreno con modelo digital GMTED2010. Para la simulación se fijó una frecuencia de operación coherente con la banda TVWS, y alturas de antena de 30 m para el transmisor y 10 m para el receptor, representativas de un escenario rural típico. Asimismo, se

emplearon valores estándar para los parámetros del entorno, incluyendo conductividad del terreno, permitividad relativa y refractividad atmosférica.

Los resultados de pérdida de trayecto obtenidos mediante Longley–Rice se interpretan con ayuda del presupuesto de enlace, el cual constituye el modelo analítico que relaciona las variables del sistema de transmisión y recepción. Dicho presupuesto se expresa mediante:

$$P_r \text{ [dBm]} = P_t + G_t + G_r - PL - L_{\text{misc}} \quad (6)$$

donde  $P_r$  corresponde a la potencia recibida,  $P_t$  a la potencia transmitida,  $G_t$  y  $G_r$  a las ganancias de transmisión y recepción respectivamente,  $PL$  a la pérdida de trayecto estimada por el modelo de propagación, y  $L_{\text{misc}}$  agrupa pérdidas adicionales asociadas a cables, conectores y desadaptaciones.

#### 4.2 Fase 2: Implementación del sistema SDR

Una vez caracterizado el entorno espectral y el comportamiento del enlace, se inició la Fase 2, que tuvo como propósito principal configurar, ejecutar y automatizar un barrido sistemático del espectro TVWS, empleando el también mismo flujograma que se observa en la Figura 2 y el analizador de espectro como patrón. La implementación experimental se realizó utilizando el dispositivo USRP-2920, junto con una antena adecuada para la banda de interés. Allí se identificaron los canales libres con baja interferencia, que posteriormente pudieran ser utilizados para pruebas de transmisión de datos. Para el proyecto nos regimos en la normatividad (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), 2016) y (Congreso de la República de Colombia, 2009).

#### 4.2.1 Configuración espectral y resolución de análisis

Con el fin de asegurar una cobertura continua del espectro asociado a TVWS y una resolución adecuada para la detección de ocupación, el sistema SDR se configuró con una frecuencia de muestreo de  $f_s = 12,5$  MHz. Esta elección se fundamenta en las capacidades de adquisición en banda base I/Q del USRP-2920 reportadas por el fabricante (National Instruments, 2013) con el propósito de capturar un ancho de banda suficientemente amplio por ventana.

Sobre las muestras adquiridas se aplicó una Transformada Rápida de Fourier (FFT) de longitud  $N=1024$ , la cual define la resolución teórica dada por la ecuación 3, que aplicándola se obtuvo:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{12.5 \text{ MHz}}{1024} \approx 12.2 \text{ kHz} \quad (7)$$

donde  $\Delta f$  es la resolución,  $f_s$  la frecuencia de muestreo y  $N$  el número de muestras. Esta resolución fue considerada adecuada para el análisis del espectro TVWS. Para mantener una buena relación entre la medición SDR y el analizador de espectro, en el cual se fijó un Resolution Bandwidth (RBW) práctico cercano a 10 kHz, valor representativo y comparable con la resolución obtenida mediante la FFT. (Apéndice I)

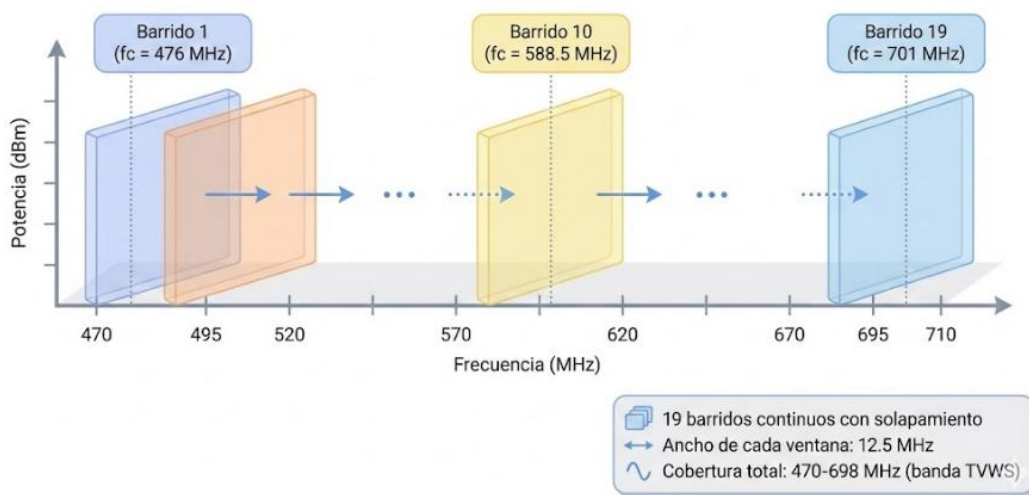
#### 4.2.2 Diseño del barrido espectral

El barrido completo de la banda TVWS se diseñó en 19 segmentos contiguos y con solape, cada uno centrado en una frecuencia distinta, con el objetivo de cubrir de manera continua el rango de interés (470–698 MHz) sin dejar vacíos entre ventanas consecutivas. Dado que cada adquisición con el SDR observa un ancho de banda de 12.5 MHz esto es,  $\pm 6.25$  MHz alrededor de  $f_c$ , las frecuencias centrales se seleccionaron de forma que los extremos de las ventanas adyacentes se superpusieran ligeramente y garantizando continuidad espectral al concatenar los resultados,

minimizando discontinuidades en los bordes de cada captura. Este esquema también resulta pertinente porque la canalización convencional en UHF para radiodifusión televisiva se organiza en canales del orden típicamente 6 MHz, por lo que una ventana de 12,5 MHz permite observar simultáneamente más de un canal potencial o porciones relevantes de canales contiguos, manteniendo una uniformidad espectral suficiente para discriminar ocupación dentro de cada bloque. La distribución de frecuencias centrales y el solape utilizado se muestran en la Figura 5 (Agencia Nacional del Espectro, s.f.).

**Figura 5**

*Paquete de frecuencias para el barrido del espectro de la TVWS.*



*Nota: Estrategia de muestreo sistemático para identificación de canales libres. Las 19 ventanas con solapamiento evitan discontinuidades en los bordes causadas por efectos de ventaneo de la FFT. Cada adquisición de 12.5 MHz permite observar múltiples canales de TV (típicamente 6 MHz).*

#### ***4.2.3 Adquisición de datos con SDR y analizador de espectro***

Cada uno de los 19 barridos se ejecutó mediante el mismo esquema implementado en la fase 1, cuyo archivo se denominó “prueba\_barrido.grc” (Figura 2). En cada ejecución se fijó una frecuencia central distinta y se adquirió el espectro correspondiente a la ventana de  $\pm 6.25$  MHz. Este flujograma permitió obtener vectores de magnitud en el dominio de la frecuencia y exportarlos en formato CSV, junto con los parámetros necesarios para reconstruir el eje de frecuencias que son: frecuencia central, tasa de muestreo y longitud del vector.

De forma paralela, para cada frecuencia central se realizó una medición independiente con el analizador de espectro, configurado con un RBW nominal de 10 kHz, y se exportó igualmente un archivo CSV con frecuencia y magnitud. Así, para cada barrido se generó una pareja de archivos (SDR vs. analizador), lo cual permitió una validación posterior por comparación directa entre ambos instrumentos.

#### ***4.2.4 Automatización del proceso de barrido***

Con el fin de garantizar la reproducibilidad, reducir la intervención manual y evitar errores operativos, se desarrolló un paquete de automatización para la ejecución secuencial de los barridos. A partir del flujograma base “prueba\_barrido.grc”, se generaron scripts individuales en Python asociados a cada frecuencia central, por ejemplo:

- *prueba\_barrido\_476M.py*

El control de la ejecución se realizó mediante un script maestro denominado “maestro.py”, el cual actúa como controlador central del proceso. Este script contiene una lista ordenada con los 19 barridos y se encarga de:

- Ejecutar cada script de forma secuencial mediante llamadas al sistema (subprocess.run)
- Controlar los tiempos de espera entre ejecuciones
- Verificar el código de salida de cada barrido
- Organizar los archivos CSV generados en carpetas con su respectivo nombre

Gracias a este esquema, se eliminó la necesidad de ejecutar manualmente cada flujograma, asegurando una adquisición consistente y repetible a lo largo de toda la banda analizada. El procesamiento posterior de los datos adquiridos se realizó en el cuaderno “FinalBarridoFrecuencias.ipynb”, cuyo flujo general se resume en el diagrama presentado en la Figura 6.

