

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE MONITOREO DE BAJO COSTO PARA ESTACIONES DE RADIODIFUSIÓN SONORA EN FRECUENCIA MODULADA

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A LOW COST PROTOTYPE TO MONITOR FREQUENCY MODULATION IN BROADCAST RADIO STATIONS

Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca, Colombia
claudiah@unicauca.edu.co

Víctor Fabián Miramá Pérez

Universidad del Cauca, Colombia
vmirama@unicauca.edu.co

Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca, Colombia
vflorez@unicauca.edu.co

Recepción: 28/octubre/2020

Aceptación: 3/diciembre/2020

Resumen

Es necesario tener instrumentos para evaluar la operación de sistemas de radiodifusión sonora, y verificar el cumplimiento de los parámetros de operación otorgados por las agencias encargadas de administrar el espectro radioeléctrico. Este artículo presenta el proceso de diseño, implementación y pruebas de calibración y operación de un prototipo de monitoreo de bajo costo para estaciones de radiodifusión sonora en frecuencia modulada, utilizando radio definido por software. Este proceso adaptó la metodología de Programación Extrema, la cual define análisis de requerimientos, diseño, implementación y evaluación del prototipo. El prototipo empleó un dispositivo periférico de radio universal, fue calibrado mediante equipos especializados y se utilizó para evaluar los parámetros de operación de la estación Unicauca Estéreo de la Universidad del Cauca en Popayán. La evaluación permitió concluir que el prototipo ofrece la posibilidad de realizar el monitoreo de los parámetros esenciales de las estaciones de FM de forma sencilla y confiable.

Palabras Clave: Prototipo de monitoreo de bajo costo, radio definido por software, radiodifusión sonora en frecuencia modulada.

Abstract

There is a need to have instruments to evaluate the operation of radio broadcast systems, and thereby to verify and ensure the operating parameters granted by the respective radio spectrum national agency. This article presents the process of designing, implementing, calibrating, and operating a low-cost monitoring prototype for FM radio broadcast stations using software-defined radio (SDR). This process applied the extreme programming (XP) methodology, which defines activities related to requirement analysis, design, implementation, and evaluation of the prototype's operation. The implemented prototype used a universal radio peripheral device (USRP), which offered results comparable to specialized equipment. The monitoring prototype was calibrated using specialized radio frequency laboratory equipment and was used to evaluate and analyze the operating parameters of the Unicauca Estéreo, a university radio station at the Universidad del Cauca in Popayán, Colombia. The evaluation allowed us to conclude that the prototype offers the possibility to monitor the essential parameters of an FM broadcast radio station easily and confidently.

Keywords: *FM broadcast radio stations, low cost prototype monitor, software define radio.*

1. Introducción

Instituciones públicas y privadas con interés público en el municipio de Popayán y en el departamento del Cauca requieren para cumplir su misión institucional, la implementación de soluciones de comunicación y difusión vía radio, y por ello acuden a la Universidad del Cauca buscando asesoría, apoyo y colaboración en el análisis, diseño e implementación de estas soluciones.

La Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca no posee información referente a los parámetros técnicos esenciales específicos de las estaciones de radiodifusión sonora en frecuencia

modulada (FM) del Municipio o del Departamento. Los sistemas de radiodifusión sonora son altamente empleados en la región, dado que constituyen un mecanismo de difusión de información eficaz. El gobierno nacional a través del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) ha definido y expedido una ley de telecomunicaciones (ley 1978 de 2019) [Congreso de Colombia, 2019] y un Plan técnico de radiodifusión sonora en FM [MinTIC, 2019], por lo tanto existen normas y regulación con respecto a la puesta en marcha y operación de un sistema de radiodifusión en FM, sin embargo, no todas las estaciones que se instalan tienen los permisos correspondientes, o no cumplen con los parámetros de operación.

La Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia ha implementado estrategias de control para el cumplimiento del plan técnico y un uso adecuado del uso del espectro electromagnético [Suárez, 2019], sin embargo, el país tiene una gran extensión geográfica y no se tiene personal ni infraestructura suficiente para realizar control y monitoreo continuo de los sistemas de radiodifusión sonora en FM en ciudades intermedias y pequeñas, en las cuales se realizan visitas anuales para control de estaciones no licenciadas y la verificación del cumplimiento de los parámetros técnicos por parte de las estaciones licenciadas. Este artículo es el resultado de un proyecto en el cual se busca diseñar e implementar un prototipo de bajo costo para el monitoreo de sistemas de radiodifusión sonora en FM utilizando radio definido por software (SDR, *Software Defined Radio*), que permita monitorear la operación básica de estaciones de radiodifusión y verificar el correcto uso del espectro por estaciones licenciadas en la ciudad de Popayán y municipios aledaños. El servicio de radiodifusión sonora en frecuencia modulada (FM) se presta haciendo uso de las bandas de frecuencias comprendidas entre 88 MHz y 108 MHz. Esta banda se divide en canales de 200 kHz de ancho de banda. Para obtener un sonido de alta calidad y confiable, la máxima desviación de frecuencia permitida es 75 kHz con una frecuencia máxima de señal moduladora de 15 kHz. Los sistemas de radiodifusión sonora en FM toleran un cierto grado de interferencia en canales adyacentes, lo cual no es un problema dado que la banda de FM no se encuentra ocupada completamente. Para brindar mayor protección o aislamiento contra

interferencia de canal adyacente se busca no asignar los canales adyacentes al canal asignado en la misma zona de operación, constituyendo una banda de protección de 200 kHz entre estaciones.

