

# Sintonizador múltiple de señales de FM comercial en una plataforma de radio definido por software

V. I. Rodríguez-Abdalá<sup>1</sup>, J. Flores-Troncoso<sup>1</sup>, J. Sánchez-García<sup>1</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones Espaciales,  
Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,  
Av. López Velarde No. 801, Zacatecas, Zac., México, 98000.

<http://cidte.uaz.edu.mx>

<sup>b</sup>Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada  
Carr. Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, Ensenada, B.C., México, 22860.

<http://cicese.edu.mx>

2016 Publicado por *DIFU*<sub>100ci</sub>@ <http://difu100cia.uaz.edu.mx>

---

## Resumen

En el presente documento se muestra el método utilizado para realizar una sintonización múltiple de señales analógicas moduladas en frecuencia a través de un banco de filtros, los cuáles, son reconfigurables a la frecuencia que se desea sintonizar, a su vez, la información demodulada es guardada en archivos para su análisis posterior. También se muestran diferentes herramientas gráficas que permiten el análisis en el dominio de la frecuencia de la señal recibida y la obtenida después de la demodulación.

*Palabras clave:* sdr, usrp, sintonizador analógico.

---

## 1. Introducción

Hoy en día, el uso de tecnologías analógicas ha sido desplazado lentamente por las nuevas técnicas digitales que ofrecen una mayor diversidad de funciones (como el envío de datos), pero, en el caso de los servicios de difusión como televisión y radio, esta transición ha sido lenta debido al costo que implica el cambio masivo de los dispositivos de recepción, de igual modo se justifica por el área de cobertura reducida que ofrece un sistema digital en comparación con uno analógico.

Sin embargo, estas limitantes no han impedido el

desarrollo de dispositivos con nuevas tecnologías digitales capaces de sintonizar señales analógicas. De acuerdo con [? ], las emisoras de radio pueden transmitir ambas señales (Frecuencia Modulada (FM) comercial y difusión de audio digital (DAB)) en la misma frecuencia, sin interferirse, lo que permite que el proceso de transición a difusión digital tenga una completa compatibilidad con los receptores analógicos.

Trabajos como [? ] han desarrollado convertidores de frecuencia intermedia a digital que pueden sintonizar AM (Amplitud Modulada), FM e IBOC (In Band On Channel) que es un estándar para DAB. Donde con solo un sintonizador y dos convertidores Frecuencia Intermedia-

a-digital pueden cambiar entre los diferentes esquemas de modulación.

Aunque el objetivo de este documento no es analizar a detalle como se realiza la transmisión de DAB o los estándares utilizados para su difusión, se mostrará como con solo un sintonizador y variando el ancho de banda de recepción, es posible demodular simultáneamente múltiples estaciones, esto con ayuda de un banco de filtros digitales configurables por software en tiempo real. Todos los procesos son realizados con bloques de procesamiento digital de señales en una plataforma de radio definido por software.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección ?? se muestra el diagrama de un receptor FM tradicional, en la sección ?? se analiza el modelo de radio definido por software donde se realiza la demodulación y el filtrado de las diferentes frecuencias de FM y finalmente en las secciones ?? y ?? se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones del modelo propuesto.

## 2. Arquitectura del demodulador FM

### 2.1. Teoría

Sea  $x_m(t)$  la información a ser transmitida llamada señal modulante, la señal portadora es  $x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t)$  donde  $f_c$  es la frecuencia base de la portadora y  $A_c$  es la amplitud de la portadora. La señal resultante de la modulación, en frecuencia se define como:

$$\begin{aligned} y(t) &= A_c \cos\left(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau\right) \\ &= A_c \cos\left(2\pi \int_0^t [f_c + f_\Delta x_m(\tau)] d\tau\right) \\ &= A_c \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta \int_0^t x_m(\tau) d\tau\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $f(\tau)$  es la frecuencia instantánea y  $f(\tau) - f_c = f_\Delta x_m(\tau)$  es la desviación en frecuencia, que es proporcional a la señal moduladora  $x_m(t)$ , se asume que la señal moduladora está limitado por un rango de valores comprendidos entre  $\pm 1$ .