**Figura 6**

*Diagrama del algoritmo.*



*Nota: Algoritmo de análisis espectral para Fase 2. Carga archivos CSV, alinea espectros SDR/analizador, aplica suavizado (promedio móvil), reconstruye eje de frecuencias, estima piso de ruido, detecta ocupación con umbral  $\lambda = \mu + 2.5\sigma$  y genera salidas gráficas.*

### **4.3 Fase 3: Validación del enlace de comunicación mediante simulación y pruebas experimentales**

Una vez identificadas las frecuencias libres en la banda TVWS descrito en la Fase 2, esta fase tuvo como objetivo validar la funcionalidad del sistema de comunicaciones SDR mediante la implementación y evaluación de los esquemas de modulación digital: FSK (Frequency Shift Keying) y GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). La validación se realizó en dos etapas complementarias: (i) simulación computacional con modelado de canal y cálculo de métricas de desempeño, y (ii) pruebas experimentales con hardware SDR en condiciones reales de operación. El propósito fue verificar la integridad de la información transmitida como mensajes de texto e imágenes y comprobar la correcta operación de la arquitectura de enlace implementada, empleando los dispositivos USRP-2920 y HackRF One (Tabla 1).

#### ***4.3.1 Arquitectura del protocolo de enlace***

Esta parte del proyecto se basó del contenido del trabajo de (Ruiz Torres, Fuquen Gil, & Rincón Santana, 2021) y de (Calderón, Cuadros, & Guerrero, 2021) que fueron proyectos finales en la asignatura de comunicaciones II. También está basado en el proyecto: “Diseño e implementación del prototipo de un sistema de comunicaciones satelital”. desarrollado por los ingenieros Andrés Felipe Pérez Rueda y Carlos Andrés Estupiñán Parra, dirigidos por el doctor Homero Ortega Boada (Estupiñán & Perez, 2022).

Con base en esta experiencia previa, se implementaron en GNU Radio flujogramas completos de transmisión y recepción que siguen una arquitectura estructurada en capas (GNU Radio, s.f.). A continuación, se describe el recorrido completo que sigue la información:

Paso 1 – Fuente de información: El proceso inicia con la entrada de datos a transmitir, que pueden ser archivos de texto o imágenes.

Paso 2 – Encapsulación HDLC (High-Level Data Link Control): Los datos se encapsulan en tramas HDLC, añadiendo un preámbulo de 100 bytes al inicio, para sincronización del receptor y un postámbulo de 14 bytes al final. Además, se calcula y añade un código de verificación de redundancia cíclica (FCS, Frame Check Sequence) que permitirá al receptor detectar si la trama llegó corrupta.

Paso 3 – Conversión PDU a Tagged Stream: Las tramas HDLC se estructuran como Protocol Data Units (PDU), que son mensajes completos con metadatos asociados. GNU Radio requiere convertir estos PDUs en un flujo continuo de bytes etiquetados (Tagged Stream) donde cada paquete lleva una etiqueta con su longitud, permitiendo el procesamiento por bloques.

Paso 4 – Scrambling (Aleatorización): Los bits del flujo se "mezclan" mediante un scrambler con polinomio 0x21 y longitud 16. Esta operación rompe patrones repetitivos en los datos (decorrelación), lo cual mejora el desempeño del sincronizador del receptor y distribuye uniformemente la energía espectral de la señal transmitida.

Paso 5 – Codificación NRZI (Non-Return-to-Zero Inverted): Se aplica una codificación diferencial donde un "1" lógico produce un cambio de estado (0→1 o 1→0) y un "0" lógico mantiene el estado anterior. Esta técnica hace que la señal sea insensible a inversiones de polaridad durante la transmisión.

Paso 6 – Empaquetado (Pack K Bits): Los bits se agrupan en símbolos de 8 bits (bytes) para facilitar el procesamiento por los bloques de modulación.

Paso 7 – Modulación digital (GMSK o FSK): Los símbolos se modulan usando GMSK, con filtro gaussiano de  $BT=0.5$  (Bandwidth-Time Product) o FSK con filtro gaussiano de  $BT=0.35$ , generando una señal compleja en banda base I/Q. (Oppenheim & Schaffer, 2010)

Paso 8 – Transmisión RF: La señal modulada se envía al hardware SDR: USRP-2920 mediante el bloque UHD Sink y HackRF One mediante el bloque Osmocom Sink. El dispositivo convierte la señal digital I/Q a señal analógica RF y la transmite por cable coaxial o antena.

La cadena de recepción implementó las operaciones inversas en orden simétrico: adquisición desde hardware SDR, demodulación, decodificación NRZI, descrambling, deenmarcado HDLC con verificación FCS, y reconstrucción del mensaje o imagen original.

Esta arquitectura se mantuvo idéntica en todos los experimentos, variando únicamente: el esquema de modulación/demodulación (FSK o GMSK) y la interfaz de hardware SDR (UHD para USRP-2920, Osmocom para HackRF One).

#### ***4.3.2 Configuración de parámetros***

La Tabla 4 resume los parámetros técnicos configurados para cada esquema de modulación en las dos etapas de validación (simulación y pruebas reales con hardware).

#### **Tabla 4**

*Parámetros de configuración para esquemas de modulación FSK y GMSK en simulación y pruebas experimentales.*

Parámetro	GMSK Simulación	FSK Simulación	GMSK Pruebas Reales TX/RX	FSK Pruebas Reales TX/RX
Producto BT	0.5	0.35	0.5	0.35
Sensitivity	N/A	0.785	N/A	0.785
Samples per-symbol (sps)	4	4	4	4
Sample rate (fs)	250 kS/s	500 kS/s	2 MS/s	2 MS/s
Tasa de bits (Bit rate)	62.5 kbps	125 kbps	500 kbps	500 kbps

*Nota: Parámetros de modulación GMSK y FSK: producto BT, sensitivity, tasa de muestreo y bit rate para simulación y pruebas con hardware.*

A continuación, se explican los parámetros utilizados en esta tercera fase:

- Producto BT (Bandwidth-Time): Controla el compromiso entre ancho de banda espectral y control de interferencia intersimbólica. Valores menores producen señales más compactas espectralmente.
- Sensitivity: Parámetro que controla la separación entre las dos frecuencias utilizadas para representar "0" y "1" en FSK. Se define como:

$$Sensitivity = \frac{2\pi * \Delta f}{symbol\ rate} \quad (8)$$

donde  $\Delta f$  es la desviación de frecuencia en Hz y symbol rate es la tasa de símbolos dada en símbolos/segundo. El valor de sensitivity determina un compromiso crítico entre: (i) robustez ante ruido que hace que sea más fácil distinguir "0" y "1" en presencia de ruido y (ii) eficiencia espectral donde una señal más compacta, ocupa menos ancho de banda.

Por ejemplo, para FSK con symbol\_rate = 500 ksps (500,000 símbolos/segundo) y sensitivity = 0.785:

$$\Delta f = \frac{0.785 * 500 \text{ksps}}{2\pi} = 62.5 \text{kHz} \quad (9)$$

Esto significa que las frecuencias utilizadas para transmitir son: para "0",  $f_c - 62.5 \text{ kHz}$ , para "1"  $f_c + 62.5 \text{ kHz}$  y su separación total entre frecuencias sería de  $125 \text{ kHz}$ .

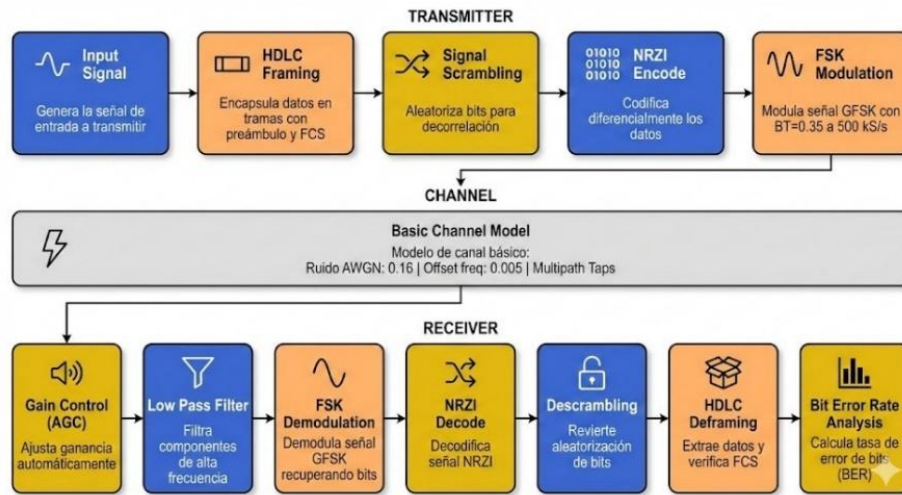
- Sample rate: La diferencia entre simulación (250–500 kS/s) y pruebas reales (2 MS/s) obedeció a limitaciones computacionales en tiempo real y a la necesidad de reducir la carga de procesamiento durante la validación inicial en simulación.
- BER: La tasa de error de bits se calculó únicamente en simulación mediante comparación bit a bit entre secuencias transmitida y recibida. En pruebas reales, la verificación se basó en recuperación funcional de archivos y verificación FCS del protocolo HDLC.

#### ***4.3.3 Evaluación en simulación con modelado de canal y métrica BER***

Previo a las pruebas con hardware, se validó la cadena completa de transmisión/recepción descrita en la sección 4.3.1 mediante simulación en GNU Radio, en la Figura 7 se puede observar el flujograma implementado, manteniendo fija la arquitectura de enlace cambiando únicamente los bloques de modulación/demodulación y Channel Model dependiendo si es FSK o GMSK, los parámetros se encuentran en la Tabla 5. Esta etapa permitió evaluar el desempeño de ambos esquemas de modulación bajo condiciones controladas de canal, así como estimar la tasa de error de bits (BER) como métrica cuantitativa.

