

SISTEMA DE MONITOREO DEL PORCENTAJE DE MODULACIÓN DE EMISORAS DE RADIO AM Y FM EN RCN RADIO

MIGUEL FERNANDO SALAS HERRERA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DE CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CALI

2026

SISTEMA DE MONITOREO DEL PORCENTAJE DE MODULACIÓN DE EMISORAS DE RADIO AM Y FM EN RCN RADIO

MIGUEL FERNANDO SALAS HERRERA

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Carlos Andrés Giraldo Castañeda

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DE CALI

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CALI

2026

Santiago de Cali, 15 de julio de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana – Cali
Dr. Mateo López Victoria
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial Saludo.

Por medio de la presente me permito presentarle el Trabajo de Grado titulado “SISTEMA DE MONITOREO DEL PORCENTAJE DE MODULACIÓN DE EMISORAS DE RADIO AM Y FM EN RCN RADIO”.

Espero que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,



Miguel Fernando Salas

Santiago de Cali, 15 de julio de 2026

Señores

Pontificia Universidad Javeriana – Cali

Dr. Mateo López Victoria

Decano

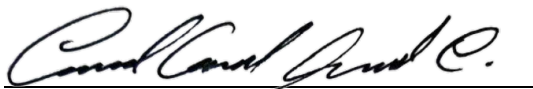
Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ciudad

Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “SISTEMA DE MONITOREO DEL PORCENTAJE DE MODULACIÓN DE EMISORAS DE RADIO AM Y FM EN RCN RADIO”, realizado por Miguel Fernando Salas, estudiante de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Andrés Giraldo', is written over a horizontal line.

MSc. Carlos Andrés Giraldo

Director Trabajo de Grado

AGRADECIMIENTOS

A mi padre, por ser mi ejemplo a seguir y por su trabajo constante para darme todas las oportunidades, le agradezco inmensamente por impulsarme a buscar la excelencia, por motivarme a entregar lo mejor de mí y darme todo su apoyo.

A mi madre, por cuidar de mi bienestar con dedicación y por su compañía en cada momento, le agradezco enormemente por su paciencia y la confianza que ha puesto en mí.

A mi director de proyecto, el profesor Carlos Giraldo, por guiarme e instruirme a lo largo de todo el desarrollo de este trabajo.

A la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, por brindarme una educación de tan alta calidad.

A la empresa RCN Radio, por su colaboración en el desarrollo del proyecto y por abrirme las puertas de sus instalaciones.

A mis profesores, por todo el conocimiento que me transmitieron a lo largo de mi formación.

A mis compañeros, por su amistad y por acompañarme en este camino.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

GLOSARIO

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1 Regulaciones internacionales
- 1.2 Regulaciones nacionales
- 1.3 Modulación de amplitud (AM)
- 1.4 Modulación de frecuencia (FM)
- 1.5 Radio Definida por Software (SDR)
- 1.6 GNU Radio
- 1.7 Monitores de modulación
- 1.8 RCN Radio
- 1.9 Antecedentes

2. DISEÑO DEL SISTEMA

- 2.1 Requerimientos del sistema
- 2.2 Selección de componentes y justificación
- 2.3 Arquitectura general del sistema
- 2.4 Requerimientos del reporte semanal

3. IMPLEMENTACIÓN

- 3.1 Configuración del hardware
- 3.2 Implementación del software de monitoreo
- 3.3 Dashboard y monitoreo de audio
- 3.4 Reporte semanal
- 3.5 Integración con app de gestión técnica
- 3.6 Diseño e integración del gabinete
- 3.7 Manual de usuario

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

- 4.1 Plan de pruebas
- 4.2 Prueba funcional
- 4.3 Prueba de precisión
- 4.4 Pruebas de reporte y estabilidad
- 4.5 Discusión de resultados

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

- 5.1 Planteamiento y alcance del análisis
- 5.2 Comparación de las alternativas
- 5.3 Consideraciones regulatorias

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

- 6.1 Conclusiones
- 6.2 Limitaciones y trabajo futuro

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Señal moduladora, portadora y onda modulada AM al 50% y 100%

Figura 2. Distorsión por sobremodulación

Figura 3. Modulación FM: señal portadora, moduladora y señal modulada

Figura 4. Separación de canales FM adyacentes y bandas de guarda

Figura 5. Espectro de la señal FM estereofónica compuesta

Figura 6. Arquitectura del RTL-SDR Blog V4

Figura 7. Arquitectura general del sistema de monitoreo

Figura 8. Cadena de procesamiento de la señal FM

Figura 9. Cadena de procesamiento de la señal AM

Figura 10. Diagrama de bloques del ciclo de monitoreo

Figura 11. Dashboard web del sistema de monitoreo

Figura 12. Modulación de emisoras en la aplicación de gestión técnica

Figura 13. Gabinete del sistema de monitoreo: panel frontal y lateral

Figura 14. Gabinete del sistema de monitoreo: panel trasero

Figura 15. Interior del gabinete: distribución de componentes y cableado

Figura 16. Sistema completo de monitoreo: gabinete, antena y alimentación

Figura 17. Interfaz del sistema durante el monitoreo de una emisora FM

Figura 18. Dispersión de las mediciones del sistema frente al monitor de referencia

Figura 19. Correo de reporte semanal

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura de bandas de frecuencia según la UIT-R

Tabla 2. Monitores de modulación

Tabla 3. Plan de pruebas del sistema de monitoreo

Tabla 4. RMSE entre el sistema desarrollado y los monitores de referencia

Tabla 5. Costo aproximado de los componentes de una unidad del sistema

GLOSARIO

ADC: Analog to Digital Converter. Componente electrónico que convierte señales analógicas continuas en valores digitales discretos.

AM: Amplitud Modulada. Técnica de modulación en la que la amplitud de la señal portadora varía en proporción a la señal de información.

ANE: Agencia Nacional del Espectro. Entidad colombiana encargada de la planeación, atribución, vigilancia y control del espectro radioeléctrico.

CSV: Comma Separated Values. Formato de archivo de texto plano para almacenamiento de datos tabulares.

Cuasi-pico (QP): Detector de señal con constante de tiempo de ataque corta y constante de tiempo de decaimiento larga.

dB: Decibelio. Unidad logarítmica que expresa la relación entre dos magnitudes, usada para cuantificar potencia o amplitud de señales.

Envolvente: Curva que une los valores pico de una señal modulada en amplitud. Su forma reproduce la señal moduladora.

FFT: Fast Fourier Transform. Algoritmo eficiente para calcular la transformada discreta de Fourier, usado para obtener la representación en frecuencia de una señal.

Firestore: Base de datos NoSQL en la nube de Firebase, organizada en colecciones y documentos.

Flowgraph: Grafo de flujo de señal en GNU Radio. Diagrama que interconecta bloques de procesamiento de señales para formar una cadena de procesamiento.

FM: Frecuencia Modulada. Técnica de modulación en la que la frecuencia instantánea de la señal portadora varía en proporción a la señal de información.

GNU Radio: Kit de herramientas de código abierto para procesamiento de señales y desarrollo de sistemas de Radio Definida por Software.

GRC: GNU Radio Companion. Interfaz gráfica de GNU Radio que permite diseñar flowgraphs de manera visual.

Hz: Hertz. Unidad del Sistema Internacional de medida de la frecuencia, equivalente a un ciclo por segundo.

IIR: Infinite Impulse Response. Filtro digital recursivo cuya salida depende tanto de las entradas actuales como de salidas anteriores.

IQ: In-phase / Quadrature. Representación compleja de una señal en banda base compuesta por la componente en fase I y la componente en cuadratura Q.

LPF: Low Pass Filter. Filtro que permite el paso de frecuencias por debajo de una frecuencia de corte y atenúa las superiores.

MinTIC: Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia.

MS/s: Megamuestras por segundo. Unidad de tasa de muestreo equivalente a un millón de muestras por segundo.

P99: Percentil 99. Valor estadístico por debajo del cual se encuentra el 99% de las observaciones de un conjunto de datos.

PLL: Phase-Locked Loop. Circuito de control que sincroniza la fase de una señal generada internamente con la de una señal de referencia. En el monitor AM se usa para seguimiento de portadora.

Porcentaje de modulación (FM): Razón entre la desviación de frecuencia instantánea de la señal transmitida y la desviación de frecuencia máxima permitida, expresada en porcentaje.

Porcentaje de modulación (AM): Relación entre la mitad de la diferencia entre las amplitudes máxima y mínima de la envolvente de la señal modulada y la amplitud promedio de la portadora, expresada en porcentaje.

PTNRS: Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora. Normativa del MinTIC que establece los parámetros técnicos para las emisoras FM y AM en Colombia.

PyQt5: Conjunto de bindings de Python para el framework Qt5, utilizado para desarrollar la interfaz gráfica del monitor combinado.

Quadrature Demod: Bloque de GNU Radio que calcula la frecuencia instantánea de una señal compleja a partir de la diferencia de fase entre muestras consecutivas.

Raspberry Pi 5: Computador de placa reducida con procesador ARM Cortex-A76 de cuatro núcleos a 2,4 GHz y 8 GB de RAM, utilizado como unidad de procesamiento del sistema.

RDS: Radio Data System. Protocolo que permite transmitir datos digitales como el nombre de la emisora, información del programa y metadatos. Por medio de una subportadora en la señal FM.

RTL-SDR Blog V4: Receptor SDR de bajo costo basado en el chip RTL2832U con sintonizador Rafael Micro R828D.

SDR: Software Defined Radio. Sistema de radiocomunicaciones en el que funciones tradicionalmente implementadas en hardware se realizan mediante software.

SMTP: Simple Mail Transfer Protocol. Protocolo estándar para el envío de correos electrónicos.

SNR: Signal to Noise Ratio. Medida que compara el nivel de la señal deseada con el nivel de ruido de fondo, expresada en dB.

SoapySDR: Capa de abstracción de hardware de código abierto que proporciona una API unificada para el control de distintos receptores SDR.

UDP: User Datagram Protocol. Protocolo de transporte sin conexión utilizado para la transmisión de audio en tiempo real desde el monitor hacia el dashboard.

UIT-R: Unión Internacional de Telecomunicaciones, sector de Radiocomunicaciones. Organismo encargado de la gestión del espectro radioeléctrico a nivel mundial.

Upconverter: Circuito que traslada una señal de baja frecuencia a una frecuencia más alta mediante su mezcla con una señal de referencia generada por un oscilador local fijo.

USB: Universal Serial Bus. Interfaz de comunicación estandarizada.

RESUMEN

Este trabajo desarrolla un dispositivo de medición automático, basado en radio definida por software, para monitorear de manera continua el nivel de modulación de las emisoras de una cadena radial en la ciudad de Cali. Este proyecto responde a la necesidad de monitorear los índices de modulación de las emisoras de RCN Radio en Cali, de manera regular y cumpliendo la normativa, teniendo en cuenta que el monitoreo se realizaba de manera manual y esporádicamente por el personal técnico. Este proceso ofrecía una sola muestra diaria del parámetro de interés, la cual era poco representativa y de baja confiabilidad. Se diseñó, construyó y caracterizó un prototipo que integra un receptor de radio definida por software y una Raspberry Pi, sobre los cuales se implementaron dos cadenas de procesamiento, una para frecuencia modulada y otra para amplitud modulada, que permiten extraer datos del porcentaje de modulación de las emisoras. El prototipo sintoniza secuencialmente cada emisora, procesa los datos, los almacena de forma local, los publica en un tablero de visualización accesible por red y envía un reporte semanal por correo electrónico al encargado de la gestión técnica de la compañía. Además, el prototipo también se comunica con la aplicación que usan los ingenieros de la empresa para la gestión técnica. Se ejecutó un plan de pruebas funcionales, de precisión, de estabilidad y de reporte. El sistema operó de forma continua durante más de veinte días sin intervención, con una disponibilidad superior al noventa y nueve por ciento. Al contrastar las mediciones con los monitores comerciales de referencia, el error se mantuvo dentro del criterio de aceptación para la mayoría de las emisoras. El costo por unidad resultó cercano a los ciento cuarenta dólares, muy inferior al de los equipos comerciales equivalentes, lo que confirma una alternativa viable, escalable y más confiable que el proceso manual.

Palabras clave: Porcentaje de modulación, Radio, SDR, AM, FM.

ABSTRACT

This work develops an automatic measurement device, based on software-defined radio, to continuously monitor the modulation level of the stations of a radio network in the city of Cali. This project responds to the need to monitor the modulation indices of RCN Radio's stations in Cali on a regular basis and in compliance with regulations, given that monitoring was carried out manually and sporadically by technical staff. This process provided only a single daily sample of the parameter of interest, which was not very representative and had low reliability. A prototype was designed, built, and characterized that integrates a software-defined radio receiver and a Raspberry Pi, on which two processing chains were implemented, one for frequency modulation and another for amplitude modulation, which allow extracting data on the modulation percentage of the stations. The prototype sequentially tunes each station, processes the data, stores it locally, publishes it on a network-accessible visualization dashboard, and sends a weekly report by email to the person in charge of the company's technical management. In addition, the prototype also communicates with the application used by the company's engineers for technical management. A functional, precision, stability, and reporting test plan was executed. The system operated continuously for more than twenty days without intervention, with availability above ninety-nine percent. When contrasting the measurements with the commercial reference monitors, the error remained within the acceptance criterion for most stations. The cost per unit came out close to one hundred forty dollars, much lower than that of equivalent commercial equipment, which confirms a viable, scalable alternative that is more reliable than the manual process.

Keywords: Modulation percentage, Radio, SDR, AM, FM.

INTRODUCCIÓN

La radiodifusión es un método de comunicación que ha tenido una gran relevancia a nivel mundial desde el siglo pasado, abriendo paso a un gran número de programas radiales ya sean musicales, noticieros, deportivos, reportajes, tertulias, entre otros. Gracias a la radio se han creado grandes comunidades de aficionados a la música, se brindan noticias en tiempo real, se puede seguir la narración deportiva y, en general, se logró conectar a las personas de una manera nunca vista. A partir de la radio surgieron grandes compañías dedicadas a transmitir programas radiales mediante sus emisoras.

Todas las emisoras de radio en Colombia están reguladas por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), en términos de la potencia de transmisión, ubicación de los transmisores, frecuencias asignadas para enlaces y transmisiones, y otras regulaciones técnicas. Uno de los parámetros esenciales que se regula en una emisión de radio es el porcentaje de modulación, ya que un valor alto de esta variable podría causar interferencia en un canal vecino. Por otro lado, a las emisoras les interesa mantener un porcentaje de modulación suficiente, ya que una modulación baja puede ser la causa de un bajo volumen y peor calidad en el sonido del receptor.

Por lo anterior, las compañías propietarias de emisoras de radio deben cumplir ciertos requisitos para demostrar que están en la capacidad de monitorear y controlar el porcentaje de modulación de cada una de sus emisoras, como por ejemplo el requisito de tener en funcionamiento un monitor de modulación. Adicionalmente, a las cadenas de radio también les interesa conocer el porcentaje de modulación de sus emisoras para corregir problemas en los equipos de la cadena de audio, desde las consolas y mezcladoras hasta los transmisores.

El presente trabajo de grado surge a partir de la experiencia del autor como practicante universitario en la empresa RCN Radio en Cali y de reuniones con el director técnico regional de la misma empresa, a través de las cuales se identificó un problema de ineficiencia y poca confiabilidad en el proceso de monitoreo del porcentaje de modulación de las emisoras de la cadena. A continuación, se presenta la definición del problema, los objetivos, alcances y justificación del proyecto.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A partir de la observación del proceso de monitoreo del porcentaje de modulación en RCN Radio Cali, se identificaron dos síntomas principales asociados al problema de ineficiencia y poca confiabilidad.

En primer lugar, el monitoreo de modulación se realiza regularmente una sola vez al día, lo cual no constituye una muestra representativa para tener conocimiento del comportamiento del parámetro. Teniendo en cuenta que el porcentaje de modulación es altamente variable a lo largo del día, ya que se ve afectado por la amplitud de la señal de entrada al sistema de transmisión, se observa que la frecuencia de muestreo es insuficiente y los datos obtenidos con este método no representan realmente el comportamiento del parámetro de interés, ni permiten hacer un seguimiento adecuado.

El segundo síntoma importante tiene que ver con la percepción de poca confiabilidad que tienen los datos obtenidos en el monitoreo, lo cual se da principalmente debido al método por el cual se toman los datos y la alta variabilidad del parámetro de interés.

Las principales causas de estos síntomas radican en la naturaleza manual del proceso. La toma de datos es realizada por el ingeniero de turno, quien debe desplazarse al cuarto de enlaces y luego usar el monitor para sintonizar cada emisora por medio de los botones del equipo, verificando el porcentaje de

modulación de cada una de manera visual mediante un medidor de aguja que en ocasiones es difícil de leer por la velocidad y variabilidad con que se mueve la aguja. Posteriormente, el ingeniero debe digitar cada medición en la aplicación de gestión técnica de la empresa instalada en su teléfono inteligente, es decir, no existe un mecanismo que permita transferir de manera automática los datos de las mediciones al sistema de información.

Este protocolo completo para el monitoreo de la modulación requiere de la presencia de los ingenieros y dedicación de su tiempo. El proceso puede tomar aproximadamente 10 a 15 minutos, lo cual dificulta que se pueda repetir varias veces en el día, teniendo en cuenta las demás tareas que realizan. Adicionalmente, hay días en que no se realiza el monitoreo, ya sea porque es un día festivo y el cuerpo técnico no está necesariamente en la sede, o porque se omite debido a otras responsabilidades y actividades con las emisoras de radio.

En el caso específico de RCN Radio, la empresa cuenta con un monitor de modulación TFT 844 para FM y un monitor TFT 923 para AM, los cuales no son compatibles con el sistema de información y gestión técnica de la empresa, ya que no pueden controlarse de manera automática y no brindan datos digitales que puedan ser adquiridos por las bases de datos de la aplicación de gestión. Sus mediciones son analógicas y su control es manual, por lo tanto, no permite realizar un monitoreo continuo y automático de todas las emisoras de la cadena de radio [16] [17].

Teniendo en cuenta toda la caracterización del problema, se identificó la necesidad de mejorar el proceso de monitoreo del porcentaje de modulación de las emisoras radiales de la cadena. Este proyecto de grado se propuso mejorar dicho proceso mediante la implementación de un dispositivo basado en Radio Definida por Software (SDR) que brinde mediciones automáticas de forma constante y prolongada, genere reportes periódicos y sea compatible con el sistema de gestión técnica de la empresa RCN Radio.

Es así como se llegó a la pregunta de investigación: *¿Cómo implementar un dispositivo de monitoreo de porcentaje de modulación, digital y de funcionamiento continuo, para emisoras AM y FM de RCN Radio en Cali?*

OBJETIVOS

Objetivo general

Implementar un dispositivo de medición y monitoreo continuo del porcentaje de modulación de las emisoras FM y AM de la empresa RCN Radio, utilizando Radio Definida por Software (SDR), garantizando mejor confiabilidad en las medidas.

Objetivos específicos

1. Diseñar el dispositivo que permita monitorear el porcentaje de modulación de emisoras comerciales de FM y AM.
2. Construir y caracterizar un prototipo funcional del dispositivo monitor de modulación.
3. Integrar el prototipo con el sistema de información y gestión de RCN Radio.
4. Desarrollar y ejecutar un plan de pruebas para evaluar el funcionamiento del sistema de monitoreo.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento está organizado de la siguiente manera. El Capítulo 1 presenta el marco teórico, con las regulaciones que rigen la radiodifusión sonora, los fundamentos de la modulación en amplitud y en frecuencia y los conceptos de Radio Definida por Software. El Capítulo 2 describe el diseño del sistema, los requerimientos, la selección de componentes, la arquitectura general y los bloques

de procesamiento de las señales. El Capítulo 3 detalla la implementación, incluyendo el hardware, el software de monitoreo y los métodos de presentación de información. El Capítulo 4 expone el plan de pruebas, los resultados y la discusión de estas. El Capítulo 5 desarrolla el análisis económico. Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones, las limitaciones y el trabajo futuro.

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para comprender el diseño e implementación del sistema de monitoreo del porcentaje de modulación. Se abordan las regulaciones internacionales y nacionales que rigen la radiodifusión sonora, los principios de la modulación en amplitud y en frecuencia, los conceptos de Radio Definida por Software y el framework GNU Radio utilizado en el procesamiento de señales, así como una revisión de los monitores de modulación existentes en el mercado. También se presenta la descripción de la empresa RCN Radio y los antecedentes relevantes al proyecto.

1.1 REGULACIONES INTERNACIONALES

El organismo más importante en la regulación de las telecomunicaciones es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). En el sector de las comunicaciones, la UIT-R desempeña un papel fundamental en la gestión del espectro de frecuencias radioeléctricas y de las órbitas de los satélites. El principal objetivo de la UIT-R es garantizar el funcionamiento sin interferencias de los sistemas de radiocomunicaciones, mediante la aplicación del Reglamento de Radiocomunicaciones y los Acuerdos Regionales. Además, para la normalización del sector se crean Recomendaciones cuyo objetivo es garantizar la calidad y eficacia del funcionamiento de los sistemas de radiocomunicaciones [1].

En el Reglamento de Radiocomunicaciones Vol.1 publicado por la UIT-R se indican las bandas en que se subdivide el espectro radioeléctrico, designadas por números. La radiodifusión en frecuencia modulada opera en la banda 8 (VHF),

correspondiente al rango de 30 a 300 MHz, clasificada como ondas métricas. Por su parte, la radiodifusión en amplitud modulada opera en la banda 6 (MF), correspondiente al rango de 300 a 3000 kHz, clasificada como ondas hectométricas [1]. La Tabla 1 presenta la nomenclatura de las bandas de frecuencia definidas por la UIT-R.