A nivel internacional no existen muchas iniciativas sobre la medición de los parámetros técnicos de estaciones de radiodifusión FM, sin embargo, existen normativas e intentos por aplicar nuevas tecnologías al análisis del uso del espectro radioeléctrico. La Unión Internacional de Telecomunicaciones sección radiocomunicaciones (ITU-R, *International Telecommunications Union - Radiocommunication Sector*) establece recomendaciones para medir ciertos parámetros de la emisión de radiodifusión sonora en FM [ITU, 2020]. Artículos en [Mariani, 2015], [Kozmin, 2011] y [MacDonald, 2007] definen alternativas para detección general de espectro, incluyendo métodos de estimación de ocupación espectral, sin enfocarse en los parámetros técnicos ni el cumplimiento de algún tipo de regulación. Trabajos enfocados en sistemas de radiodifusión sonora en FM, como [Tony, 2016] y [Tandale, 2016], realizan una detección de espectro con el objetivo de analizar la ocupación espectral, y concluyen sobre el estado de ocupación de la banda, pero no profundizan en el análisis de parámetros técnicos y los límites de operación. Existen algunos trabajos de SDR enfocados en el análisis de espectro de una señal de FM que emplean RTL SDR, un chip de bajo costo que puede ser usado como un scanner de señales radio en conjunto con un computador, tales como [Sierra, 2015] [Santos, 2019]. En [Saavedra, 2018] se presenta el uso de SDR y una Raspberry pi para el análisis de la ocupación espectral entre 850 MHz y 2 GHz en un ambiente cerrado en la ciudad de Bogotá, en [Juhana, 2017] se presenta un sistema basado en SDR capaz de monitorear el contenido de varias estaciones de FM disponibles desde una aplicación online, pero no determinan parámetros técnicos de la señal transmitida. En el artículo [Martoyo, 2018] se muestra un analizador de espectro utilizando un HackRF One, capaz de analizar el espectro de señales de FM y GSM con baja precisión dada su limitada capacidad por ser un elemento SDR básico.

En Colombia la Agencia Nacional del Espectro dispone de una herramienta llamada Sistema de Monitoreo de Campos (SMC) [Suárez, 2019], dicho sistema cuenta con

un sistema de monitoreo continuo instalado en las principales ciudades del País, por consiguiente, en aquellas ciudades donde no se ha instalado el sistema de medición, no se cuenta con información actualizada de la operación de estaciones de radiodifusión en la banda FM.

2. Métodos

Para el desarrollo del prototipo de monitoreo de bajo costo para estaciones de radiodifusión sonora en FM utilizando SDR, se adaptaron las fases definidas en la metodología de programación extrema (*XP, Extreme Programming*) [Pressman, 2010], la cual tiene como ventaja la retroalimentación entre sus diferentes etapas, esto permite que una vez terminado el producto se regrese a la etapa inicial y se verifique si es requerida alguna adición o modificación, antes de terminar el proyecto. En la figura 1 se muestran las etapas de desarrollo de la metodología planteada. Para la elaboración de los casos de uso primero se realiza un análisis de requerimientos, estos pueden ser funcionales o no funcionales y permiten enumerar las diferentes características del prototipo a desarrollar.



Figura 1 Adaptación de metodología XP.

Análisis de requerimientos

Para la definición de los requerimientos se tiene en cuenta que la señal banda base compuesta o señal multiplex estéreo (MPX, *Stereo Multiplexed Signal*)

contiene la señal resultante de la suma del canal izquierdo y derecho (L+R), para recepción monofónica y ocupando la región del espectro de 0 a 15 kHz; la señal resultante de la resta del canal izquierdo y derecho (L-R) modulada con doble banda lateral y portadora suprimida (DSB-SC, *Double-Sideband - Suppressed Carrier*) centrada en la frecuencia de 38 kHz, ocupando la región del espectro de 23 a 53 kHz; y una señal piloto con un tono de 19 kHz, para permitir la demodulación coherente de la señal DSB-SC. La señal MPX puede también contener alrededor de los 57 kHz una señal con información sobre la estación radio (RDS, *Radio Data System*) y datos adicionales (RBDS, *Radio Broadcast Data System*). El RDS/RBDS se conoce también como subportadora de audio (SCA) y permite enviar una segunda señal de audio o información adicional para los radioescuchas. En la figura 2 se presenta el espectro de la señal MPX.

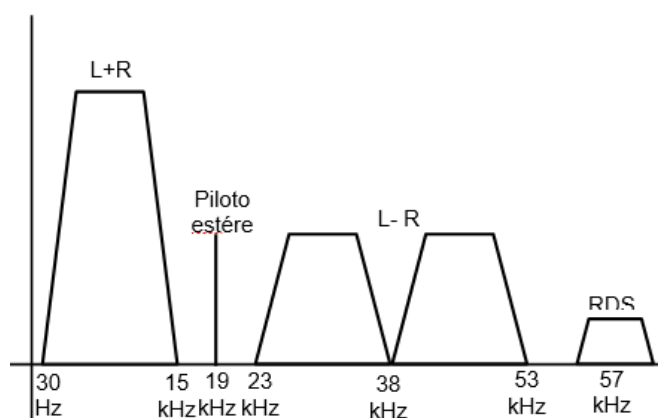


Figura 2 Espectro de la señal multiplex estéreo (MPX).