#### **Figura 7**

*Flujograma modulación FSK o GMSK simulación.*



*Nota: Arquitectura de simulación FSK/GMSK en GNU Radio: cadena de transmisión (HDLC, scrambler, NRZI, modulación), modelo de canal (AWGN, desvanecimiento) y cadena de recepción (demodulación, descrambling, análisis BER).*

**Tabla 5**

*Parámetros para Channel Model en el flujograma de GNU Radio.*

Parámetro	FSK	GMSK
Tipo de modelo	Canal básico	Canal robusto rural
Ruido AWGN	$\sigma = 0.16$ (SNR $\approx 15.9$ dB)	$\sigma = 0.14$ (SNR $\approx 17.1$ dB)
Offset de frecuencia	0.005	0.005
Propagación multicamino	✓	✓
Pérdida de trayecto [dB]	N/A	118.2
Desvanecimiento por sombra	N/A	✓
Efecto Doppler [Hz]	N/A	20 (movilidad 5 km/h)

*Nota: Configuración del modelo de canal en GNU Radio: FSK evaluado con canal básico, GMSK con canal realista rural aplicando diferentes parámetros como, PL, shadowing, Doppler.*

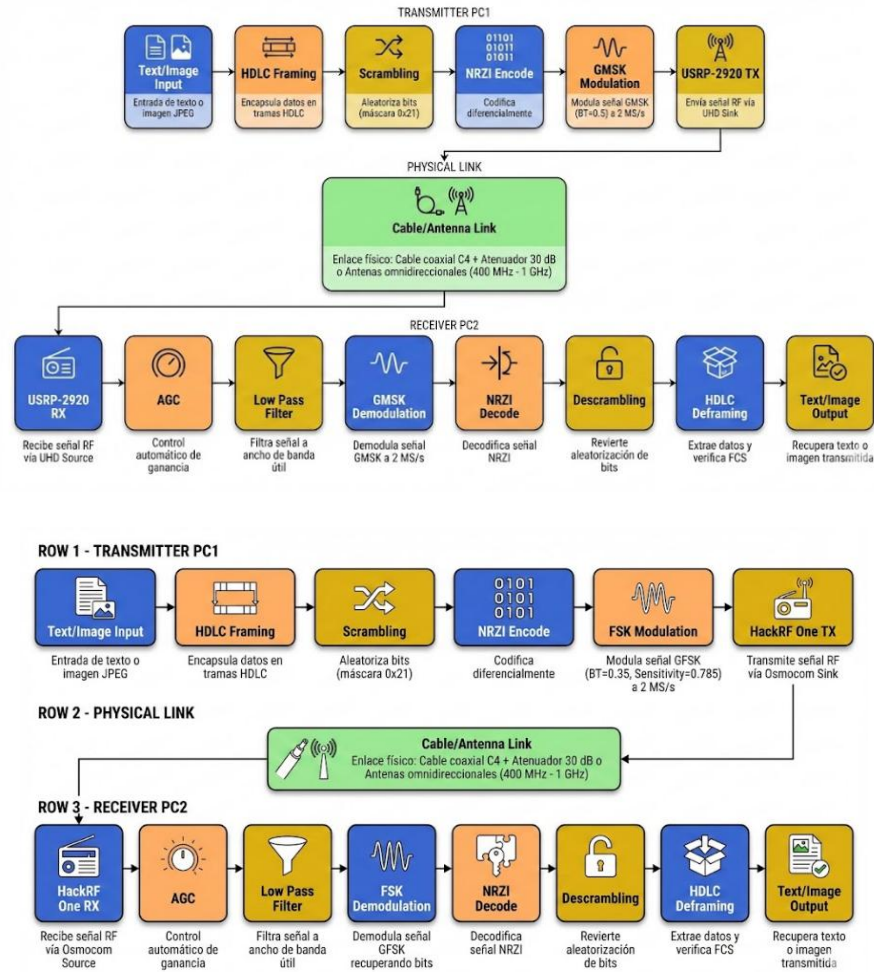
La elección de un canal básico para FSK y uno realista para GMSK se fundamentó en que GMSK es inherentemente más robusto ante propagación multicamino debido a su filtrado gaussiano, por lo cual fue evaluado en el peor escenario posible. FSK, siendo más sensible a offset de frecuencia, se evaluó primero en condiciones idealizadas para caracterizar su desempeño fundamental sin enmascarar limitaciones. Así mismo, se implementó un bloque comparador que correlacionó los bits transmitidos con los bits recibidos después de la demodulación. Para compensar el retardo de grupo introducido por los filtros se aplicó un retardo ajustable (típicamente 24 muestras) a la secuencia de referencia, garantizando sincronización temporal correcta antes de la comparación.

#### ***4.3.4 Pruebas experimentales con hardware SDR***

Una vez validada la cadena de comunicaciones en simulación, se procedió a la implementación y evaluación con los dispositivos SDR (Tabla 1). Las pruebas se realizaron bajo dos configuraciones de enlace: cableado e inalámbrico. La Figura 8 a) muestra el diagrama de bloques implementado para GMSK y la parte b para FSK, donde se observa la arquitectura completa desde el transmisor (PC1) hasta el receptor (PC2), pasando por el enlace físico (cable o antenas).

Figura 8

Diagramas de flujo transmisión/recepción.



Nota: Arquitectura completa del sistema de comunicación implementado en GNU Radio para pruebas con hardware (Fase 3). Incluye transmisor PC1, enlace físico mediante cable/antenas y receptor.

a Diagrama para modulación GMSK con configuración  $BT = 0.5$  y sample rate de 2 MS/s.

b Diagrama para modulación FSK con sensitivity = 0.785 y sample rate de 2 MS/s.

Como primera instancia se realizó el enlace cableado: en el cual se conectó el transmisor y el receptor mediante el cable coaxial denominado C4, para evitar saturación del receptor y mantener la señal dentro del rango dinámico se incorporó el atenuador fijo de 30 dB recomendado por los equipos SDR, ambos elementos se describen en la Tabla 2. Este montaje permitió validar el sistema sin interferencia externa.

Luego se continuó con el enlace inalámbrico: en este, se utilizaron la antena omnidireccional tanto en transmisión como en la recepción (Tabla 2), con un rango operativo aproximado de 400 MHz a 1 GHz, adecuado para las frecuencias de trabajo consideradas en el proyecto.

#### **4.4 Interfaz Web**

El prototipo de comunicación propuesto tiene como objetivo facilitar el acceso a atención médica para personas que se encuentran en lugares de difícil acceso, permitiéndoles comunicarse de manera sencilla e intuitiva con un profesional de la salud. La solución busca reducir las barreras tecnológicas, de modo que cualquier usuario pueda interactuar con el sistema sin requerir conocimientos técnicos avanzados.

Para este fin, se desarrolló una interfaz gráfica basada en **FastAPI** (FastAPI, s.f.), cuyo diseño se asemeja al de una aplicación de mensajería o chat convencional, por medio de **ngrok** que es una plataforma de servicios de red que permite exponer servidores locales, que se encuentran detrás de firewalls, a la Internet pública a través de túneles seguros (ngrok, s.f.). Esta decisión

permite que tanto el paciente como el personal médico se familiaricen rápidamente con la plataforma, favoreciendo una comunicación clara y cómoda entre ambas partes. (Anexo E)

En esta fase del proyecto, el sistema funciona a partir del archivo de simulación (Figura 8), la cual permite evaluar la interacción general y el flujo de comunicación sin necesidad de una implementación completa en tiempo real. Adicionalmente, se desarrolló un manual de uso orientado al usuario, en el cual se explica de manera detallada y paso a paso el funcionamiento de la interfaz, con el fin de garantizar una correcta comprensión y utilización del sistema. Dicho manual se presenta y referencia en el (Anexo F).

## **5. Análisis de Resultados**

### **5.1 Resultados de la validación instrumental y caracterización de enlace**

La validación experimental de la cadena de adquisición SDR se realizó comparando las mediciones obtenidas con el analizador de espectros del laboratorio frente a las señales capturadas mediante el USRP-2920 y procesadas en GNU Radio. Para ello, se generaron señales portadoras controladas a 500 MHz, 590 MHz y 660 MHz, como se muestra en la Figura 9 y en la sección 4.1.