### 2.2. Demodulación FM

Existen diversos tipos de demoduladores para señales de FM analógicas, entre ellos:

- Detector de fase. Es un dispositivo el cuál su salida representa la diferencia de fase entre dos señales

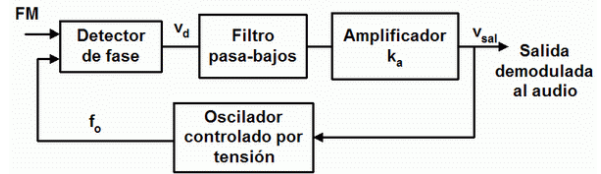


Figura 1. Diagrama a bloques de un receptor FM.

de entrada. Una de las señales de entrada es la de referencia y la otra es la captada por la antena.

- Discriminador Foster-Seeley [? ]. Es el detector de FM mas utilizado. Este detector se conforma de un transformador que alimenta dos diodos en un circuito rectificador de corriente directa de onda completa. Cuando la entrada del transformador es sintonizada en la frecuencia, la salida del discriminador es cero. Cuando existe alguna variación en la frecuencia, el balance del circuito es roto y la salida del circuito representa la desviación en frecuencia.
- Detector de relación. Este detector es una variante del discriminador de Foster-Seeley, el cuál tiene la ventaja de eliminar el ruido de AM y por lo tanto no demodular señales de AM. Este detector tiene un ancho de banda mas angosto pero una distorsión mayor en comparación con Foster-Seeley.
- Detector de cuadratura. En este dispositivo, la señal es dividida en dos partes, una de ellas es desfasada 90 grados a través de un capacitor y enviada a un circuito LC el cuál resuena a la frecuencia de la portadora. Si la frecuencia de la señal recibida es igual a la frecuencia central, entonces las dos señales tendrán una diferencia de 90 grados, a esto se le llama fase en cuadratura, de ahí el nombre de este detector. Las señales son multiplicadas entre si para detectar la fase y la salida de esta multiplicación es la representación de la desviación de fase de la señal. Este proceso de detección puede complementarse con una compuerta lógica XOR, la cuál convierte la señal FM en una señal modulada por ancho de pulso (PWM). Cuando estos pulsos son filtrados, la salida del filtro entrega la señal original con la que fué modulada la portadora.

En la Figura ?? se puede observar un diagrama a bloques de como se conforma un receptor de FM. Donde el detector de fase entrega a su salida la señal demodulada que es enviada a un filtro pasabajos para la amplificación del audio obtenido.

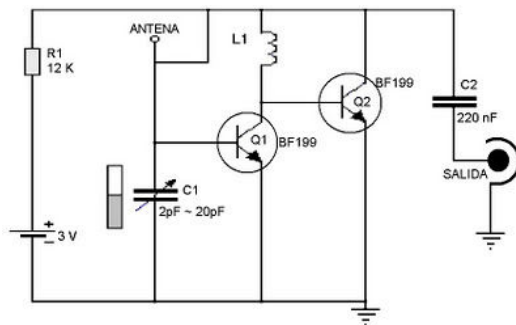


Figura 2. Circuito de un receptor FM sencillo.

En la Figura ?? se observa un circuito electrónico sencillo donde se implementa un receptor de FM de sintonización variable a base de transistores.

### 3. Modelo propuesto

De acuerdo con [?] y [?], la implementación de un demodulador FM en una plataforma digital de radio definido por software, permite el uso de diferentes algoritmos de correlación, filtros digitales, decimadores e interpoladores que en un circuito de FM tradicional no es fácil de implementar, y en cambio, en la plataforma digital, se pueden agregar estas tareas de una manera sencilla para que sean realizadas por el FPGA.

Un entorno de radio definido por software en GNU Radio [?], es un conjunto de herramientas que permite la implementación de diversos bloques de procesamiento de señales, en un ambiente de software para su desarrollo en un determinado equipo de hardware programable.

En la Figura ?? se muestra un receptor de radio FM desarrollado en GNU Radio. El receptor es una tarjeta de radio definido por software USRP sintonizado a la frecuencia de la emisora deseada, la señal recibida es remuestreada, para pasar de una tasa de 250 KHz a 192 KHz, que es el ancho de banda que utiliza una estación de radio FM comercial. Una vez preparada la señal se entrega al bloque que demodulará la señal FM y entregará a su salida una señal de audio con una tasa de 48 KHz, que es la tasa de muestreo de la tarjeta de sonido de la computadora.