El prototipo de monitoreo de bajo costo para estaciones de radiodifusión sonora en FM utilizando SDR debe tener la capacidad de analizar los siguientes parámetros:

- Ancho de banda ocupado por una señal de radiodifusión sonora en FM.
- Nivel de potencia de recepción de la señal de radiodifusión sonora en FM.
- Ancho de banda ocupado por la señal MPX de un sistema de radiodifusión sonora en FM.
- Nivel y ancho de banda de las componentes de la señal MPX: señal piloto (tono de 19 kHz); señal izquierda más derecha (L+R); y señal izquierda

menos derecha (L-R). Esta última señal debe estar modulada con DSB-SC en 38 kHz.

- Ancho de banda y nivel de SCA presente en la señal MPX alrededor de la frecuencia de 57 kHz.
- Presencia en la señal multiplex estéreo (MPX) de la identificación de la estación de radiodifusión sonora (RDS/RDBS).
- Análisis de nivel de la señal audio: canales, izquierdo (L) y derecho (R).

Diseño e implementación

Atendiendo el análisis de requerimientos necesarios para el prototipo, se definió el diagrama en bloques de la figura 3. La primera etapa es el receptor de la señal RF donde se recupera y se filtra la señal, para su análisis en el dominio de la frecuencia mediante el Analizador de Espectro RF y la determinación de potencia empleando el Medidor de Potencia RF. Posteriormente se tienen los bloques correspondientes a la demodulación, donde se recupera la señal compuesta MPX, su nivel de potencia y su espectro mediante los bloques Medidor de Potencia BB y Analizador de Espectro BB. Toda la información del sistema de monitoreo se despliega mediante el bloque Interfaz Gráfica.

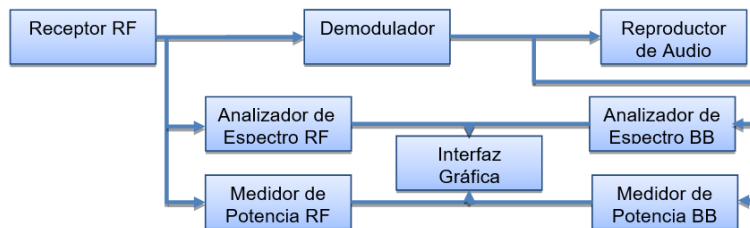


Figura 3 Diagrama en bloques del prototipo.

La lógica del prototipo de monitoreo de bajo costo para estaciones de radiodifusión sonora FM utilizando SDR se puede visualizar en el diagrama de flujo de la figura 4. El prototipo requiere la configuración de la frecuencia de recepción de la señal y posteriormente seleccionar el análisis de señales a nivel de banda base o radiofrecuencia mediante la selección en la Interfaz Gráfica de la pestaña (Espectro de RF o Espectro demodulado). Una vez seleccionada la pestaña, la herramienta

genera las imágenes correspondientes y reproduce el audio de la estación bajo análisis.

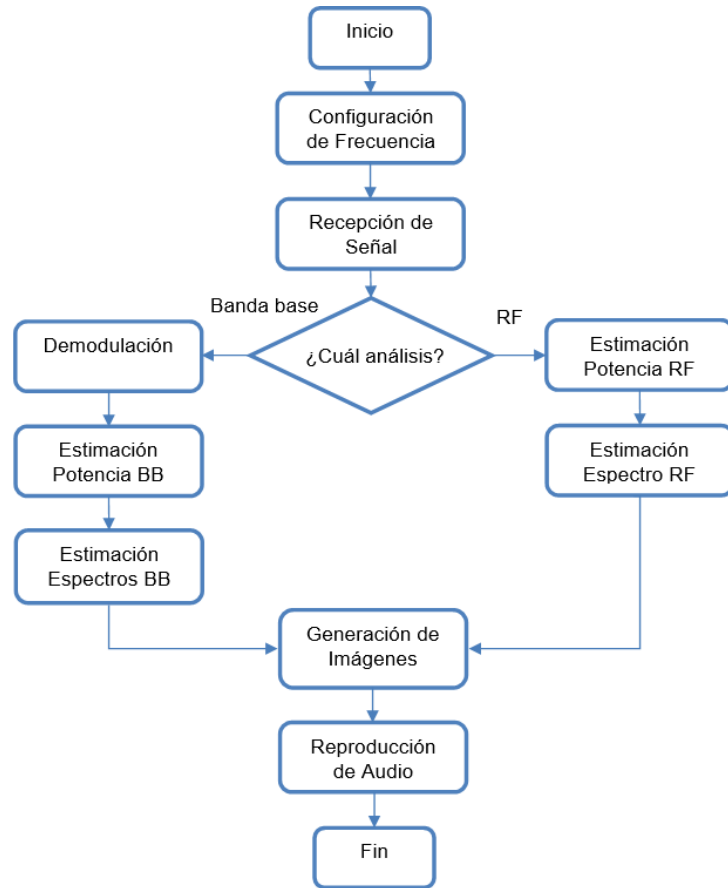


Figura 4 Diagrama de flujo del prototipo.

Para la implementación del prototipo se empleó la tarjeta SDR USRP B210 de Ettus Research [National Instruments, 2019]. Este tipo de tarjetas pueden ser programadas desde diferentes herramientas software como Matlab, GNU Radio y LabView, entre otras. Para el desarrollo software del sistema se eligió GNU Radio por ser de licencia libre y posibilitar el desarrollo e incorporación de nuevos módulos empleando el lenguaje de programación Python.

