

D. Pruebas de transmisión y recepción con modulaciones GMSK y FSK en GNU Radio (simulación y hardware)

INTRODUCCIÓN

Este apéndice documenta el soporte técnico de la Fase 3: Pruebas de transmisión y recepción, con el propósito de facilitar la comprensión del sistema de comunicación implementado en GNU Radio Companion (GRC). Se presentan los flujogramas, parámetros y la lógica funcional de la cadena de transmisión/recepción para mensajes de texto e imágenes, tanto en simulación como en pruebas reales con hardware SDR. Se detalla la arquitectura de bloques, las variantes entre modulaciones FSK y GMSK, los modelos de canal empleados y la adaptación del sistema para operar con USRP-2920 y HackRF One, manteniendo una estructura común que permite comparaciones consistentes entre escenarios.

DESARROLLO

D.0.1 Simulación de transmisión y recepción (FSK y GMSK) con texto e imagen

En la etapa de simulación se validó el funcionamiento integral de la cadena de transmisión y recepción en GNU Radio Companion, empleando un mismo flujograma base en el que se substituyó únicamente el bloque de modulación/demodulación para comparar dos alternativas: FSK (GFSK Mod/Demod) y GMSK (GMSK Mod/Demod). Para ambos casos se evaluaron dos tipos de información: mensajes de texto e imágenes (archivo convertido a flujo de bytes). Los flujogramas completos implementados para simulación se presentan en la 1 (FSK) y Figura 2(GMSK), donde se observa la cadena completa desde la generación del dato hasta la recuperación y verificación de la información recibida.

Este trabajo 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)

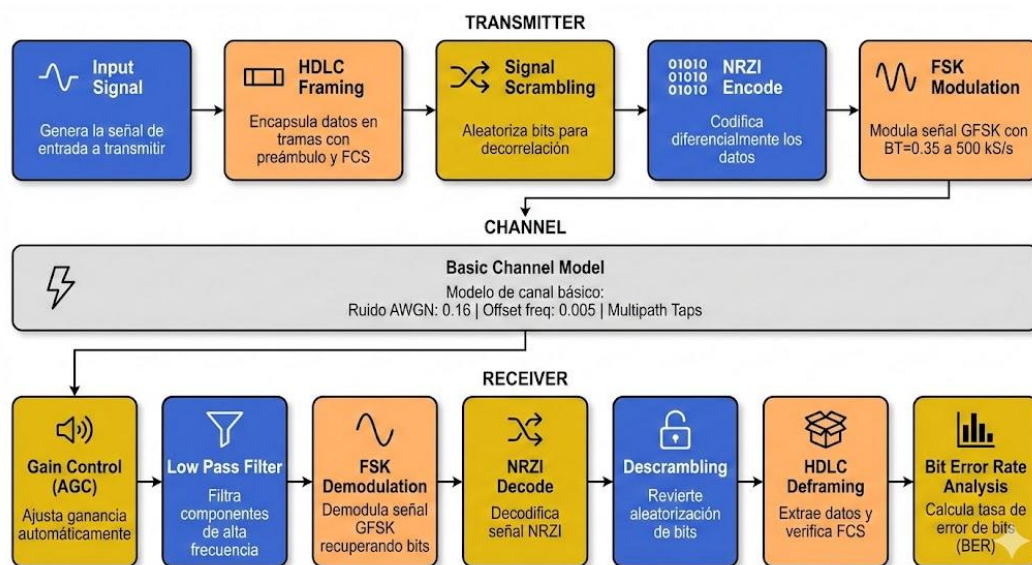


Figura 1. Flujograma modulación FSK simulación

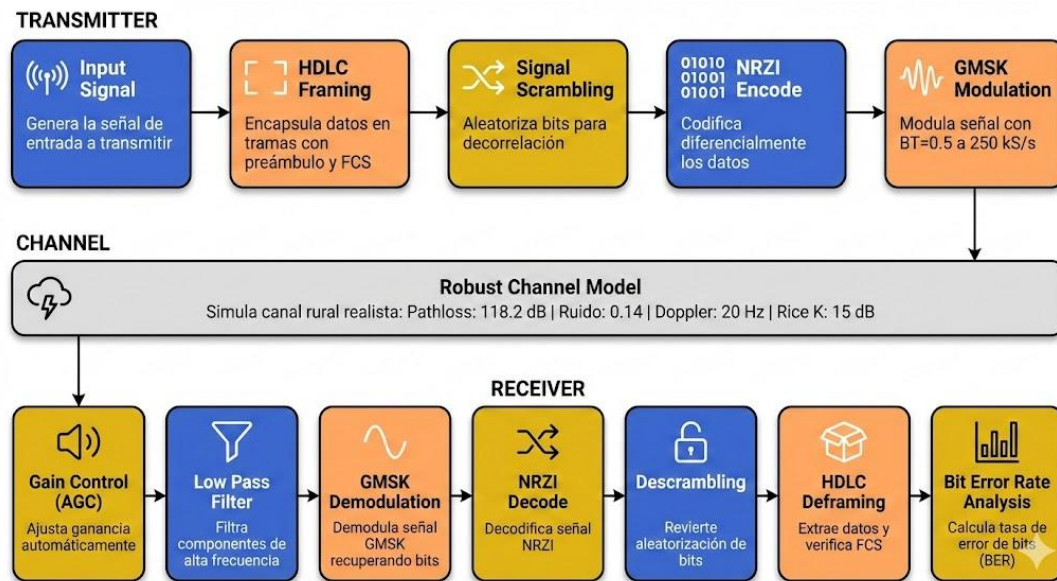
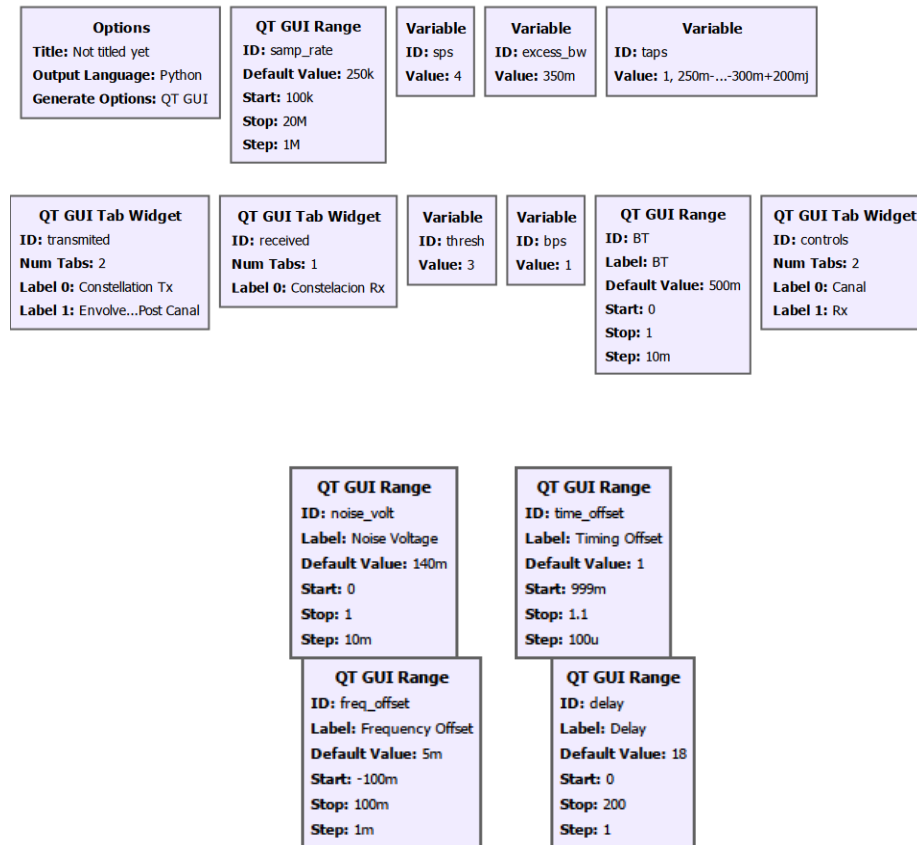