#### **Figura 9**

*Generador de señales, analizador de espectro, USRP 2920 y Google Colab.*

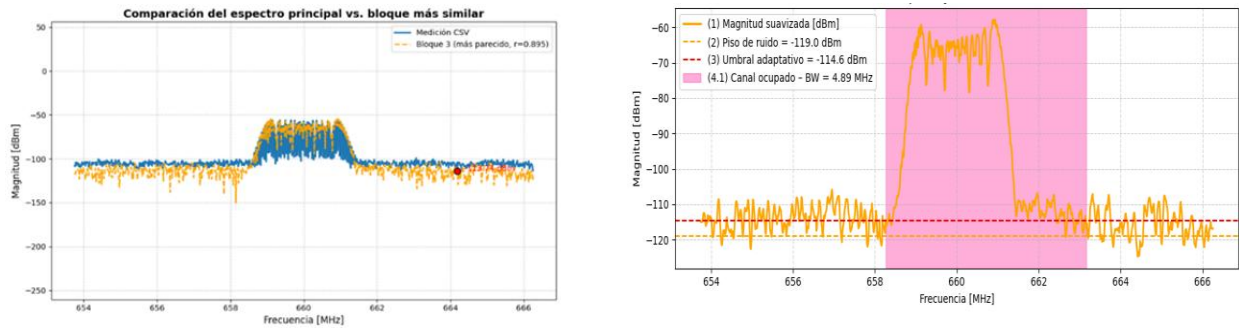


*Nota: Montaje experimental para validación instrumental (Fase 1): generador R&S SMB100A, analizador R&S FPC1000, transceptor USRP-2920 y entorno de procesamiento en Google Colab.*

Las Figura 10 a), Figura 11 a) y Figura 12 a), muestran la superposición entre el espectro medido por el analizador (curva azul) y el bloque más representativo obtenido desde GNU Radio (curva naranja). En los tres casos se observa una coincidencia clara en la forma espectral, el ancho de banda ocupado y el nivel de potencia.

### **Figura 10**

*Comparación del espectro medido con el analizador de espectros vs USRP2920 y detección de ocupación.*



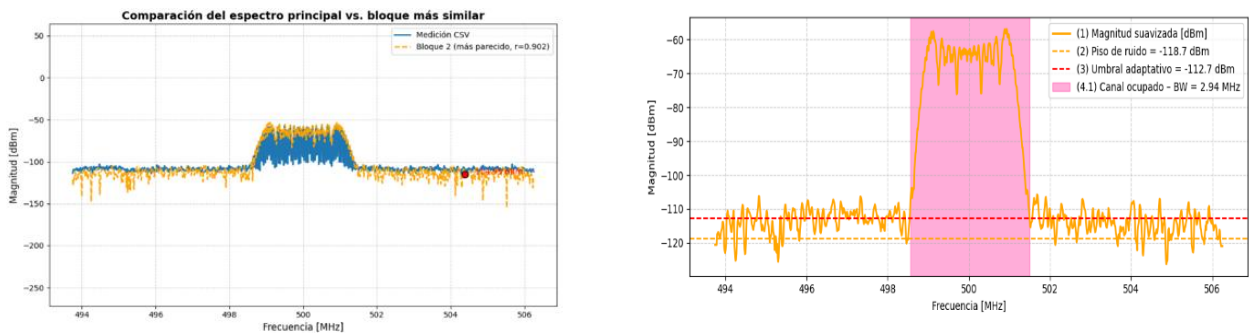
*Nota: Validación instrumental a 660 MHz: comparación espectral entre analizador R&S FPC1000 y USRP-2920 con correlación de Pearson  $r = 0.902$ .*

*a Superposición de espectros medidos (banda  $\pm 6.25$  MHz).*

*b Detección de ocupación con umbral adaptativo  $\lambda = \mu + 2.5\sigma$ .*

**Figura 11**

*Comparación del espectro medido con el analizador de espectros vs USRP2920 y detección de ocupación.*



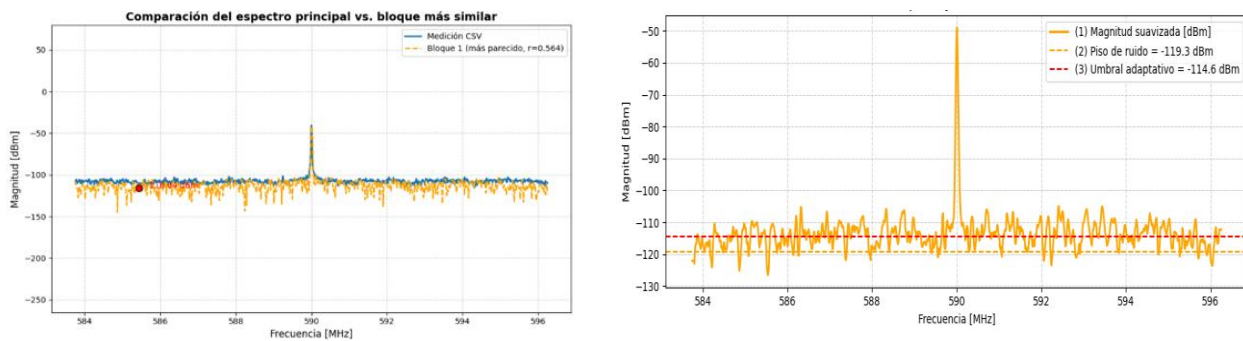
*Nota: Validación instrumental a 500 MHz: comparación espectral entre analizador R&S FPC1000 y USRP-2920 con correlación de Pearson  $r = 0.895$ .*

*a Superposición de espectros medidos (banda  $\pm 6.25$  MHz).*

*b* Detección de ocupación con umbral adaptativo  $\lambda = \mu + 2.5\sigma$ .

**Figura 12**

*Comparación del espectro medido con el analizador de espectros vs USRP2920 y detección de ocupación.*



*Nota: Validación instrumental a 590 MHz: comparación espectral entre analizador R&S FPC1000 y USRP-2920 con correlación de Pearson  $r = 0.564$ .*

*a* Superposición de espectros medidos (banda  $\pm 6.25$  MHz).

*b* Detección de ocupación con umbral adaptativo  $\lambda = \mu + 2.5\sigma$ .

Desde un punto de vista cuantitativo, la similitud entre ambas mediciones se evaluó mediante la metodología descrita en la sección 4.1.2 donde se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (Apéndice G sección G.0.1). Para las frecuencias de 660 MHz y 500 MHz, se obtuvieron valores de  $r = 0.902$  y  $r = 0.895$ , respectivamente, lo que indica una alta correspondencia entre las señales capturadas por el SDR y las mediciones de referencia del analizador. Estos resultados validan que la cadena de adquisición basada en el USRP-2920, reproduce de forma confiable el comportamiento espectral real de la señal.

En el caso de 590 MHz, el valor de correlación fue menor,  $r = 0.564$ , lo que sugiere una mayor variabilidad en la medición. Este comportamiento puede atribuirse a la presencia de interferencias en esa porción del espectro o a fluctuaciones del ruido de fondo durante la prueba, lo cual es consistente con la naturaleza del espectro TVWS.

Luego sobre las señales adquiridas se aplicó un análisis de ocupación espectral basado en un umbral adaptativo calculado a partir del piso de ruido estimado y de la (ecuación 4).

Las Figura 10 b), Figura 11 b) y Figura 12 b), muestran los resultados de este procedimiento para cada una de las frecuencias evaluadas. En las tres mediciones, el algoritmo utilizado permitió identificar de manera clara las regiones del espectro donde la magnitud supera el umbral adaptativo, delimitando correctamente las bandas ocupadas. Para las frecuencias de 660 MHz y 590 MHz, se estimaron pisos de ruido del orden de  $-118$  dBm, con umbrales adaptativos cercanos a  $-113$  dBm, lo que evidencia un entorno con bajo nivel de ruido y buena separación entre señal y fondo.

La consistencia entre las bandas ocupadas detectadas y las características esperadas de la señal generada confirma la efectividad del método propuesto para identificar ocupación espectral.

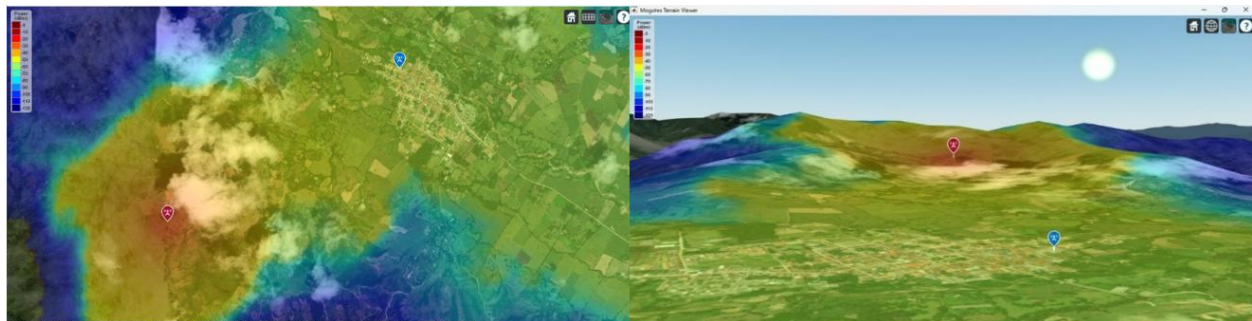
Este resultado es particularmente relevante en el contexto de TVWS, ya que demuestra que la cadena SDR es capaz de discriminar entre regiones libres y ocupadas del espectro, fundamental para la selección dinámica de frecuencias que finalmente se puedan aprovechar para la transmisión y recepción de información, como se describe en la sección 4.3.4 de la fase 3.