La primera parte del diseño en bloques del software del sistema prototipo se muestra en la figura 5. Los bloques resaltados corresponden a la etapa de demodulación de la señal FM y su posterior reproducción: el bloque *UHD:USRP Source* recupera la señal proveniente de la tarjeta USRP; el bloque *Low Pass Filter*

filtra la señal para eliminar señales no deseadas y limitar el ruido; y el bloque *WBFM Receiver* demodula la señal para que sea reproducida por el bloque *Audio Sink*.

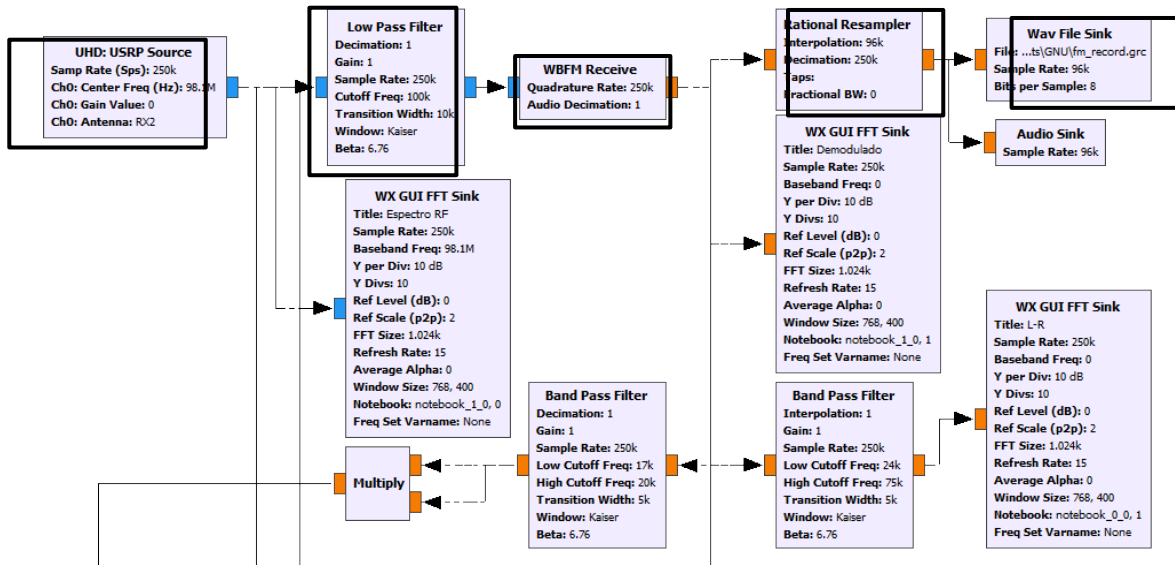


Figura 5 Diagrama de bloques del software – parte 1.

En la figura 5, los bloques *Band Pass Filter* son filtros empleados para la separación de los diferentes componentes de la señal MPX en banda base. Los bloques *WX GUI FFT Sink* actúan como analizadores de espectro y permiten visualizar en una interfaz gráfica las señales en el dominio de la frecuencia. La segunda parte del diseño en bloques del software del sistema prototipo se muestra en la figura 6. Se muestra la interconexión necesaria para obtener los valores de potencia aproximados de las diferentes señales bajo análisis. Para este cálculo se toma la señal como variable compleja y se calcula su valor de potencia instantánea utilizando su valor conjugado y el bloque *Multiply*. El bloque *Moving Average* calcula el promedio de la potencia y se realiza su conversión a unidades logarítmicas. El resultado se muestra haciendo uso del bloque *Number Sink*.

La interfaz gráfica inicial de la herramienta se muestra en la figura 7, se diseñó empleando pestañas de selección donde se pueden observar los diferentes espectros obtenidos y las potencias asociadas.

En la parte superior de la interfaz gráfica de usuario (Figura 7), es posible configurar la frecuencia central de la estación radio para su sintonización, lo que a su vez

permite visualizar el espectro de la señal de radiofrecuencia (RF) en la recepción. En la parte inferior se visualiza el espectro de la señal de audio monofónica en banda base.