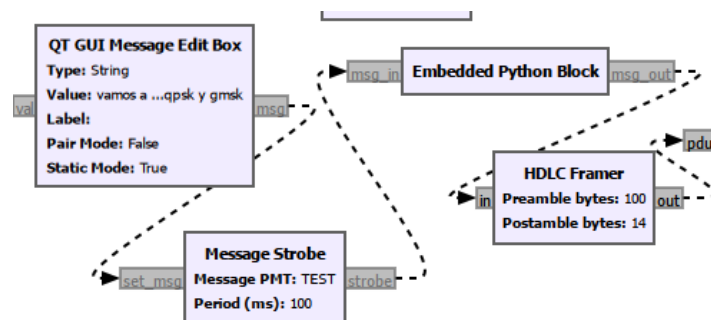
Figura 2. Flujograma modulación GMSK simulación en dos partes.

La simulación contempló dos formas de alimentar el sistema. Para texto, se utilizó un bloque de entrada interactiva (QT GUI Message Edit Box) que permite escribir el mensaje deseado y ejecutar su envío. Para imagen, se empleó un bloque Python (image_sender) encargado de leer el archivo, como se muestran en la figura 3 y sus subíndices, convertirlo a una secuencia de bytes y entregarla al flujograma como mensajes tipo PDU. En ambos casos, la información se gestiona como un flujo binario que posteriormente se organiza y transporta mediante el mismo conjunto de bloques, lo cual permite comparar el desempeño de FSK y GMSK bajo condiciones equivalentes.

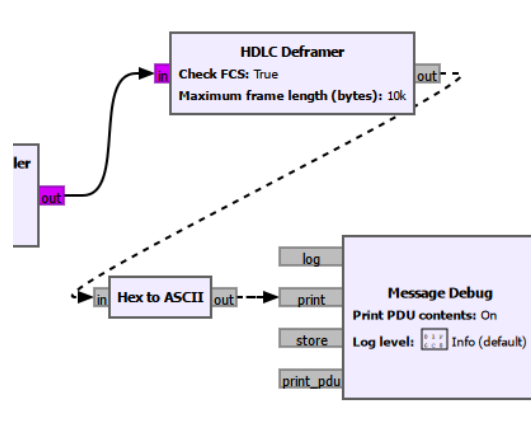
Figura 3. Bloques y variables utilizadas



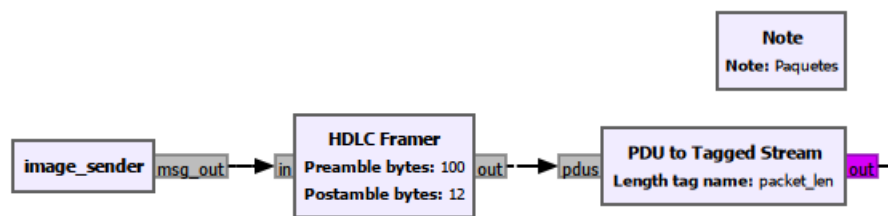
a) Variables utilizadas



b) Bloques para tener como entrada un mensaje de texto

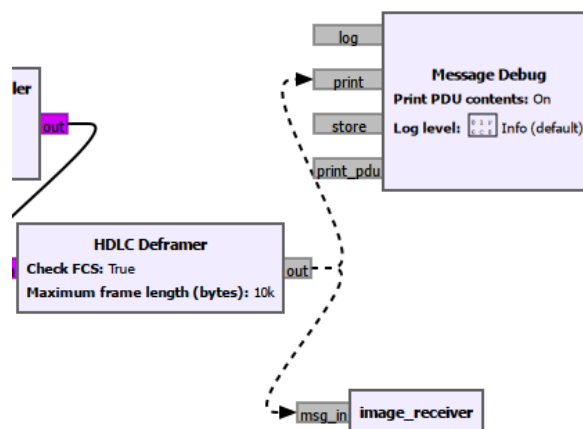


c) Bloques para recibir un mensaje de texto



Note
Note: Paquetes

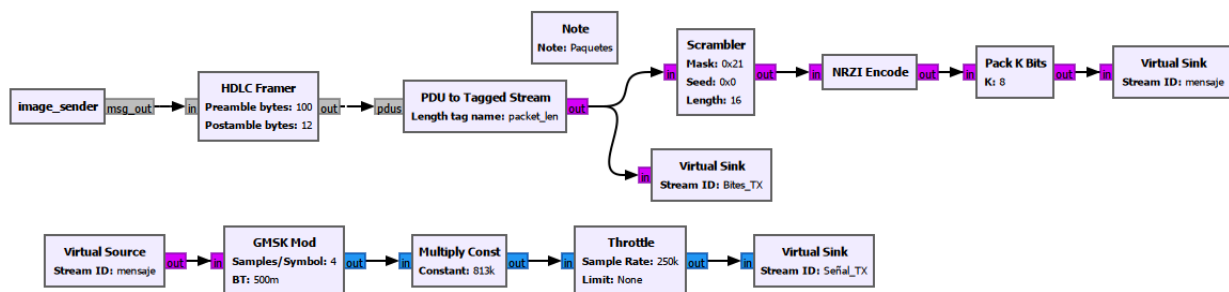
d) Bloques para tener como entrada una imagen



