

A More Flexible Communication System: A Software Defined Radio

Martín Poveda¹, Héctor Poveda, PhD¹, and Fernando Merchan, PhD.¹

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, martin.poveda@utp.ac.pa, hector.poveda@utp.ac.pa, fernando.merchan@utp.ac.pa

Abstract— In recent years there has been an unprecedented development of wireless communications. This progress is a result of the demand for bandwidth and new applications by users. This demand increases more and more. For this reason, engineers and researchers must develop strategies to meet these users' needs. Electronic devices must advance in parallel so that these strategies can be implemented. In addition, to validate these strategies necessary testing and research to determine the feasibility of implementing the proposed methods.

It is for this reason that this paper presents the USRP (Universal Software Radio Peripheral) research in digital communications systems. The great advantage of these equipment is that they are programmable radio platforms, this allows the USRP to be reprogrammed, and enabling a lot of communications systems that can be implemented with just a communication device.

This paper presents different wireless communications applications where you can use the USRP. In addition, it presents the USRP as a solution for the implementation of future applications of wireless communication.

Keywords— USRP, SDR, GNU Radio Companion, Ettus Research, wireless communications systems.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.039>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

Un Sistema de Comunicación Más Flexible: Una Radio Definida por Software

Martín Poveda, Héctor Poveda, PhD, and Fernando Merchan, PhD
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá,
{martin.poveda, hector.poveda, fernando.merchan}@utp.ac.pa

Resumen—En los últimos años se ha dado un avance sin precedentes de las comunicaciones inalámbricas. Este avance es producto de la demanda de ancho de banda y de nuevas aplicaciones por parte de los usuarios. Esta demanda se incrementa cada vez más. Por esta razón, ingenieros e investigadores deben desarrollar estrategias que permitan satisfacer estas necesidades de los usuarios.

Los dispositivos electrónicos deben avanzar de manera paralela para que estas estrategias se puedan implementar. Además, para poder validar estas estrategias es necesario realizar pruebas e investigaciones que determinen la factibilidad de implementación de los métodos propuestos.

Es por esta razón que en este trabajo presentamos el USRP (por sus siglas en inglés, Universal Software Radio Peripheral) en la investigación de sistemas de comunicaciones digitales [1]. La gran ventaja que tienen estos equipos se debe a que son plataformas de radio programable, esto permite que los USRP puedan reprogramarse, haciendo posible que una gran cantidad de sistemas de comunicaciones se puedan implementar con solo un equipo de comunicación.

El presente trabajo presenta diferentes aplicaciones de comunicaciones inalámbricas en las que se puede utilizar el USRP. Además, nos presenta los USRP como una solución para la implementación de futuras aplicaciones de comunicación inalámbrica.

Palabras claves—USRP, SDR, GNU Radio Companion, Ettus Research, Sistemas de comunicaciones inalámbricos.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos de la actualidad se han hechos imprescindibles en nuestra vida cotidiana. Los mismos han crecido exponencialmente en los últimos años. Tanto en cantidad debido a la gran demanda por parte de los usuarios, como en la complejidad debido a los nuevos sistemas de modulaciones y aplicaciones.

Esta misma complejidad hace que los dispositivos y equipos de radio frecuencia sean costosos, haciendo difícil el acceso a los mismos, principalmente a las empresas, universidades y laboratorios de investigación que quieran implementar nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas.

En un paradigma clásico se requiere un equipo dedicado para cada sistema de comunicaciones que se desee implementar. Esto implica inversiones en la medida que se requiera nuevos sistemas o tecnologías.

Una solución a este problema fue propuesta por Ettus Research con los equipos USRP, que en conjunto con la plataforma de desarrollo GNU Radio Companion, nos permite implementar cualquier tipo de sistema de comunicación en

breve tiempo, dándonos ventajas al momento de probar técnicas avanzadas de modulación y de sistemas de comunicaciones sin tener la necesidad de cambiar el hardware para cada sistema a implementar [2], [3].

La característica principal de los USRP es que son plataformas SDR (por sus siglas en inglés, software define radio). Estas plataformas SDR son sistemas de radio comunicación, en el cual el hardware que se ha implementado en el equipo se configura por medio de software, esto permite que los dispositivos sean reutilizados para otros fines [4], [5].