Tabla 1. Nomenclatura de bandas de frecuencia según la UIT-R

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3 000 kHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3 000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas
12		300 a 3 000 GHz	Ondas decimilimétricas

Fuente: UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). Reglamento de Radiocomunicaciones. Vol. 1. Ginebra: UIT, 2020.

En el mismo reglamento se definen los siguientes términos fundamentales para el presente trabajo. La emisión fuera de banda se define como la emisión en una o varias frecuencias situadas inmediatamente fuera de la anchura de banda necesaria, resultante del proceso de modulación, excluyendo las emisiones no esenciales. La anchura de banda necesaria se define como la banda de frecuencias estrictamente suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y con la calidad requeridas. La interferencia se define como el efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones

o sus combinaciones sobre la recepción en un sistema de radiocomunicación, que se manifiesta como degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de la información [1].

En la recomendación UIT-R BS.412-9 [14] se establece que para F.M. los canales deben asignarse de tal manera que las frecuencias portadoras de la banda sean múltiplos enteros de 100 kHz y exista una separación de canales uniforme de 100 kHz. En la recomendación UIT-R BS.450-4 [2] se indica que en el caso de señales estereofónicas, estas deben tener una excursión máxima de frecuencia de 75 kHz.

1.2 REGULACIONES NACIONALES

La regulación técnica de las emisoras de radio en Colombia está a cargo del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), el cual se encarga de diseñar, adoptar y promover las políticas y planes en el sector de las comunicaciones, incluyendo la radiodifusión AM y FM [3].

Otro agente importante en la regulación es la Agencia Nacional del Espectro (ANE), la cual se encarga de administrar de manera eficiente el espectro radioeléctrico por medio de la planeación, atribución, vigilancia y control de este. La ANE asesora al MinTIC con el diseño y formulación de políticas, planes y programas relacionados con el espectro radioeléctrico.

MinTIC publica el Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora tanto para Frecuencia Modulada como para Amplitud Modulada (PTNRS F.M y PTNRS A.M). El objetivo del PTNRS es establecer un marco técnico que permita el uso de la mayor cantidad de canales radioeléctricos libres de interferencias, facilitar la asignación de estos canales y racionalizar el uso del espectro según los lineamientos del Reglamento de Radiocomunicaciones y las Recomendaciones de la UIT-R [3] [6].

En el numeral 3.15 del PTNRS F.M se indica que se le atribuye la banda de 88 MHz a 108 MHz al servicio de radiodifusión sonora en frecuencia modulada, es decir que hace parte de la banda 8 según la subdivisión de la UIT-R, correspondientes a ondas métricas [6].

En el numeral 3.24 del PTNRS F.M se define el porcentaje de modulación como la razón de la oscilación real de la frecuencia a la oscilación de frecuencia definida como el 100% de modulación a una oscilación de frecuencia de ± 75 kHz [6].

En el numeral 5.4 del PTNRS F.M se indican los límites que tiene el porcentaje de modulación. En ningún caso debe exceder de los siguientes valores en las crestas de recurrencia frecuente: para sistemas monofónicos o estereofónicos, únicamente 100%; para sistemas monofónicos o estereofónicos que utilicen una subportadora, 110%; y para sistemas monofónicos o estereofónicos que utilicen dos o más subportadoras, 115% [6].

En el numeral 3.1.24 del PTNRS A.M se indica que se le atribuye la banda de 535 kHz a 1705 kHz al servicio de radiodifusión sonora en amplitud modulada, es decir que hace parte de la banda 6 según la subdivisión de la UIT-R, correspondientes a ondas hectométricas [3].

En el numeral 4.4.0 del PTNRS A.M se establece la división de la banda de AM en 117 canales con frecuencias portadoras múltiplos de 10 kHz, desde 540 kHz hasta 1700 kHz y con una separación entre canales de 10 kHz [3].

En el numeral 3.1.19 del PTNRS A.M se define el porcentaje de modulación como la relación de la mitad de la diferencia entre las amplitudes máxima y mínima de la onda modulada en amplitud, con amplitud promedio de la onda modulada expresada en porcentaje [3].

En el numeral 4.5.0 del PTNRS A.M se estipula que el porcentaje de modulación negativa debe ser menor al 100% mientras que el porcentaje de modulación positiva debe ser máximo 125% [3].

1.3 MODULACIÓN DE AMPLITUD (AM)

La Modulación de Amplitud (AM) es la técnica usada en radiodifusión AM para transmitir las señales de audio a través del espacio electromagnético. Una de las principales ventajas de la Modulación de Amplitud es su capacidad de ofrecer una amplia cobertura geográfica, lo que la convierte en una herramienta esencial para la distribución de contenido como programas de radio, música y noticias, a comunidades tanto urbanas como rurales.

Aunque la radiodifusión FM y las plataformas de transmisión en línea han ganado popularidad, la radiodifusión AM sigue siendo importante por su capacidad para proporcionar cobertura extendida, incluso en áreas rurales y en emergencias.

La modulación en amplitud consiste en variar la amplitud de una señal portadora de alta frecuencia, en proporción del valor instantáneo de la señal moduladora, generando una señal modulada cuya amplitud varía en proporción a la señal de información, pero conserva la alta frecuencia de la portadora. La señal portadora es una onda senoidal de frecuencia f_c mientras que la señal moduladora contiene la información que se desea transmitir en forma de variaciones en su amplitud.

La Figura 1 ilustra la señal moduladora, la señal portadora y la onda modulada resultante al 50% y al 100% de modulación, permitiendo visualizar cómo varía la amplitud de la portadora según la señal de información.

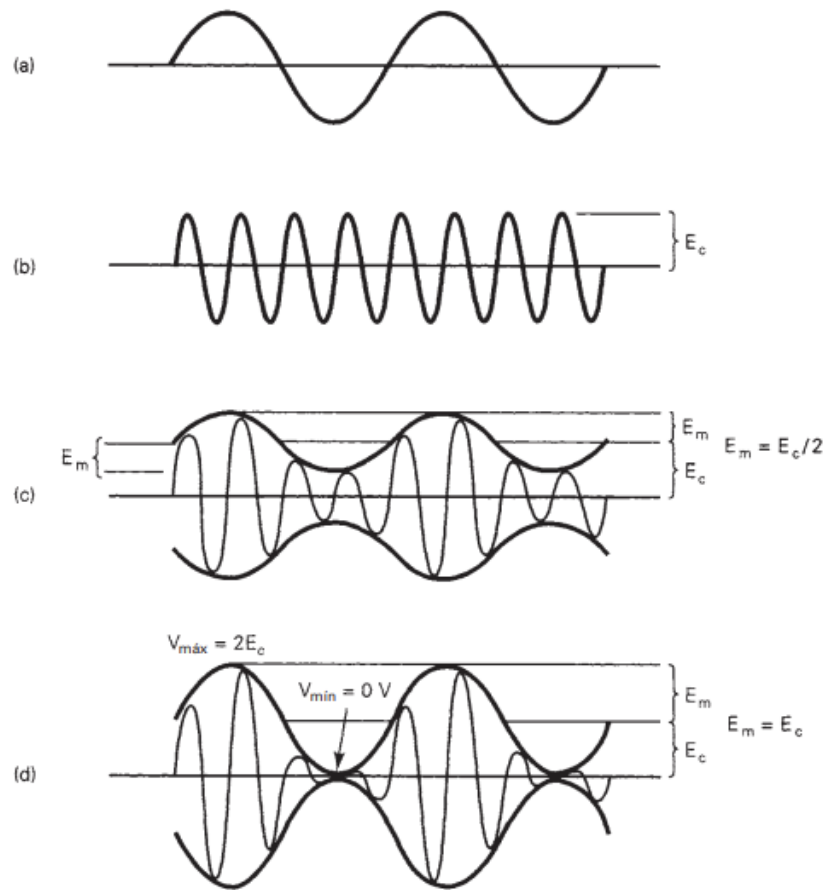


Figura 1. Señal moduladora (a), señal portadora (b), onda modulada 50% (c), onda modulada 100% (d). Porcentaje de modulación de una señal de AM. Fuente: Tomasi 2003 [5]

Siendo $E_c \cos(2\pi f_c t)$ la señal portadora y $m(t)$ la moduladora, la fórmula matemática que representa la señal modulada en AM es:

$$S_{AM}(t) = E_c [1 + a \cdot m(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

donde S_{AM} es la señal modulada en amplitud, E_c es la amplitud de la portadora sin modular, a es el índice de modulación AM y f_c es la frecuencia de la portadora.

El porcentaje de modulación en AM, denotado como $\%M_{AM}$ corresponde al índice de modulación expresado en porcentaje [3] y se calcula según la ecuación 2:

$$\%M_{AM} = \frac{E_m}{E_c} \times 100 = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}} \times 100 \quad (2)$$

donde V_{max} y V_{min} son las amplitudes máxima y mínima de la envolvente de la señal AM, y E_m es la amplitud de la señal moduladora.

Un porcentaje de modulación bajo puede inducir problemas de ruido en la recepción, debido a que se ve reducida la potencia de la señal transmitida, lo cual implica que la relación señal-ruido sea pequeña. Por lo tanto, es deseable que el porcentaje de modulación sea alto. Sin embargo, un porcentaje de modulación que sobrepasa el 100% puede producir distorsión, la cual genera componentes espectrales no deseadas que se extienden más allá del canal asignado, causando interferencia a otras frecuencias.

La Figura 2 muestra visualmente los efectos de la distorsión por sobremodulación, comparando la onda modulada para tres valores del índice a: modulación parcial ($a = 0,5$), modulación al 100% ($a = 1$) y sobremodulación ($a = 1,5$).

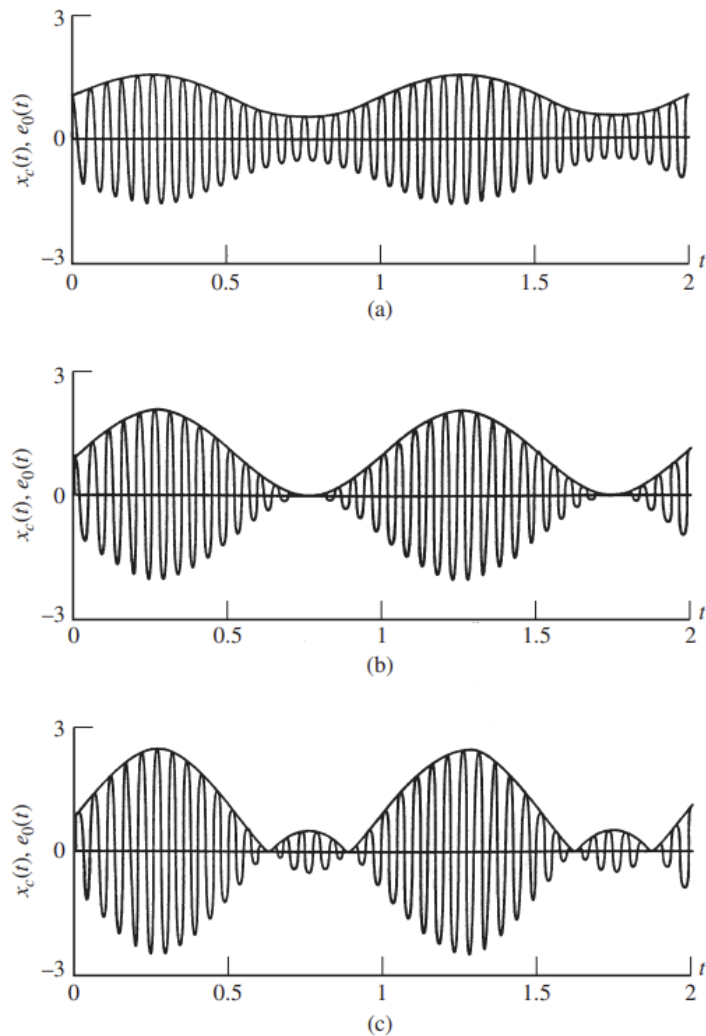


Figura 2. Distorsión por sobremodulación: (a) $a = 0,5$, (b) $a = 1$, (c) $a = 1,5$.

Fuente: Ziemer 2014 [4]

1.4 MODULACIÓN DE FRECUENCIA (FM)

La modulación de frecuencia (FM) es una técnica que se utiliza en radiodifusión para transmitir señales de audio o información a través de ondas de radio. En comparación con AM, la modulación de frecuencia implica variar la frecuencia de

una señal portadora en función de la información que se desea transmitir. Este cambio en la frecuencia es lo que lleva la información a través del espacio radioeléctrico.

En el contexto de la radiodifusión, la modulación FM se destaca por su calidad de audio superior en comparación con la modulación de amplitud. Debido a que la información se codifica en la frecuencia, tiene mayor inmunidad a las interferencias y el ruido en comparación con la modulación AM. La modulación FM es ampliamente utilizada en emisoras de radio FM, donde las variaciones en la frecuencia portadora transmiten la música y la voz con una alta fidelidad.

La Figura 3 ilustra los tres elementos de la modulación FM: la señal portadora de frecuencia constante, la señal moduladora que contiene la información, y la señal modulada resultante donde se observan las variaciones de frecuencia proporcionales a la señal de audio.

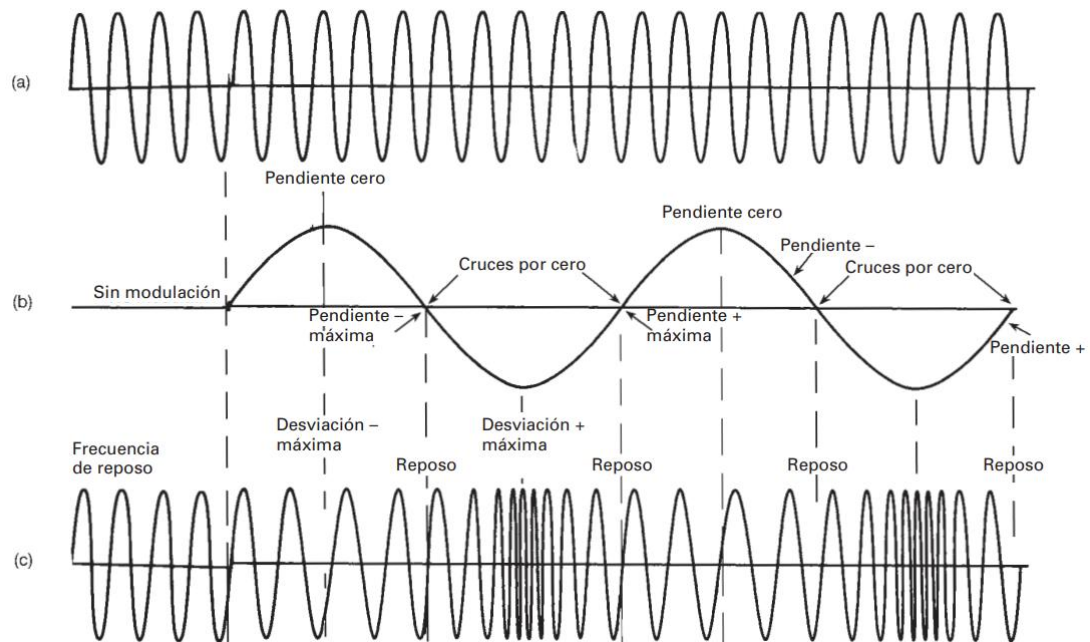


Figura 3. Modulación FM: (a) señal portadora, (b) señal moduladora, (c) señal modulada. Fuente: Tomasi 2003 [5]

Siendo $A_c \cos(2\pi f_c t)$ la señal portadora y $m(t)$ la señal moduladora, la fórmula matemática que representa la señal modulada en FM es:

$$S_{FM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int m(\eta) d\eta] \quad (3)$$

donde S_{FM} es la señal modulada en frecuencia, A_c es la amplitud de la portadora, f_c es su frecuencia, k_f es la sensibilidad a la desviación de frecuencia (en Hz/V) y $\int m(\eta) d\eta$ es la integral de la señal moduladora.

El índice de modulación FM β y la sensibilidad a la desviación se relacionan según la ecuación 4:

$$\beta = \frac{k_f \cdot V_m}{f_m} = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (4)$$

donde V_m es la amplitud de la señal moduladora, f_m es su frecuencia y Δf es la desviación de frecuencia máxima producida por la señal moduladora.

El porcentaje de modulación en FM es la razón entre la desviación de frecuencia real y la desviación de frecuencia máxima permitida, la cual en Colombia equivale a 75 kHz [6]. Dada esta definición, un porcentaje de modulación superior al 100% implica que la desviación de frecuencia instantánea está superando el umbral de los ± 75 kHz y por lo tanto incumpliendo la norma estipulada en el PTNRS F.M.

$$\%M_{FM} = \frac{\Delta f_{efectiva}}{\Delta f_{max}} \times 100\% \quad (5)$$

donde $\Delta f_{efectiva}$ es la desviación de frecuencia instantánea de la señal transmitida y $\Delta f_{max} = 75$ kHz es la desviación máxima permitida por la norma colombiana para radiodifusión FM comercial.

La diferencia entre los 100 kHz de separación de canales y los 75 kHz de la excursión máxima de frecuencia se debe a la necesidad de una banda de guarda

de 25 kHz que funciona como protección ante emisiones fuera de banda y previene la interferencia [6].

La Figura 4 ilustra el ancho de banda de 200 kHz que ocupa una emisora FM, incluyendo la excursión de ± 75 kHz de cada canal y las bandas de guarda de 25 kHz que protegen contra emisiones fuera de banda.

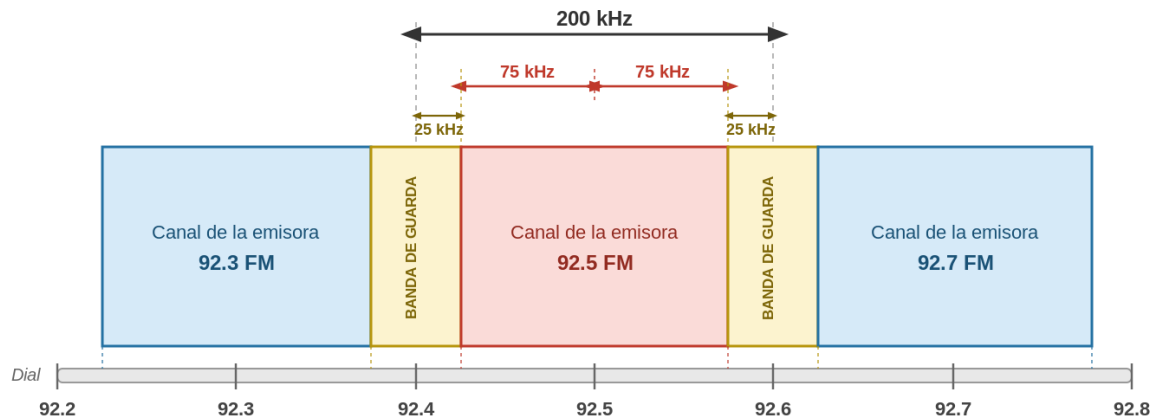


Figura 4. Separación de canales FM adyacentes y bandas de guarda.

La señal FM comercial estereofónica no transmite únicamente el audio de la emisora, sino una señal compuesta formada por varios componentes espectrales distribuidos en el rango de 0 a 65 kHz. La Figura 5 ilustra la distribución en frecuencia de estos componentes.

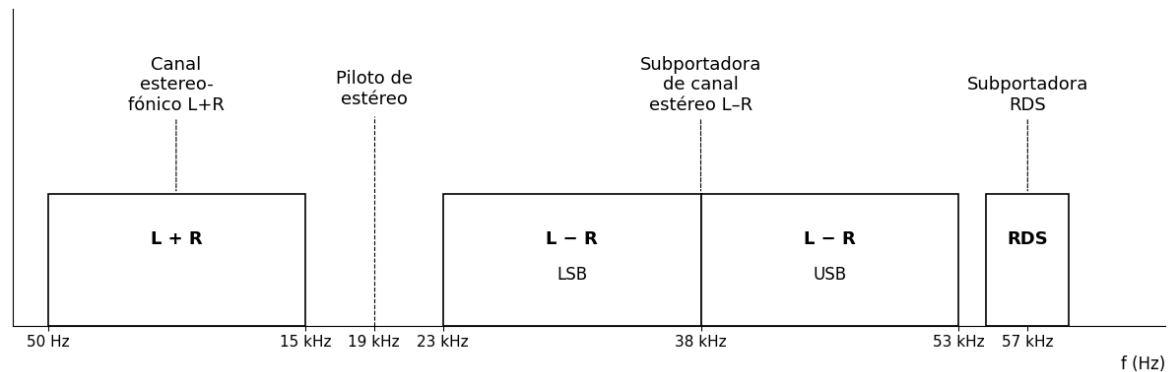


Figura 5. Espectro de la señal FM estereofónica compuesta.

El primer componente es el canal monofónico $L+R$, correspondiente a la suma de los canales izquierdo y derecho, que ocupa la banda de 50 Hz a 15 kHz y garantiza la compatibilidad con receptores monoaurales. A 19 kHz se encuentra el tono piloto de estéreo, una subportadora sin modular que los receptores estereofónicos utilizan como referencia para reconstruir la separación de canales. Entre los 23 kHz y los 53 kHz se ubica la subportadora estéreo de diferencia $L-R$, transmitida como señal de doble banda lateral centrada en 38 kHz; esta contiene la información necesaria para separar los canales izquierdo y derecho. Finalmente, a 57 kHz se aloja la subportadora RDS (*Radio Data System*), que transporta datos digitales como el nombre de la emisora, información del programa y metadatos.

Es importante distinguir entre el espectro mostrado en la Figura 5 y el espectro de la señal que se transmite realmente por el aire. La Figura 5 representa la señal en banda base, es decir, la señal moduladora.