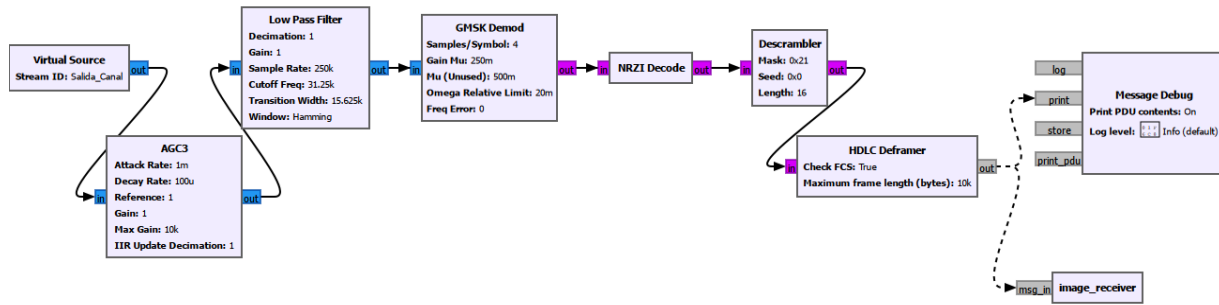
e) Bloques para recibir una imagen

Una vez generada la información, el bloque HDLC Framer encapsula los datos en tramas con estructura definida, de forma que en el receptor sea posible reconocer límites de trama y validar integridad. Posteriormente, PDU to Tagged Stream convierte las tramas (PDU) en un flujo continuo con etiquetas (tags), lo cual habilita el procesamiento por bloques de modulación que esperan entrada tipo stream. A continuación, se aplican dos transformaciones sobre el flujo: Scrambler, que evita secuencias repetitivas prolongadas y mejora el comportamiento estadístico del tren de bits, y NRZI Encode, que representa la información mediante transiciones, facilitando la recuperación robusta del flujo una vez demodulado. Estos bloques aparecen de forma análoga en ambos flujogramas (FSK y GMSK), manteniendo constante la lógica de transmisión y dejando como diferencia principal el bloque de modulación.

Figura 4. Flujograma transmisión y recepción

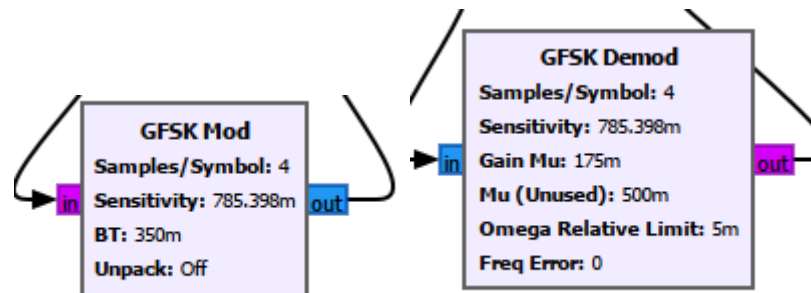


a) Bloques utilizados para la línea de transmisión

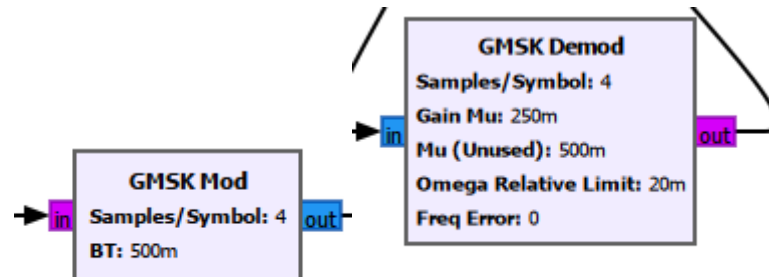


b) Bloques utilizados para la línea de recepción

Figura 5. Moduladores y demoduladores implementados



a) Bloques de modulación y demodulación para FSK



b) Bloques de modulación y demodulación para GMSK

La variación entre escenarios se realizó en el bloque de modulación/demodulación. En el caso FSK, el flujo binario se moduló mediante GFSK Mod y se recuperó con GFSK Demod. En el caso GMSK, se utilizó GMSK Mod y GMSK Demod. Los bloques se muestran en la Figura 5 . Esta organización permitió comparar ambos esquemas manteniendo iguales los demás bloques del flujograma, de modo que las diferencias observadas en robustez o estabilidad se asocian principalmente al tipo de modulación y al modelo de canal aplicado.

Modelo de canal en simulación

Para introducir degradaciones controladas y emular condiciones de propagación, se utilizaron dos modelos de canal distintos según el esquema de modulación:

- **Channel Model (FSK):** se empleó el modelo estándar orientado a introducir ruido y desajustes básicos configurables (por ejemplo, desviación/fase o desplazamiento en frecuencia según los parámetros activos), permitiendo variar la severidad del canal durante la ejecución. Este bloque se documenta en la Figura 6.
- **Realistic Channel Model (GMSK):** se empleó un modelo más completo que incorpora degradaciones adicionales para aproximar un canal más cercano a condiciones físicas, incluyendo parámetros como pathloss y efectos asociados a multipropagación según la configuración seleccionada. Este bloque se documenta en Figura 5.