La plataforma USRP está diseñada para aplicaciones de radio frecuencia, que pueden ir desde 0 Hz hasta 6 GHz, y proporciona opciones como la sincronización GPS (por sus siglas en inglés, global positioning system), configuraciones MIMO (por sus siglas en inglés, multiple-input and multiple-output) [6] y sistemas embebidos. Las áreas de aplicación incluyen telefonía móvil, televisión digital terrestre (DVB-T), radio FM, navegación por satélite, radares, entre otras aplicaciones. [7].

Por las razones arriba descritas, los USRP se perfilan como una solución potencial ante el avance masivo de las comunicaciones inalámbricas a nivel mundial. La contribución principal del presente trabajo es presentar diferentes aplicaciones de comunicaciones inalámbricas en las que se puede utilizar el USRP con el objetivo de mostrar el nivel de flexibilidad de estos dispositivos. Además, se pretende brindar a ingenieros e investigadores una visión para la implementación de futuras aplicaciones de comunicación inalámbrica.

La organización de este artículo inicia con la descripción de Ettus Research, los USRP y el software que se utiliza con los mismos denominado GNU Radio Companion. En la sección III, se describen algunos sistemas que se han implementados en los USRP y se presentan los resultados obtenidos. Dichos sistemas implementados son los siguientes: analizador de espectro y osciloscopio, receptor de radio FM, transmisor de radio FM, transmisor de DVB-T. Además, explicamos el funcionamiento interno del equipo y sus principales características.

En la sección IV, nosotros proponemos utilizar los dispositivos USRP en los laboratorios de clases, para que sirvan de apoyo a los estudiantes al momento de realizar alguna experiencia en el área de las comunicaciones.

II. ETTUS RESEARCH Y GNU RADIO COMPANION

A. Acerca de Ettus Research

Ettus Research es una compañía a nivel mundial dedicada

a la fabricación de plataformas SDR [7].

Ettus Research cuenta con una variedad de familias de plataformas SDR, algunas de ellas son: USRP X Series, USRP Networked Series, USRP Bus Series y USRP Embedded Series. Cada una de estas familias se diferencia por sus características de hardware. La familia con la cual trabajamos es la USRP Bus Series, y en específico con el USRP B100 (ver Fig. 1).



Fig. 1. USRP B100.

B. USRP

Los USRP son plataformas SDR, en las cuales los dispositivos como los amplificadores, la frecuencia del NCO (por sus siglas en inglés, numerically controlled oscillator), y las tarjetas hijas, son configurados por medio de un software que se ha implementado en una computadora.

Estos periféricos nos permiten implementar fácilmente sistemas de comunicaciones, como por ejemplo: radio FM, televisión digital, transmisión de imágenes, radar [8], satélites, “cognitive radio” [9,10], bluetooth, analizadores de espectro, estaciones banda base, control inalámbrico, entre otras aplicaciones.

Todo esto sin la necesidad de cambiar el hardware, siempre y cuando el ancho de banda y la frecuencia portadora a utilizar no se salgan del rango de operación de las tarjetas hijas. Estos equipos cuentan con dos tipos de tarjetas, la principal o tarjeta madre y la secundaria o tarjeta hija.

La tarjeta madre está compuesta por un FPGA (por sus siglas en inglés, field programmable gate array), quien es el que se configura según el software o sistema que se quiera implementar. Así pues, una vez que compilamos el código, el software escribe en el FPGA la configuración de todos los módulos que se utilizaran. Además, contiene un PGA (por sus siglas en inglés, programmable gain amplifier), el cual es un amplificador que tiene como función amplificar la señal recibida por la tarjeta hija, para que la señal pueda estar dentro del rango de conversión de los ADC (por sus siglas en inglés, analog to digital converter) y así poder obtener más información de la señal. Otros dispositivos con los que cuenta la tarjeta madre son los convertidores ADC y DAC (por sus siglas en inglés, digital to analog converter) de alta velocidad.

La tasa de muestreo del ADC es de 64Mmuestras/s y del DAC 128Mmuestras/s, permitiéndonos un ancho de banda

máximo de 32MHz y 64MHz respectivamente. La cantidad de bit que se utilizan para cuantificar la señal es 12 y 14 bits respectivamente.

El USRP B100 permite una razón de símbolo de 8MSps cuando se utiliza una resolución de 16bit/Símbolo y 16MSps cuando se utiliza una resolución de 8bit/Símbolo, para ambos casos la razón de bit es de 128Mbps, es por esta razón que se tiene que reducir o decimar la razón de bit de la señal recibida y aumentar o interpolar la razón de bit de la señal a transmitir.