## 5.2 Resultados de caracterización del terreno y análisis de enlace

La caracterización del terreno se realizó para el enlace entre el transmisor ubicado en la zona de “El Medio” y el receptor situado en el “ESE Hospital San Pedro Claver”, municipio de Mogotes, Santander. La Figura 13 muestra el mapa de cobertura generado por el modelo Longley–Rice alrededor del transmisor con radio de 10 km, superpuesto sobre el terreno real obtenido mediante el modelo digital de elevación GMTED2010.

**Figura 13**

*Mapa de cobertura del enlace de propagación.*



*Nota: Mapa de cobertura generado con Longley–Rice (MATLAB) para el enlace Mogotes: TX en El Medio, RX en Hospital, distancia 2.55 km,  $PL = 95.25$  dB.*

*a Vista superior mostrando distribución espacial de potencia recibida.*

*b Vista de relieve evidenciando topografía montañosa del terreno.*

La visualización permite identificar:

- Ubicación de TX y RX: Marcadores rojo (TX) y azul (RX), respectivamente.

- Topografía del enlace: Terreno montañoso con variaciones de elevación significativas.
- Barra de colores lateral (Power [dBm]): Representa la potencia de señal recibida estimada en cada punto del área de cobertura, calculada mediante el modelo Longley–Rice considerando distancia desde el TX, pérdida por espacio libre, efectos de difracción por obstáculos topográficos.

El modelo Longley–Rice calculó la pérdida de trayecto ( $PL$ ) para el enlace TX-RX, por medio de la metodología descrita en la sección 4.1.4 con la longitud, latitud y alturas que se muestran en la Tabla 3, utilizando como frecuencia de operación 540 MHz que se encuentra dentro del rango TVWS, para la distancia del enlace se aplicó la ecuación 5 en MATLAB y se obtuvo una distancia de 2.55 km. La pérdida calculada fue de **95.25 dB** la cual refleja el impacto de la topografía montañoso sobre la propagación de la señal. A partir de ella, se aplicó el presupuesto de enlace (ecuación 6) para evaluar la viabilidad del sistema con equipos SDR disponibles en el laboratorio, utilizando los valores de atenuación descritos en la Tabla 2 y valores configurados en el SDR. (National Instruments, 2013)

$$P_r [\text{dBm}] = 20 + 5 + 3 - 95.25 - 2 = -69.25 \text{ dBm} \quad (10)$$

La potencia calculada analíticamente  $P_r = -69.25$  dBm es consistente con la Figura 13, donde la ubicación del RX (marcador azul) se encuentra en la zona verde/amarilla del mapa, que corresponde al rango de -60 a -70 dBm según la escala de colores. Esta coherencia entre el cálculo teórico y la simulación gráfica valida los resultados obtenidos. En este contexto, la caracterización del terreno proporciona un marco cuantitativo para dimensionar el sistema SDR, especialmente en términos de potencia, ganancia y selección de frecuencia dentro de la banda TVWS.

### 5.3 Discusión de resultados de la fase 1

Para el mapa de cobertura generado alrededor del transmisor, se consideró un radio máximo de 10 km y niveles de señal entre  $-120$  dBm y  $-5$  dBm. Este mapa evidencia cómo la intensidad de la señal varía significativamente en función del relieve, mostrando regiones con buena cobertura y otras severamente atenuadas.

La integración de los resultados experimentales de la validación instrumental con la caracterización del terreno permite asumir que:

- La cadena SDR reproduce de manera confiable mediciones espectrales reales.
- El método de detección de ocupación espectral es robusto frente al ruido.
- El terreno tiene un impacto determinante en la cobertura y el margen de enlace.

En conjunto, estos resultados validan la elección del espectro TVWS como una alternativa viable para comunicaciones en entornos rurales y proporcionan una base sólida para el diseño del sistema SDR en las fases posteriores del proyecto.

### 5.4 Resultados de barrido espectral en la banda TVWS

Siguiendo la metodología descrita en la sección 4.2 (Fase 2: Identificación de frecuencias libres), se realizó un barrido secuencial de la banda TVWS (470–698 MHz) mediante 19 ventanas consecutivas de 12.5MHz cada una, este procedimiento replica la estrategia validada en la Fase 1 (sección 5.1), donde se validó instrumentalmente el sistema USRP-2920 comparándolo con el analizador de espectros R&S FPC1000. Sin embargo, en esta fase el objetivo fue identificar canales libres en la banda TVWS que puedan ser utilizados posteriormente en las pruebas de transmisión (Fase 3). Para cada uno de los 19 barridos se aplicó el siguiente procedimiento:

- Estimación del piso de ruido ( $\mu_{\text{ruido}}$ ): Calculado como la mediana del 20% de las muestras de menor potencia en cada ventana.
- Estimación de la desviación estándar ( $\sigma_{\text{ruido}}$ ): Calculada sobre el mismo subconjunto del 20% inferior.
- Cálculo del umbral adaptativo con la ecuación 4 con  $k=2.5$ .
- Detección de ocupación: Una región se consideró ocupada cuando la magnitud suavizada excedió el umbral de forma sostenida (no por picos aislados).

La Tabla 6 compara diferentes percentiles de muestras. La selección del 20% de muestras de menor magnitud para estimar el piso de ruido obedece a la necesidad de evitar contaminación por señales reales presentes en el espectro. Por tal razón, al seleccionar el 20% más bajo, se garantizó que la estimación del piso de ruido no estuviera sesgada por las señales activas.

**Tabla 6**

*Comparación de diferentes percentiles para estimación del piso de ruido.*

Percentil	Características	Limitaciones
10%	Muy robusto ante presencia de señales; ignora prácticamente todas las emisiones activas.	Puede subestimar $\sigma$ si el ruido presenta alta variabilidad espacial.
20%	Buen balance: suficientes muestras para estabilidad estadística sin incluir señales.	Seleccionado
30%	Mayor número de muestras, mejor estimación de $\sigma$ en entornos uniformes.	Riesgo de incluir señales débiles, elevando artificialmente $\mu$ y $\sigma$ .

Percentil	Características	Limitaciones
50% (mediana)	Representativo si el espectro está mayormente desocupado.	Falla cuando >50% del espectro está ocupado; umbral resultante es excesivamente alto.

*Nota: Evaluación de percentiles para estimación del piso de ruido: percentil 20% seleccionado por balance apropiado entre estabilidad estadística y exclusión de señales para nuestro proyecto.*

Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación ( $r$ ) entre la traza espectral medida por el USRP-2920 y la obtenida con el analizador R&S FPC1000 para el mismo barrido. Este parámetro proporciona una verificación instrumental complementaria sobre la consistencia de la forma espectral observada, donde valores de  $r$  cercanos a 1 indican alta similitud entre ambos instrumentos (Apéndice G).

### 5.5 Disponibilidad espectral observada en la banda 470–698 MHz

La Tabla 7 resume las métricas obtenidas para cada uno de los 19 barridos, incluyendo el piso de ruido estimado, la desviación estándar del ruido, el umbral adaptativo calculado, el coeficiente de correlación con el analizador de espectros, el número de canales ocupados detectados y sus rangos de frecuencia. Los barridos resaltados en negrita presentan ocupación espectral detectada. El coeficiente de correlación ( $r$ ) cuantifica la similitud entre las trazas del USRP-2920 y el analizador R&S FPC1000.

**Tabla 7**

*Métricas de los 19 barridos y detección de canales ocupados.*

Barrido	Centro [MHz]	r correlación	$\mu_{\text{ruido}}$ [dBm]	$\sigma_{\text{ruido}}$ [dBm]	Umbral [dBm]	Canales detectados	Frecuencias detectadas [MHz]
1	476	0.0757	-116.23	2.55	-109.86	0	—
2	488.5	0.1538	-113.88	2.51	-107.61	0	—
3	501	0.0531	-119.47	1.81	-114.94	0	—
4	513.5	0.0399	-119.33	1.94	-114.48	0	—
5	526	-0.0049	-119.27	1.61	-115.24	0	—
6	538.5	0.0025	-118.94	1.85	-114.31	0	—
<b>7</b>	<b>551</b>	<b>0.2352</b>	<b>-118.06</b>	<b>2.1</b>	<b>-112.8</b>	<b>2</b>	<b>548.05 – 551.85, 551.93 – 554.11</b>
8	563.5	0.0073	-119	1.84	-114.4	0	—
9	576	0.0159	-118.62	1.98	-113.67	0	—
10	588.5	0.0355	-119.79	2.14	-114.45	0	—
11	601	0.1	-118.31	1.71	-114.04	0	—
12	613.5	0.0727	-119.5	2.06	-114.35	0	—
13	626	0.0941	-118.89	2.27	-113.21	0	—
<b>14</b>	<b>638.5</b>	<b>0.1895</b>	<b>-117.86</b>	<b>1.65</b>	<b>-113.73</b>	<b>1</b>	<b>634.97 – 638.21</b>
<b>15</b>	<b>651</b>	<b>0.3302</b>	<b>-117.53</b>	<b>2.37</b>	<b>-111.61</b>	<b>1</b>	<b>656.09 – 657.25</b>
<b>16</b>	<b>663.5</b>	<b>0.7143</b>	<b>-116.29</b>	<b>2.33</b>	<b>-110.47</b>	<b>1</b>	<b>657.25 – 661.94</b>
<b>17</b>	<b>676</b>	<b>0.5154</b>	<b>-117.72</b>	<b>2.03</b>	<b>-112.64</b>	<b>1</b>	<b>679.76 – 682.25</b>

<b>18</b>	<b>688.5</b>	<b>0.6972</b>	<b>-117.84</b>	<b>1.67</b>	<b>-113.66</b>	<b>1</b>	<b>682.25 – 685.99</b>
19	701	0.11	-119.82	2.59	-113.35	0	—

*Nota: Métricas de 19 barridos: correlación r, piso de ruido, umbral adaptativo y ocupación detectada (68.4% libre, 31.6% ocupado).*

El análisis revela que la banda TVWS presenta amplia disponibilidad espectral durante el período de medición. Del total de 19 barridos ejecutados, 13, que representa el 68.4% de la banda no registraron ocupación detectable bajo el criterio de umbral adaptativo establecido, mientras que 6 barridos evidenciaron presencia de señales activas.