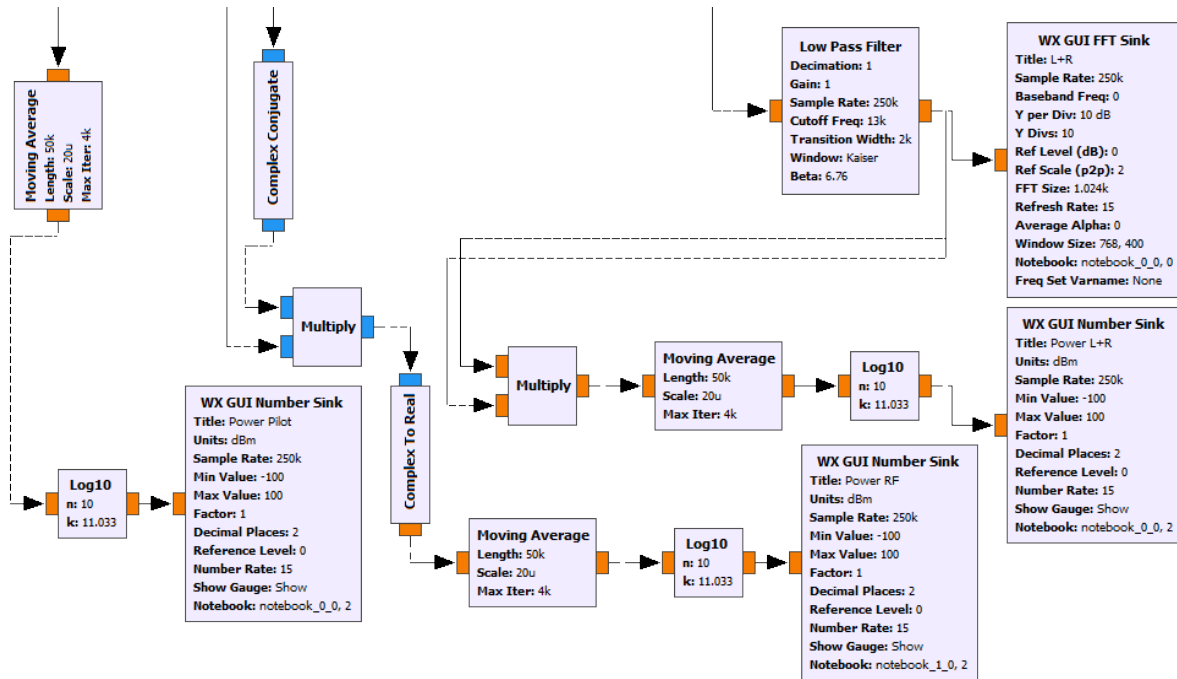


Figura 6 Diagrama de bloques del software – parte 2.

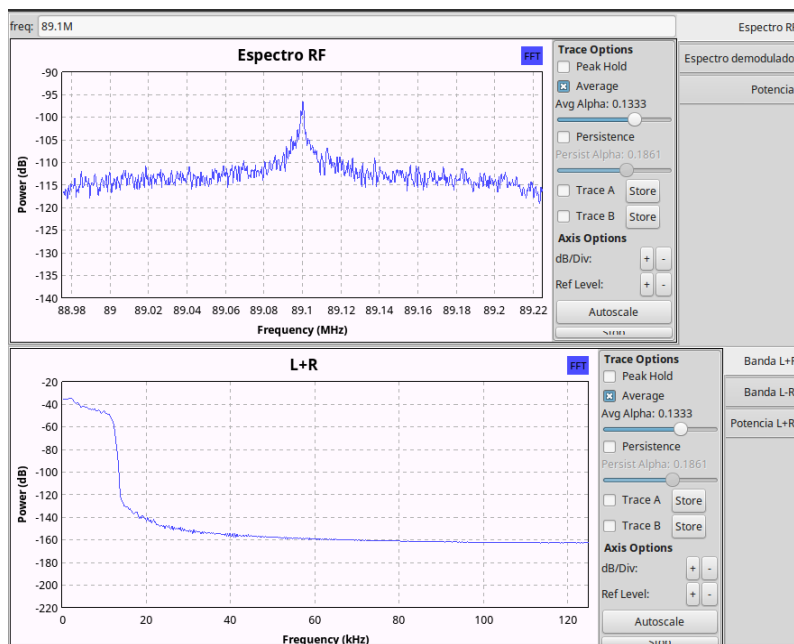


Figura 7 Interfaz gráfica de usuario Inicial.

En la parte superior derecha de la interfaz gráfica se puede explorar mediante pestañas, el espectro de la señal demodulada y la potencia de señal en la recepción a nivel de RF. Además, en la parte inferior derecha existen pestañas que permiten visualizar el espectro de las señales L+R, L-R, la potencia de la señal L+R y la potencia de la señal piloto, como lo muestra la figura 8.

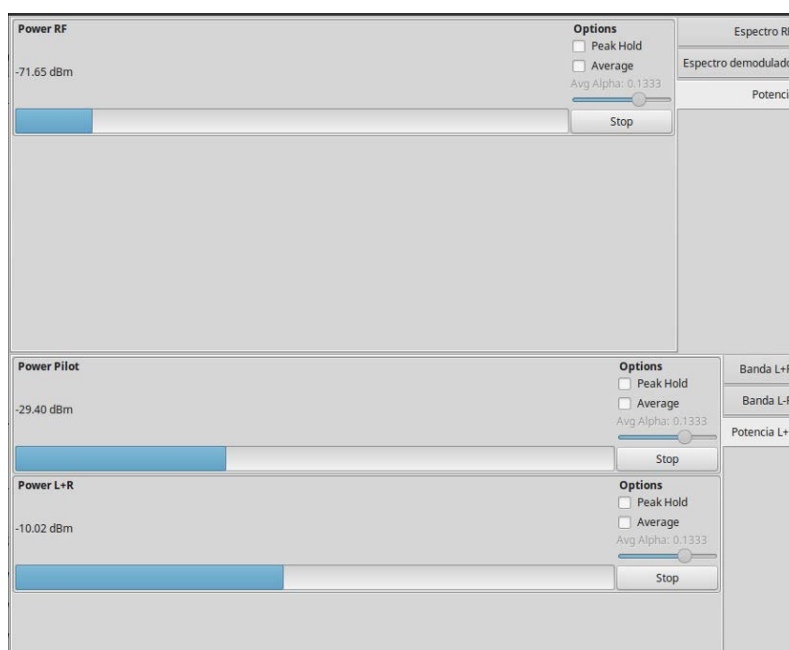


Figura 8 Interfaz gráfica de usuario para nivel de potencia de señal MPX.