Para esto la tarjeta madre cuenta con un DDC (por sus siglas en inglés, digital down converter) y un DUC (por sus siglas en inglés, digital up converter) los cuales nos permiten reducir la razón de bit de transmisión por medio del puerto USB y eliminar la desviación de frecuencia en ambos casos.

La función de los DDC es dividir la tasa de muestreo por un factor de diezmando, se recomienda que este factor de diezmando sea un número de base 2 para efectos de los algoritmos de la transformada de Fourier.

Dado que la máxima razón de bit que permite el puerto USB es de 128Mbps, el factor de diezmando mínimo tiene que ser 8. Ya que cuando se utilizan los 12 bit del ADC la razón de bit es 768Mbit/s, y si esta razón de bit se divide entre 8, obtendremos una razón de bit menor que la máxima permitida por el puerto USB, en el caso que se divida entre 4, la razón de bit será mayor que la máxima permitida por el puerto USB.

La función del DUC es similar a la del DDC, la diferencia es que en vez de decimar la tasa de muestreo recibida, este interpola la tasa de muestreo a transmitir, ya que la razón de símbolo del DAC es de 128MSps y su resolución es de 14bit.

Hay que recordar que las señales que se transmiten de forma inalámbricas son señales analógicas y no señales binarias de 1 y 0, es por esto que se necesitan los convertidores ADC, DAC, DDC y DUC.

Las tarjetas hijas (ver Fig. 2) tienen como objetivo trasladar las frecuencias de radio a banda base y viceversa, por medio del NCO.

Sin embargo, como el NCO solo toma valores discretos de frecuencias, cuando se traslada el espectro de radio frecuencia a banda base y viceversa, se produce una desviación de frecuencia (Δf), las cuales se eliminan por medio de los DDC y DUC. Estas tarjetas hijas también cuentan con un PGA, el cual también se configura por medio de software.

C. Funcionalidad del USRP

En esta sección se explicará como el USRP hace para convertir una señal inalámbrica en un código binario, el cual será transmitido por medio del puerto USB a la computadora, para su posterior procesamiento.

La señal electromagnética que se recibe por medio de la antena pasa a través de la tarjeta hija, en donde es amplificada con el PGA y trasladada de RF a banda base (BB) más un Δf con el NCO, está señal que sale de la tarjeta hija es pasada a la tarjeta madre, en donde pasa nuevamente por medio de un PGA y posteriormente a un ADC, en donde se convierte en

una señal binaria, dado que la computadora solo procesa bits y no señales analógicas. Luego la señal codificada binariamente se pasa por medio de un DDC, el cual elimina la ΔF y divide la tasa de muestreo del ADC por un factor de diez, la cual será la que se transmitirá por medio de la interfaz USB a la computadora.

Sabiendo que los USRP solo sirven como convertidor de señales, la computadora es la que se encarga de procesar todos los códigos binarios, por medio de algoritmos generados por el software GNU Radio Companion.

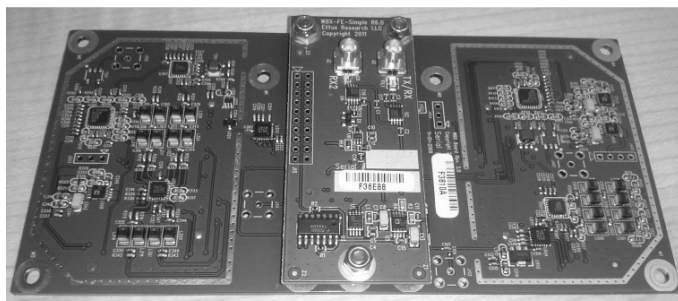


Fig. 2. Tarjeta hija (daughterboard).

D. GNU Radio Companion

GNU Radio Companion (GRC) es una herramienta gráfica que nos permite crear gráficos de flujo de señal y generar códigos fuentes de flujo gráfico [11]. Este tipo de lenguaje es muy parecido al entorno simulink de MATLAB.

La ventaja principal de este lenguaje es la rápida implementación de los sistemas. Por otro lado, una de las desventajas de utilizar este tipo de programación es que muchas veces se desperdicia líneas de código internamente en los bloques, y estas líneas extras equivalen a muchos ciclos de reloj de una computadora.

III. SISTEMAS IMPLEMENTADOS

En esta sección se presentaran los sistemas que hemos simulado e implementado con los USRP. Estos sistemas son los siguientes:

- Analizador de espectro y osciloscopio.
- Receptor de radio FM.
- Transmisor de radio FM.
- Transmisor de televisión digital (DVB-T).