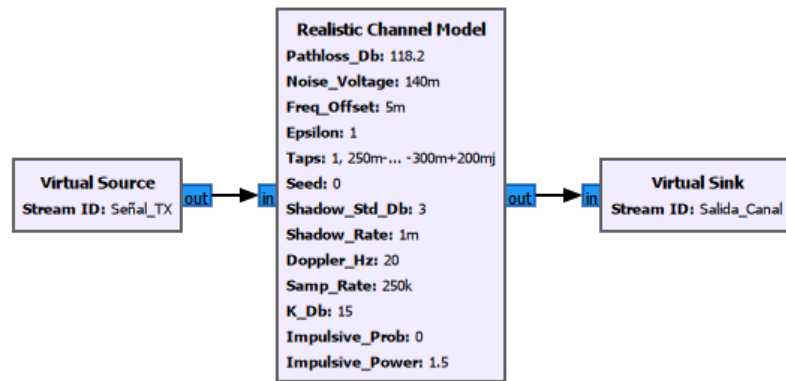


Figura 5. Channel Model para modulación GMSK

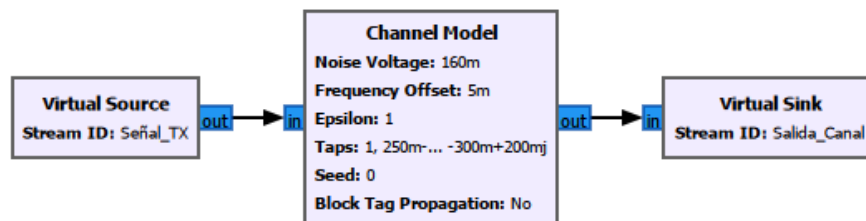


Figura 6. Channel Model para modulación FSK

A la salida del canal, la señal recibida atraviesa un conjunto de bloques destinados a estabilizar y recuperar la información. Un bloque de AGC ajusta automáticamente la amplitud para evitar saturación o niveles demasiado bajos, seguido de un Low Pass Filter que atenúa componentes fuera de banda antes de la demodulación. Luego se realiza la demodulación según el esquema elegido (FSK o GMSK) y se invierten las transformaciones aplicadas en transmisión: NRZI Decode y Descrambler. Finalmente, el HDLC Deframer extrae tramas válidas y descarta aquellas que no cumplen la verificación de integridad (FCS). En texto, la correcta recepción se confirma por la legibilidad del mensaje recuperado; en imagen, por la reconstrucción del archivo sin corrupción apreciable (image_receiver).

Medición cuantitativa en simulación: BER

Para disponer de una medida cuantitativa de desempeño se incorporó un bloque de cálculo de la Tasa de Error de Bits (BER), que compara bit a bit la secuencia transmitida con la secuencia recibida. La BER se define como el cociente entre el número de bits erróneos y el número total de bits transmitidos, de manera que valores más bajos indican una comunicación más confiable y precisa. Esta métrica se registró tanto para transmisiones de mensajes de texto como de imágenes, ya que en ambos casos la información se gestiona como un flujo de bits a nivel físico. Además, se utilizaron bloques QT GUI Time Sink y QT GUI Number Sink para visualizar, respectivamente, la superposición temporal de los bits TX/RX y la evolución numérica de BER en función de los parámetros del canal. Esta fase de simulación resultó fundamental, pues permitió depurar la cadena completa, ajustar parámetros como la sensibilidad del demodulador, la relación señal–ruido y la tasa de símbolos, y seleccionar las configuraciones más robustas antes de pasar a las pruebas de transmisión y recepción en condiciones reales con el USRP-2920 y el Hack One Rf.

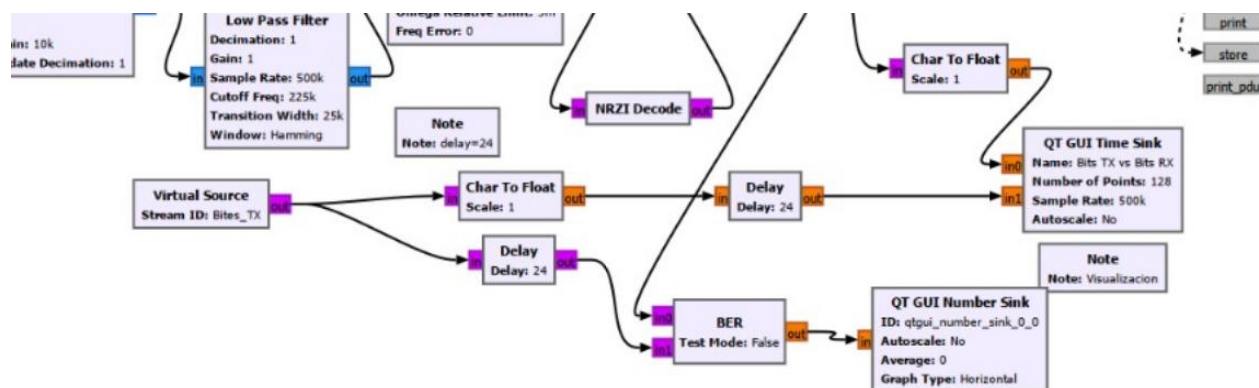
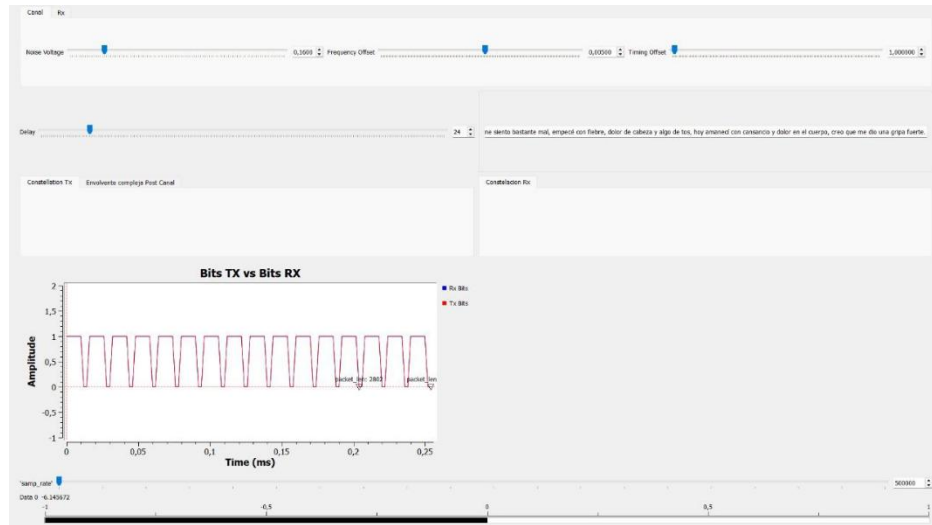