Pruebas

Se realizaron pruebas de calibración del prototipo de monitoreo de bajo costo para estaciones de radiodifusión sonora FM utilizando SDR y pruebas de operación del prototipo.

Pruebas de calibración sobre el prototipo

Para verificar la validez de las medidas realizadas por el prototipo, se realizó la comparación de las medidas del prototipo y equipos de laboratorio debidamente calibrados. Los elementos utilizados fueron: Generador de Señales RIGOL DSG830, Analizador vectorial de redes y analizador de espectro Rohde & Schwarz ZVL6, Medidor de Intensidad de Campo Eléctrico Electrónica Veneta, y Cable de bajas pérdidas con conector SMA.

El montaje de calibración haciendo uso del prototipo se puede apreciar en la figura 9, este procedimiento además permitió determinar el rango de operación del medidor.

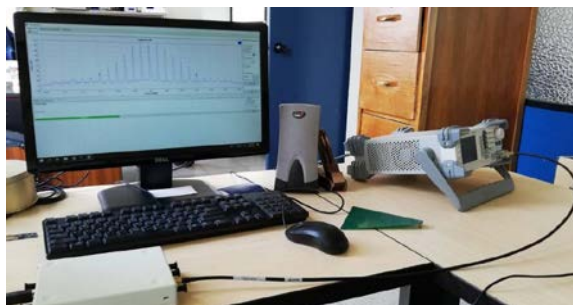


Figura 9 Montaje de calibración.

En el procedimiento de calibración se conectó de manera directa el analizador vectorial de redes (sonda de potencia) y el prototipo de monitoreo, al generador de señal, para medir la señal de salida de la forma más precisa, sin efectos aleatorios del canal, el generador se configuró con un tono de prueba a la frecuencia de 97.5 MHz. Se registraron las potencias obtenidas en el medidor de potencia y en el prototipo variando la potencia de salida del generador.

Pruebas de operación sobre el prototipo

Se analizaron parámetros de recepción de la estación de radio de la Universidad del Cauca, Unicauca Estéreo, considerando que se contaba con la información oficial de sus parámetros de transmisión, los cuales se presentan en tabla 1.

Tabla 1 Parámetros Unicauca Estéreo.

Parámetro	Valor
Potencia de Tx	5 kW
Frecuencia	104.1 MHz
Frecuencia STL	302.9 MHz

Se utilizó el prototipo de monitoreo de bajo costo para estaciones de radiodifusión sonora en FM utilizando SDR para analizar los parámetros Unicauca Estéreo en diferentes ubicaciones de la ciudad de Popayán.

3. Resultados

Se presentan los resultados de la calibración del sistema y las pruebas de funcionamiento del prototipo.

Calibración

Del proceso de calibración del prototipo se estimó un error de medida de 11.033 dB, el cual fue considerado como factor de corrección. La figura 10 muestra la tendencia de las medidas en el prototipo y en el analizador vectorial de redes y la aplicación del factor de corrección. Así mismo se identifica el valor de -75 dBm, como el más bajo de potencia medible en el prototipo.

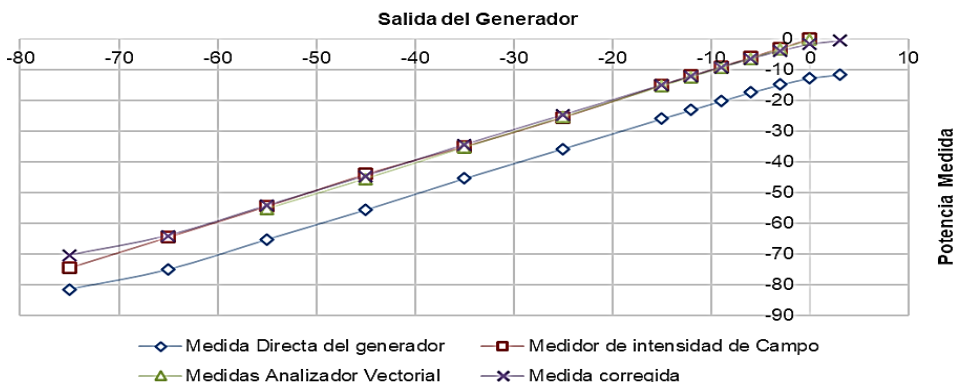


Figura 10 Curvas de medidas de potencia para corrección del prototipo.

Pruebas de operación

Las figuras 11 y 12 presentan el espectro de la señal de RF de la estación radio Unicauca Estéreo. De la figura 11 se puede estimar el ancho de banda de la señal considerando aquellos extremos donde la señal se ha atenuado 20 dB con respecto al máximo (ancho de banda de 20 dB), obteniendo un valor aproximado de 200 kHz, que corresponde con el ancho de banda disponible en un canal de radiodifusión sonora FM. En la parte inferior de la figura 11, se pueden observar las componentes del espectro monofónico de la señal en banda base, donde se alcanza a apreciar una componente en 19 kHz, correspondiente a la señal piloto. Esta señal también se puede visualizar en la parte superior de la figura 12, la cual muestra el espectro de la señal MPX en la recepción.