A. Analizador de espectro y osciloscopio.

El analizador de espectro que se ha implementado con los USRP nos permite seleccionar múltiples anchos de banda en distintas frecuencias portadoras y también la ganancia de la señal recibida. Para este caso se seleccionó un ancho de banda de 8MHz a una frecuencia portadora de 105MHz y una ganancia de 45dB.

Estos parámetros pueden ser cambiados en tiempo real cuando se está corriendo la aplicación, gracias a los bloques GUI Slider y GUI Chooser que se observan en el diagrama de bloques de la Fig. 3.

Dicha frecuencia portadora y ancho de banda seleccionados se encuentran dentro de la banda de radio FM, es por esto, que en la Fig. 4 se observan algunos picos en gráfica, los cuales corresponden a estaciones de radio FM.

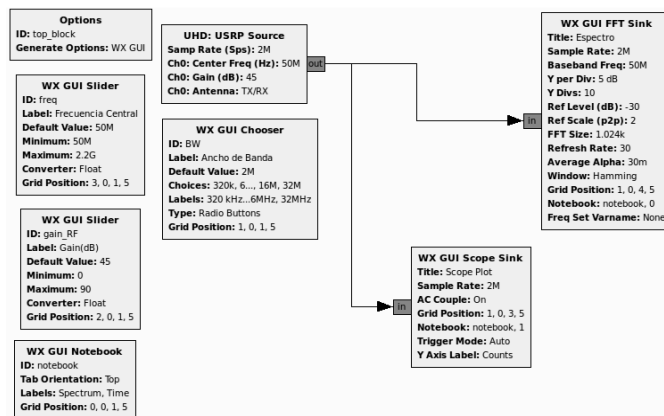


Fig. 3. Diagrama de bloques del analizador de espectro y osciloscopio.

Los bloques principales para esta aplicación son: el USRP Source, el GUI FFT Sink y el GUI Scope Sink.

El bloque USRP Source representa al USRP B100 que se muestra en la Fig. 1, la función de este bloque es obtener la data que transmite el USRP a la computadora a través del cable USB. Una vez que estos datos llegan al USRP Source son transmitidos a los bloques que están conectados a su salida. Los bloques GUI FFT Sink y GUI Scope Sink son graficadores de señales, la diferencia entre estos dos es que el bloque FFT Sink grafica la transformada rápida de Fourier que se le aplica a la señal de entrada, mientras que el Scope Sink grafica directamente dicha señal.

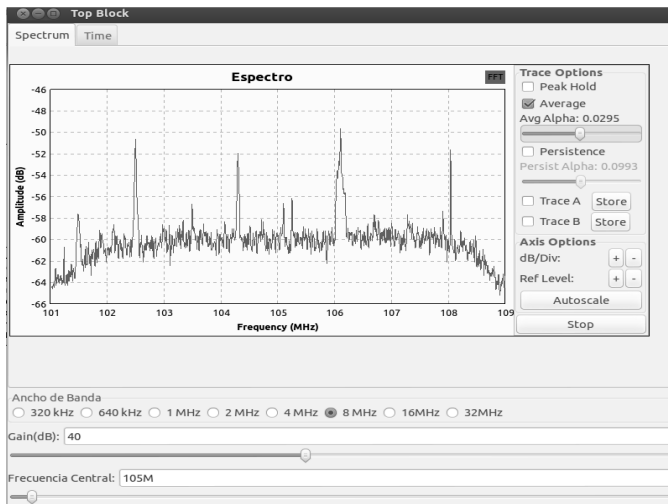


Fig. 4. Señal graficada con el analizador de espectro.

En la Fig. 5 se ve una señal en el dominio del tiempo, la cual corresponde a la sumatoria de todas las señales dentro del ancho de banda seleccionado, el cual va desde 101MHz a 109MHz.

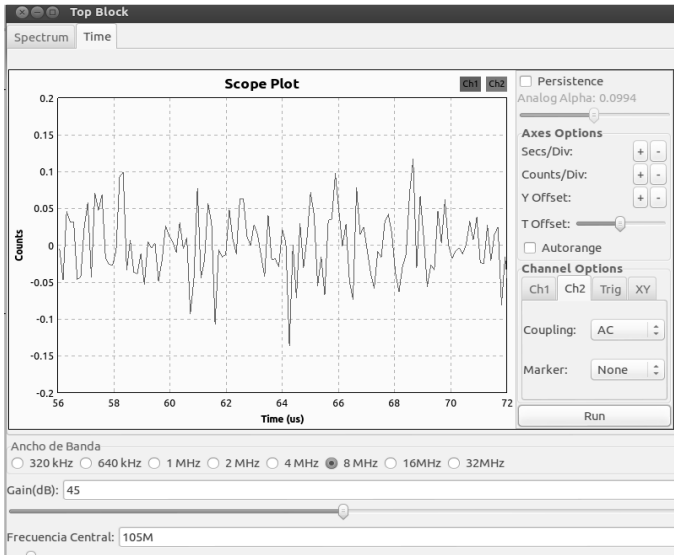


Fig. 5. Señal graficada con el osciloscopio.