1.5 RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SDR)

La Radio Definida por Software (SDR, por sus siglas en inglés *Software Defined Radio*) es un sistema de radiocomunicaciones donde componentes que tradicionalmente se implementan en hardware, tales como mezcladores, filtros,

amplificadores, moduladores y demoduladores, son implementados mediante software en un computador de propósito general o en un procesador embebido. El concepto fue propuesto inicialmente por Joseph Mitola en 1991 y ha evolucionado significativamente con el avance de los procesadores digitales y los convertidores analógico-digital de alta velocidad [13].

En un sistema SDR típico, la señal de radiofrecuencia (RF) es captada por una antena y convertida a una representación digital mediante un convertidor analógico-digital (ADC). A partir de ese punto, todo el procesamiento de la señal se realiza en el dominio digital: filtrado, demodulación, decodificación y análisis. Esta arquitectura ofrece una flexibilidad notable, ya que un mismo hardware puede ser reconfigurado mediante software para operar con diferentes tipos de modulación, anchos de banda y protocolos, sin necesidad de modificar circuitos físicos.

RTL-SDR Blog V4

El RTL-SDR Blog V4 es un receptor SDR de bajo costo basado en el chip RTL2832U y el sintonizador Rafael Micro R828D. Este dispositivo fue originalmente diseñado como un receptor de televisión digital terrestre (DVB-T), pero la comunidad de radio aficionados descubrió que podía utilizarse como un receptor SDR de propósito general.

La resolución del ADC del RTL2832U es de 8 bits, lo que proporciona un rango dinámico teórico de aproximadamente 48 dB. Aunque esta resolución es modesta comparada con receptores SDR profesionales, es adecuada para la medición de modulación en emisoras de radiodifusión comercial, donde las señales son típicamente fuertes.

El sintonizador Rafael Micro R828D opera de forma nativa en el rango de 24 MHz a 1,766 GHz. Sin embargo, el RTL-SDR Blog V4 incorpora un upconverter integrado en su PCB que extiende la recepción desde aproximadamente 500 kHz.

Este upconverter traslada las frecuencias de banda baja hacia el rango nativo del R828D.

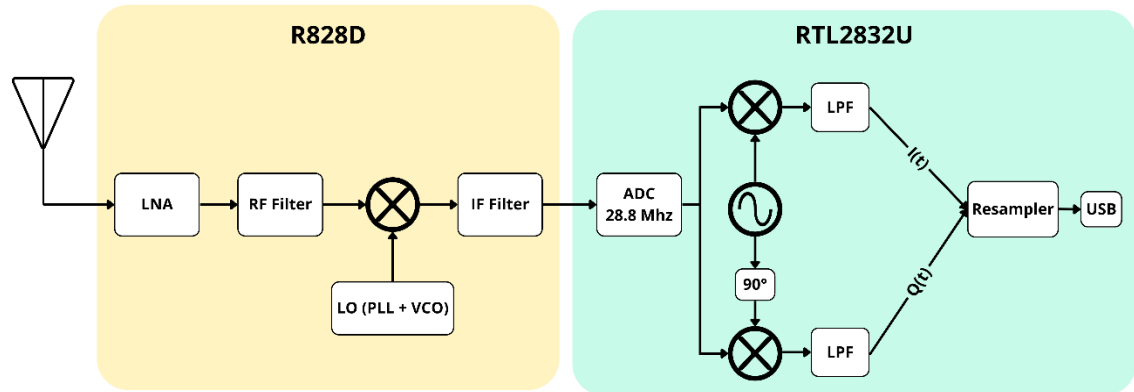


Figura 6. Arquitectura del RTL-SDR Blog V4.

La Figura 6 ilustra la arquitectura del RTL-SDR. La señal de RF ingresa al chip sintonizador R828D, pasa por un amplificador de bajo ruido (LNA) y un filtro pasa banda. Luego, la señal de RF se convierte a frecuencia intermedia (IF) mediante un oscilador local (LO). La señal de IF resultante sale del R828D como una señal analógica de una sola rama y entra al chip RTL2832U, donde el convertidor analógico-digital (ADC) la muestrea.

Para preservar toda la información de la señal original, la conversión IQ se realiza digitalmente en dos ramas paralelas y simétricas. En la rama en fase I, la muestra digital de la señal en IF se multiplica por $\cos(2\pi f_{LO} t)$. En la rama en cuadratura Q, la muestra digital de la misma señal se multiplica por $\sin(2\pi f_{LO} t)$. Después del mezclado, cada rama pasa por un filtro pasa-bajas (LPF) que elimina los términos de alta frecuencia resultantes de la multiplicación, conservando solo el contenido de banda base. El bloque Resampler adapta la tasa de muestreo a la velocidad final requerida por la interfaz USB.

El resultado son dos señales reales de baja frecuencia: $I(t)$ y $Q(t)$. Estas dos componentes se combinan en una única señal compleja $r(t) = I(t) + jQ(t)$. Esta

representación compleja preserva tanto la información de amplitud como la de fase de la señal original, lo cual es esencial para demodular cualquier tipo de modulación.

1.6 GNU RADIO

GNU Radio es un kit de herramientas de desarrollo de código abierto y libre que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar sistemas de radio definida por software. Fue creado originalmente por Eric Blossom en 2001 y desde entonces ha sido mantenido y desarrollado por una comunidad global de ingenieros y desarrolladores. GNU Radio permite diseñar, simular e implementar sistemas de procesamiento de señales de alto rendimiento en tiempo real, utilizando lenguaje Python para la configuración y C++ para los bloques de procesamiento intensivo.

La arquitectura de GNU Radio se basa en el concepto de grafos de flujo de señal (flowgraphs), donde los bloques de procesamiento se interconectan mediante puertos de entrada y salida para formar una cadena de procesamiento. Cada bloque realiza una operación específica sobre los datos: desde la adquisición de muestras desde un dispositivo SDR, pasando por filtrado, demodulación y análisis, hasta la visualización o almacenamiento de los resultados.

GNU Radio Companion (GRC) es la interfaz gráfica de GNU Radio que permite diseñar flowgraphs de manera visual, arrastrando y conectando bloques. GRC genera automáticamente el código Python equivalente al diseño gráfico, facilitando la transición entre el prototipado visual y la implementación en código. Esta herramienta es especialmente útil en la etapa de desarrollo y depuración de los algoritmos de procesamiento de señales, antes de su implementación final en scripts de Python.

1.7 MONITORES DE MODULACIÓN

En la actualidad se pueden encontrar monitores de modulación profesionales, los cuales destacan por la variedad de parámetros que pueden medir con gran precisión. Sin embargo, la mayoría de estos dispositivos brindan mediciones analógicas del porcentaje de modulación que deben ser interpretadas visualmente por una persona. Por otro lado, existen los monitores más modernos, que brindan información digital de las mediciones del porcentaje de modulación y soportan conexión de red o USB a computadoras. Sin embargo, algunos de estos monitores no se pueden programar para automatizar las mediciones y su precio puede ser elevado. Además, cada monitor soporta un único tipo de modulación, ya sea AM o FM, pero no ambas.

En la empresa RCN Radio cuentan con el monitor de modulación TFT 844, fabricado por Time & Frequency Technology, Inc. El Model 844 es un monitor profesional de modulación FM diseñado para radiodifusión, cuya documentación técnica data de mediados de la década de 1980. Sus medidores de modulación emplean un circuito de lectura de cuasi-pico, lo que determina la respuesta dinámica del instrumento ante transientes de modulación. Además, cuenta con una precisión de $\pm 2\%$ [16]. El equipo dispone de tres medidores analógicos de aguja en el panel frontal: uno para la modulación total, uno para el canal izquierdo y uno configurable para múltiples funciones.

Para monitoreo de AM, el equipo técnico de RCN Radio usa el TFT Model 923 el cual está diseñado para la supervisión continua de transmisores que operan en el rango de 500 kHz a 40 MHz. El equipo cuenta con dos medidores analógicos independientes: el medidor derecho/test, que indica la modulación positiva en una escala de 0 a 133 %, y el medidor izquierdo, que indica la modulación negativa en la misma escala. La precisión es de $\pm 2\%$ a 100 % de modulación. Dos indicadores de pico señalan cuando la modulación positiva supera el umbral fijo de 125 % o un nivel ajustable entre 50 % y 150 % [17].

En la Tabla 2 se presentan los monitores instalados actualmente en RCN Radio y otros modelos disponibles en el mercado actual, los precios corresponden a referencias de mercado obtenidas de distribuidores autorizados y sitios de fabricantes consultados durante el desarrollo del proyecto.

Tabla 2. Monitores de modulación

Marca y modelo	Modulación	Programable	Medición digital	Precio (USD)
TFT 844	FM	No	No	Descontinuado
TFT 923	AM	No	No	Descontinuado
Eurocaster STMM	FM	No	No	1700
Belar FMM-2	FM	No	No	3600
Inovonics 541N	FM	Sí	Sí	6000
Inovonics 525N	AM	Sí	Sí	3250

Fuente: Elaboración propia a partir de información de distribuidores.

Como se puede observar, los monitores de modulación profesionales tienen precios que van desde los 1700 dólares, ninguno de ellos permite monitorear simultáneamente emisoras AM y FM. Además, la mayoría no son programables para automatizar las mediciones. Estas limitaciones justifican la necesidad de desarrollar una solución alternativa basada en SDR que permita monitorear ambos tipos de modulación con un solo dispositivo, a un costo significativamente menor.

1.8 RCN RADIO

RCN Radio es una cadena de radio colombiana fundada en 1948. Es propietaria de variedad de emisoras a lo largo del país, concretamente en la Ciudad de Cali, de cinco emisoras FM: La Mega (92.5 MHz), La FM Plus (98.0 MHz), La FM (98.5 MHz),

El Sol (97.5 MHz) y Radio Uno (100.5 MHz). Además de una emisora AM: Alerta Calidad (980 kHz).

El departamento técnico de RCN Radio utiliza una aplicación web para la gestión técnica de los aspectos relacionados con la salida al aire de las emisoras y el correcto funcionamiento de los equipos. Esta aplicación está implementada en Firebase y usa bases de datos de Firestore. Los ingenieros del equipo técnico registran diariamente los parámetros de operación de las emisoras a través de esta aplicación, incluyendo el porcentaje de modulación que se obtiene de los monitores TFT 844 y TFT 923.

El cuarto de enlaces de RCN Radio en Cali es el lugar donde se encuentran los equipos de transmisión y recepción de las señales de las emisoras. Es en este cuarto donde se encuentran instalados los monitores actuales y donde se propone instalar el dispositivo de monitoreo desarrollado en este proyecto, aprovechando la infraestructura de racks y la conectividad de red e internet.

1.9 ANTECEDENTES

Paez (2007) [7] en su tesis de licenciatura, con el objetivo de desarrollar un sistema remoto de control y monitoreo de estaciones de radiodifusión en FM, usando la red WAN de la Superintendencia de Telecomunicaciones, el software ARGUS y estaciones de comprobación técnica, se tomaron mediciones de ancho de banda, intensidad de campo y porcentaje de modulación de las emisoras FM en las ciudades de Quito y Tulcán. Se concluye que el monitoreo permite conocer el estado de operación de las estaciones de radio, para corregir parámetros técnicos, además de evitar interferencias perjudiciales entre sistemas de radio co-localizados.

Ayala (1997) [8] en su trabajo de investigación, orientado a la determinación de la calidad de los parámetros de transmisión de las estaciones de radiodifusión FM que sirven a la ciudad de Quito y zonas aledañas, realizó mediciones de campo de

diversos parámetros técnicos de emisoras FM, incluyendo el porcentaje de modulación. Este trabajo proporcionó una metodología de evaluación de la calidad de las emisiones de radio FM que sirve como referencia para el presente proyecto.

Saransig (2016) [9] en su trabajo sobre el diseño de un sistema de monitoreo de contenidos de radiodifusión analógica en FM y AM, propuso una arquitectura de monitoreo que incluye la captura y análisis de las señales de radiodifusión. Si bien su enfoque principal fue el monitoreo de contenido y no de parámetros técnicos como el porcentaje de modulación, su trabajo aporta conceptos relevantes sobre la arquitectura de sistemas de monitoreo de radiodifusión.

Romero (2015) [10] en su tesis de licenciatura sobre implementación de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B usando SDR con hardware y software libre, demostró la viabilidad de utilizar dispositivos SDR de bajo costo para la recepción y demodulación de señales de radiodifusión AM y FM. Su trabajo resulta relevante como antecedente directo del uso de SDR para el procesamiento de señales de radiodifusión.

Pazmiño y Espinoza (2022) [11] en su tesis de licenciatura sobre el diseño e implementación de un banco de pruebas de laboratorio aplicado a FM broadcasting utilizando software de código abierto GNU Radio, Raspberry Pi y Radio Definida por Software, demostraron que la combinación de GNU Radio con hardware SDR y Raspberry Pi es una plataforma viable para el procesamiento de señales FM en un entorno embebido. Este trabajo es especialmente relevante como antecedente directo, ya que utiliza la misma plataforma tecnológica propuesta en el presente proyecto.

Valle et al. (2017) [12] en su tesis de licenciatura sobre el desarrollo de un sistema de monitoreo y vigilancia del espectro radioeléctrico en las bandas comprendidas en el rango 88-108 MHz para la verificación del cumplimiento de leyes y regulaciones nacionales utilizando radio definido por software RTL-SDR, desarrollaron un sistema capaz de monitorear las emisoras FM en el rango de la

banda de radiodifusión y verificar el cumplimiento de las regulaciones. Este antecedente es relevante por su enfoque en el cumplimiento regulatorio, que es uno de los aspectos motivadores del presente proyecto.

Los antecedentes revisados evidencian que el uso de Radio Definida por Software para el monitoreo de emisoras de radiodifusión es un campo activo de investigación, especialmente en el contexto latinoamericano. Sin embargo, ninguno de los trabajos revisados aborda específicamente el monitoreo continuo y automatizado del porcentaje de modulación de múltiples emisoras AM y FM simultáneamente, con integración a un sistema de gestión técnica empresarial, lo cual constituye la contribución diferenciadora del presente proyecto.

2. DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se describe el proceso de diseño del sistema de monitoreo del porcentaje de modulación, desde la definición de los requerimientos del sistema hasta la selección y justificación de los componentes de hardware y software, los algoritmos de medición, el ciclo de monitoreo y la arquitectura de integración con el sistema de gestión técnica de RCN Radio.

2.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Los requerimientos del sistema fueron definidos a partir del levantamiento de información con el equipo técnico de RCN Radio Cali y del análisis del proceso actual de monitoreo del porcentaje de modulación. Establecen el conjunto mínimo de funcionalidades que el dispositivo debe satisfacer para ser considerado exitoso:

- El dispositivo debe monitorear todas las emisoras de la cadena RCN Radio en la ciudad de Cali.
- El dispositivo debe comunicar los datos de monitoreo a la aplicación de gestión técnica de la empresa RCN Radio.
- El dispositivo debe reportar periódicamente mediante correo electrónico al equipo técnico de RCN Radio los resultados del monitoreo de modulación.
- El dispositivo debe tener un sistema de visualización virtual donde se puedan observar parámetros como la emisora y el porcentaje de modulación actual.
- El dispositivo debe funcionar constantemente, con mediciones periódicas durante el día y todos los días de la semana.

2.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES Y JUSTIFICACIÓN

GNU Radio es el framework de procesamiento de señales seleccionado debido a su arquitectura modular de bloques de procesamiento interconectados, su amplia biblioteca de bloques validados para radiocomunicaciones, su naturaleza de software libre acompañada de una extensa documentación oficial y una comunidad activa. La compatibilidad nativa con dispositivos SDR y la posibilidad de implementar procesamiento personalizado mediante bloques Python brindan las condiciones adecuadas para desarrollar sistemas de monitoreo de calidad.

Partiendo de la elección del framework, se optó por la combinación de una Raspberry Pi 5 como unidad de procesamiento y un RTL-SDR Blog V4 como receptor SDR. La Raspberry Pi 5 cuenta con un procesador ARM Cortex-A76 de cuatro núcleos a 2,4 GHz con 8 GB de RAM, lo que le confiere capacidad de procesamiento digital de señales en tiempo real suficiente para ejecutar flujos de GNU Radio con múltiples bloques de procesamiento simultáneamente. Es compatible con Raspberry Pi OS (basado en Debian GNU/Linux), que soporta nativamente GNU Radio y las librerías SoapySDR necesarias para el control del receptor. Su factor de forma compacto y su costo reducido (aproximadamente USD 80) la hacen adecuada para la instalación permanente en el cuarto de enlaces de RCN Radio.

El RTL-SDR Blog V4 se selecciona por su bajo costo, de aproximadamente USD 30 y su cobertura de frecuencias que va desde los 500 kHz a 1,766 GHz. Además, su conexión por USB hace que la integración con la Raspberry Pi 5 sea inmediata.

Se utilizó el dipolo telescópico suministrado con el receptor RTL-SDR Blog V4 como antena de recepción. La longitud eléctrica de la antena es apropiada para recibir señales en la banda de FM. En contraparte, el dipolo no está diseñado para operar en la banda de onda media debido a su longitud física, sin embargo, la proximidad geográfica del transmisor de la emisora AM monitoreada permite obtener niveles de señal suficientes para producir mediciones de modulación

aceptables. Se priorizó el desempeño en la banda FM, dado que la cadena RCN Radio en Cali cuenta con cinco emisoras FM y solo una AM, por lo tanto, el monitoreo FM representa la mayor carga de mediciones y tiene el principal interés operativo de la empresa.

2.3 ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA

La arquitectura del sistema de monitoreo se compone de los componentes ilustrados en la Figura 7, donde cada elemento cumple una o varias funciones dentro del flujo de adquisición, procesamiento y distribución de datos.

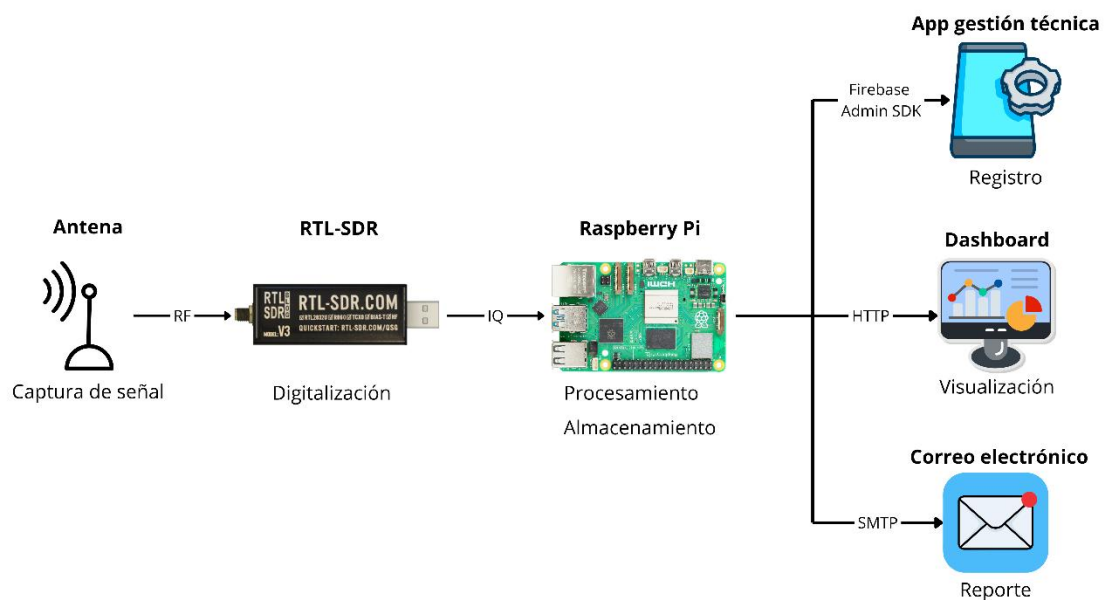


Figura 7. Arquitectura general del sistema de monitoreo.

La antena captura la señal de radiofrecuencia en las bandas FM y AM, y la entrega como señal eléctrica al receptor SDR. El RTL-SDR Blog V4 convierte esta señal analógica en una representación digital en formato IQ, la cual se transfiere a la Raspberry Pi 5 a través de USB a una tasa de muestreo de 2,4 MS/s.

La Raspberry Pi realiza el procesamiento mediante flujos implementados en GNU Radio, presentados en las secciones 2.4 y 2.5 para FM y AM respectivamente. El almacenamiento se hace en archivos CSV locales con los indicadores de modulación, y datos como el nombre de la emisora, la fecha y hora del registro.

Desde la Raspberry Pi, los datos se distribuyen hacia tres destinos. A través del Firebase Admin SDK, los registros se sincronizan con la aplicación de gestión técnica de RCN Radio. Mediante HTTP, los datos se exportan a un dashboard accesible desde dispositivos en la misma red, para visualización en tiempo real. Finalmente, vía SMTP, el sistema genera un reporte semanal enviado por correo electrónico con el resumen de las mediciones del período.

2.4 REQUERIMIENTOS DEL REPORTE SEMANAL

El sistema incluye un módulo de reporte automático que consolida los resultados del monitoreo semanal y los comunica al director técnico de RCN Radio Cali. El reporte se genera y envía de forma autónoma desde la Raspberry Pi 5, sin intervención manual, y tiene carácter exclusivamente informativo. Los requerimientos del sistema de reportes son los siguientes:

- El sistema debe generar y enviar automáticamente un reporte semanal cada lunes a las 7:00 a.m.
- El reporte debe enviarse a la dirección de correo electrónico del director técnico de RCN Radio Cali.
- El reporte debe incluir una tabla con los datos de monitoreo de las emisoras durante los 7 días anteriores, incluyendo: nombre de la emisora, frecuencia, tipo de modulación, promedio de modulación pico y porcentaje de sesiones que superaron el umbral.

3. IMPLEMENTACIÓN

Este capítulo describe los detalles de implementación del sistema de monitoreo, incluyendo la configuración del hardware, el desarrollo de los flujos de procesamiento de señal en GNU Radio para FM y AM, la implementación del dashboard de análisis y el estado de la integración con el sistema de gestión técnica de RCN Radio.