Figura 7. Bloques para cálculo de la BER

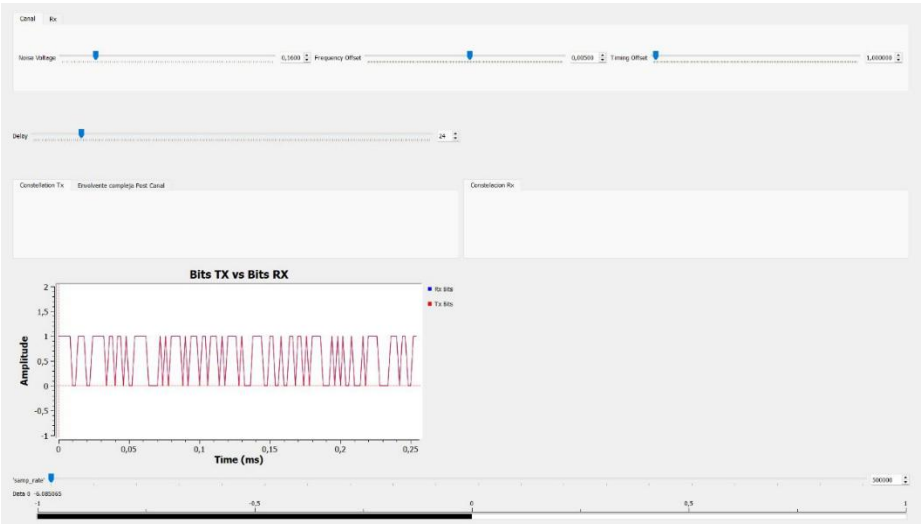
Figura 9. Bloques para cálculo de la BER



a) Análisis BER para texto con modulación GMSK y FSK en simulación.



b) Valor BER para texto simulación.



c) Análisis BER para imagen con modulación GMSK y FSK en simulación.



d) Valor BER para imagen simulación.

Caso	Modelo de Canal	$\log_{10}(\text{BER})$ (valor mostrado)	$\text{BER} = 10^{(\log_{10}(\text{BER}))}$
GMSK – Texto	Realistic Channel Model	-6.046088	8.98992×10^{-7}
GMSK – Imagen	Realistic Channel Model	-6.146085	7.12349×10^{-7}
GMSK – Texto	Channel Model	-6.145672	7.12036×10^{-7}
FSK – Imagen	Channel Model	-6.085065	8.22120×10^{-7}

Figura 10. BER para los 4 casos simulados

[illegible][illegible]

b) Esquema completo de simulación para modulación GMSK

D.0.2 Pruebas reales con hardware SDR: USRP-2920 y HackRF One (cableado e inalámbrico)

Una vez validado el funcionamiento del sistema en simulación, se implementó la cadena de transmisión y recepción en pruebas reales utilizando hardware SDR. En esta etapa se emplearon los dispositivos USRP-2920 y HackRF One, manteniendo la misma estructura funcional del flujograma y variando únicamente los bloques de interfaz de radiofrecuencia requeridos por cada equipo. Para el USRP-2920 se usaron los bloques UHD: USRP Sink/Source, mientras que para el HackRF One se emplearon los bloques osocom Sink/Source, conservando la misma secuencia de procesamiento digital (encapsulado, preprocesamiento, modulación/demodulación y reconstrucción de datos).

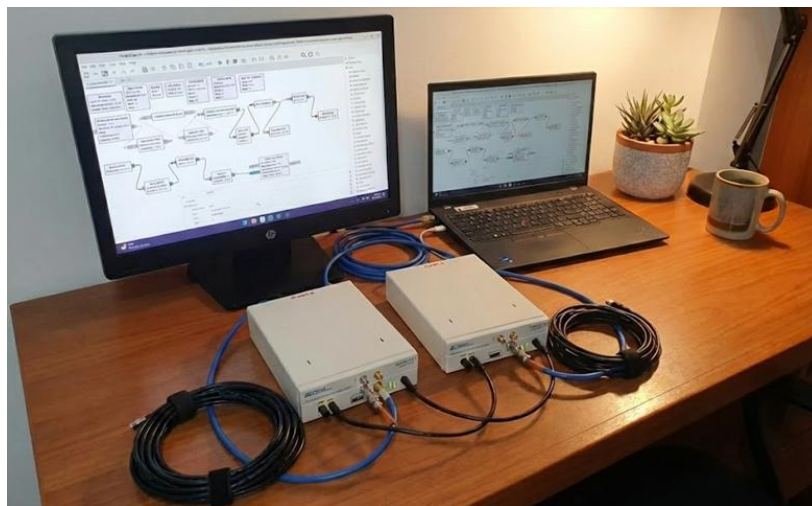
El banco de pruebas se conformó por dos computadores ejecutando GNU Radio Companion (GRC), donde uno operó como transmisor y el otro como receptor, conectados cada uno a su respectivo SDR. Las configuraciones experimentales contemplaron dos medios de enlace: enlace cableado y enlace inalámbrico por antenas, con el fin de verificar la operación del sistema bajo dos condiciones físicas distintas de propagación.

En el enlace cableado, transmisor y receptor se conectaron mediante un cable coaxial tipo C4 del laboratorio, con longitud de 24,38 m y atenuación medida $\approx 26,70$ dB. Adicionalmente, se incorporó un atenuador fijo de 30 dB en el trayecto de RF para reducir el riesgo de saturación del receptor y mantener la señal dentro de un rango operativo seguro. Esta configuración permitió ejecutar pruebas repetibles en un medio físico guiado, donde la degradación principal proviene de la atenuación total del trayecto y de la configuración de ganancia en los equipos, en lugar de efectos de propagación por aire.