**La distribución de la ocupación no es uniforme:** se concentra predominantemente en el rango 635–690 MHz (barridos 14–18), atribuible posiblemente a servicios de televisión digital terrestre (TDT). Por el contrario, la porción inferior y media del espectro analizado (470–635 MHz) exhibe baja o nula actividad, constituyendo la región de mayor interés para la selección de frecuencias de operación para la fase 3.

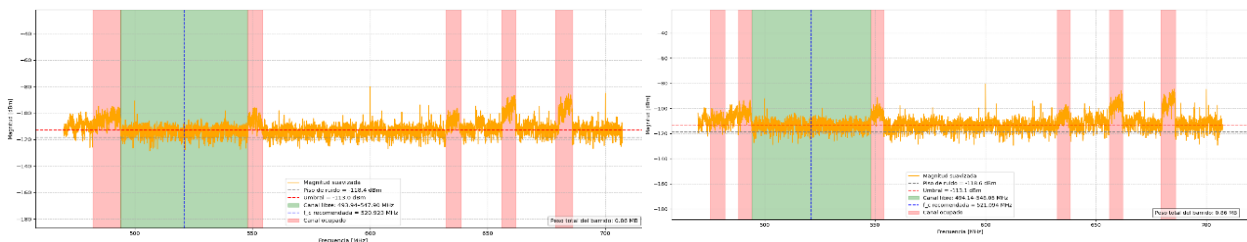
Desde el punto de vista de la estabilidad de medición, el piso de ruido estimado se mantiene en el rango -116 a -120 dBm para la mayoría de las ventanas, con desviación estándar ( $\sigma$ ) entre 1.6 y 2.6 dB, lo cual evidencia condiciones ambientales estables y baja interferencia externa durante la adquisición. El coeficiente de correlación ( $r$ ) entre el USRP-2920 y el analizador R&S FPC1000 presenta un comportamiento diferenciado según la naturaleza del contenido espectral: en barridos libres (1–6, 8–13, 19) se observan valores bajos ( $r \approx 0.0$ – $0.15$ ), consistentes con la

decorrelación esperada en procesos de ruido aleatorio, mientras que en barridos con ocupación (7, 14–18) la correlación aumenta notablemente ( $r \approx 0.19\text{--}0.71$ ), reflejando la similitud de ambos instrumentos. El valor máximo de correlación ( $r = 0.714$ , barrido 16) coincide con la detección de ocupación sostenida en 657–662 MHz, validando la capacidad del sistema de detección para identificar señales activas de manera reproducible entre instrumentos.

Finalmente, Para obtener una visión continua del espectro y verificar la estabilidad temporal de las mediciones, se concatenaron los 19 barridos construyendo dos vectores globales (Vector 1 y Vector 2), correspondientes a dos adquisiciones consecutivas separadas temporalmente. La Figura 14 muestra la superposición de ambos vectores con la detección de ocupación aplicada al rango completo 470–698 MHz. Las bandas sombreadas en rosa indican regiones ocupadas, mientras que las bandas en verde señalan un canal libre seleccionado para pruebas posteriores.

**Figura 14**

*Concatenación de los 19 barridos espectrales.*



*Nota: Espectro completo TVWS (470–698 MHz) generado por concatenación de 19 ventanas. Ocupación concentrada en 635–690 MHz. Piso de ruido estable -116 a -120 dBm. a Primera adquisición completa del barrido espectral.*

*b Segunda adquisición completa para verificación de reproducibilidad.*

El propósito de analizar ambos vectores es verificar estabilidad temporal de la medición: si el sistema es consistente, las zonas ocupadas y los niveles de ruido deben aparecer en posiciones similares en ambas uniones.

### **5.6 Resultados de la fase 3: Validación del enlace SDR**

Siguiendo la metodología descrita en la sección 4.3, se llevó a cabo la validación del sistema de comunicación SDR implementado. Esta fase integra los resultados de las fases anteriores fase 1 (sección 5.1) y fase 2 (sección 5.4). El objetivo de esta fase fue evaluar el desempeño extremo a extremo del sistema bajo tres escenarios progresivos (i) simulación con evaluación cuantitativa BER. (ii) Enlace cableado (conexión directa TX-RX) y (iii) Enlace inalámbrico (antenas omnidireccionales). Para cada escenario se evaluaron los dos esquemas de modulación (FSK y GMSK) transportando dos tipos de carga (texto e imagen).

Aunque ambas modulaciones permitieron completar transmisiones exitosas, los resultados muestran diferencias claras en desempeño. En general, GMSK presentó mayor tolerancia al ruido y mayor estabilidad del enlace, mientras que FSK resultó más susceptible a degradaciones cuando las condiciones del canal se alejaron de lo ideal, reflejándose en mayor probabilidad de errores y mayor variabilidad en la recuperación, especialmente perceptible al transmitir imágenes.

Adicionalmente, desde la perspectiva de eficiencia, GMSK tendió a ofrecer mejor aprovechamiento espectral, lo cual se tradujo en un comportamiento más favorable cuando se necesitó sostener transmisión continua de mayor volumen de datos. En contraste, FSK cumplió

adecuadamente como alternativa funcional, pero con un desempeño menos consistente ante perturbaciones. Se calculó una métrica cuantitativa del desempeño a través de la tasa de error de bit (BER), como se puede ver en la Tabla 8, lo cual permitió comparar de manera controlada la confiabilidad del enlace bajo condiciones de canal definidas. Los resultados de BER obtenidos fueron consistentes con una operación adecuada del sistema y sirvieron como verificación objetiva de que la arquitectura es capaz de sostener transmisión digital con baja tasa de error en condiciones simuladas.

**Tabla 8**

*BER para los 4 casos simulados*

Caso	Modelo de Canal	log10(BER)	BER $10^{\log10(BER)}$
GMSK Texto	Realistic Channel Model	-6.046088	$8.98992 \times 10^{-7}$
GMSK Imagen	Realistic Channel Model	-6.146085	$7.12349 \times 10^{-7}$
FSK Texto	Channel Model	-6.145672	$7.12036 \times 10^{-7}$
FSK Imagen	Channel Model	-6.085065	$8.22120 \times 10^{-7}$

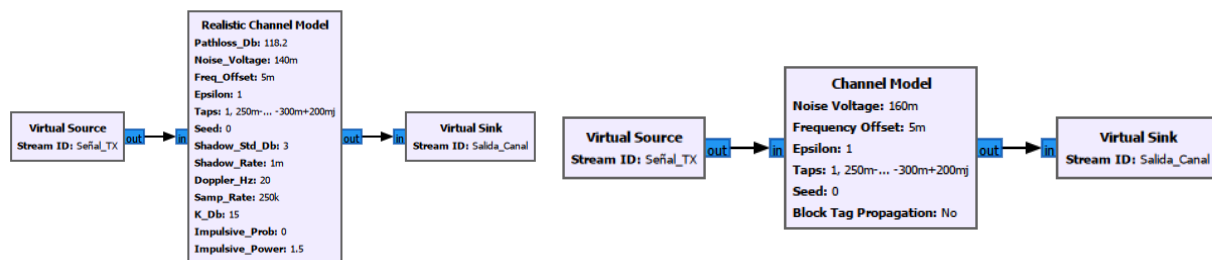
*Nota: BER simulado para GMSK (canal realista) y FSK (canal básico): aproximadamente  $10^{-7}$  en ambos casos.*

Es importante resaltar que los modelos de canal usados no fueron idénticos entre modulaciones: para FSK se evaluó un canal más básico, se muestra en la Figura 15 parte b, mientras que para GMSK se incluyó un canal más realista se muestra en la Figura 15 parte a. Aun

así, el comportamiento mostró que: GMSK mantuvo mayor estabilidad frente a degradaciones del canal, mientras que FSK evidenció mayor sensibilidad cuando aumentó el nivel de perturbación, especialmente al transportar una carga más exigente (imágenes).