3.1 CONFIGURACIÓN DEL HARDWARE

El hardware del sistema consiste en una Raspberry Pi 5 con 8 GB de RAM y un RTL-SDR Blog V4, conectados directamente mediante la interfaz USB. La Raspberry Pi 5 ejecuta Raspberry Pi OS, configurado para arranque automático de los scripts de monitoreo al inicio, habilitando la operación desatendida y continua.

La instalación de GNU Radio 3.10 en la Raspberry Pi 5 se realizó a través del gestor de paquetes apt, junto con los paquetes necesarios que proveen los drivers y bloques de GNU Radio necesarios para el control del receptor RTL-SDR. La librería SoapySDR y el módulo SoapyRTLSDR se instalaron adicionalmente para proporcionar una capa de abstracción de hardware compatible con GNU Radio.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE MONITOREO

El sistema de monitoreo se implementa en un script Python que integra el procesamiento FM y AM en una sola aplicación con interfaz gráfica basada en PyQt5 y GNU Radio. La arquitectura del script se organiza en tres clases principales: FMWidget, AMWidget y MonitorCombinado.

Las clases FMWidget y AMWidget encapsulan su propia cadena de procesamiento de señales y sus widgets de visualización (indicador numérico de modulación y visualizador de espectro FFT). La clase MonitorCombinado es la ventana principal que administra la ejecución cíclica, insertando y extrayendo dinámicamente el widget FM o AM activo en un área central de la interfaz.

3.2.1 Cadena de procesamiento FM

Esta sección describe paso a paso cada bloque de la cadena FM, con su fundamento matemático y la justificación de cada decisión de diseño. El objetivo es transformar la señal de radio capturada por el RTL-SDR en el porcentaje de modulación FM instantáneo $\%M_{FM}$. La cadena de procesamiento que implementada en GNU Radio se compone de seis bloques funcionales, ilustrados en la Figura 8.

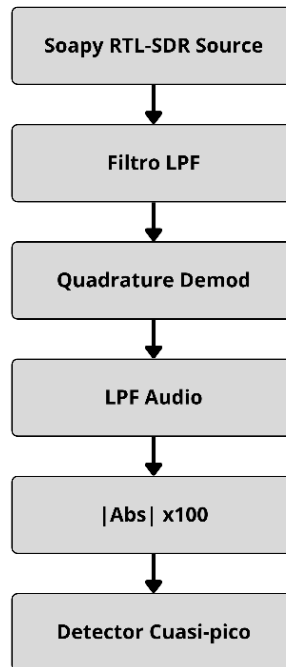


Figura 8. Cadena de procesamiento de la señal FM.

Fuente SDR. El RTL-SDR Blog V4 captura la señal de radio y la entrega como una secuencia de números complejos IQ a 2,4 MS/s:

$$x[n] = I[n] + j Q[n] \quad (6)$$

Donde $I[n]$ y $Q[n]$ son las componentes en fase y cuadratura. Juntas codifican completamente la amplitud y la fase instantánea de la señal. La ganancia de RF se fija en 30 dB para asegurar una relación señal-ruido adecuada sin saturar el ADC de 8 bits del chip RTL2832U.

Filtro pasa bajas con decimación. Este bloque cumple dos funciones simultáneas: aislar el canal FM de interés y reducir la tasa de muestreo. La señal capturada a 2,4 MS/s contiene todo el espectro visible al SDR, el filtro selecciona únicamente los ± 120 kHz centrados en la emisora sintonizada.

La frecuencia de corte de 120 kHz se seleccionó para contener sin distorsión todos los componentes de la señal FM comercial: audio monoaural, tono piloto estéreo, subportadora estéreo y subportadora RDS. Conservar el espectro completo en esta etapa garantiza que el demodulador de cuadratura opere sobre la señal FM íntegra antes de cualquier filtrado de audio. La banda de transición de 30 kHz es suficientemente gradual para evitar el efecto Gibbs y suficientemente estrecha para rechazar las emisoras adyacentes separadas al menos 200 kHz. La ventana de Hamming ofrece el equilibrio óptimo entre ancho del lóbulo principal y atenuación de lóbulos laterales. El factor de decimación de 10 reduce la tasa de 2,4 MS/s a 240 kS/s, satisfaciendo el teorema de Nyquist y reduciendo en un orden de magnitud la carga de procesamiento para todos los bloques siguientes.

Demodulador de cuadratura (Quadrature Demod).

El demodulador de cuadratura es el bloque central de la cadena de medición FM. Su función es extraer la frecuencia instantánea de la señal compleja recibida a

partir de la variación de fase entre muestras consecutivas. La fase instantánea de la señal compleja IQ es:

$$\varphi[n] = \arctan\left(\frac{Q[n]}{I[n]}\right) \quad (7)$$

La frecuencia instantánea es proporcional a la derivada temporal de la fase. En tiempo discreto, esa derivada se aproxima mediante la diferencia de fase entre dos muestras contiguas:

$$\Delta\varphi[n] = \varphi[n] - \varphi[n-1] \quad (8)$$

Calcular la arcotangente en cada muestra resulta costoso computacionalmente. GNU Radio lo resuelve con una equivalencia algebraica, el ángulo de la diferencia de fase es igual al argumento del producto de la muestra actual por el conjugado complejo de la muestra anterior, tal como está documentado en la implementación oficial del bloque *Quadrature Demod* [19]:

$$\Delta\varphi[n] = \arg(x[n] \cdot \text{conj}(x[n-1])) \quad (9)$$

Esta expresión es matemáticamente idéntica a la resta de arcotangentes de la ecuación (8), evitando el cálculo directo de dos arcotangentes por muestra. Tanto la fuente oficial de GNU Radio [19] como la implementación descrita en [20] presentan y demuestran esta equivalencia, confirmando que el argumento del producto corresponde directamente a la frecuencia instantánea normalizada de la señal.

La ganancia G del demodulador no es un valor arbitrario del bloque, sino un parámetro de calibración que se obtiene analíticamente y depende directamente de la desviación de frecuencia máxima permitida y la frecuencia de muestreo efectiva del sistema f_s , la cual corresponde a la tasa posterior a la decimación aplicada en la etapa del LPF que en este caso es de 240 kS/s. Este cálculo se elige de modo

que una desviación de frecuencia igual a la máxima permitida (± 75 kHz para FM comercial) produzca exactamente una salida de ± 1 , condición que se formaliza a continuación.

La relación entre la diferencia de fase de una muestra y la desviación de frecuencia Δf para una señal muestreada a tasa f_s es:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta f}{f_s} \quad (10)$$

Para que la salida sea 1,0 cuando la desviación es la máxima permitida, se impone la condición:

$$G \cdot \Delta\varphi_{m\acute{a}x} = 1,0 \quad (11)$$

Sustituyendo la expresión de $\Delta\varphi_{m\acute{a}x}$ y despejando G , se obtiene la expresión general que relaciona la ganancia con la frecuencia de muestreo del sistema:

$$G = \frac{f_s}{2\pi \cdot \Delta f_{m\acute{a}x}} \quad (12)$$

Con los valores del sistema, tasa de muestreo tras la decimación $f_s = 240$ kS/s y desviación máxima $\Delta f_{m\acute{a}x} = 75$ kHz resulta:

$$G = \frac{240\,000}{2\pi \cdot 75\,000} \approx 0,5093 \quad (13)$$

Combinando la operación de diferencia de fase con la ganancia de calibración, la expresión completa que implementa el bloque en GNU Radio es:

$$y[n] = \arg(x[n] \cdot \text{conj}(x[n-1])) \times G \quad (14)$$

La salida $y[n]$ es un valor real que representa la modulación normalizada en la escala $[-1, +1]$

LPF de señal compuesta. Tras la demodulación de cuadratura, la señal contiene varios componentes en frecuencia, como se vio en la Figura 5: la señal de audio modulante, el tono piloto estéreo, la subportadora estéreo y la subportadora RDS. Conforme a la Recomendación UIT-R SM.1268-4 [15], la medición del porcentaje de modulación $\%M_{FM}$ debe capturar la señal compuesta completa, que incluye toda la información de modulación relevante para el cálculo de la desviación de frecuencia.

La frecuencia de corte de 60 kHz captura el ancho de banda completo de la señal compuesta. La banda de transición de 8 kHz es suficientemente estrecha para atenuar el ruido de alta frecuencia sin introducir distorsión en los componentes relevantes de modulación, e impide que artefactos espectrales demodulados inflen la medición de modulación.

Valor absoluto y conversión a porcentaje. La modulación FM es bilateral: el audio positivo produce desviación positiva de frecuencia y el negativo produce desviación negativa. Tras el filtro de audio, la señal oscila simétricamente alrededor de cero. El bloque Abs convierte todos los valores a positivos. Esta operación es esencial para obtener la magnitud de la desviación.

A continuación, una multiplicación por 100 escala la señal del rango normalizado al rango de porcentaje: $p[n] = |y[n]| \times 100$. Un valor de $p[n] = 100$ indica desviación de exactamente 75 kHz. Esta señal $p[n]$, es la modulación instantánea expresada en porcentaje y es la que se entrega directamente como entrada al siguiente bloque de la cadena, el detector de cuasi-pico descrito a continuación.

Detector cuasi-pico. Para extraer la modulación pico de la señal, se implementa un detector de cuasi-pico (*quasi-peak*) mediante un bloque Python denominado QuasiPeakFF, insertado a la salida del bloque de conversión a porcentaje. A diferencia de un detector de pico absoluto, el cuasi-pico es un filtro IIR de primer orden con dos constantes de tiempo, τ_a para los incrementos de la señal

de entrada (ataque) y τ_d para las disminuciones de la señal (decaimiento). El detector queda descrito por la ecuación 15:

$$s[n] = \begin{cases} s[n-1] + \alpha_a(p[n] - s[n-1]) & \text{si } p[n] > s[n-1] \\ s[n-1] + \alpha_d(p[n] - s[n-1]) & \text{si } p[n] \leq s[n-1] \end{cases} \quad (15)$$

donde $p[n]$ es la señal de entrada al detector, es decir, la modulación instantánea en porcentaje que entrega la etapa de conversión anterior, y $s[n]$ es la salida del detector, es decir el valor que este indica en cada instante.

La ecuación está definida por partes porque el detector se comporta de dos maneras distintas según la relación entre la muestra que acaba de llegar y el valor que el detector traía. La condición selecciona cuál de los dos casos aplica. Si $p[n] > s[n-1]$ corresponde al ataque, porque la nueva muestra es mayor que el valor que el detector venía indicando y por lo tanto este debe subir. Si $p[n] \leq s[n-1]$ corresponde al decaimiento, porque la nueva muestra es igual o menor que el valor indicado y por lo tanto el detector debe bajar o mantenerse.

En ambos casos la expresión tiene la misma forma, el detector parte del valor que traía, $s[n-1]$ y avanza hacia la muestra actual. El término $(p[n] - s[n-1])$ es la distancia que lo separa del valor que debería indicar, y el coeficiente α es la fracción de esa distancia que recorre en cada muestra. Así, si α fuese igual a 1 el detector cubriría la totalidad de la distancia y alcanzaría el valor nuevo de inmediato, si fuese igual a 0 no se movería en absoluto. En consecuencia, cuanto mayor es α , más rápida es la respuesta del detector.

Al emplear un α_a grande durante el ataque y un α_d pequeño durante el decaimiento, el detector sube rápidamente hasta los picos de modulación y desciende despacio, reproduciendo el comportamiento de la aguja del monitor de referencia.

Los coeficientes α_a y α_d se derivan de las constantes de tiempo τ_a y τ_d mediante:

$$\alpha = 1 - e^{-1/(f_s \cdot \tau)} \quad (16)$$

Las constantes de tiempo seleccionadas para FM son $\tau_a = 1$ ms y $\tau_d = 300$ ms, evaluadas a la tasa de muestreo post-decimación $f_s = 240$ kS/s. Con estos valores, $\alpha_a \approx 4,16 \times 10^{-3}$ y $\alpha_d \approx 1,39 \times 10^{-5}$.

El detector de modulación implementado utiliza el método de cuasi-pico, adoptando el mismo principio de medición del monitor de referencia TFT 844 [16]. Esta elección es relevante porque el TFT 844 es el instrumento que históricamente han empleado las emisoras FM para verificar el cumplimiento regulatorio, de modo que un sistema software que replique su comportamiento dinámico produce lecturas directamente comparables con las del equipo de referencia de la industria. La constante de ataque de 1 ms garantiza que cualquier sobremodulación sostenida durante al menos 5 ms sea capturada, ya que en ese tiempo el estado alcanza el 99,3 % del valor real. La constante de decaimiento de 300 ms reproduce el retorno lento de la aguja analógica del TFT 844, manteniendo el indicador estable y legible durante la programación musical. Gracias a esta asimetría, un pico de ruido aislado produce un desplazamiento prácticamente nulo, mientras que una sobremodulación sostenida eleva el indicador de forma proporcional. El resultado es un detector que mide únicamente modulación real, con un comportamiento dinámico coherente con el del instrumento de referencia.

La salida del bloque QuasiPeakFF se conecta a la cadena de registro, el bloque Stream-to-Vector agrupa 12.000 muestras consecutivas de la salida QP en un vector, equivalente a una ventana de 50 ms a 240 kS/s. El bloque Max extrae el valor máximo de cada vector, generando una serie de máximos cuasi-pico con cadencia de aproximadamente 20 valores por segundo.

3.2.2 Cadena de procesamiento AM

La medición de $\%M_{AM}$ presenta retos cualitativamente distintos a los de FM: en FM se mide la variación de frecuencia (y la amplitud de la señal IQ no importa); en AM se mide la variación de la amplitud de la envolvente. En esta sección, se describe cada bloque de la cadena de procesamiento AM, compuesta de seis bloques principales ilustrados en la Figura 9

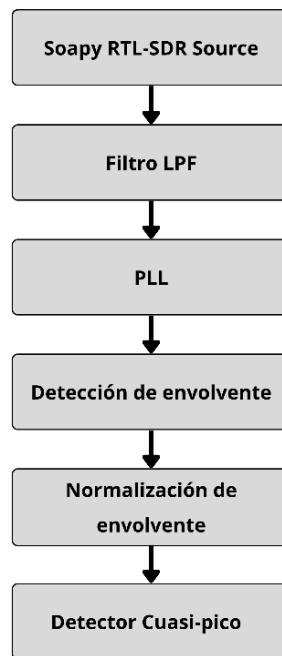


Figura 9. Cadena de procesamiento de la señal AM.

Fuente SDR. Las emisoras AM de onda media operan entre 535 kHz y 1705 kHz, muy por debajo del rango del sintonizador R828D (24 MHz - 1,766 GHz). El RTL-SDR Blog V4 resuelve esto mediante un upconverter integrado en su PCB que traslada estas frecuencias al rango de operación del R828D, permitiendo que el sintonizador procese la señal con su LNA activo. El AGC se desactiva y se establece una ganancia de RF fija de 42 dB, para garantizar que el nivel de portadora permanezca constante durante toda la sesión de medición.

La tasa de muestreo se configura en 960 kHz, valor suficiente para capturar el canal AM sintonizado una vez que el upconverter ha trasladado la frecuencia al rango del R828D. La señal capturada se entrega como un par IQ.

Filtro pasa-bajas con decimación (Filtro LPF). El filtro AM es notablemente más agresivo que el de FM: la frecuencia de corte cae de 120 kHz a 5 kHz y la decimación es de x20.

El ancho de banda de audio de una emisora AM comercial es de aproximadamente 5 kHz por banda lateral, con separación de canales de 10 kHz. La frecuencia de corte de 5 kHz aísla el canal sintonizado y elimina completamente los canales adyacentes. La banda de transición de 2 kHz (de 5 a 7 kHz) asegura más de 40 dB de atenuación en el canal adyacente más próximo. La decimación reduce la tasa a 48 kS/s, satisfaciendo ampliamente Nyquist.

PLL de seguimiento de portadora. Este bloque resuelve un problema del RTL-SDR que es determinante en AM. El oscilador de cristal del RTL2832U tiene una precisión típica de ± 60 a 100 Hz. En AM un offset de solo 80 Hz genera una oscilación de 80 Hz en la envolvente que puede aumentar el $\%M_{AM}$ medido en varios puntos porcentuales.

El bloque PLL Carrier Tracking rastrea la portadora y la recentra dinámicamente en DC. Además, se configura para que el PLL siga la deriva cuasi-estática del oscilador sin seguir las variaciones de audio. Tras el PLL, la portadora queda en exactamente 0 Hz y la detección de envolvente es precisa.

Detección de envolvente. El bloque Complex to Mag calcula la magnitud del número complejo:

$$E[n] = |x[n]| = \sqrt{I^2[n] + Q^2[n]} = A(1 + m(t)) \quad (17)$$

Esta operación extrae directamente la envolvente de la señal AM, una señal real que contiene una componente DC proporcional a A y una componente de audio

proporcional a $A m(t)$. La operación de magnitud es no lineal y genera armónicos, por lo tanto, es necesario un segundo filtro pasa-bajas con corte en 5 kHz y banda de transición de 1 kHz que elimina estos armónicos de alta frecuencia y cualquier residuo de portadora no compensado por el PLL. El resultado es una envolvente limpia y suavizada.

Normalización de envolvente. La envolvente de la señal AM fluye continuamente a 48 kS/s desde el bloque Complex to Mag. Para expresarla como porcentaje de modulación, es necesario conocer el nivel de portadora sin modular A_c . Este nivel se estima mediante un filtro IIR de primer polo con constante de tiempo $\tau = 5$ s, suficientemente larga para que las variaciones de audio, cuyo valor medio es cero, no afecten la estimación. Tras un período de convergencia de 20 s, el filtro entrega una estimación estable de A_c que se mantiene constante durante toda la sesión de medición. La modulación instantánea se obtiene normalizando la envolvente respecto a esta estimación:

$$M\%(t) = \left(\frac{E[n]}{A_c} - 1 \right) \times 100 \quad (18)$$

Cuando $M\%(t) > 0$ hay modulación positiva (+MOD) y cuando $M\%(t) < 0$ hay modulación negativa (−MOD).

Detección de modulación QP. La señal normalizada $M\%(t)$ se divide en dos ramas paralelas con detectores de cuasi-pico independientes. La rama de modulación positiva (+MOD) aplica directamente el detector QP sobre $M\%(t)$, capturando las excursiones positivas de la envolvente. La rama de modulación negativa (−MOD) invierte la señal antes de aplicar el detector QP, de modo que los valles negativos se procesan como excursiones positivas y el resultado se interpreta como la magnitud de la modulación negativa.

Ambos detectores siguen la ecuación 15, con constantes de tiempo $\tau_a = 5$ ms de ataque y $\tau_d = 280$ ms de decaimiento evaluadas a $f_s = 48.000$ Hz. La constante

de ataque de 5 ms se seleccionó de forma que, para un pico de voz típico de 20 ms de duración, el detector alcance el 98 % del valor real, comportamiento coherente con el de los monitores de modulación AM profesionales como el TFT 923 [17].

3.2.3 Ciclo de monitoreo y gestión térmica

El primer bloque corresponde al monitoreo FM, el sistema sintoniza secuencialmente a cada una de las cinco emisoras FM y permanece en cada una por 15 minutos. Este periodo de tiempo se establece conforme a UIT-R SM.1268-4 [15]. A continuación, se ejecuta el bloque de monitoreo AM, obteniendo datos durante 15 minutos, para completar una medición de las 6 emisoras con duración aproximada de 90 minutos. Concluidas las mediciones, el sistema entra en reposo por aproximadamente 30 minutos hasta la siguiente hora en punto, momento en que se inicia un nuevo ciclo. Esto da como resultado una duración de 2 horas para un ciclo regular. La Figura 10 muestra el diagrama de bloques del ciclo de monitoreo.

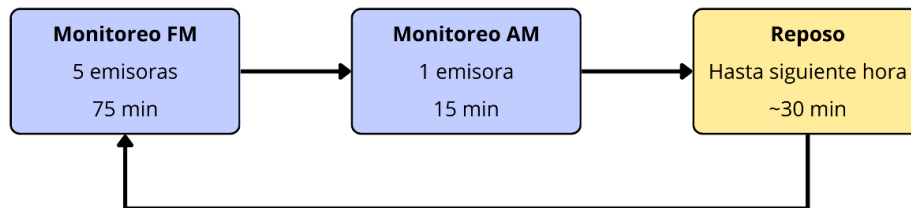


Figura 10. Diagrama de bloques del ciclo de monitoreo.

El módulo ThermalMonitor supervisa la temperatura de la CPU de la Raspberry Pi cada 10 segundos. Las lecturas las registra en un archivo CSV y el último dato lo muestra en la interfaz gráfica del monitor con un indicador de estado para conocer si la temperatura entra dentro del rango normal ($t < 65^{\circ}\text{C}$), riesgo ($65^{\circ}\text{C} < t < 80^{\circ}\text{C}$) o crítico ($t > 80^{\circ}\text{C}$). Este seguimiento es necesario porque la operación continua eleva la temperatura del procesador, si esta supera los umbrales de seguridad, la Raspberry Pi reduce automáticamente su frecuencia de reloj, lo que puede degradar el desempeño de las cadenas de procesamiento e incluso interrumpir una sesión de medición. Vigilar la temperatura también permite verificar que el diseño térmico del

gabinete es eficiente manteniendo el sistema dentro de un rango seguro durante la operación prolongada.

3.2.4 Recolección de datos y archivos CSV

Durante el monitoreo de cada emisora, tanto FM como AM, el sistema acumula en memoria los picos por ventana de 50 ms generados por el detector de máximos. El ciclo de recolección lee este buffer cada segundo, obteniendo aproximadamente 20 valores por lectura.