Así mismo, para observar la señal en las diferentes etapas del procesamiento, se agregaron dos analizadores de espectro, uno a la salida de la tarjeta USRP y otro en la salida del demodulador de FM,.

Para realizar una demodulación múltiple simultánea es necesario incrementar el ancho de banda de la tarjeta USRP, llevándolo en este caso a su máximo posible. El valor de la tasa de muestreo de la tarjeta USRP depende del modelo de la tarjeta USRP y la computadora

utilizada, en este caso, el valor de la tasa de muestreo y por consecuencia el ancho de banda máximo de la tarjeta USRP es 4 MHz.

Debido a que el ancho de banda de la tarjeta USRP es muy grande en comparación con el ancho de banda que se requiere para sintonizar una estación de FM, es necesario separar cada uno de los canales de FM. Para ello se utilizó un filtro FIR que permite el paso de la frecuencia que se desea sintonizar y elimina el desplazamiento en frecuencia con respecto a la frecuencia central de la tarjeta USRP, dejando la señal de la estación de FM centrada en el espectro. Dependiendo de la cantidad de emisoras que se deseen sintonizar al mismo tiempo, es la cantidad de filtros FIR que deberán integrarse al sistema de radio definido por software.

En la Figura ?? se muestra un demodulador FM para 3 frecuencias independientes, incluyendo la grabación por separado de cada uno de los canales demodulados.

### 4. Resultados

En la Figura ?? se presenta el espectro de las señales recibidas en un ancho de banda de 4 MHz, y de acuerdo a como varíe la frecuencia central de la tarjeta USRP, se podrán observar otras portadoras en el espectro.

Una vez fija la frecuencia central de la tarjeta USRP se procede a seleccionar las diferentes frecuencias de las emisoras de FM para su demodulación. Para mejorar la recepción de la señal, se agregó una variable de ganancia, la cuál está normalizada (valores entre 0 y 1) para que la tarjeta incremente o disminuya la ganancia de la antena por hardware. Una operación similar se podría hacer mediante software, esto es, agregando un bloque de multiplicación sobre la señal recibida o sobre el audio demodulado para controlar el volumen en la bocina.

Con el menú de selección de estación es posible cambiar el audio de la estación que se escucha en la tarjeta de sonido, mas esto no quiere decir que se esté dejando de demodular las otras estaciones, por ello se incluyó una etapa de grabación, la cuál generará un archivo de audio con extensión .wav sin importar que estación se esté escuchando en ese momento y permitir de este modo un análisis posterior de la señal demodulada.

En la Figura ?? se muestra el espectro del audio demodulado, se puede observar que el ancho de banda del audio coincide con el definido para FM comercial (200 KHz), además, se observa la presencia de una portadora adicional mezclada junto con el audio alrededor de los 88 KHz, en esta portadora es donde se envía los

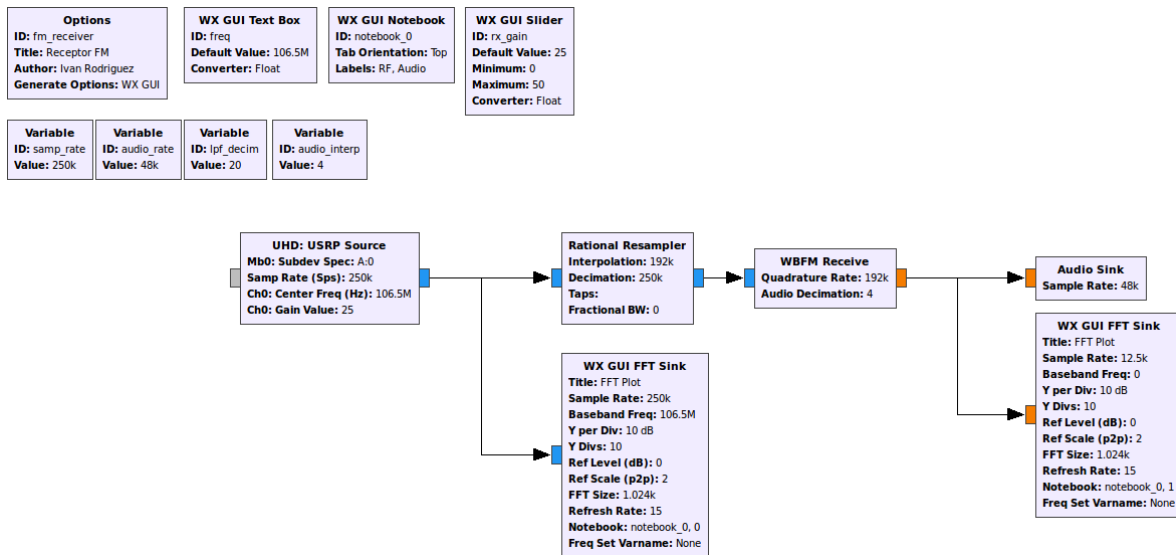


Figura 3. Receptor FM en GNU Radio.