**Figura 15**

*Channel Model.*



*Nota: Bloques del modelo de canal implementados en GNU Radio para simulación.*

*a Canal realista GMSK con pérdida de trayecto, shadowing y Doppler (PL = 118.2 dB).*

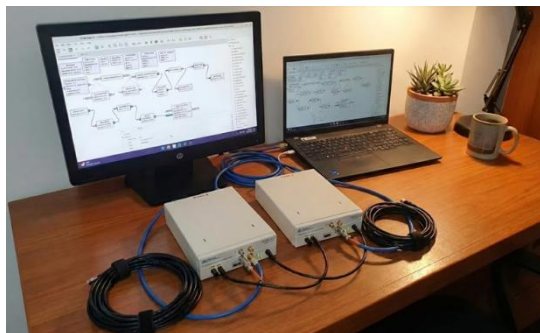
*b Canal básico FSK con ruido AWGN únicamente.*

Los resultados de esta fase evidencian que la arquitectura de comunicación implementada fue capaz de transportar y recuperar información útil en los dos tipos de carga: mensajes de texto e imágenes. La validación se soportó en las herramientas de observación disponibles en GNU Radio como dominio temporal, espectral y constelación, donde se verificó que el sistema mantuvo comportamiento coherente durante transmisión y recepción, y que la información recibida conservó integridad funcional, es decir, texto legible e imágenes reconstruidas.

### **5.7 Resultados experimentales: enlace cableado y enlace inalámbrico**

Una vez validado el sistema en simulación, se procedió a las pruebas experimentales utilizando los dos equipos SDR. En el entorno experimental (Figura 16) se evaluaron dos escenarios: enlace cableado e inalámbrico. En el enlace cableado la operación fue más predecible y tanto texto como imágenes se recuperaron correctamente con baja variabilidad; FSK funcionó adecuadamente, pero mostró mayor latencia y sensibilidad a condiciones no ideales, mientras que GMSK presentó transmisiones más estables y mejor desempeño en el transporte de imágenes. En el escenario inalámbrico, donde entran en juego pérdidas, variaciones del canal e interferencias, la diferencia entre modulaciones fue más marcada: GMSK mantuvo un comportamiento más robusto y FSK resultó más susceptible a errores y degradación en la reconstrucción cuando el enlace se exigió más. Aun así, ambas modulaciones permitieron transmisiones y recepciones exitosas. Estos resultados indican que la elección de la modulación influye directamente en la confiabilidad práctica del enlace, especialmente al transportar archivos de mayor tamaño. Los videos de las pruebas están disponibles en el repositorio de GitHub (Rodríguez y Díaz, 2025). Para ahondar más en el análisis de esta fase se invita a leer el (Apéndice D).

**Figura 16.**

*Montaje del transmisor / receptor*

*Nota: Configuración experimental para pruebas de transmisión/recepción en Fase 3 con diferentes plataformas SDR.*

*a Montaje con USRP-2920 (enlace cableado y inalámbrico).*

*b Montaje con HackRF One (validación con hardware alternativo).*

## 6. Conclusiones

De la primera fase se concluyó que la comparación entre las mediciones del analizador de espectro y las obtenidas mediante SDR-GNU Radio evidenció una alta concordancia espectral, reflejada en coeficientes de correlación elevados en la mayoría de las frecuencias evaluadas. Esto confirma que el procedimiento de adquisición y el criterio de selección de la traza representativa, basado en la normalización y la maximización del coeficiente de Pearson, permiten reproducir de forma confiable el comportamiento espectral. No obstante, la disminución de la correlación en una de las ventanas analizadas sugiere la influencia de interferencias o variaciones ambientales.

La configuración espectral adoptada, con una FFT de 1024 puntos y una tasa de muestreo de 12.5 MHz, resultó consistente con la resolución empleada por el analizador de espectro (RBW  $\approx$  10 kHz), lo que permitió establecer comparaciones válidas entre ambas herramientas. Los resultados confirman que esta configuración es adecuada para la caracterización del entorno radioeléctrico y la estimación del piso de ruido.

El análisis de propagación evidenció una pérdida de trayecto (PL) significativa, con un valor aproximado de 95.24 dB, confirmando que el factor dominante en la degradación del enlace es el terreno y la geografía del entorno. Este resultado resalta que la viabilidad del enlace no depende exclusivamente de la potencia de transmisión, sino del impacto combinado de las condiciones físicas del medio, lo cual debe ser considerado desde las etapas iniciales de diseño.

El uso de un umbral adaptativo definido como el piso de ruido más 2.5 veces la desviación estándar demostró ser eficaz para la detección de ocupación espectral, al reducir falsos positivos y permitir la identificación de sub-bandas ocupadas con presencia persistente. Este enfoque favorece la confiabilidad en la selección de canales con menor probabilidad de interferencia, lo cual resulta coherente con los objetivos del proyecto y con condiciones reales.

La segunda fase mostró que la estrategia de 19 barridos solapados (ventanas  $\pm 6,25$  MHz con  $\text{samp\_rate} = 12,5$  MHz y  $\text{FFT } N = 1024$ ) permitió construir trazas espectrales continuas en el rango 470–698 MHz sin huecos evidentes. La automatización del proceso, mediante scripts individuales y un script maestro, mejoró la reproducibilidad y redujo la intervención manual, facilitando la recolección ordenada de las parejas SDR/analizador para cada centro de frecuencia. Al concatenar los 19 segmentos y analizar dos adquisiciones consecutivas, se verificó la coherencia en la ubicación de las regiones ocupadas y en los niveles del piso de ruido, lo que

confirma la estabilidad temporal del proceso de adquisición y la funcionabilidad del método para la selección de canales libres a partir de un análisis espectral global.

El análisis por barrido permitió concluir que la disponibilidad espectral en la banda TVWS no es homogénea, sino fuertemente dependiente de la frecuencia, con una mayor probabilidad de ocupación en la porción alta del espectro y un comportamiento más despejado en los segmentos bajos y medios. La detección recurrente de ocupación en rangos como 548–554 MHz y  $\approx$ 634–686 MHz evidencia la necesidad de realizar un análisis previo sistemático antes de la selección de canales operativos.

La tercera fase permitió confirmar que el enlace SDR propuesto es funcional tanto en entornos simulados como en implementaciones con hardware real, logrando la transmisión y recepción correcta de texto e imágenes mediante modulaciones FSK y GMSK. Esta validación demuestra que la arquitectura diseñada, junto con los flujogramas de transmisión y recepción, es coherente y cumple el objetivo de evaluar la viabilidad práctica del sistema.

Aunque ambas modulaciones presentaron valores de BER bajos y aceptables en simulación, el análisis evidenció que GMSK ofrece un comportamiento más robusto frente a modelos de canal más exigentes. Su desempeño bajo el Realistic Channel Model mostró mayor tolerancia a degradaciones como ruido adicional y pérdidas del canal, lo que la posiciona como una alternativa más adecuada para escenarios reales con condiciones de propagación no ideales.

Las pruebas realizadas con USRP-2920 y HackRF One evidenciaron que el desempeño del enlace no depende únicamente del esquema de modulación, sino también de factores prácticos asociados al montaje experimental, como la atenuación introducida por cables y atenuadores, así

como la estabilidad del hardware utilizado, los cuales influyen directamente en la calidad de la señal recibida.

Como última fase, el trabajo desarrollado evidencia que el éxito de un sistema tecnológico en el ámbito de la salud no depende únicamente de su capacidad técnica, sino también de la forma en que dicha capacidad es presentada al usuario final. El diseño de una interfaz intuitiva, apoyada en algoritmos bien estructurados y principios de usabilidad, permitió desarrollar un sistema accesible tanto para pacientes como para profesionales de la salud, favoreciendo su comprensión y potencial adopción.

## **7. Recomendaciones**

Repetir las mediciones en las ventanas que mostraron correlación moderada o baja en distintas franjas horarias y condiciones meteorológicas, registrando metadatos completos (fecha y hora UTC, ganancias TX/RX y atenuación en línea) y reportando la media y la desviación estándar de las métricas clave (piso de ruido,  $\sigma$ ,  $r$ ).

Ampliar el análisis de propagación Longley–Rice realizando pruebas de sensibilidad: variar ubicaciones TX/RX, alturas de antena, conductividad del suelo y perfiles de refractividad, y presentar mapas comparativos de pérdida para evaluar la influencia del terreno.

Validar el umbral adaptativo probando varios factores  $k$  (por ejemplo 2.0, 2.5 y 3.0), cuantificando detección versus falsos positivos mediante tablas y figuras, y fijar el valor final de  $k$  justificado por los resultados.

Mejorar el script de post-procesado para generar automáticamente tablas-resumen por barrido (centro, piso de ruido,  $\sigma$ , umbral, r, número de canales y frecuencias detectados) y usar esas tablas para producir mapas temporales de ocupación y un sistema básico de “canal recomendado” basado en historial.

Implementar un protocolo experimental estandarizado para medir BER en hardware: transmitir secuencias conocidas por cable y por aire, registrar los bits recibidos, calcular BER comparable con simulación y repetir medidas para distintos niveles de atenuación o SNR.