Al finalizar el período de medición de 15 minutos por cada emisora se dispone de la lista completa de picos. A partir de ella se calcula el percentil 99, que constituye la métrica principal de nivel de modulación reportada. Su elección se basa en UIT-R SM.1268-4 [15], que recomienda que no más de $10^{-4}\%$ de las muestras individuales superen el umbral. Sin embargo, el sistema no registra muestras individuales sino el valor máximo de cada ventana de 50 ms, donde cada ventana contiene 12.000 muestras. Por lo tanto, es necesario determinar qué fracción de ventanas tendrá su máximo por encima del umbral cuando exactamente $10^{-4}\%$ de las muestras individuales lo supera.

Si la probabilidad de que una muestra supere el umbral es $p = 10^{-4}\% = 10^{-6}$, la probabilidad que ninguna de las 12.000 muestras de una ventana lo supere es:

$$P(\text{ventana} \leq \text{umbral}) = (1 - 10^{-6})^{12000} \quad (19)$$

La probabilidad de que el máximo de la ventana supere el umbral es:

$$P(\text{ventana} > \text{umbral}) = 1 - (1 - 10^{-6})^{12000} \quad (20)$$

Dado que p es muy pequeño, se aplica la aproximación $e^{-np} \approx (1 - p)^n$

$$P(\text{ventana} > \text{umbral}) \approx 1 - e^{(-12000 \times 10^{-6})} = 1,19\% \quad (21)$$

Esto significa que, cuando el sistema opera exactamente en el límite normativo, aproximadamente el 1,19 % de las ventanas tendrán su pico por encima del umbral, lo que equivale al percentil 98,8 de la distribución de picos. El percentil 99 es el valor entero más cercano. En una sesión de 15 minutos se generan aproximadamente 18.000 ventanas; el P99 excluye las 180 de mayor valor, que pueden corresponder a eventos espurios como interferencia puntual o multitrayecto momentáneo que no reflejan el comportamiento habitual de la emisora.

Otra métrica que se calcula es la fracción de ventanas que superaron el umbral de modulación configurado. La evaluación de cumplimiento consiste en contrastar esta fracción con la máxima permisible según los parámetros configurados, determinando el estado de cada emisora como Cumple o Excede.

Los resultados se escriben en el archivo CSV de registro de modulación con los campos: timestamp, tipo, emisora, frecuencia, P99 de modulación pico (FM), P99 de modulación positiva y negativa (AM), número de ventanas sobre umbral, total de ventanas, fracción de excedencias, estado de cumplimiento y SNR. Este archivo recibe un único registro por emisora al finalizar cada período de medición de 15 minutos, de modo que cada fila representa el resumen completo de una sesión de monitoreo. El archivo se mantiene de forma acumulativa durante toda la ejecución del sistema, conservando el historial de todas las sesiones.

Adicionalmente, cada ventana de 50 ms se registra individualmente en otro archivo CSV de registro de muestras con los campos: timestamp, tipo, emisora, frecuencia y valor de pico porcentual. A una cadencia de 20 ventanas por segundo y 15 minutos por emisora, este archivo acumula alrededor de 18.000 registros por cada emisora. Con el fin de no sobrecargar el almacenamiento, el archivo se vacía al inicio de cada ciclo completo de emisoras y se reescribe desde cero, de modo que en todo momento contiene exclusivamente las muestras del ciclo en curso.

Ambos archivos se almacenan en la raspberry en una carpeta dedicada a registros y se mantienen abiertos durante toda la ejecución para minimizar

operaciones de entrada/salida y garantizar que ningún dato se pierda ante interrupciones inesperadas.

3.2.5 Control y prevención de errores

Dado que el sistema debe mantener mediciones continuas, se implementaron mecanismos de recuperación automática organizados en tres capas, para minimizar el riesgo de detención debido a errores.

La primera capa es de detección interna, donde un temporizador de vigilancia revisa que, durante una medición activa, el flujo de datos avance. Si transcurre un periodo prolongado sin que se reciban muestras, se asume que la recepción falló y se detiene el proceso.

La segunda capa actúa como un supervisor que lanza el programa de monitoreo y cuando este termina por un fallo o cierre inesperado, lo relanza automáticamente. Antes de cada relanzamiento, el supervisor reinicia el receptor USB, lo que restablece el dispositivo y resuelve el bloqueo que originó el fallo.

La tercera capa corresponde al mantenimiento preventivo. Se define una ventana de reposo nocturno entre las 12 am y las 4 am, durante la cual el monitor detiene el procesamiento y cierra el receptor, reduciendo el estrés térmico del hardware en las horas de menor relevancia de la programación de las emisoras. También se programa un reinicio diario a las 3:55 am que libera la memoria y restablece el receptor. Debido a este reposo y teniendo en cuenta que un ciclo de medición regular es de 2 horas, cada día se completan 10 ciclos de monitoreo.

Todas las acciones relevantes del sistema se registran en un archivo de log técnico, que incluye los eventos de cada flujo de procesamiento y los reinicios. Este registro permite reconstruir el comportamiento del sistema y diagnosticar la causa de cualquier interrupción, brindando trazabilidad operativa del monitor.

3.3 DASHBOARD Y MONITOREO DE AUDIO

Visualización de datos. Para facilitar la observación integral de los parámetros de modulación, se desarrolló un dashboard web implementado en HTML5 con procesamiento de datos en JavaScript. El dashboard consume datos históricos almacenados en archivos CSV, permitiendo visualizar la evolución temporal del porcentaje de modulación mediante gráficas de serie de tiempo.

El dashboard presenta gráficas de línea que muestran la evolución del indicador para cada emisora durante el período seleccionado. Esto acompañado de tablas que detallan los estadísticos relacionados y el estado de cumplimiento normativo. El usuario puede filtrar los datos según tres períodos predefinidos: últimas 24 horas, últimos 7 días o últimos 30 días. La Figura 11 muestra el dashboard durante el período de pruebas del sistema, con siete días de datos reales de las cinco emisoras FM monitoreadas; puede observarse la línea de referencia del umbral normativo del 110%, la tabla de estadísticos por emisora y el indicador de estado de cumplimiento.



Figura 11. Dashboard web del sistema de monitoreo.

Monitoreo de audio en vivo. El sistema incluye una interfaz de monitoreo de audio en vivo que permite al equipo técnico escuchar directamente la señal de la emisora bajo análisis en tiempo real. Esta funcionalidad incluye los bloques demoduladores en el monitor principal que generan las corrientes de audio, estos bloques operan en paralelo al flujo principal de GNU Radio. Luego, un puente WebSocket recibe los paquetes de audio UDP desde el monitor principal y los reenvía a través de conexiones WebSocket. Esta arquitectura garantiza baja latencia y permite conexiones simultáneas de navegadores clientes.

Se implementó otra interfaz HTML5 que se conecta al puente WebSocket, decodifica el flujo de audio, y lo reproduce mediante la API Web Audio de los navegadores modernos. En la interfaz de audio se puede cambiar entre emisoras FM y AM, además de controlar el volumen del audio.

Publicación en red local y acceso remoto. Ambas interfaces (dashboard y monitor de audio) se implementan en formato HTML estático y se publican en la red local mediante un servidor HTTP en el puerto 8080 de la Raspberry Pi. Esta configuración elimina dependencias de software adicional en los clientes y permite acceso desde cualquier dispositivo con navegador web conectado a la red corporativa de RCN Radio. La dirección IP de la Raspberry Pi se configura de forma fija durante la instalación, garantizando que la URL de acceso permanezca constante y sea reutilizable.

Para facilitar el acceso, la dirección del dashboard se muestra de forma destacada en la GUI del monitor de modulación principal, permitiendo a los ingenieros copiar y pegar directamente la dirección en la barra de direcciones de su navegador preferido. Esta flexibilidad permite realizar verificaciones y análisis desde cualquier ubicación dentro de las instalaciones de RCN Radio, tanto desde estaciones de trabajo en los cuartos de enlaces como desde computadores portátiles o dispositivos móviles.

3.4 REPORTE SEMANAL

El sistema de reporte implementa el envío automático de un correo electrónico semanal al director técnico de RCN Radio Cali, consolidando los resultados del monitoreo de todas las emisoras de la cadena durante los siete días anteriores.

El módulo está implementado en un script Python independiente que se ejecuta automáticamente cada lunes a las 7:00 a.m. mediante una tarea programada en el sistema operativo. Al ejecutarse, el script lee el archivo CSV de registros y filtra los correspondientes a los últimos siete días. Por cada emisora, se calcula la modulación pico promedio y se cuenta el número de sesiones en las que el monitor registró una excedencia del umbral regulatorio, el número de sesiones excedidas se expresa sobre el total de sesiones efectivamente registradas durante la semana.

El reporte se construye como una tabla HTML con una fila por emisora, que incluye el nombre, la frecuencia, el tipo de modulación, el promedio de la modulación pico en la semana y la proporción de sesiones que sobrepasaron el umbral. El correo se envía directamente desde la Raspberry Pi 5 mediante el protocolo SMTP sobre SSL, utilizando una cuenta de correo dedicada y una contraseña de aplicación, sin dependencia de servicios externos adicionales. Un ejemplo del correo con la tabla de reporte generada por el sistema se presenta más adelante en la Figura 19, dentro de la sección 4.4 Pruebas de reporte y estabilidad.

3.5 INTEGRACIÓN CON APP DE GESTIÓN TÉCNICA

La aplicación de gestión técnica de RCN Radio está implementada sobre la plataforma Firebase y utiliza Firestore como base de datos. La integración del sistema de monitoreo con la app permite que los datos adquiridos queden disponibles dentro de la misma herramienta que el equipo técnico ya emplea para el registro y seguimiento de los parámetros de operación de las emisoras.

La sincronización se implementa en un módulo de Python que se ejecuta de forma automática en la Raspberry Pi mediante una tarea programada cada lunes, pocos minutos después del envío del reporte semanal por correo. El módulo lee el archivo de registro y filtra las sesiones de los siete días anteriores.

La comunicación con Firestore se realiza mediante el Firebase Admin SDK, autenticándose con una cuenta de servicio del proyecto. Cada ejecución genera un documento por semana, identificado por la fecha de cierre del período y almacenado en una colección dedicada dentro de Firestore.

En la aplicación de gestión técnica, la información almacenada en Firestore se presenta en una tabla con la misma estructura del reporte semanal, en la que cada fila corresponde a una emisora e incluye su frecuencia, el tipo de modulación, la modulación promedio semanal y las sesiones excedidas. De esta manera, el consolidado semanal queda accesible a través de dos canales complementarios el correo electrónico y la aplicación de gestión garantizando que la información llegue al equipo técnico de forma redundante y con un formato uniforme. La Figura 12 presenta el consolidado semanal dentro de la aplicación de gestión técnica.



Figura 12. Modulación de emisoras en la aplicación de gestión técnica.

3.6 DISEÑO E INTEGRACIÓN DEL GABINETE

Para la instalación permanente del sistema en el cuarto de enlaces de RCN Radio se seleccionó y adaptó un gabinete de plástico ABS. Las dimensiones son 18,3 cm de ancho, 26,3 cm de profundidad y 6,1 cm de alto, por lo que ocuparía 2 unidades de rack (2U) en altura. La adaptación fue realizada en el Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, donde se incorporaron todas las funcionalidades requeridas por el sistema.

El panel frontal del gabinete cuenta con un LED de encendido que indica el estado de la Raspberry Pi: verde cuando el sistema está en operación y rojo cuando está apagado. Junto al LED se ubica el botón de encendido y apagado del sistema. Los paneles laterales incorporan rejillas de ventilación que permiten la circulación de aire necesaria para la disipación de calor de los componentes internos. La Figura 13 muestra el panel frontal y el lateral del gabinete.



Figura 13. Gabinete del sistema de monitoreo: panel frontal y lateral.

El panel trasero concentra todas las conexiones externas del dispositivo: un puerto USB-C para alimentación, un puerto RJ45 para la conexión de red, y un conector SMA hembra para la conexión de la antena. La tapa superior del gabinete se fija mediante seis tornillos, facilitando el acceso al interior para mantenimiento o actualizaciones de hardware. La Figura 14 muestra el panel trasero con sus conexiones.



Figura 14. Gabinete del sistema de monitoreo: panel trasero.

En el interior del gabinete se alojan todos los componentes del sistema. La Raspberry queda sujeta a la base del chasis mediante pines de montaje, estos pines se enganchan a los orificios de la placa y se fijan al piso del gabinete con adhesivo, este sistema permite distribuir uniformemente el peso y sujeta firmemente la Raspberry al gabinete. El receptor RTL-SDR Blog V4 se conecta directamente a un puerto USB de la Raspberry Pi y cuenta con un soporte dedicado que sostiene su peso, evitando que la interfaz USB quede sometida a esfuerzos mecánicos continuos.

Ambos componentes cuentan con sistemas de disipación de calor independientes. La Raspberry Pi 5 incorpora un disipador de aluminio y un ventilador de baja velocidad sobre el procesador principal. El RTL-SDR Blog V4 tiene igualmente su propio disipador y ventilador, necesarios para mantener la temperatura de operación del chip RTL2832U dentro de los rangos admisibles durante el monitoreo continuo. La conexión entre los puertos exteriores del gabinete y los componentes internos se realiza mediante tres extensiones de cable, uno de alimentación USB tipo c, un cable de red cortado a medida y un cable SMA. La Figura 15 muestra el interior del gabinete y los componentes. Finalmente, la Figura 16 muestra el sistema completo ya ensamblado y conectado, incluyendo la antena de recepción.

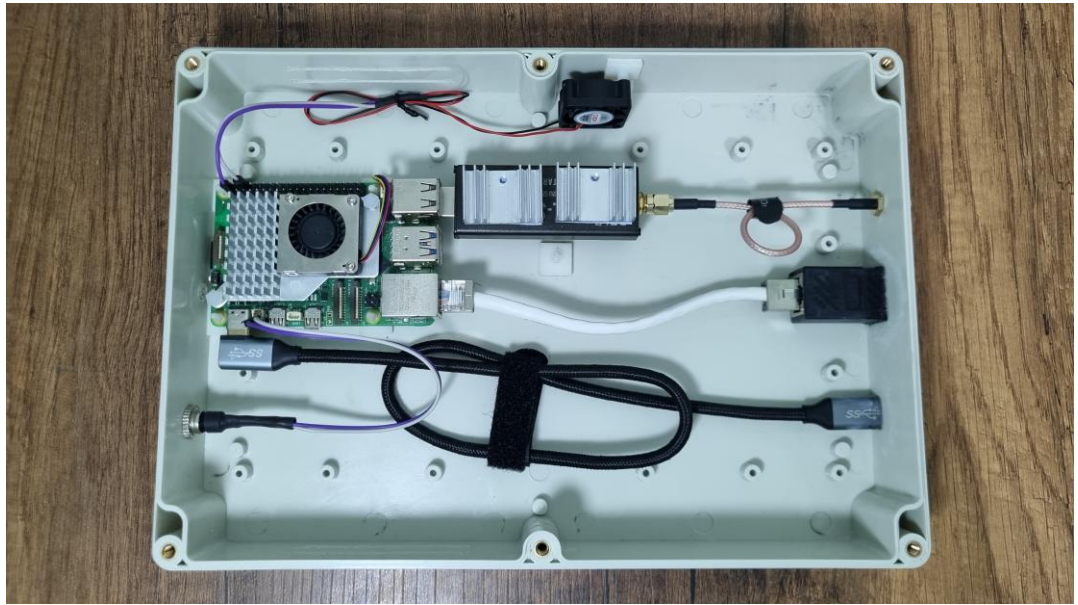


Figura 15. Interior del gabinete: distribución de componentes y cableado.



Figura 16. Sistema completo de monitoreo: gabinete, antena y alimentación.

3.7 MANUAL DE USUARIO

Como parte de los entregables se elaboró un manual de usuario orientado al equipo técnico de RCN Radio Cali. El manual documenta la operación del sistema e incluye la descripción de la arquitectura de hardware y software, el procedimiento para iniciar y detener el monitor, la configuración de todos los parámetros ajustables, la interpretación de los archivos de registro, las buenas prácticas de manejo del sistema y los procedimientos de solución de problemas frecuentes.

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo presenta el plan de pruebas diseñado para evaluar el sistema de monitoreo, los resultados de las pruebas funcionales, el análisis de los datos recopilados en sesiones de monitoreo y la discusión de los resultados obtenidos.

4.1 PLAN DE PRUEBAS

El plan de pruebas del sistema de monitoreo se estructuró en cuatro categorías: prueba funcional, prueba de precisión, prueba de reporte semanal y pruebas de estabilidad. La Tabla 3 presenta el resumen del plan de pruebas con los criterios de aceptación de cada categoría.

Tabla 3. Plan de pruebas del sistema de monitoreo

Categoría	Descripción	Criterio de aceptación
Funcional	Recepción y ciclo automático de las emisoras.	Monitoreo sin interrupciones ni fallos en 24 h.
Precisión	Comparación simultánea con un monitor de referencia.	RMSE < 10 puntos porcentuales.
Reporte	Verificación de reporte vía correo electrónico.	Reporte recibido automáticamente con información completa.
Estabilidad	Operación continua 7 días sin intervención manual.	Disponibilidad > 99%.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 PRUEBA FUNCIONAL

La prueba funcional tiene como objetivo verificar que la cadena de procesamiento de señal opera correctamente de extremo a extremo, desde la recepción de la señal de radiofrecuencia hasta la obtención y el registro de los indicadores de modulación. Esta prueba se realizó de forma conjunta para FM y AM en un periodo de 24 horas, comprobando la recepción de las emisoras, el funcionamiento secuencial, la extracción de los datos de modulación y la generación de los archivos CSV correspondientes.

La Figura 17 muestra la interfaz gráfica del sistema durante el monitoreo en vivo de la emisora La Mega en 92,5 MHz, donde se observa el valor de modulación FM, y el espectro de la señal recibida.

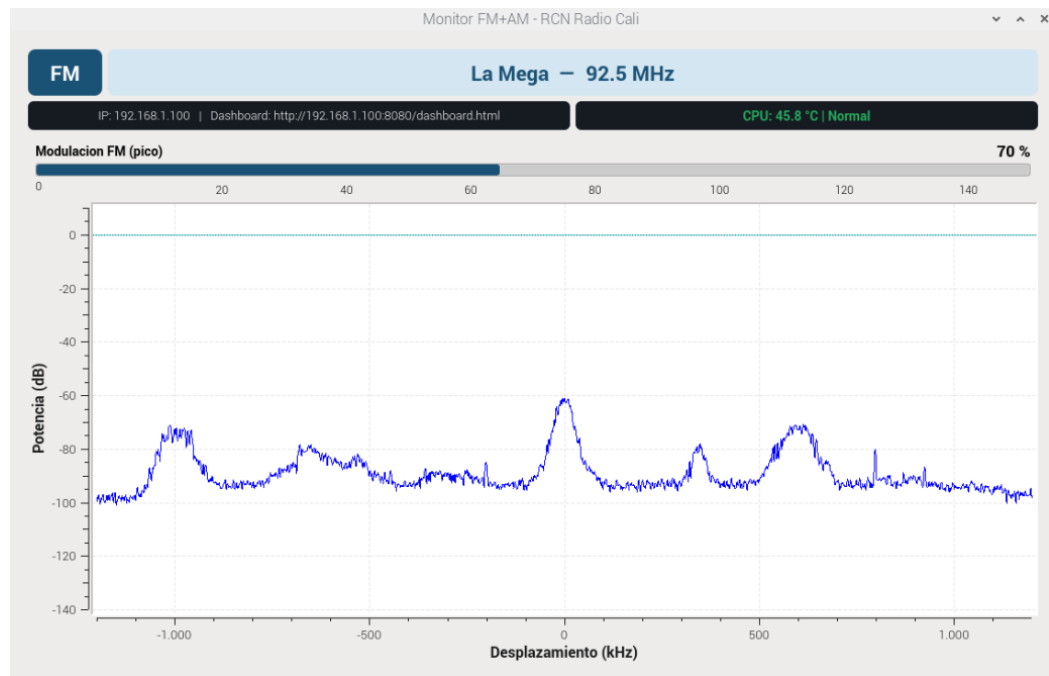


Figura 17. Interfaz del sistema durante el monitoreo de una emisora FM.

El ciclo compuesto de 75 minutos para FM y de 15 minutos para AM operó de forma continua y sin incidentes durante las sesiones de prueba, realizando la sintonización de emisoras de forma secuencial y el registro de datos exitosamente.

4.3 PRUEBA DE PRECISIÓN

La prueba de precisión compara las mediciones del sistema desarrollado con las lecturas de los monitores de referencia de RCN Radio: el TFT 844 para FM y el TFT 923 para AM. Ambos instrumentos entregan una lectura analógica de aguja del valor pico de modulación, por lo que la comparación no se realiza muestra a muestra, sino emparejando el pico que indica el monitor de referencia con el valor de modulación que reporta el sistema sobre la misma ventana de observación.

La prueba se ejecutó en una única visita al cuarto de enlaces de RCN Radio Cali. Por cada una de las emisoras se realizaron cinco ventanas de observación consecutivas de un minuto cada una, durante las cuales se registró el pico de modulación indicado por la aguja del monitor de referencia en un cuadro de Excel de manera manual. Simultáneamente el sistema bajo prueba registró los datos de monitoreo en el archivo CSV correspondiente de manera automática, para esto se configuró el tiempo de muestreo de emisora en 5 minutos con el fin de agilizar la prueba y evitar interrumpir las operaciones de la empresa. A partir de estos pares de datos se calcula el error cuadrático medio (RMSE) entre ambos instrumentos, el criterio de aceptación es un RMSE inferior a 10 puntos porcentuales.