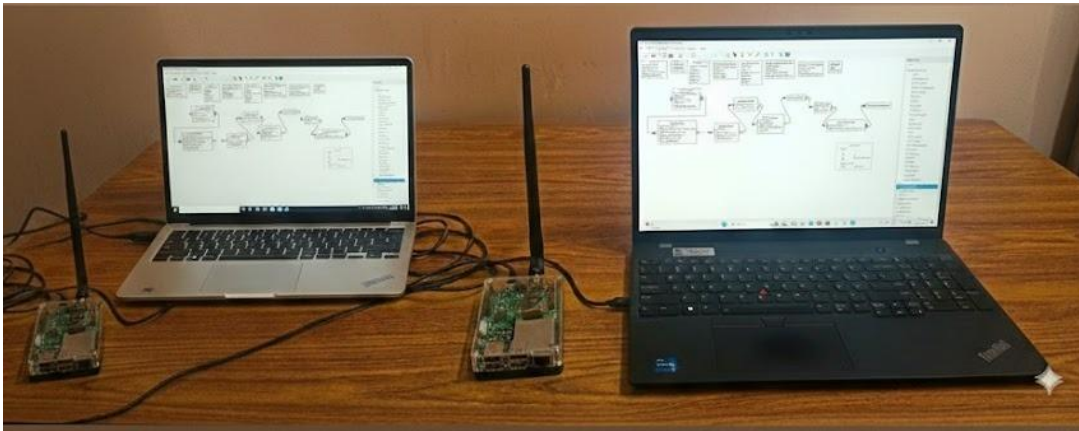
En el enlace inalámbrico, el mismo sistema se operó con antenas tanto en transmisión como en la recepción, empleando antenas con rango de trabajo 400 MHz–1 GHz. Este escenario permitió evaluar el desempeño del enlace en un canal físico no guiado, expuesto a efectos propios de propagación como variaciones de nivel por distancia/orientación y sensibilidad a desajustes de frecuencia, manteniendo la misma cadena de procesamiento digital y los mismos parámetros base de operación tales como frecuencia central, frecuencia de muestreo y ganancia, ajustados según el dispositivo y la condición de enlace.

La arquitectura general del sistema se resume en la Figura 13, donde se evidencia que la comparación entre modulaciones se realiza manteniendo constante el flujograma y cambiando únicamente el bloque de modulación/demodulación. Con base en esta estructura, se documentan los flujogramas específicos: FSK (Figura 14) y GMSK (Figura 15). Los montajes representativos con USRP-2920 y con HackRF One se presentan en la Figura 12 y sus subíndices a y b, respectivamente.

Figura 12. Montaje con dispositivos SDR.

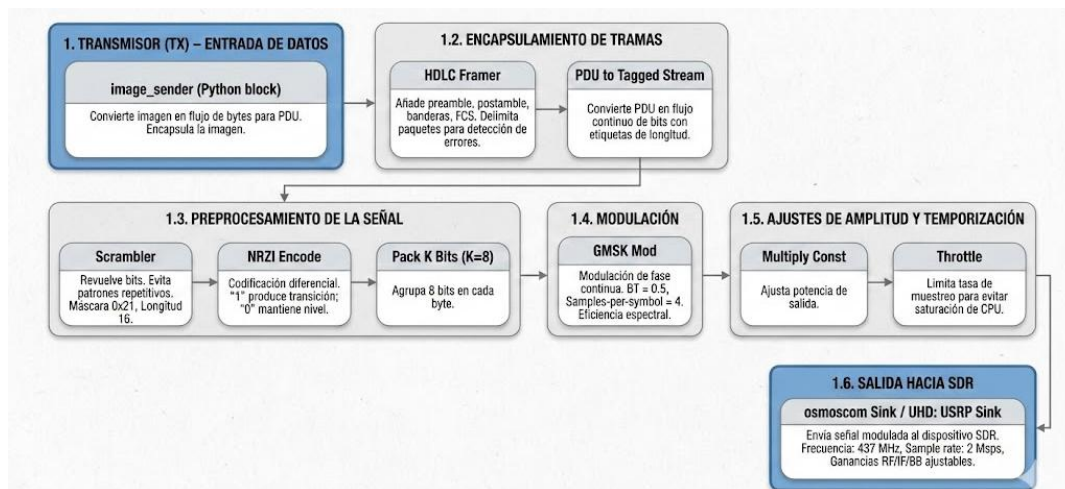


a) Montaje del transmisor / receptor con USRP 2920.

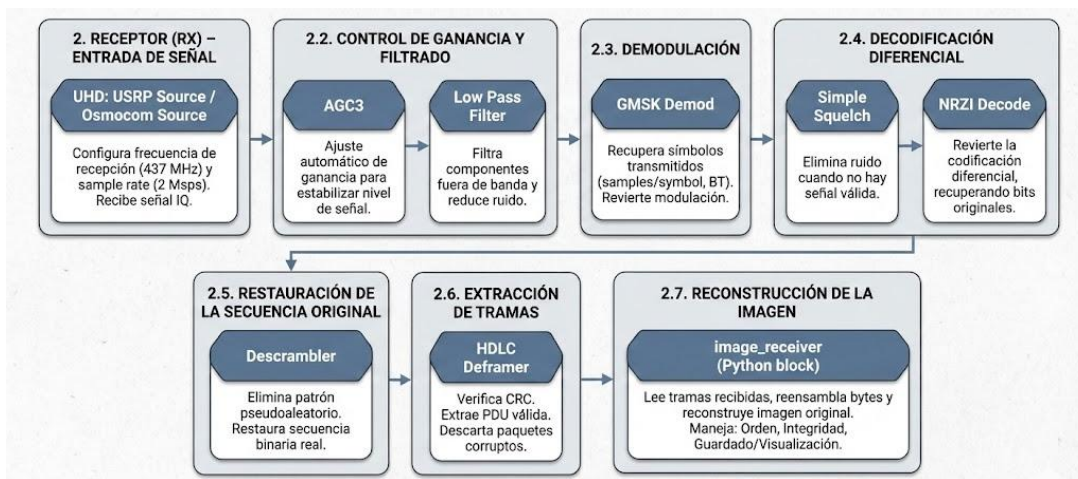


b) Montaje del transmisor / receptor con Hack One RF.

Figura 13. Diagrama de flujo para modulación GMSK y FSK, cambiando solo el bloque de modulación.