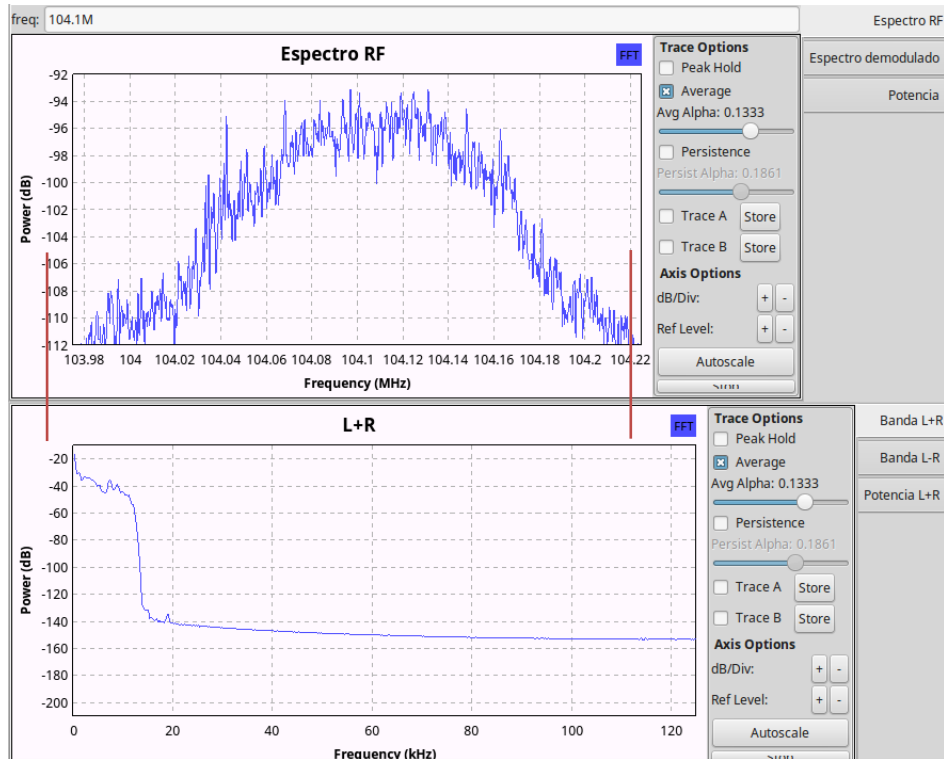


Figura 11 Espectro Unicauca estéreo.

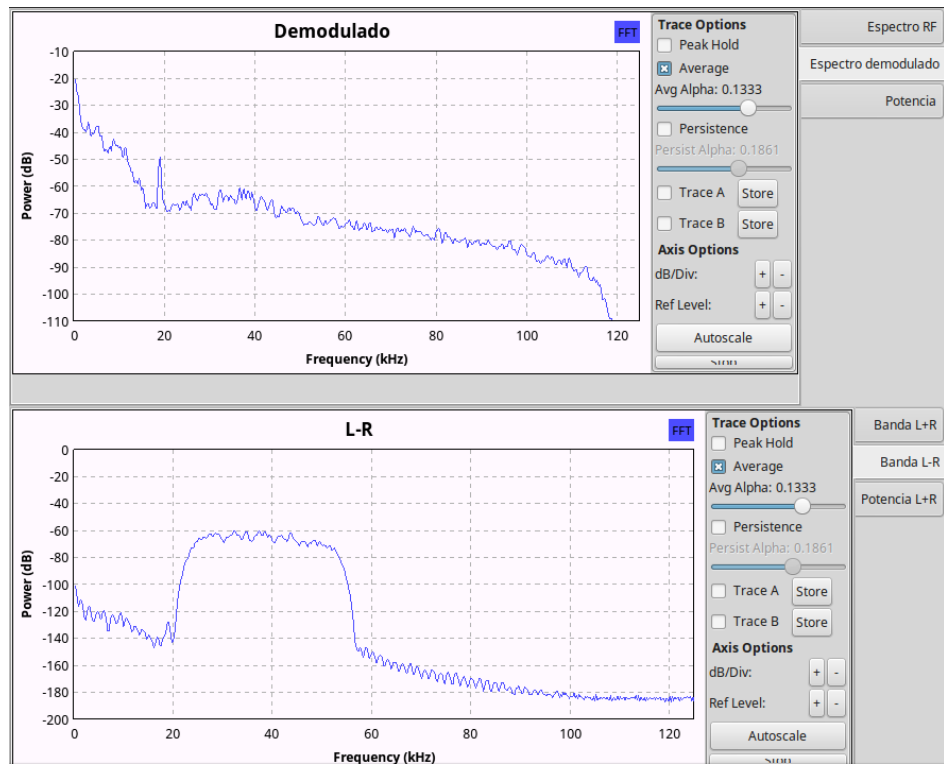


Figura 12 Espectro demodulado señal Unicauca Estéreo.

En la parte inferior de la figura 12 se muestra el espectro de la señal L-R en banda base de la señal MPX. En la tabla 2 se muestran los resultados del monitoreo de la estación radio Unicauca Estéreo en varios puntos extremos de la ciudad de Popayán.

Tabla 2 Resultados de medidas.

Lugar	PRF (dBm)	E (dBUV/m)	PL+R (dBm)	P Piloto (dBm)
Mi Bohío	-73.69	43.86	-8.66	-29.41
Lomas	-73.26	44.29	-10.54	-30.07
Santa Clara	-66.88	50.67	-1.99	-33.67
Centro	-68.42	49.13	-1.64	-32.59
Loma Cartagena	-67.07	50.48	-2.51	-32.26
Terraplaza	-70.96	46.59	-9.38	-28.99
Barrio Bolivar	-63.11	54.44	-2.47	-33.94

4. Discusión

SDR permite la implementación de un sistema de comunicaciones. El uso de GNU Radio permitió modelar cada una de las etapas de procesamiento de señal en el prototipo de monitoreo para estaciones de radiodifusión sonora.