El RMSE cuantifica en un único valor la discrepancia global entre el sistema y el monitor de referencia a lo largo de las ventanas de observación por cada emisora. Se calcula a partir de los pares de datos obtenidos, para cada una de las cinco ventanas se determina el error como la diferencia entre el valor de modulación reportado por el sistema y el valor leído del monitor de referencia. El RMSE resulta de la raíz cuadrada del promedio de esos errores elevados al cuadrado, como lo muestra la ecuación 22:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{sist,i} - M_{ref,i})^2} \quad (22)$$

Donde n es el número de ventanas de observación por emisora ($n = 5$), $M_{sist,i}$ es el valor de modulación reportado por el sistema en el minuto i y $M_{ref,i}$ es el pico registrado en el monitor de referencia en ese mismo minuto. El resultado se expresa en puntos porcentuales (pp), las mismas unidades de la variable comparada. Al elevar los errores al cuadrado antes de promediarlos, el RMSE penaliza en mayor medida las desviaciones grandes que las pequeñas, lo que permite detectar discrepancias puntuales que un promedio simple podría enmascarar.

Los valores de RMSE obtenidos para cada emisora y componente de modulación se presentan en la Tabla 4.

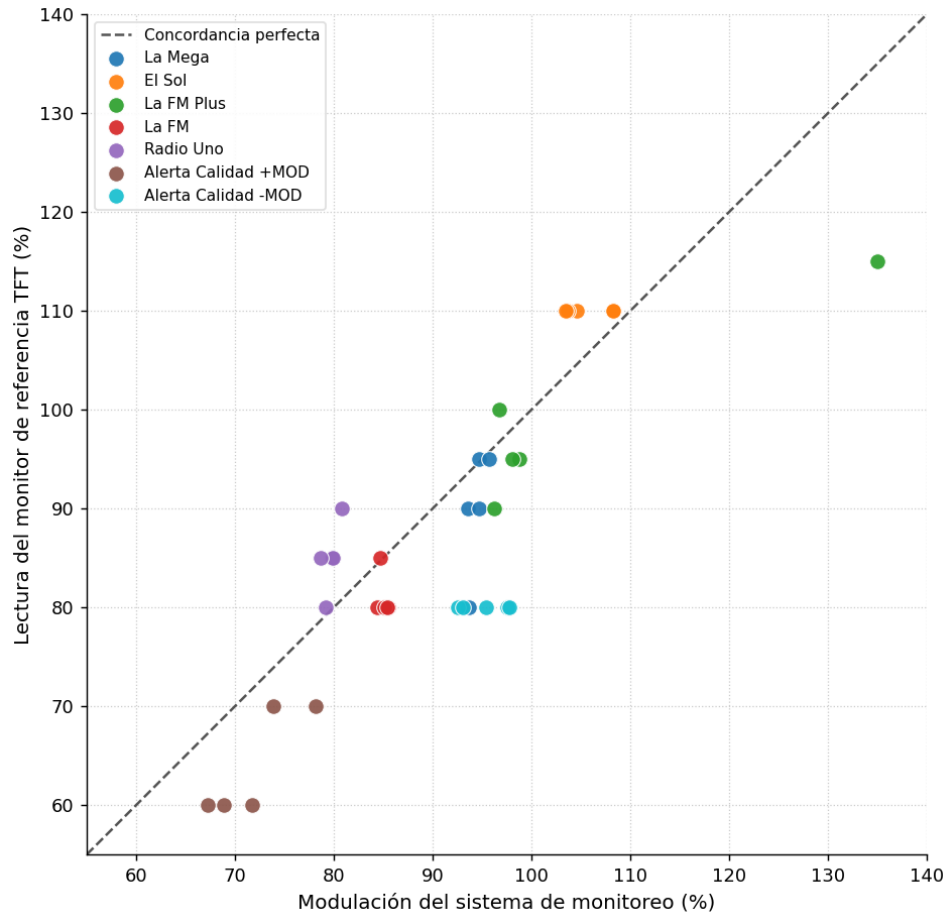
Tabla 4. RMSE entre el sistema desarrollado y los monitores de referencia.

Emisora	RMSE (pp)
La Mega	6,68
El Sol	4,85
La FM Plus	9,72
La FM	4,55
Radio Uno	5,98
Alerta Calidad +MOD	8,38
Alerta Calidad -MOD	15,41

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 18 presenta el gráfico de dispersión que compara las mediciones del sistema con las lecturas del monitor de referencia para cada ventana de observación. El eje horizontal corresponde a la modulación reportada por el sistema y el eje vertical a la lectura del monitor TFT 844 para las emisoras de FM o el TFT 923 para AM. La línea punteada representa la concordancia perfecta entre ambos instrumentos y la distancia de cada punto a la diagonal refleja la diferencia entre las dos mediciones. Se observa que la mayoría de los puntos correspondientes a las

emisoras de FM se agrupan próximos a la diagonal, lo que evidencia una buena concordancia entre el sistema y la referencia.



Durante todo el período no se registró ninguna interrupción y no se tuvo que ejecutar ninguna recuperación por fallo. Los únicos reinicios registrados fueron los preventivos diarios, programados a las 3:55 a.m. Dado que estos reinicios ocurren dentro de la ventana de reposo nocturno, no afectaron ninguna sesión de medición.

La continuidad de las mediciones se verificó a partir del archivo de registro de modulación. Cada día el sistema registró los 10 ciclos diarios. Esto equivale al 100% de los ciclos esperados.

La prueba del reporte semanal se verificó con la recepción automática del correo electrónico generado y enviado a las 7:00 a.m. del lunes. Con esto se cumplen los criterios de aceptación de las dos categorías.

La Figura 19 muestra el correo recibido durante la prueba. La tabla presenta las seis emisoras de la cadena con sus respectivos indicadores semanales. El Sol 97.5 MHz muestra un promedio semanal de modulación de 124,3 % y un conteo de 69 de 70 sesiones excedidas, mientras que la FM plus 98.0 MHz solo reportó una sesión de sobremodulación en toda la semana.



reporte.monitormod@gmail.com
para mí ▼

11:50 (hace 3 minutos)



Reporte Semanal de Modulación

RCN Radio Cali · 12/06/2026 – 19/06/2026

Emisora	Frecuencia	Tipo	Mod. promedio semanal	Sesiones excedidas
El Sol	97.5 MHz	FM	124.3 %	69 / 70 (98.6 %)
La FM	98.5 MHz	FM	82.2 %	0 / 70 (0.0 %)
La FM Plus	98.0 MHz	FM	96.6 %	1 / 70 (1.4 %)
La Mega	92.5 MHz	FM	94.5 %	0 / 70 (0.0 %)
Radio Uno	100.5 MHz	FM	82.0 %	0 / 70 (0.0 %)
Alerta Calidad	980 kHz	AM	+76.5 % / -67.6 %	0 / 70 (0.0 %)

Figura 19. Correo de reporte semanal.

4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante las pruebas del prototipo demuestran la viabilidad técnica del sistema de monitoreo. A continuación, se discuten los hallazgos de cada categoría en relación con los criterios de aceptación definidos.

La prueba funcional mostró que las cadenas de procesamiento FM y AM operaron sin interrupciones ni imprevistos durante las sesiones de prueba de 24 horas. Esto confirma que la arquitectura de software basada en GNU Radio y Python es adecuada para el monitoreo secuencial de múltiples emisoras en operación desatendida, cumpliendo el criterio de aceptación de ciclo sin interrupciones en 24 horas para ambos tipos de modulación.

La prueba de precisión evidenció una concordancia satisfactoria entre las mediciones del sistema y las lecturas de los monitores de referencia de RCN Radio en la mayoría de los casos evaluados. En FM, las cinco emisoras registraron un RMSE inferior al criterio de aceptación de 10 puntos porcentuales, lo que confirma que la cadena de procesamiento FM reproduce con fidelidad el pico de modulación indicado por el monitor TFT 844.

En AM, la componente de modulación positiva (+MOD) de Alerta Calidad cumplió el criterio con un RMSE de 8,38 pp, mientras que la componente negativa (-MOD) no lo cumplió, con 15,41 pp. Esta discrepancia se atribuye principalmente a la etapa de recepción, ya que la antena utilizada está optimizada para la banda de FM, ya que en el diseño del sistema se priorizó esta banda por ser la que concentra mayor cantidad de emisoras y la de mayor interés para la compañía. Como consecuencia, su desempeño en AM no es el idóneo, lo que afecta la calidad de la muestra sobre la que el sistema calcula la modulación y explica la mayor desviación observada en la componente negativa.

El sistema superó el criterio de disponibilidad del 99 % al operar durante ocho días consecutivos sin ninguna intervención manual ni interrupción no programada,

incluso continuó en funcionamiento por más de 20 días sin intervención, lo cual demuestra que los protocolos de robustez y medidas preventivas como el reinicio diario cumplen su propósito. La temperatura media de la CPU de 40,5 °C, con un máximo de 54 °C, confirma que el diseño térmico del gabinete es adecuado y la recepción automática del reporte semanal con la información completa indica una buena integración del sistema de monitoreo con los protocolos de comunicación vía correo electrónico.

En conjunto, los resultados de las pruebas confirman que el sistema cumple con los objetivos del proyecto y que el prototipo está listo para su operación en las instalaciones de RCN Radio Cali.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

Este capítulo evalúa el sistema desarrollado desde una perspectiva económica, analizando una decisión de inversión que la cadena enfrentaría en el caso de que decidiera migrar su monitoreo de modulación hacia un esquema digital y automatizado. Para ese objetivo existen dos caminos, adquirir equipos de monitoreo comerciales o desplegar una solución basada en Radio Definida por Software como la de este trabajo. Las cifras de costo de los equipos corresponden a referencias de mercado y a precios de componentes vigentes durante el desarrollo del proyecto.

5.1 PLANTEAMIENTO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS

El monitoreo del porcentaje de modulación es una obligación técnica para toda estación de radiodifusión. Como se expuso en la definición del problema, el esquema actual de la cadena se basa en mediciones manuales y puntuales, que tienen un costo operativo bajo, pero una cobertura limitada. La modernización hacia un monitoreo digital, continuo y con capacidad de registro y alerta remota es la evolución natural de ese proceso, en línea con la tendencia del sector. La pregunta relevante es, ¿qué alternativa es económicamente más eficiente para implementar un monitoreo moderno?

El análisis toma como alcance la Sección Suroccidente de RCN Radio, conformada por cinco sedes o puntos de transmisión distribuidos en el suroccidente del país: Cali, Buga, Pasto, Popayán y Tumaco. Dotar de monitoreo digital a esta sección implica cubrir las cinco sedes. Una característica del sistema desarrollado resulta determinante para la comparación, y es que una sola unidad puede sintonizar y procesar varias frecuencias y cubrir tanto AM como FM. Basta entonces una unidad por sede para monitorear todas las señales que esta transmite, de modo que el despliegue requerido es de una unidad por cada una de las cinco sedes.

5.2 COMPARACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Por la vía comercial, los monitores de modulación digitales con conectividad de red y capacidad de alerta remota se ubican en el segmento profesional del mercado. Un equipo representativo, el Inovonics 541N para FM, que incorpora interfaz web, registro, notificaciones por correo y mensajería y soporte SNMP, tiene un precio cercano a los 6.000 USD por unidad [18]. A este costo se suma una restricción funcional y es que cada equipo mide un solo tipo de modulación, por lo que una sede que transmita en AM y FM requeriría más de un equipo. Tomando el escenario más conservador de un equipo por sede, equipar las cinco sedes de la Sección Suroccidente representa una inversión cercana a los 30.000 USD.

Por la vía basada en SDR, el sistema desarrollado combina hardware de bajo costo con software libre, trasladando el procesamiento de señal a una plataforma de cómputo de propósito general. La Tabla 5 detalla el costo de los componentes de una unidad.

Tabla 5. Costo aproximado de los componentes de una unidad del sistema.

Componente	Función	Costo (USD)
Raspberry Pi 5 (8 GB)	Unidad de procesamiento	80
RTL-SDR Blog V4	Receptor SDR	30
Gabinete, cableado y elementos de montaje	Integración física	30
Total por unidad		140

Fuente: Elaboración propia.

El software empleado no genera costos de licencia, y una sola unidad cubre todas las frecuencias de una sede en ambas bandas. Cubrir las cinco sedes con la

solución SDR requiere cinco unidades, con un costo de hardware cercano a los 700 dólares para toda la sección. Otra ventaja es que cada unidad SDR cubre simultáneamente AM y FM.

La comparación anterior considera el costo del hardware de la solución SDR, pero no el esfuerzo de ingeniería de desarrollar el software, caracterizar el sistema y validar su funcionamiento. A diferencia de un monitor comercial, que se adquiere listo para operar, la solución SDR requiere ese trabajo previo. Este proyecto, sin embargo, surge de una necesidad concreta de la cadena y se desarrolla en el marco de un trabajo de grado, de modo que el esfuerzo de desarrollo se realiza una sola vez y queda incorporado en la solución. Una vez desarrollado el software, replicar el sistema en cada nueva sede cuesta esencialmente el precio de su hardware, siendo una ventaja estructural frente a la electrónica dedicada de los equipos comerciales, donde cada unidad implica el precio íntegro del equipo.

Esta diferencia admite además una lectura en términos de costo de oportunidad. El capital que la cadena debería inmovilizar para equipar las cinco sedes con monitores comerciales es muy superior al que requiere la solución SDR. De optarse por la vía comercial, ese capital quedaría comprometido y dejaría de estar disponible para otros usos productivos dentro de la organización, o simplemente la cadena no podría permitirse esa inversión y los problemas relacionados con el monitoreo de modulación continuarían presentes.

5.3 CONSIDERACIONES REGULATORIAS

Un elemento regulatorio incide favorablemente sobre la viabilidad de la solución. La revisión de los planes técnicos nacionales de radiodifusión sonora vigentes muestra que la normativa exige que la estación disponga de un monitor de modulación y de un monitor de frecuencia entre sus equipos de medición y control, y que cumpla los límites de modulación establecidos [6][3]. Adicionalmente, los

planes establecen que el concesionario tiene libertad para escoger los equipos que estime conveniente operar, exigiendo como única condición que la señal resultante mantenga una calidad adecuada. Este principio, confirma que no existe una barrera regulatoria que impida emplear un instrumento de medición propio, como el desarrollado en este trabajo, siempre que cumpla su función correctamente. En consecuencia, llevar el prototipo a una versión operativa corresponde a un esfuerzo de ingeniería y no a un trámite regulatorio de costo elevado.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo e implementación del sistema de monitoreo del porcentaje de modulación de las emisoras de radio AM y FM de RCN Radio, las limitaciones identificadas durante el proceso de implementación, y las recomendaciones de trabajo futuro orientadas a completar y mejorar el sistema.

6.1 CONCLUSIONES

El diseño del sistema partió de una arquitectura basada en la recepción SDR que permitió monitorear el porcentaje de modulación tanto de emisoras comerciales de FM como de AM con un único receptor. El esquema de sintonización secuencial y el procesamiento en cadena de bloques demostró ser una solución de diseño viable para cubrir las seis emisoras de RCN Radio en Cali sin requerir hardware dedicado por estación.

Se construyó un prototipo funcional apto para instalación y operación continua en el cuarto de enlaces de la compañía. Los resultados de la prueba de estabilidad verifican que el prototipo cumple los criterios de autonomía operativa.

El sistema demostró una exactitud adecuada frente a los monitores de referencia, el TFT 844 para FM y TFT 923 para AM. En la prueba de precisión, el RMSE se mantuvo por debajo del criterio de aceptación de 10 puntos porcentuales en las cinco emisoras de FM evaluadas, lo que confirma que las mediciones del prototipo son estadísticamente comparables con las de instrumentos calibrados. En AM, la componente de modulación positiva también cumplió el criterio, mientras que la componente negativa presentó una desviación superior. En conjunto, los resultados validan la precisión de las mediciones del sistema.

La arquitectura del sistema, basada en componentes de software libre (GNU Radio, Python, Linux) y hardware de bajo costo (RTL-SDR Blog V4 y Raspberry Pi 5), resulta en un sistema cuyo costo total de hardware es inferior a USD 140, en contraste con los monitores comerciales cuyo costo puede superar los USD 6.000. Esta relación costo-beneficio favorable es relevante para la potencial escalabilidad del sistema a otras sedes de RCN Radio.

Se puede concluir que el proyecto superó en términos de confiabilidad al proceso manual, gracias al sistema de monitoreo automático y continuo, el cual es escalable, robusto, preciso y de bajo costo, demostrando que la Radio Definida por Software constituye una alternativa sólida para la verificación del porcentaje de modulación en radiodifusión sonora comercial.

6.2 LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

Antenas. El sistema de antenas empleado condiciona la calidad de la recepción de forma diferente según la banda de operación. Para FM, el dipolo telescópico suministrado con el receptor RTL-SDR Blog V4 opera con una longitud eléctrica apropiada para VHF, lo que garantiza una recepción eficiente de las señales de las emisoras monitoreadas. Para la recepción AM en la banda de onda media, en cambio, el mismo dipolo resulta eléctricamente muy corto, su longitud física representa una fracción mínima de la longitud de onda en esa banda. Esta limitación afecta directamente la relación señal a ruido de las mediciones AM y puede introducir incertidumbre en el porcentaje de modulación registrado.

Para mejorar el desempeño del sistema en ambas bandas se recomienda adoptar una arquitectura con antenas y receptores SDR dedicados por tipo de modulación. Para FM, una antena dipolo diseñada específicamente para la banda de 88 a 108 MHz, ofrecería mayor ganancia y mejor relación señal a ruido que el dipolo telescópico de longitud variable. Para AM, una antena de cuadro con núcleo

de ferrita es la solución habitual en receptores de onda media, su alta selectividad le permite rechazar interferencias y captar eficientemente señales en la banda de 535 kHz a 1705 kHz. Contar con un receptor SDR independiente para cada banda permitiría además que el monitoreo FM y AM se ejecute de forma simultánea, eliminando la limitación del esquema secuencial actual.

ADC. El receptor RTL-SDR Blog V4 incorpora un convertidor analógico-digital de 8 bits, lo que resulta en un rango dinámico teórico de aproximadamente 48 dB. Esta resolución es suficiente para emisoras comerciales, donde las señales son fuertes. Sin embargo, en escenarios con señales de amplitud muy dispar la limitación en el rango dinámico puede generar distorsión por intermodulación o saturación del ADC, afectando la precisión de la medición.

La migración a un receptor SDR con convertidor de mayor resolución, que emplean ADC de 12 a 14 bits, ampliaría el rango dinámico efectivo en 24 a 36 dB adicionales, reduciendo la susceptibilidad a la distorsión.

Expansión territorial. La extensión del sistema para monitorear emisoras en otras sedes de la cadena RCN Radio podría realizarse replicando el mismo hardware y software en cada ciudad. Al conectar cada dispositivo a la misma plataforma de gestión técnica de la empresa, los datos de todas las sedes quedarían disponibles en una única interfaz, permitiendo la visibilidad de información de todas las emisoras de la cadena a nivel nacional.

Análisis de componentes estéreo. La incorporación de mediciones de modulación de componentes individuales de la señal FM como el canal principal L+R, la subportadora de diferencia L-R y el tono piloto, ampliaría las capacidades de diagnóstico del sistema, permitiendo verificar el balance entre canales y la correcta generación del piloto. Estas funcionalidades son alcanzables con el hardware actual, pero requieren desarrollo de nuevos módulos de software.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT). Reglamento de Radiocomunicaciones. Vol. 1. Ginebra: UIT, 2020.
- [2] UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT-R). Recomendación UIT-R BS.450-4: Normas de transmisión para radiodifusión sonora con modulación de frecuencia en ondas métricas. Ginebra: UIT, 2020.
- [3] AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO (ANE). Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Amplitud Modulada (A.M.). Bogotá: ANE, agosto de 2020. Actualizado según Resolución No. 186 del 5 de agosto de 2020.
- [4] ZIEMER, Rodger E. y TRANTER, William H. Principles of Communications: Systems, Modulation and Noise. 7 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- [5] TOMASI, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. 4 ed. México: Pearson Educación, 2003.
- [6] AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO (ANE). Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada (F.M.). Bogotá: ANE, agosto de 2020. Actualizado según Resolución No. 186 del 5 de agosto de 2020.
- [7] PÁEZ VÁSQUEZ, Xavier Santiago y OLIVO JÁCOME, Freddy Moisés. Sistema remoto de control y monitoreo de estaciones de radiodifusión en FM usando la red WAN de la Superintendencia de Telecomunicaciones. Trabajo de grado Ingeniería Electrónica. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [8] AYALA VINUEZA, Edison Guillermo. Determinación de la calidad de los parámetros de transmisión de las estaciones de radiodifusión FM que sirven a la ciudad de Quito y zonas aledañas. Trabajo de investigación. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1997.

- [9] SARANSIG TIXICURO, Rubén Fernando. Diseño de un sistema de monitoreo de contenidos de radiodifusión analógica en frecuencia modulada FM y amplitud modulada AM, y, televisión analógica terrestre abierta VHF y UHF. Trabajo de grado. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2016.
- [10] ROMERO PAZMIÑO, Santiago José. Implementación de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B usando SDR (Software Defined Radio), hardware y software libre. Trabajo de grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [11] PAZMIÑO QUIGUANGO, Vanessa Stephania y ESPINOZA PIONCE, Luis Erick. Diseño e implementación de un banco de pruebas de laboratorio aplicado a FM broadcasting utilizando software de código abierto GNU Radio, Raspberry Pi y radios definidas por software. Trabajo de titulación. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [12] VALLE VIVANCO, Dennis Adrián y VILLAVICENCIO QUINTEROS, Juliana Melissa. Desarrollo de un sistema de monitoreo y vigilancia del espectro radioeléctrico en las bandas comprendidas en el rango 88-108 MHz para la verificación del cumplimiento de leyes y regulaciones nacionales utilizando radio definido por software RTL-SDR. Informe de materia integradora. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2017.
- [13] MITOLA III, Joseph. Software Radios: Survey, Critical Evaluation and Future Directions. En: Proceedings of the IEEE National Telesystems Conference (NTC-92). New York: IEEE, 1992. p. 13-15 – 13-23.
- [14] UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT-R). Recomendación UIT-R BS.412-9: Normas para la planificación de la radiodifusión sonora con modulación de frecuencia en ondas métricas. Ginebra: UIT, 2010.
- [15] UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES (UIT-R). Recomendación UIT-R SM.1268-4: Método de medición de la máxima desviación de frecuencia de las emisiones de radiodifusión en frecuencia

modulada (FM) a utilizar en las estaciones de comprobación técnica.
Ginebra: UIT, 2017.