Priorizar GMSK en pruebas de campo y propuestas de despliegue por su mayor tolerancia en modelos de canal realistas, calculando su tiempo de transmisión y recepción de información.

Controlar y documentar la cadena RF midiendo pérdidas de cada tramo (cables, conectores, atenuadores), registrar valores medidos (pérdidas del C4 y del atenuador de 30 dB) y realizar comparativas con antenas direccionales y omnidireccionales indicando orientación, altura y coordenadas geográficas.

### Referencias Bibliográficas

Agencia Nacional del Espectro. (s.f.). *Espacios en Blanco de Radiofrecuencia*. Recuperado el 27 de 08 de 2025, de Agencia Nacional del Espectro:

<https://ane.gov.co/SitePages/Gesti%C3%B3n%20t%C3%A9cnica/index.aspx?p=22>

Calderón, D., Cuadros, M., & Guerrero, S. (2021). *Proyecto final de comunicaciones 2*

*Validación de un sistema de comunicación digital*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Congreso de la República de Colombia. (30 de 07 de 2009). *Ley 1341 de 2009, por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones - TIC*. Obtenido de Alcaldía de

Bogotá: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=36913>

Couch, L. W. (2013). *Digital and analog communication systems* (Octava ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson. Recuperado el 27 de 08 de 2025

Electrorent / Rohde & Schwarz. (14 de 01 de 2026). *R&S ZV-Z191 Precision RF Cable*.

Obtenido de Electrorent: [https://www.electrorent.com/eu/products/rf-and-microwave-network-analyzers/cal-kits/rohde-and-schwarz/zv-z191-](https://www.electrorent.com/eu/products/rf-and-microwave-network-analyzers/cal-kits/rohde-and-schwarz/zv-z191-1306450724/01t1O00000CkRfkQAF?)

[1306450724/01t1O00000CkRfkQAF?](https://www.electrorent.com/eu/products/rf-and-microwave-network-analyzers/cal-kits/rohde-and-schwarz/zv-z191-1306450724/01t1O00000CkRfkQAF?)

ERM Automatismes / National Instruments (NI). (15 de 01 de 2026). *NI USRP – Documentación técnica*. Obtenido de ERM Automatismes: [https://www.erm-](https://www.erm-automatismes.com/d00016E-ni-usrp.pdf)

[automatismes.com/d00016E-ni-usrp.pdf](https://www.erm-automatismes.com/d00016E-ni-usrp.pdf)

Estupiñan, C. A., & Perez, A. F. (2022). *Diseño e implementación del prototipo de un sistema de comunicaciones satelital*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

FastAPI. (s.f.). *Path Operation Advanced Configuration*. Recuperado el 4 de 12 de 2025, de

FastAPI Documentation: <https://fastapi.tiangolo.com/advanced/path-operation-advanced-configuration/>

GNU Radio. (2025). *GNU Radio: A Free & Open-Source Toolkit for Software Radio*.

Recuperado el 21 de 08 de 2025, de gnuradio: <https://www.gnuradio.org/about/>

GNU Radio. (s.f.). *FFT*. Recuperado el 12 de 12 de 2025, de GNU Radio Wiki:

<https://wiki.gnuradio.org/index.php/FFT>

GNU Radio. (s.f.). *Packet Communications*. Recuperado el 10 de 09 de 2025, de GNU Radio

Wiki: [https://wiki.gnuradio.org/index.php/Packet\\_Communications](https://wiki.gnuradio.org/index.php/Packet_Communications)

Gorcin, A., & Arslan, H. (2010). An Adaptive Threshold Method for Spectrum sensing in multi-channel cognitive radio networks. *2010 17th International Conference on*

*Telecommunications (ICT)* (pág. 5). Doha, Qatar: IEEE. Obtenido de

<https://www.scopus.com/pages/publications/77954550078>

Great Scott Gadgets. (15 de 01 de 2026). *HackRF One*. Obtenido de Great Scott Gadgets:

<https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/>

Komunika Power. (15 de 01 de 2026). *Antena Walkie VHF-UHF RX 36 cm SMAF*. Obtenido de

Komunika Power: <https://komunicapower.com/es/vhf-uhf/367-antena-walkie-vhf-uhf-rx-36cm-smaf-8435757707643.html>

MathWorks. (2024). *distance - Geographic distance between pairs of points*. Recuperado el 25 de 08 de 2025, de MATLAB Mapping Toolbox Documentation:

<https://la.mathworks.com/help/map/ref/distance.html>

MathWorks. (2024). *LongleyRice - Longley-Rice propagation model*. Recuperado el 13 de 12 de 2025, de MATLAB Antenna Toolbox Documentation:

<https://la.mathworks.com/help/antenna/ref/rfprop.longleyrice.html>

Matplotlib. (2025). *Matplotlib: Visualization with Python*. Recuperado el 26 de 08 de 2025, de

Matplotlib: <https://matplotlib.org/>

Mini-Circuits / Mouser Electronics. (15 de 01 de 2026). *VAT-30 Fixed Attenuator (30 dB)*.

Obtenido de Mouser Electronics: [https://www.mouser.sg/ProductDetail/Mini-](https://www.mouser.sg/ProductDetail/Mini-Circuits/VAT-30?qs=xZ%2FP%252Ba9zWqYd9Yaj%252Bofmpg%3D%3D)

[Circuits/VAT-30?qs=xZ%2FP%252Ba9zWqYd9Yaj%252Bofmpg%3D%3D](https://www.mouser.sg/ProductDetail/Mini-Circuits/VAT-30?qs=xZ%2FP%252Ba9zWqYd9Yaj%252Bofmpg%3D%3D)

Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC). (2016).

*Resolución 711 de 2016, por la cual se reglamenta el uso de espacios en blanco de*

*televisión (TVWS)*. Obtenido de Sistema Único de Información Normativa - SUIN-

Juriscal: <https://www.suin->

[juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30038104#:~:text=Par%C3%A1grafo%201%C2%B0,la%20Ley%201341%20de%202009](https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30038104#:~:text=Par%C3%A1grafo%201%C2%B0,la%20Ley%201341%20de%202009).

[o%201%C2%B0,la%20Ley%201341%20de%202009](https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30038104#:~:text=Par%C3%A1grafo%201%C2%B0,la%20Ley%201341%20de%202009).

National Instruments. (2013). *USRP-2920 Specifications*. Recuperado el 12 de 12 de 2025, de

National Instruments Documentation: [https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2920-](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2920-specs/page/specs.html)

[specs/page/specs.html](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2920-specs/page/specs.html)

National Instruments. (13 de 12 de 2025). *ni*. Obtenido de [www.ni.com](http://www.ni.com):

<https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-scope/page/fft-frequency.html>

ngrok. (s.f.). *API Documentation*. Recuperado el 13 de 12 de 2025, de ngrok Documentation:

<https://ngrok.com/docs/api>

NumPy. (2025). *About NumPy*. Recuperado el 22 de 08 de 2025, de NumPy:

<https://numpy.org/about/>

Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Signals and Systems*. Upper Saddle River, NJ: Pearson.

Parra, W., & Juan, C. (2025). Anexo D- Caracterización de cables por medio del VNA calibrado.

En W. Parra, & C. Juan, *Desarrollo de un banco de pruebas para un sistema de correlación enfocado a un sistema interferométrico de dos antenas*. (pág. 45).

Bucaramaga: Universidad industrial de Santander.

Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital Communications*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Python Software Foundation. (2025). *json — Codificador y decodificador JSON*. Recuperado el 22 de 08 de 2025, de Documentación de Python:

<https://docs.python.org/es/3/library/json.html>

Rodríguez y Díaz, P. L. (01 de 07 de 2025). *Repositorio Github*. Obtenido de Github:

<https://github.com/paulaRodriguez30/PROTOTYPE-FOR-A-COMMUNICATION-SYSTEM>

Rohde & Schwarz. (14 de 01 de 2026). *FPC1000 Series Spectrum Analyzer – Fact Sheet*.

Obtenido de Rohde & Schwarz: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl\\_downloads/pdm/cl\\_brochures\\_and\\_datasheets/fact\\_sheet/5214\\_9221\\_32/Comp\\_Sheet\\_\\_FPC\\_vs\\_Keysight\\_N9320B\\_.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/fact_sheet/5214_9221_32/Comp_Sheet__FPC_vs_Keysight_N9320B_.pdf)

Rohde & Schwarz. (14 de 01 de 2026). *R&S SMB100A Microwave Signal Generator*. Obtenido de Rohde & Schwarz: <https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y->

medida/generadores-de-senales-analogicas/rs-smb100a-microwave-signal-generator\_63493-9379.html

Ruiz Torres, J. P., Fuquen Gil, A. C., & Rincón Santana, A. C. (2021). *Proyecto Final de comunicaciones Transmisión Inalámbrica*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Times Microwave Systems. (Junio de 2022). *LMR-400 Coaxial Cable Datasheet*. Obtenido de Times Microwave Systems: <https://timesmicrowave.com/wp-content/uploads/2022/06/lmr-400-datasheet-1.pdf>