El diseño de dispositivos de medida o de prueba empleando dispositivos SDR, reduce los costos de implementación y permite evitar dificultades asociadas a la implementación de dispositivos de medidas basados en otras tecnologías.

El proceso de calibración del prototipo haciendo uso de equipos de laboratorio calibrados permitió corregir el error de medida. La medida de error permaneció aproximadamente constante para diferentes valores de potencia en recepción. El factor de corrección fue considerado por el prototipo y con él se obtuvieron medidas del nivel de señal aproximadamente iguales a las obtenidas con los equipos especializados de medida. También se estimó que el sistema puede trabajar con señales cuya potencia sea superior a -75 dBm, y dado que la condición de zona de servicio estima que el nivel de potencia en la zona de cobertura debe ser superior a -51 dBm (66 dBU), el nivel mínimo es adecuado para recibir satisfactoriamente las señales provenientes de estaciones de FM.

En las pruebas de campo desarrolladas, se comprobó la presencia de las componentes que conforman el espectro de banda base compuesto, facilitando que

en futuros proyectos se puedan corroborar los parámetros de operación de diferentes estaciones radio en FM.

5. Conclusiones

El uso de dispositivos de SDR brinda una excelente alternativa para las instituciones de educación superior públicas, de construir herramientas especializadas de medida a un bajo costo para su uso en los procesos de docencia, investigación y aprendizaje.

La implementación de dispositivos empleando SDR permite que los estudiantes de las instituciones académicas tengan un acercamiento con la realidad y con el uso de elementos de medida, disminuyendo los riesgos de causar daños sobre equipos especializados de alto costo y mejorando el entrenamiento de los estudiantes.

En Colombia existen una gran cantidad de estaciones de radiodifusión sonora FM, las cuales deben ser monitoreadas para garantizar su operación adecuada sin generar interferencias sobre otras estaciones. Con el prototipo implementado es posible realizar el monitoreo de los parámetros esenciales de las estaciones de FM de forma sencilla y confiable, mediante un dispositivo de bajo costo implementado sobre dispositivos radio de propósito general.

Cuando se implementan dispositivos de medida en SDR es muy importante el proceso de calibración, dado que permite ajustar los valores medidos a los valores reales, lo cual garantiza la veracidad de la medida realizada.

La metodología XP proporcionó un desarrollo ágil e incremental, permitiendo construir progresivamente la solución obteniendo realimentación en cada evolución de la herramienta de monitoreo de bajo costo basada en SDR.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Congreso de Colombia. Ley 1978 de 2019. Por la cual se moderniza el sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), se distribuyen competencias, se crea un regulador único y se dictan otras disposiciones, 2019.
- [2] ITU. Servicio de Radiodifusión Sonora: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BS/es>.

- [3] Juhana, T. & Girianto, S. An SDR based multistation FM broadcasting monitoring system. Published in 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), 2017.
- [4] Kozmin, V., Rembovskiy, Y. & Tokarev, A. Modern radio monitoring applications for radio frequency spectrum occupancy measurement. Published in International Conference on Multimedia Technology (ICMT), 2011.
- [5] MacDonald, J., & Roberson, D. Spectrum Occupancy Estimation in Wireless Channels with Asymmetric Transmitter Powers. Published in CrownCom 2007. 2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007.
- [6] Mariani, A., Giorgetti, A. & Chiani, M. Wideband Spectrum Sensing by Model Order Selection. Published in IEEE Transactions on Wireless Communications, Volume: 14, December, 2015.
- [7] Martoyo, I., Setiasabda, P., Kanalebe, H., Uranus, H., & Pardede, M. Software Defined Radio for Education: Spectrum Analyzer, FM Receiver/Transmitter and GSM Sniffer with HackRF One. Published in 2nd Borneo International Conference on Applied, 2018.
- [8] MinTIC. Plan Técnico Nacional de Radiodifusión Sonora Frecuencia Modulada (F.M.), 2019.
- [9] National Instruments. USRP Software Defined Radios. Product Flyer, 2019.
- [10] Pressman, R. Ingeniería del Software: Un Enfoque Práctico. Mc Graw Hill, 7 Ed, 2010.
- [11] Saavedra, M., Ramirez, G. & Araque, J. Spectrum Occupation Assessment in Bogota and opportunities for cognitive radio systems. Published in 2018 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2018.
- [12] Sierra, E., Ramirez, G. Low cost SDR spectrum analyzer and analog radio receiver using GNU radio, raspberry Pi2 and SDR-RTL dongle. Published in 2015 7th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2015.

- [13] Santos, E., Prieto, A., Aguilar, R., Ramos, V., Lopez, M. & Cardenas, M. A Spectrum Analyzer Based on a Low-Cost Hardware-Software Integration. Published in IEEE IEMCON, 2019.
- [14] Suárez, M. Informe de gestión 2015-2019. Agencia Nacional del Espectro, 2019.
- [15] Tandale, S., Joshi, K. Spectrum Analysis in FM Band Using Cognitive Radio Testbench. Published in International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, 2016.
- [16] Tony, T., Jacob, J. Spectrum Measurement in FM bands for Cognitive Radio Design using NI USRP and LabVIEW. Rajagiri School of Engineering and Technology, 2016.