- [16] TIME & FREQUENCY TECHNOLOGY, INC. Model 844 FM Modulation Monitor and Stereo Monitor — Operator's Manual, Rev. C. Santa Clara: TFT, Inc., 1985.
- [17] TIME & FREQUENCY TECHNOLOGY, INC. Operation and Maintenance Manual, Model 923 AM Modulation Monitor, Rev. B (P/N 5004-0923). Santa Clara: TFT, Inc., 1993.
- [18] INOVONICS BROADCAST. Model 541N FM Modulation Monitor [en línea]. Felton, California: Inovonics Broadcast, Inc. [Consultado: 6 de julio de 2026]. Disponible en: <https://www.inovonicsbroadcast.com/product/541>
- [19] GNU RADIO PROJECT. quadrature_demod_cf.h — GNU Radio C++ API Reference [en línea]. [Consultado: 29 de julio de 2026]. Disponible en: https://www.gnuradio.org/doc/doxygen/quadrature__demod__cf_8h_source.html
- [20] LICHTMAN, Marc. PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python [en línea]. Cap. 18, "End-to-End Example with RDS", sección "FM Demodulation". [Consultado: 29 de julio de 2026]. Disponible en: <https://pysdr.org/content/rds.html>

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO

Manual de Usuario

Sistema de Monitoreo de Modulación FM/AM — RCN Radio Cali

Nota: Los comandos de este manual se ejecutan en la terminal de la Raspberry Pi, a menos que se indique lo contrario

1. Descripción del gabinete

1.1 Panel frontal

El gabinete cuenta con un botón rojo en la parte frontal que controla el encendido y apagado del equipo:

- **Un pulso:** enciende el equipo
- **Dos pulsos:** apaga el equipo

Un LED indicador muestra el estado del sistema: verde cuando está encendido y rojo cuando está apagado.



1.2 Panel trasero



El panel trasero cuenta con las siguientes conexiones, de izquierda a derecha:

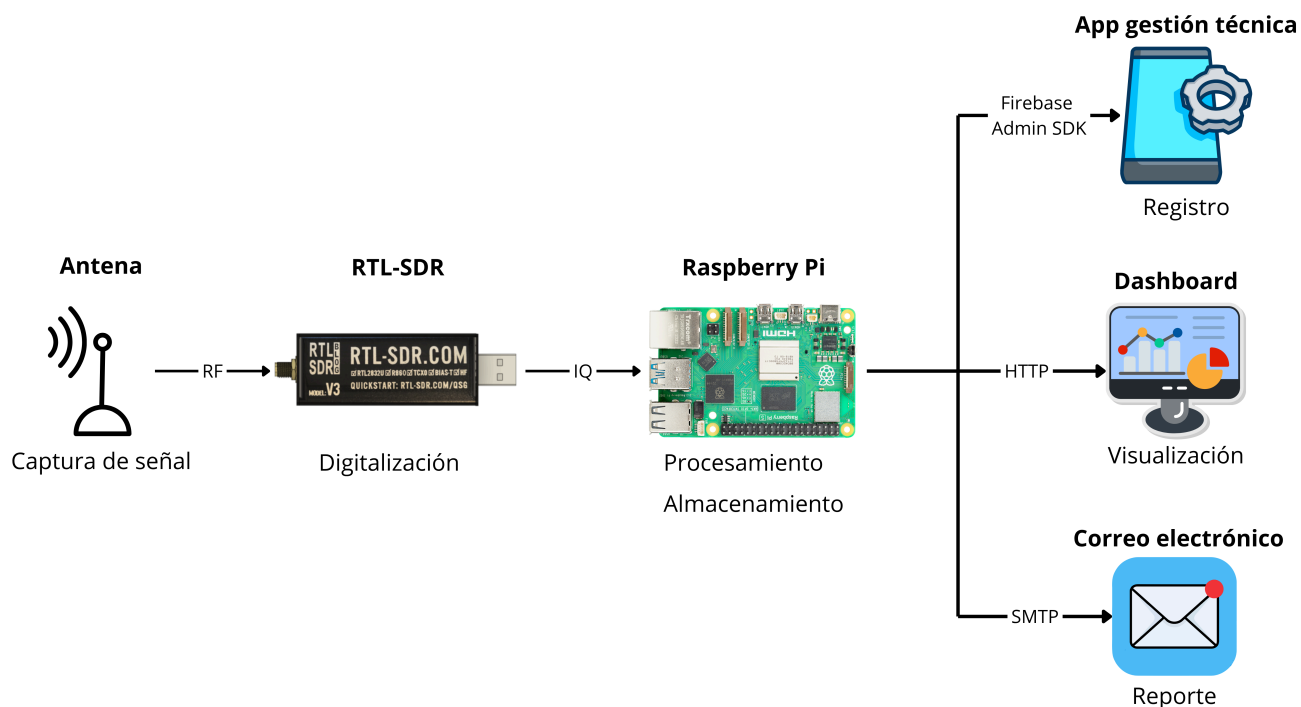
Alimentación: Conectar únicamente el adaptador de corriente oficial de Raspberry Pi. Este adaptador entrega el voltaje y la corriente exactos que requiere el equipo. El uso de un adaptador diferente puede causar funcionamiento inestable, reinicios inesperados o daños al hardware.

Puerto Ethernet (ETH): Permite conectar el equipo directamente a un computador mediante un cable de red, sin necesidad de Wi-Fi ni router. En ese caso, para acceder por VNC se usa `raspberrypi.local` en lugar de la dirección IP (ver sección 11.2).

Puerto de antena: Conexión SMA para la antena del receptor RTL-SDR. La antena debe estar conectada antes de iniciar el monitor.

Nota sobre el ventilador del SDR: El sistema de ventilación permanecerá encendido mientras el adaptador de corriente esté conectado, independientemente de si el equipo está encendido o apagado. Apagar el sistema con el botón frontal detiene la Raspberry Pi pero no corta la alimentación del ventilador, por lo tanto seguirá produciendo ruido. Para apagar completamente el ventilador es necesario desconectar el adaptador de corriente de la toma eléctrica.

2. Arquitectura del sistema



2.1 Hardware

El sistema se compone de tres elementos físicos conectados en cadena:

Antena: Captura la señal de radiofrecuencia y la entrega al receptor RTL-SDR mediante el puerto SMA.

RTL-SDR Blog V4: Receptor de radio definida por software conectado a la Raspberry Pi por USB. Su función es digitalizar la señal de RF y convertirla en datos IQ (en fase y cuadratura).

Raspberry Pi 5: Unidad central de procesamiento y almacenamiento. Recibe los datos IQ del RTL-SDR por USB, ejecuta el software de monitoreo con GNU Radio, calcula las métricas de modulación y almacena los resultados en los archivos CSV. Desde aquí también se distribuye la información hacia los tres sistemas de salida.

2.2 Software — sistemas de salida

Dashboard web: La Raspberry Pi actúa como servidor HTTP y sirve los archivos del dashboard al navegador del usuario mediante el protocolo HTTP. Permite visualizar gráficas de modulación, el estado de cada emisora y los datos históricos desde cualquier dispositivo en la misma red.

Correo electrónico: El reporte semanal se genera automáticamente y se envía al correo configurado mediante el protocolo SMTP (ver sección 6). Consolida los resultados de modulación de todas las emisoras durante la semana.

App de gestión técnica: Los resultados del monitoreo se sincronizan con la plataforma Firebase mediante el Firebase Admin SDK, quedando disponibles en la aplicación de gestión técnica de

RCN Radio para su registro y consulta.

2.3 Ciclo de monitoreo

El monitor opera en ciclos continuos con la siguiente lógica:

1. Al encender, el sistema inicia el monitoreo inmediatamente
2. Cada ciclo monitorea secuencialmente las 5 emisoras FM y la emisora AM, permaneciendo 15 minutos en cada una.
3. Al finalizar el monitoreo, el sistema espera nuevamente hasta la próxima hora en punto (30 min) y repite.
4. Un ciclo completo dura 120 minutos ($5 \times 15 \text{ min FM} + 1 \times 15 \text{ min AM} + 30 \text{ min descanso}$).

3. Estructura de archivos

```
Proyecto/
├── monitor_principal.py          # Programa principal del monitor
├── reporte_semanal.py           # Generador del reporte semanal por correo
├── audio_bridge.py              # Puente de audio para el dashboard
├── dashboard.html               # Dashboard principal de monitoreo
├── audio.html                   # Reproductor de audio en vivo
├── run_monitor.sh               # Supervisor de funcionamiento continuo
├── detener_monitor.sh           # Detiene el monitor y su supervisor
├── iniciar_dashboard.sh         # Para iniciar servidor del dashboard
├── instalar_autostart.sh        # Instalación del arranque automático
├── reset_logs.sh                # Limpiar los archivos de registro
├── monitor_principal.desktop     # Acceso directo para el monitor
├── monitor-dashboard.service     # Servicio systemd del dashboard
├── audio-bridge.service         # Servicio systemd del puente de audio
├── icon.png                     # Ícono del acceso directo
├── manual_usuario.pdf           # Manual de usuario
├── logs/                        # Carpeta de registros
│   ├── modulacion_log.csv       # Resultados historicos
│   ├── muestras_log.csv         # Datos del ultimo ciclo
│   ├── thermal_log.csv          # Registro de temperatura de la CPU
│   ├── reporte_log.txt          # Registro del reporte semanal
│   ├── monitor_debug.log        # Log técnico
│   ├── monitor_debug.log.1      # Copia de seguridad del log técnico
│   └── supervisor.log           # Log del supervisor
```

4. Iniciar y detener el monitor

Arranque automático

Al encender la Raspberry Pi el monitor se inicia automáticamente mediante un **supervisor** (`run_monitor.sh`) que lo mantiene en funcionamiento: si el monitor se cae, se cuelga el receptor o ocurre un error, el supervisor lo relanza solo (reseteando antes el USB). No es necesario hacer nada adicional para que el ciclo de monitoreo comience.

El supervisor incluye un candado de instancia única: si ya hay un monitor en ejecución, al intentar abrir otro no lo permitirá, evitando que dos monitores compitan por el mismo receptor.

Detener el monitor

Para detener el monitoreo (por ejemplo, para editar la configuración) basta con cerrar la ventana del monitor. Al cerrarla de forma intencional, el supervisor lo entiende como una parada deliberada y no relanza. El sistema queda completamente apagado hasta volver a iniciarlo.

La diferencia clave: si el monitor se cae solo, el supervisor lo relanza; si tú cierras la ventana, se queda cerrado.

Si no hay interfaz gráfica disponible (por ejemplo, trabajando por SSH), se puede detener todo desde la terminal:

```
bash /home/migue/Desktop/Proyecto/detener_monitor.sh
```

Volver a iniciar manualmente

Importante: siempre iniciar el con los metodos aqui mencionados (escritorio, terminal o reinicio de raspberry). Nunca ejecutar `monitor_principal.py` directamente, debido a que este metodo no activa el supervisor y el monitor no se recupera ante reinicios automáticos ni ante cuelgues del receptor.

- **Desde el escritorio:** hacer doble clic en el acceso directo *Monitor de Modulación* (icono a continuación) y seleccionar *Ejecutar* cuando el sistema lo solicite.



- **Desde la terminal:**

```
bash /home/migue/Desktop/Proyecto/run_monitor.sh
```

- **Reiniciando el sistema:** mediante el botón en el gabinete (apagando y encendiendo nuevamente) o dando clic en: *inicio* → *salir* → *reboot*

5. Configuración básica

Todas las variables de configuración están al inicio de `monitor_principal.py`. No es necesario modificar ninguna otra parte del código para los ajustes habituales.

5.1 Lista de emisoras

```
EMISORAS_FM = [  
    {"nombre": "La Mega",    "freq": 92.5},  
    {"nombre": "El Sol",     "freq": 97.5},  
    {"nombre": "La FM Plus", "freq": 98.0},  
    {"nombre": "La FM",      "freq": 98.5},  
    {"nombre": "Radio Uno",  "freq": 100.5},  
]  
  
EMISORAS_AM = [  
    {"nombre": "Alerta Calidad", "freq": 980},  
]
```

Para agregar, quitar o cambiar una emisora basta con editar esta lista. El nombre aparece tal cual en pantalla y en los registros CSV. Las frecuencias FM van en MHz y las AM en kHz.

5.2 Duración del monitoreo

```
TIEMPO_POR_EMITORA = 900    # segundos - 900 = 15 minutos
```

Define cuántos segundos se monitorea cada emisora antes de pasar a la siguiente.

5.3 Umbral de modulación

```
MODULATION_THRESHOLD_PCT = 110.0
```

Porcentaje de modulación a partir del cual una ventana se considera excedente. El sistema registra qué fracción de las ventanas superó este valor. Según el PTNRS, el valor habitual es 110 % para emisoras con una subportadora RDS.

5.4 Ganancia RF

```
RF_GAIN_FM = 30      # dB
```

Ganancia del sintonizador RTL-SDR para la recepción FM. En condiciones normales no requiere ajuste. Si la señal llega saturada o muy débil, puede modificarse en un rango de 0 a 49 dB.

5.5 Factor de calibración del demodulador

```
DEMOD_GAIN_FACTOR = 0.80
```

Factor multiplicativo sobre la ganancia teórica del demodulador de cuadratura. El valor 1.00 corresponde a la ganancia calculada según la tasa de muestreo y la desviación de referencia de 75 kHz. Si las lecturas de modulación difieren de las de un equipo de referencia, este factor permite ajustar la escala sin modificar el resto del procesamiento. Por ejemplo, 0.80 reduce las lecturas al 80 % del valor calculado.

5.6 Criterio de cumplimiento

```
MAX_FRACTION_WINDOWS = 0.01      # 1 %
```

Fracción máxima de ventanas que puede superar el umbral para que la emisora sea marcada como **Cumple**. Si la fracción real supera este valor, el estado queda como **Excede** en el CSV.

5.7 Descanso nocturno y reinicio preventivo

El monitor incorpora dos mecanismos de mantenimiento automático para favorecer la operación continua y la vida útil del hardware. Sus horarios se configuran al inicio de

`monitor_principal.py`, en formato `"HH:MM"` (24 horas):

```
# Ventana de reposo nocturno (cierra el SDR para que se enfríe)
REPOSO_ENABLED = True
REPOSO_INICIO   = "00:00"
REPOSO_FIN      = "04:00"

# Reinicio preventivo diario (libera memoria/hilos y resetea el USB)
REINICIO_ENABLED = True
REINICIO_HORA    = "03:55"
```

Descanso nocturno Durante la ventana indicada, el monitor detiene el procesamiento y cierra el receptor RTL-SDR, dejándolo enfriar. No se toman mediciones en ese período. Cuando termina la ventana, el monitoreo se reanuda automáticamente. Si la ventana inicia en medio de una medición, esta se interrumpe en el momento. Para desactivarlo, poner `REPOSO_ENABLED = False`.

Reinicio preventivo Una vez al día, a la hora indicada, el monitor se reinicia por completo: libera la memoria y los hilos acumulados tras horas de operación y, a través del supervisor, resetea el receptor USB. El reinicio toma alrededor de 30 segundos. En el ejemplo está a las `03:55`, de modo que ocurre cerca del final del reposo (con el SDR frío) y el monitoreo se reanuda a las `04:00`. Para desactivarlo, poner `REINICIO_ENABLED = False`.

Ambos mecanismos son independientes: puedes activar uno, el otro o los dos, y darles los horarios que prefieras. El reinicio preventivo se ejecuta una sola vez por día.

6. Configuración del reporte semanal

Cuenta de correo remitente

El sistema utiliza una cuenta Gmail dedicada exclusivamente al envío de reportes:

Campo	Credencial
Correo	reporte.monitormod@gmail.com
Contraseña de la cuenta	*****
Contraseña de aplicación	*****

La contraseña de aplicación es la que usa el sistema para enviar correos — es diferente a la contraseña de la cuenta. Se genera en: *myaccount.google.com* → *Seguridad* → *Verificación en dos pasos* → *Contraseñas de aplicaciones*.

Se recomienda cambiar la contraseña de la cuenta una vez entregado este documento y generar una nueva contraseña de aplicación. Tras el cambio, actualizar `CONTRASENA_APP` en `reporte_semanal.py` con el nuevo valor.

Variables de configuración

Las variables de configuración están al inicio de `reporte_semanal.py`:

```
DESTINATARIO = "correo@destino.com"    # Dirección que recibe el reporte
REMITENTE    = "correo@gmail.com"      # Cuenta Gmail remitente
CONTRASENA_APP = "xxxx xxxx xxxx xxxx" # Contraseña de aplicación Gmail
```

Programación del envío automático

El reporte se envía automáticamente mediante cron. Para ver o editar la programación:

```
crontab -e
```

La línea configurada actualmente es:

```
0 7 * * 1 /usr/bin/python3 /home/migue/Desktop/Proyecto/reportesemanal.py >>
/home/migue/Desktop/Proyecto/logs/reportes_log.txt 2>&1
```

Los cinco campos al inicio (`0 7 * * 1`) significan: minuto, hora, día del mes, mes y día de la semana. El último campo, actualmente `1`, es el que controla el día de la semana en que se envía el reporte. Esto ejecuta el reporte todos los **lunes a las 7:00 a.m.** Para cambiar el día, reemplaza ese `1` por el número correspondiente:

Número	Día
1	Lunes
2	Martes
3	Miércoles
4	Jueves
5	Viernes

Para enviar el reporte manualmente en cualquier momento:

```
python3 /home/migue/Desktop/Proyecto/reporte_semanal.py
```

Formato del reporte

El reporte llega como correo HTML con una tabla que resume el comportamiento de cada emisora durante los últimos siete días. A continuación se muestra un ejemplo del correo recibido:

Reporte semanal de modulación — RCN Radio Cali
(05/06/2026 – 12/06/2026) 

 **reporte.monitormod@gmail.com**
para mí 

13:41 (hace 3 horas)    

Reporte Semanal de Modulación
RCN Radio Cali · 05/06/2026 – 12/06/2026

Emisora	Frecuencia	Tipo	Mod. promedio semanal	Sesiones excedidas
El Sol	97.5 MHz	FM	114.7 %	61 / 66 (92.4 %)
La FM	98.5 MHz	FM	81.8 %	0 / 66 (0.0 %)
La FM Plus	98.0 MHz	FM	96.1 %	0 / 66 (0.0 %)
La Mega	92.5 MHz	FM	94.7 %	0 / 66 (0.0 %)
Radio Uno	100.5 MHz	FM	81.7 %	0 / 66 (0.0 %)
Alerta Calidad	980 kHz	AM	+75.1 % / -66.3 %	0 / 66 (0.0 %)

La tabla contiene las siguientes columnas:

Columna	Descripción
Emisora	Nombre de la estación
Frecuencia	Frecuencia de operación (MHz para FM, kHz para AM)
Tipo	FM o AM
Mod. promedio semanal	Media aritmética del indicador P99 de todas las sesiones de medición de la semana. Para FM muestra un único porcentaje; para AM muestra modulación positiva (+) y negativa (-) por separado
Sesiones excedidas	Número de sesiones de medición en las que el sistema detectó excedencia del límite normativo, sobre el total de sesiones registradas en la semana, expresado también como porcentaje. Se muestra en rojo si hubo al menos una sesión excedente. Los límites aplicados son: FM 110 %, AM positiva 125 %, AM negativa 100 % (según PTNRS FM y PTNRS AM §4.5.0)

El denominador de "Sesiones excedidas" se calcula dinámicamente sobre los registros reales de la semana: si el equipo estuvo fuera de servicio durante un período, el total será menor que las 70

sesiones nominales, lo que permite detectar semanas con baja disponibilidad del sistema.