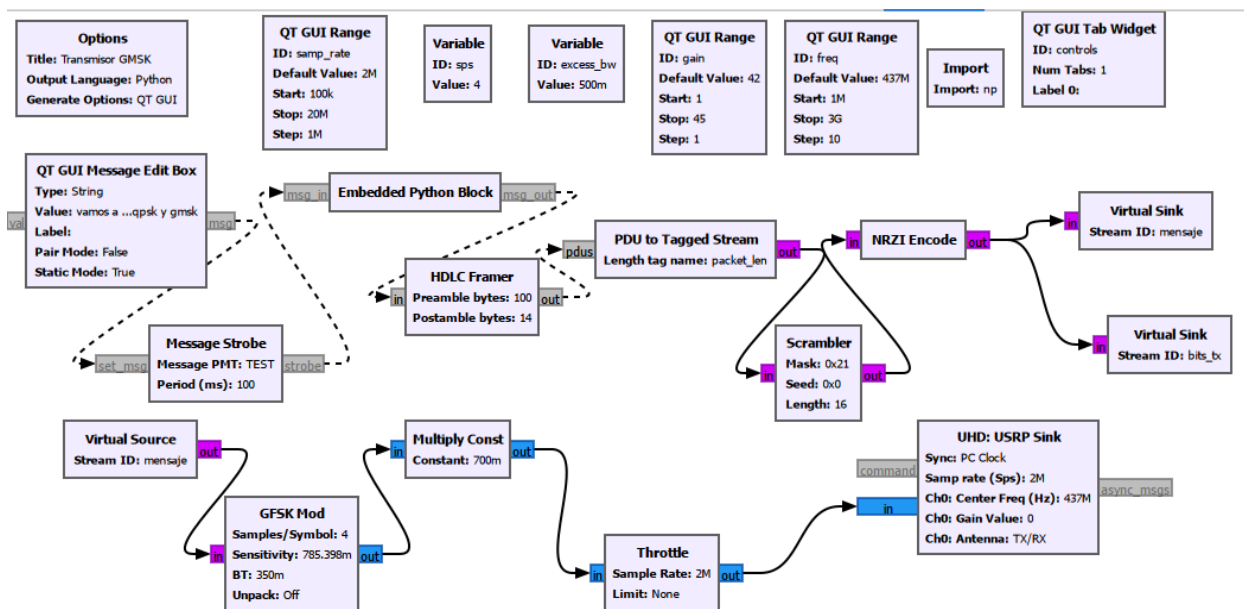


a) Transmisor

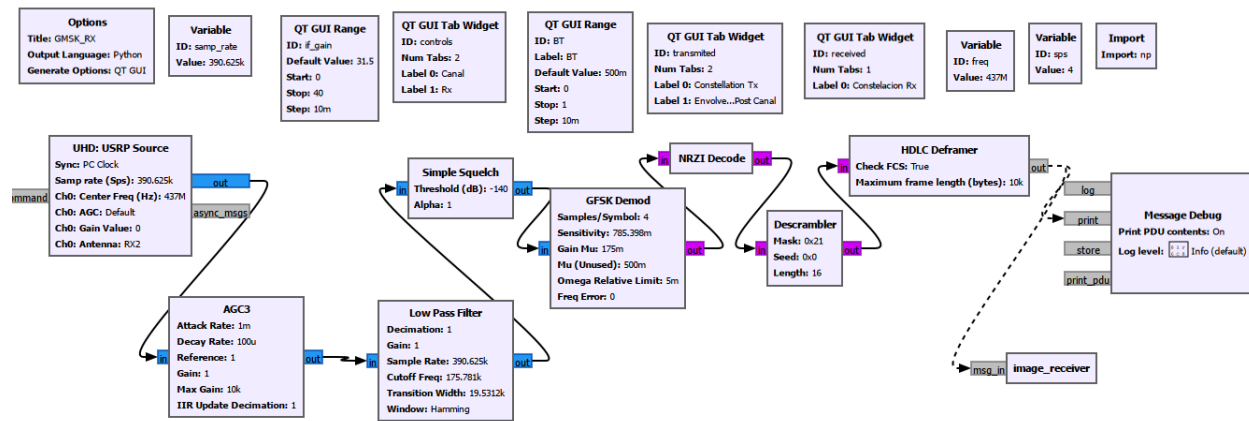


b) Receptor

Figura 14. Flujograma transmisión y recepción FSK.