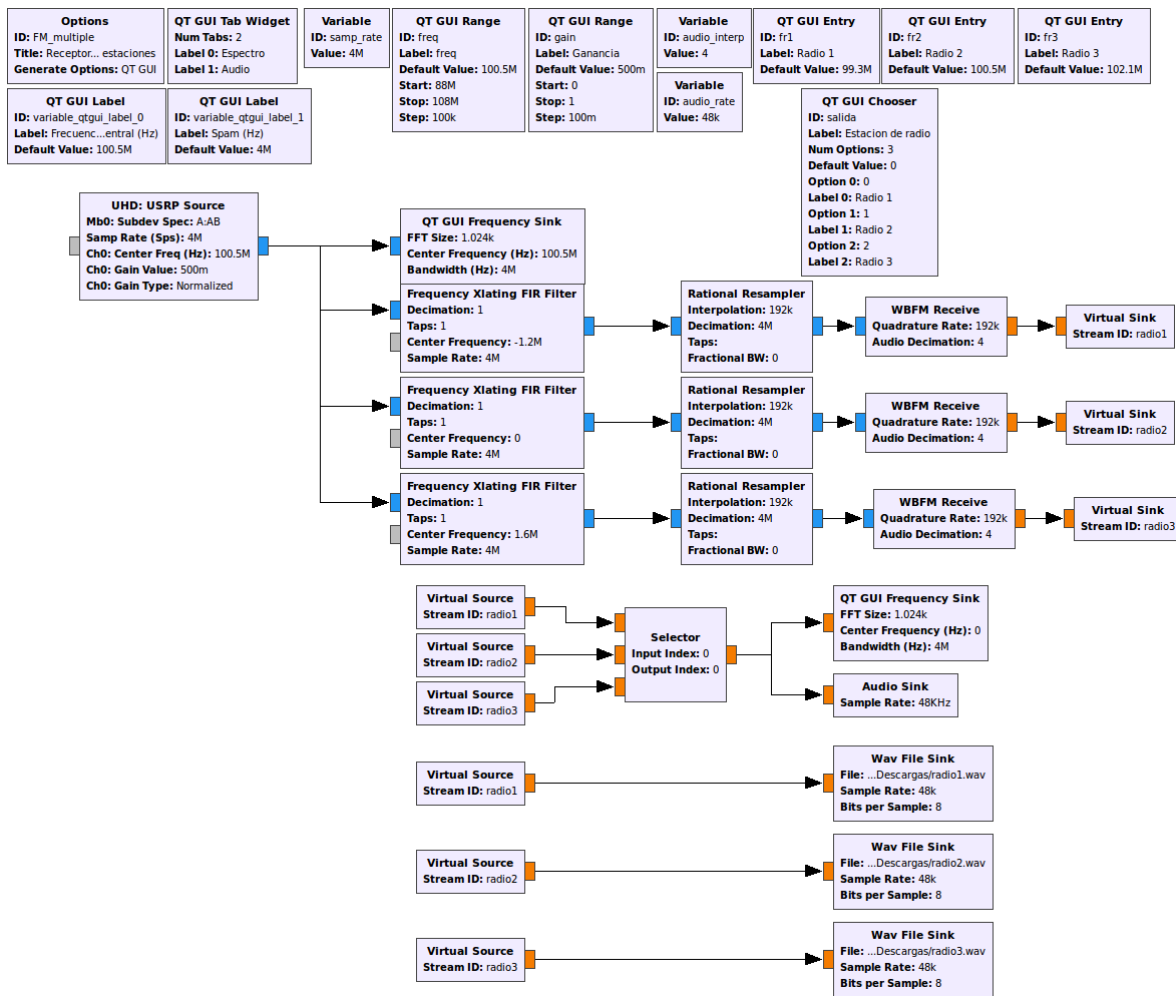


Figura 4. Receptor FM con banco de filtros en GNU Radio.

datos de la estación de radio FM para su despliegue en los nuevos sintonizadores digitales de radio.