7. Dashboard web

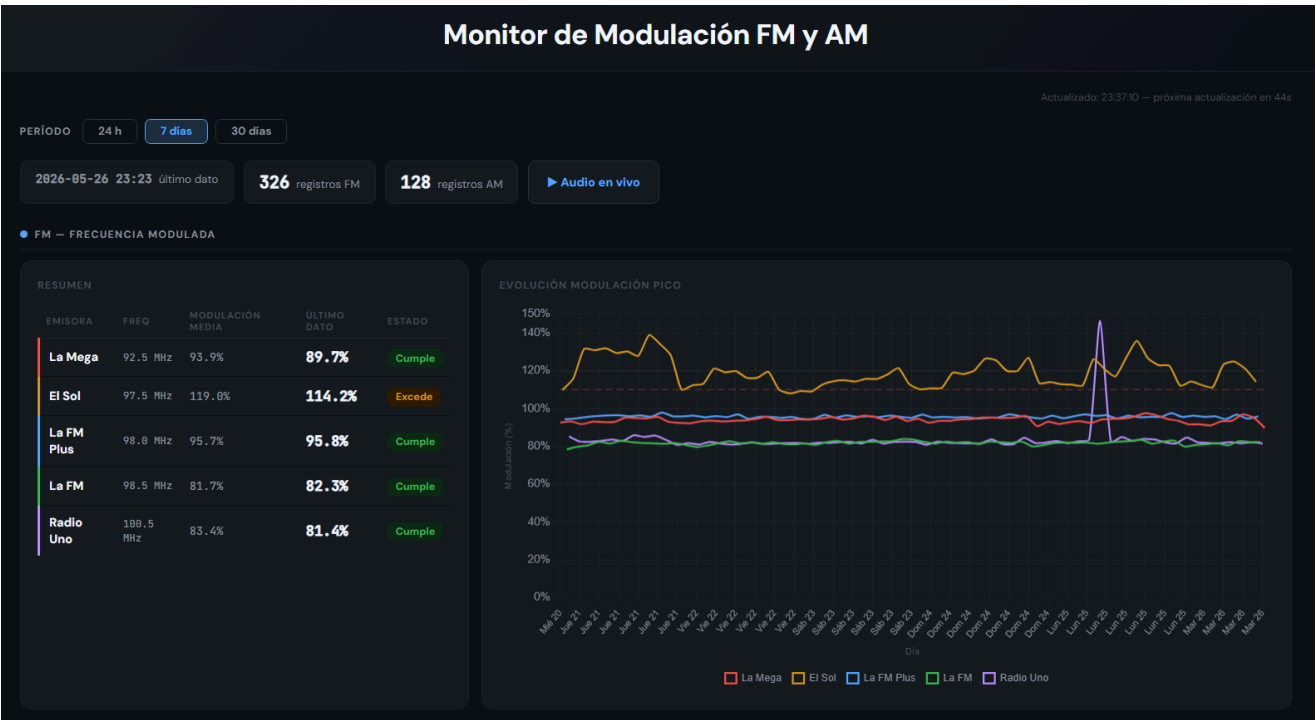
El dashboard permite visualizar los datos históricos de modulación desde cualquier dispositivo en la misma red local, sin necesidad de instalar ningún software. Basta con abrir un navegador e ingresar la dirección correspondiente:

Herramienta	URL
Dashboard principal	<code>http://<IP-Raspberry>:8080/dashboard.html</code>
Audio en vivo	<code>http://<IP-Raspberry>:8080/audio.html</code>

Para conocer la IP de la Raspberry Pi:

```
hostname -I
```

Contenido del dashboard



El dashboard está organizado en tres secciones principales:

Tabla de estado por emisora: muestra el resumen de medición de cada emisora. Las columnas incluyen el nombre, la frecuencia, la modulación promedio del periodo, el dato de modulación más reciente y el estado de cumplimiento (`cumple` o `excede`).

Gráficas de modulación: una gráfica para emisoras FM y otra para AM con la evolución de la modulación a lo largo del tiempo. Permiten identificar tendencias, picos puntuales y comparar el comportamiento entre ciclos.

Botón de audio en vivo: acceso directo al reproductor de audio (`audio.html`), que transmite en tiempo real el audio demodulado de la emisora actualmente sintonizada. Útil para verificar la calidad de la señal de forma subjetiva mientras se analiza la modulación.

8. Archivos de registro

`modulacion_log.csv`

Contiene un registro por cada emisora al finalizar su período de medición de 15 minutos.

Campo	Descripción
timestamp	Fecha y hora de finalización del período
tipo	FM o AM
emisora	Nombre de la emisora
frecuencia	Frecuencia en MHz (FM) o kHz (AM)
p99_pct	Percentil 99 de los picos de modulación del período (FM)
n_ventanas_sobre	Número de ventanas que superaron el umbral
n_ventanas_total	Total de ventanas del período
frac_ventanas	Fracción de ventanas sobre el umbral
exceeds	true si la fracción supera MAX_FRACTION_WINDOWS
snr_db	Relación señal a ruido estimada dB
p99_pos	Percentil 99 de la modulación positiva del período (AM)
p99_neg	Percentil 99 de la modulación negativa del período (AM)

`muestras_log.csv`

Acumula aproximadamente 18.000 registros por emisora. Pero solo guarda los datos del ciclo más reciente, es decir, justo antes de iniciar un ciclo, borra la información del anterior. Esto para no saturar el almacenamiento.

`thermal_log.csv`

Registra la temperatura de la CPU de la Raspberry Pi y el estado de throttling. La temperatura de riesgo es 65 °C y la crítica es 80 °C, momento en el que el monitor muestra una advertencia en pantalla.

Limpiar los registros

Para borrar todos los archivos de log y comenzar desde cero:

```
bash /home/migue/Desktop/Proyecto/reset_logs.sh
```

9. Log técnico

El sistema genera automáticamente un archivo de log técnico con toda la actividad interna del monitor:

```
logs/monitor_debug.log
```

Este archivo captura:

- Todos los mensajes de consola del monitor (los mismos que aparecerían en la terminal)
- Errores internos de GNU Radio
- Eventos clave: inicio y fin de cada flowgraph, cambios de emisora
- Heartbeat cada 60 segundos por emisora confirma que el hilo de medición está vivo
- Tracebacks completos cuando ocurre una excepción

El archivo rota automáticamente al llegar a 2 MB y conserva las 2 versiones más recientes (`monitor_debug.log`, `monitor_debug.log.1`), ocupando un máximo de 4 MB en disco.

Para seguir el log en tiempo real desde la terminal:

```
tail -f /home/migue/Desktop/Proyecto/logs/monitor_debug.log
```

Para ver solo los errores y advertencias:

```
grep -E "ERROR|WARNING" /home/migue/Desktop/Proyecto/logs/monitor_debug.log |  
tail -50
```

`supervisor.log`

El supervisor escribe su propio log en `logs/supervisor.log`. Registra cada arranque del monitor, cada reset USB y cada reinicio. Es el primer lugar para verificar que la recuperación automática está funcionando:

```
tail -20 /home/migue/Desktop/Proyecto/logs/supervisor.log
```

Ejemplo de un reinicio exitoso tras cuelgue:

```
[SUPERVISOR] Monitor terminó (código 0) tras 51234s.  
[SUPERVISOR] Reset USB OK (/dev/bus/usb/003/002).  
[SUPERVISOR] Lanzando monitor...
```

El código 0 indica que el monitor fue cerrado manualmente, es una parada intencional del usuario y el supervisor no relanza. Cualquier otro código indica un reinicio automático, error o cuelgue, y el supervisor relanza el monitor.

10. Solución de problemas frecuentes

El monitor no detecta el RTL-SDR al iniciar

Verificar que el dispositivo esté conectado al USB y que los drivers estén instalados:

```
rtl_test -t
```

Las lecturas de modulación parecen incorrectas comparadas con un equipo de referencia

Ajustar `DEMOD_GAIN_FACTOR` en `monitor_principal.py`. Si el monitor lee valores más altos que el equipo de referencia, reducir el factor (por ejemplo de 1.00 a 0.90). Si lee más bajo, aumentarlo.

El reporte semanal no llega al correo

Revisar el log del último intento:

```
cat /home/migue/Desktop/Proyecto/logs/reporte_log.txt
```


El error más frecuente es una contraseña de aplicación Gmail incorrecta o vencida. Para generar una nueva contraseña de aplicación: myaccount.google.com/apppasswords

El dashboard no carga desde otro dispositivo

Verificar que el servicio esté activo y que el firewall no bloquee el puerto 8080:

```
systemctl status monitor-dashboard.service
```

11. Acceso remoto a la Raspberry Pi

11.1 Acceso por SSH

SSH permite controlar la Raspberry Pi desde cualquier computador en la misma red sin necesidad de teclado ni monitor. La contraseña actual del usuario `migue` es `****` y puede modificarse con el comando `passwd`.

Opción A — CMD o PowerShell (Windows 10 y 11)

Abrir una terminal en Windows y ejecutar:

```
ssh migue@<IP-Raspberry>
```

Reemplazar `<IP-Raspberry>` por la dirección IP real del equipo. La primera vez pedirá confirmar la huella del servidor — escribir `yes`. Luego solicitará la contraseña.

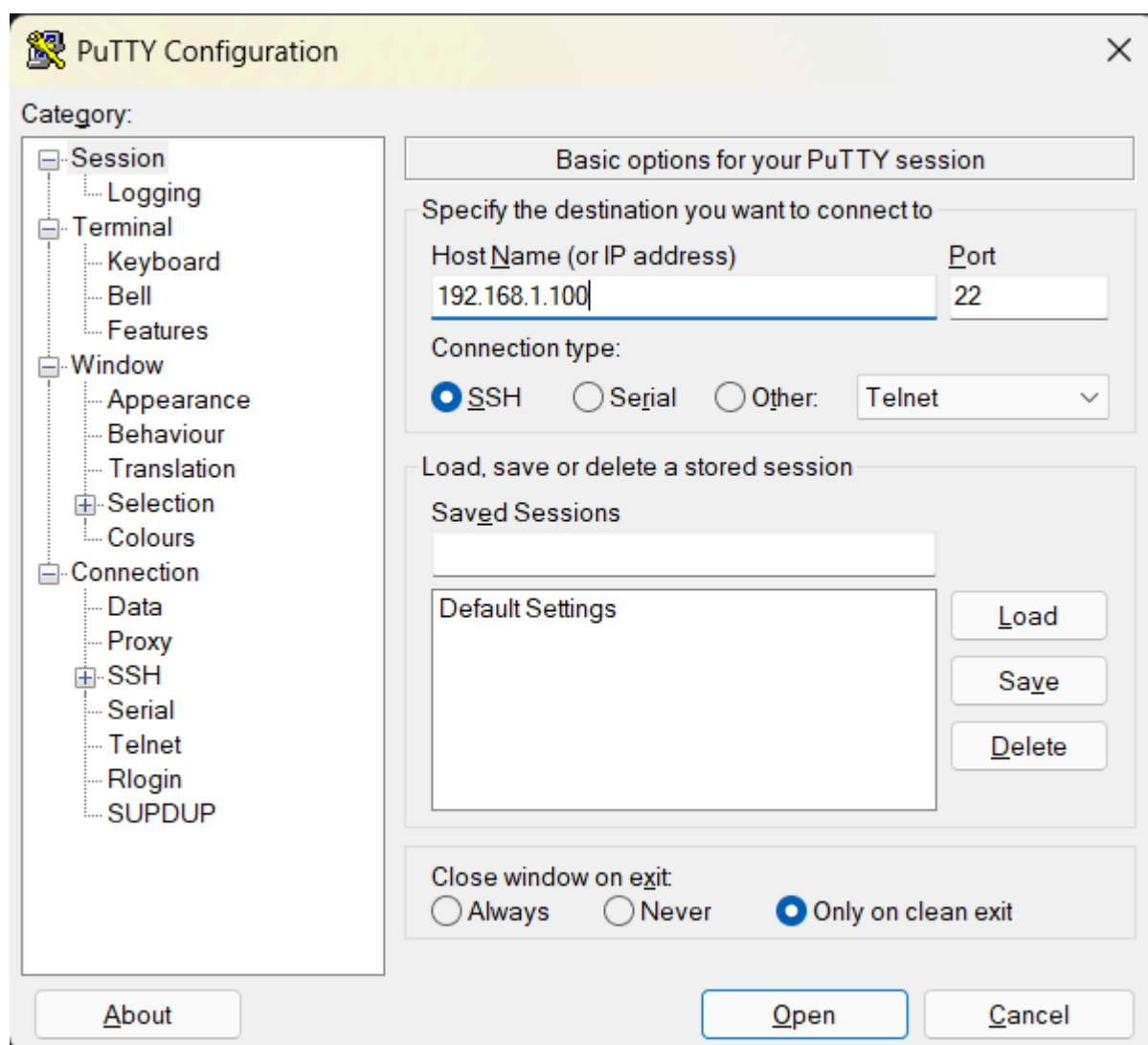
Opción B — PuTTY

PuTTY es un cliente SSH gratuito con interfaz gráfica, útil si se prefiere no usar la terminal. Descargarlo desde putty.org.

Al abrirlo, configurar los siguientes campos:

Campo	Valor
Host Name	IP de la Raspberry Pi
Port	22
Connection type	SSH

Hacer clic en Open. La primera vez mostrará una advertencia de seguridad — aceptar. Luego ingresar el usuario `migue` y la contraseña cuando los solicite.



Para salir de la sesión SSH en cualquiera de las dos opciones:

```
exit
```

11.2 Acceso por VNC

VNC permite ver y controlar el escritorio gráfico de la Raspberry Pi de forma remota, como si se estuviera sentado frente a ella. Es útil para interactuar con la interfaz gráfica del monitor.

En la Raspberry Pi — verificar que VNC esté activo:

```
sudo systemctl status vncserver-x11-serviced
```

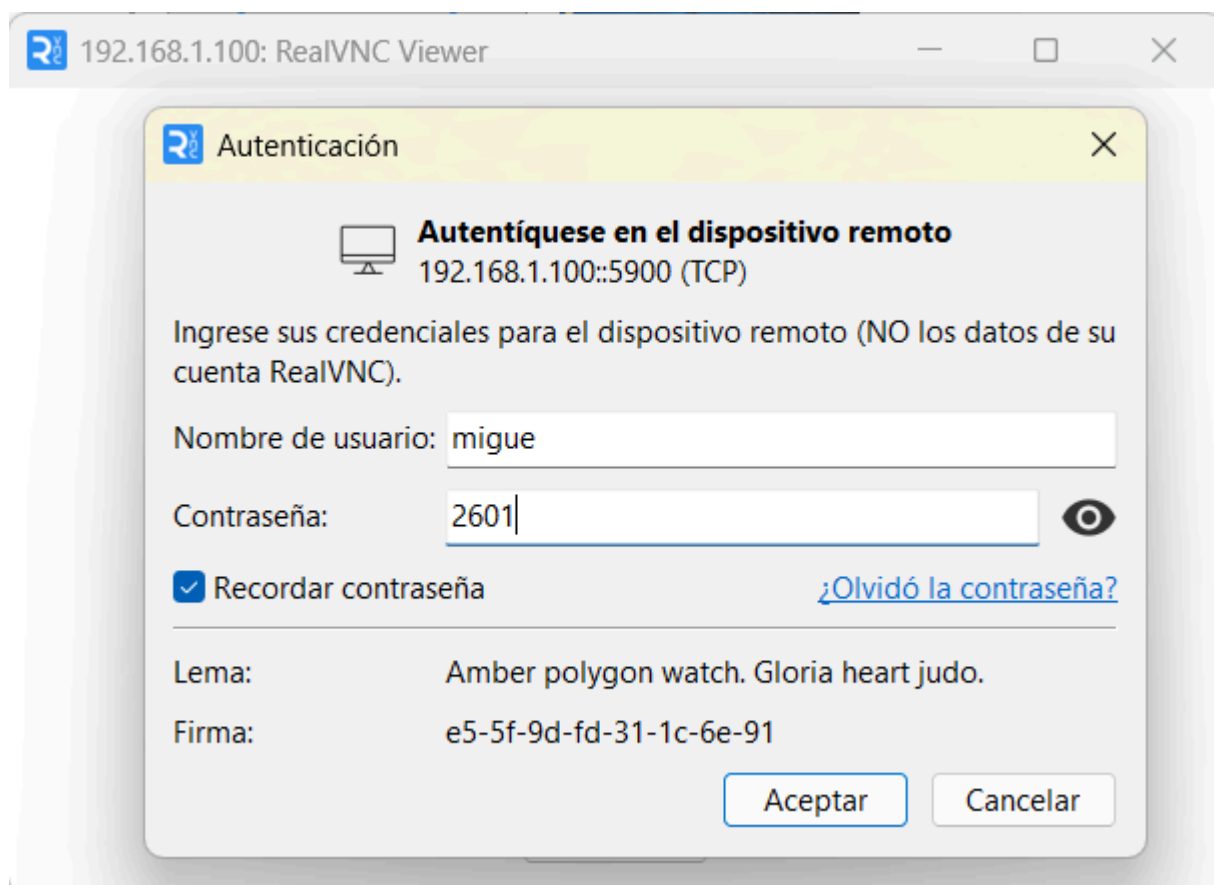
Si no está corriendo, habilitarlo desde la configuración:

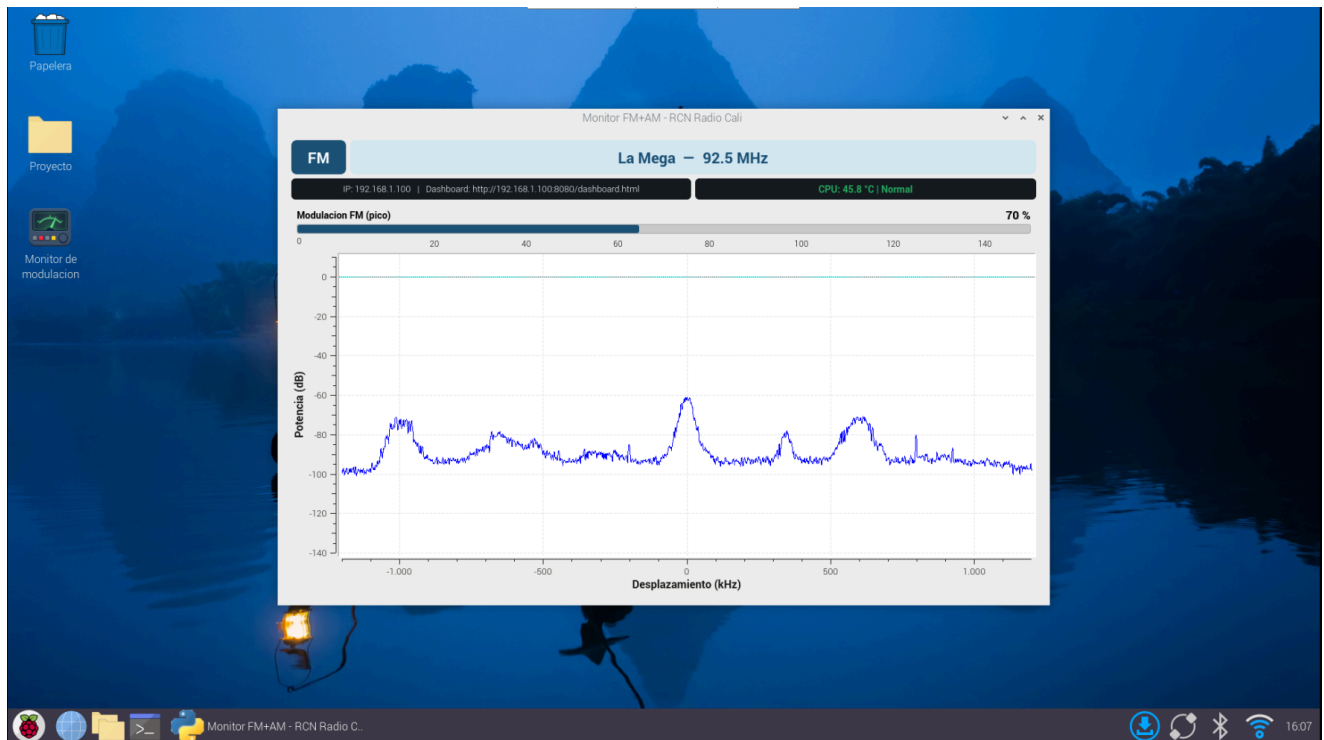
```
sudo raspi-config
```

Navegar a *Interface Options* → *VNC* → *Enable*.

En el computador remoto: Descargar e instalar **RealVNC Viewer** desde realvnc.com. Una vez abierta la aplicación, ir a *Archivo* → *Nueva conexión*, ingresar la IP de la Raspberry Pi y la contraseña (igual que en la sección 11.1), marcar la casilla *Recordar contraseña* y hacer clic en *Conectar* (ver sección 11.1 para la contraseña).

Conexión directa por Ethernet: si el computador está conectado directamente a la Raspberry Pi con un cable de red (sin router ni Wi-Fi), usar `raspberrypi.local` como dirección en lugar de la IP.





Una vez conectado, se puede ver el escritorio de la Raspberry Pi con el monitor funcionando. La interfaz gráfica del monitor contiene los siguientes elementos:

Barra superior izquierda (**FM / **AM**):** indica el tipo de señal que se está midiendo en ese momento.

Nombre y frecuencia de la emisora activa: muestra la emisora que se está monitoreando actualmente, por ejemplo *La Mega — 92.5 MHz*. Cambia automáticamente al terminar cada período de 15 minutos.

Barra de estado izquierda: muestra la IP de la Raspberry Pi y la dirección del dashboard web. Permite verificar la URL exacta para acceder desde otro dispositivo.

Barra de estado derecha: muestra la temperatura actual de la CPU y su estado (*Normal*, *Advertencia* o *Crítico*).

Barra de modulación (pico): indica el porcentaje de modulación pico de la ventana más reciente. Se actualiza en tiempo real y refleja el nivel instantáneo de la señal.

Gráfica espectral: muestra el espectro de la señal FM demodulada alrededor de la portadora.

Importante — no cerrar esta ventana por accidente: el programa de monitoreo corre dentro de esta ventana. Si se cierra, el monitoreo se detiene por completo (el supervisor lo interpreta como una parada intencional y no lo relanza); habrá que volver a iniciarlo manualmente (ver sección 4). Al terminar la sesión VNC, usar la opción de **desconectar** del menú de RealVNC en lugar de cerrar la ventana del monitor.

11.3 Configurar IP fija

Por defecto la Raspberry Pi obtiene su IP automáticamente por DHCP, lo que significa que puede cambiar en cada reinicio. Para que la IP sea siempre la misma, se configura una dirección estática.

Editar el archivo de configuración de red:

```
sudo nano /etc/dhcd.conf
```

Agregar las siguientes líneas al final del archivo, ajustando los valores según la red local:

```
interface eth0
static ip_address=192.168.1.100/24
static routers=192.168.1.1
static domain_name_servers=8.8.8.8
```

Campo	Descripción
<code>interface eth0</code>	Interfaz de red (eth0 = cable, wlan0 = Wi-Fi)
<code>static ip_address</code>	IP fija deseada para la Raspberry Pi
<code>static routers</code>	IP del router (puerta de enlace)
<code>static domain_name_servers</code>	Servidor DNS (8.8.8.8 es el de Google)

Guardar con `Ctrl + O`, salir con `Ctrl + X` y reiniciar para aplicar:

```
sudo reboot
```

Para verificar que la IP quedó asignada correctamente después del reinicio:

```
hostname -I
```