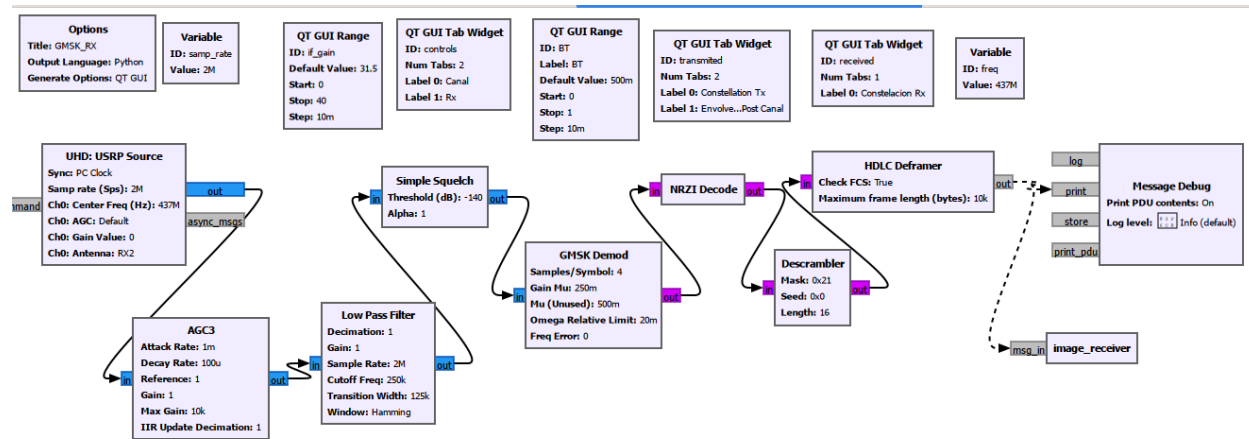


a) Flujograma transmisión con modulación FSK

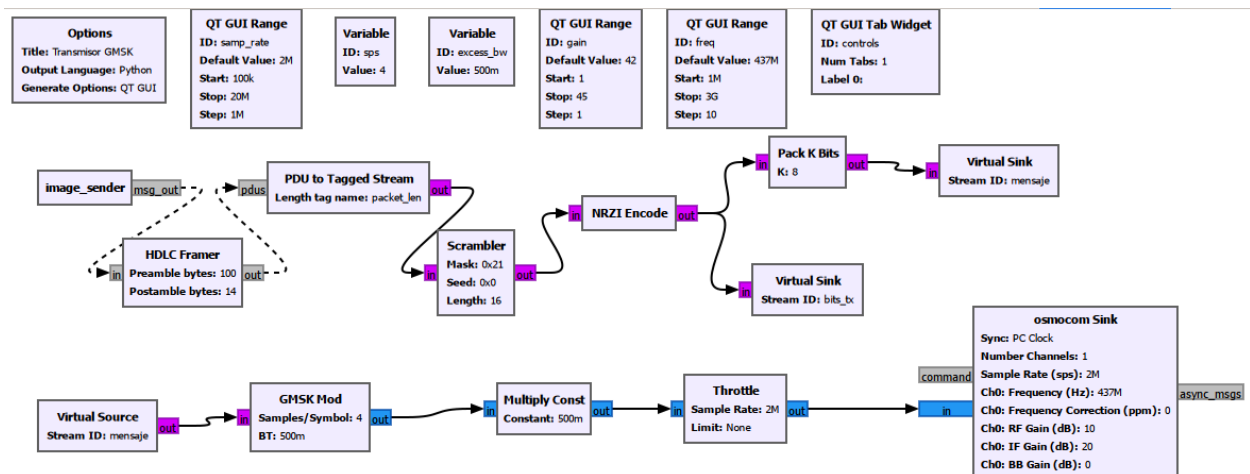


b) Flujoograma recepción con modulación FSK

Figura 15. Flujoograma transmisión y recepción GMSK.



a) Flujoograma recepción con modulación GMSK



b) Flujograma transmisión con modulación GMSK

RESULTADOS Y HALLAZGOS

Las pruebas realizadas en la Fase 3 permitieron verificar el correcto funcionamiento del sistema de comunicación SDR propuesto, tanto en simulación como en pruebas reales con hardware, utilizando las modulaciones FSK y GMSK para la transmisión de mensajes de texto e imágenes.

En el entorno de simulación, ambas modulaciones demostraron ser capaces de transmitir y recuperar correctamente la información bajo condiciones de canal controladas. El cálculo de la Tasa de Error de Bits (BER) evidenció valores bajos y estables para los escenarios evaluados, confirmando la coherencia entre la señal transmitida y la señal recibida. No obstante, al introducir degradaciones más severas mediante el Realistic Channel Model, la modulación GMSK mostró un comportamiento más robusto frente a ruido, desajustes de frecuencia y efectos de propagación simulados, manteniendo valores de BER más consistentes en comparación con FSK.

En las pruebas reales, tanto con enlace cableado como inalámbrico, se logró la transmisión y recepción exitosa de mensajes de texto e imágenes en ambos dispositivos de hardware (USRP-2920 y HackRF One). La integridad de la información se verificó mediante la correcta reconstrucción de los datos recibidos, observándose coincidencia funcional con los datos originales. El uso combinado del cable coaxial y el atenuador fijo permitió operar el sistema dentro de rangos seguros de potencia, evitando saturación del receptor y facilitando una evaluación estable del enlace físico.

En el caso del enlace inalámbrico mediante antenas, el sistema mantuvo un desempeño funcional, aunque se evidenció una mayor sensibilidad a la orientación de las antenas, al ajuste de ganancia y a pequeños desajustes de frecuencia central, especialmente en la modulación FSK. La modulación GMSK presentó mayor estabilidad en la recepción, particularmente durante la transmisión de imágenes se presentó una menor degradación perceptible de los datos recuperados.

El uso de tramas HDLC, junto con scrambling y codificación NRZI, resultó fundamental para garantizar la correcta delimitación de los datos y la detección de errores, independientemente de la modulación o del hardware utilizado. Estos mecanismos permitieron una operación consistente del sistema y facilitaron la recuperación de la información incluso en condiciones menos favorables del enlace.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo y validación experimental del sistema de comunicación SDR demostraron que la arquitectura propuesta es capaz de soportar de forma confiable la transmisión y recepción de información digital, incluyendo mensajes de texto e imágenes, tanto en simulación como en

escenarios reales. La coherencia entre los resultados simulados y los obtenidos con hardware respalda la solidez del diseño implementado en GNU Radio Companion.

La comparación entre las modulaciones evaluadas permitió concluir que, si bien FSK es funcional y adecuada en escenarios controlados, GMSK ofrece un mejor compromiso entre eficiencia espectral y robustez, especialmente frente a ruido, desajustes de frecuencia y condiciones variables del enlace inalámbrico. Esta observación justifica la elección de GMSK como esquema preferente para las pruebas reales y para eventuales aplicaciones en entornos rurales o de infraestructura limitada.

El uso de enlaces cableados con atenuación controlada fue una estrategia efectiva para la validación inicial del sistema, mientras que las pruebas con antenas evidenciaron la necesidad de un ajuste cuidadoso de parámetros de ganancia, frecuencia central y sincronización, aspectos críticos en sistemas SDR operando en condiciones reales.

Como recomendaciones para trabajos futuros, se sugiere:

- Incorporar mecanismos automáticos de sincronización y compensación de frecuencia para mejorar la robustez del enlace inalámbrico.
- Extender las pruebas a mayores distancias y diferentes escenarios de propagación.
- Integrar métricas adicionales de desempeño en pruebas reales, como estimaciones indirectas de BER o calidad de enlace.
- Evaluar esquemas de modulación y codificación más avanzados que permitan aumentar la tasa de datos manteniendo la confiabilidad.

En conclusión, los resultados obtenidos en esta fase validan la viabilidad del sistema SDR propuesto y su potencial aplicación en escenarios donde se requiera una solución flexible, configurable y de bajo costo para la transmisión de información en zonas de difícil acceso.