La captura de las señales se realiza en la etapa posterior a la demodulación, mas sin embargo, es posible

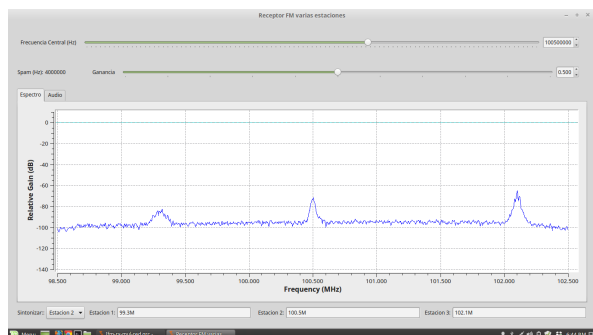


Figura 5. Espectro de la señal en la tarjeta USRP.

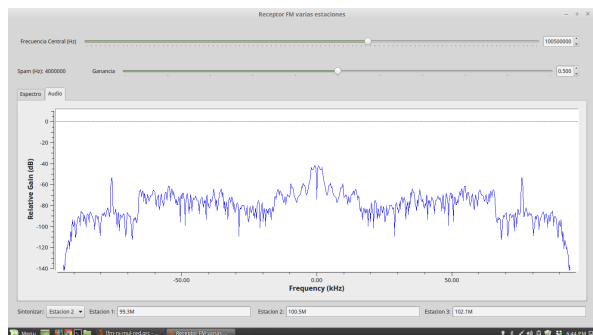


Figura 6. Espectro de la señal FM demodulada.

agregar los bloques de captura de datos en otras etapas, como puede ser a la salida de la tarjeta USRP o del filtro FIR. Los datos capturados pueden ser utilizados para procesamiento de señales que no requiera ser en tiempo real.

## 5. Conclusiones

El uso de plataformas de radio definido por software permite realizar diferentes tipos de aplicaciones utilizando una plataforma universal, y facilita la modificación de estas aplicaciones para implementar mejoras o algoritmos sin necesidad de desarrollar hardware.

La sintonización múltiple puede ser útil para diversas aplicaciones y no necesariamente cada una de las señales tienen que tener el mismo esquema de modulación. Esto es, en caso de que alguna señal esté modulada digitalmente o transmita otro tipo de información, se puede agregar diferentes filtros y hacer una ramificación exclusiva para la señal que se desea recuperar.

Este tipo de aplicaciones permite realizar múltiples tareas que se verán limitados por la capacidad de cómputo y procesamiento del entorno de GNU Radio. Igualmente, se pueden realizar procesos que optimicen la demodulación y otras etapas de banda base, que permitan una comunicación fiable entre los dispositivos.

## Referencias

- [1] B. W. Kroeger and P. J. Peyla, Compatibility of FM hybrid in-band on-channel (IBOC) system for digital audio broadcasting, *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 43, pp.421-430, num. 4, Dec 1997.
- [2] Q. Sandifort, L. Breems, C. Dijkmans and H. Schuurmans, IF-to-digital converter for FM/AM/IBOC radio, *Solid-State Circuits Conference, 2003. ESSCIRC '03. Proceedings of the 29th European*, Estoril, Portugal, 2003, pp. 707-710.
- [3] D. E. Foster and S. W. Seeley, Automatic Tuning, Simplified Circuits, and Design Practice, in *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 25, no. 3, pp. 289-313, March 1937.
- [4] Bang-Sup Song and In Seop Lee, A digital FM demodulator for FM, TV, and wireless, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 42, no. 12, pp. 821-825, Dec 1995.
- [5] Indranil Hatai and Indrajit Chakrabarti, A New High-Performance Digital FM Modulator and Demodulator for Software-Defined Radio and Its FPGA Implementation, *International Journal of Reconfigurable Computing*, vol. 2011, Article ID 342532, 10 pages, 2011.
- [6] T. W. Rondeau, On the GNU Radio Ecosystem, *Opportunistic Spectrum Sharing and White Space Access: The Practical Reality*, O. Holland, H. Bogucka, A. Medeis, Ed. New York: Wiley, 2015.