El analizador de espectro y el osciloscopio son equipos importantes en un laboratorio de investigación, en una empresa y en una universidad entre otros. Estos equipos por lo general son costosos, pero, como ya se ha demostrado, la implementación de dichos equipos en los USRP es muy fácil y rápida.

B. Receptor de radio FM

Como ya se sabe, un receptor de radio FM es un equipo que nos permite seleccionar y escuchar una emisora de radio deseada. Diseñar esta aplicación es otro ejemplo del potencial que tienen las plataformas SDR, en nuestro caso los USRP, ya que para implementar esta aplicación en los USRP, tan solo es necesario seleccionar los bloques, unirlos y correr la aplicación. En la Fig. 6 se muestra el diagrama de bloques del receptor de radio FM.

Para implementar este sistema tan solo fue necesario utilizar 11 bloques, sin embargo, 5 de estos bloques no son indispensables en el diagrama, los mismo son: Variable, GUI Slider, GUI Notebook y los bloques FFT Sink.

Las tareas de cada bloque se explican a continuación. El bloque USRP Source recibe la data del puerto USB a una razón de 5Mmuestra/s y la envía al bloque Low Pass Filter (LPF), el cual la filtra y la diezma, hay que recordar que esta señal que se recibe ya viene en BB. En el bloque LPF de la Fig. 6 se puede observar que el diezmo está configurado en 20, lo que nos da una razón de símbolo en la salida del LPF de 250kmuestra/s. El bloque WBFM Receive es un demodulador FM de banda ancha, el cual demodula la señal de salida del LPF. En este punto la razón de símbolo de la señal aun es de 250kmuestra/s, pero esta razón de símbolo aún es muy alta para que pueda ser decodificada por la tarjeta de audio de la computadora, para esto se utiliza el bloque Rational Resampler, el cual cambia la razón de símbolo de la señal por

una que pueda ser decodificada por la tarjeta de audio, este bloque diezma la señal por 250 y la interpola a 48. La tarea de diezmar se puede asociar con dividir y la tarea de interpolar con multiplicar, así pues, si dividimos 250kmuestra/s entre 250 y lo multiplicamos por 48 obtenemos una razón de símbolo de 48kHz, la cual es compatible con la tarjeta de audio de la computadora. Para enviar esta data a la bocina de la computadora se utiliza el bloque Audio Sink, el cual representa al periférico de audio de la computadora.

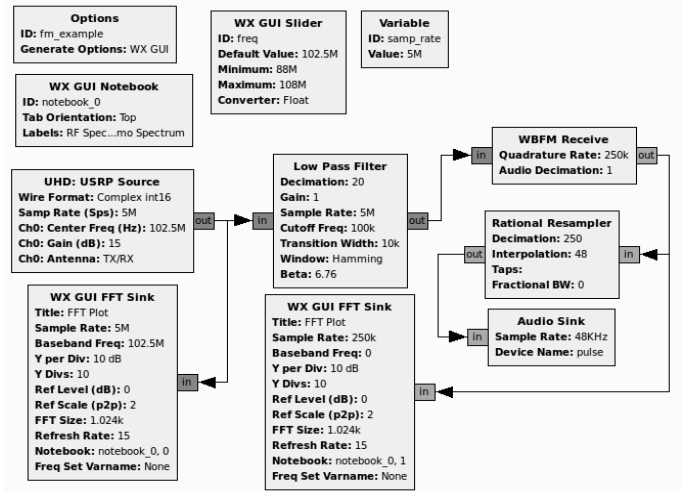


Fig. 6. Receptor de Radio FM.

La Fig. 7 muestra 2 picos claros ubicados en las frecuencias de 101.5MHz y de 102.5MHz, los cuales corresponden a 2 emisoras de radio separadas a 1MHz.

La Fig. 8 muestra el espectro de la señal de salida del demodulador FM de banda ancha, dicho espectro corresponde a la emisora ubicada a 101.5MHz.

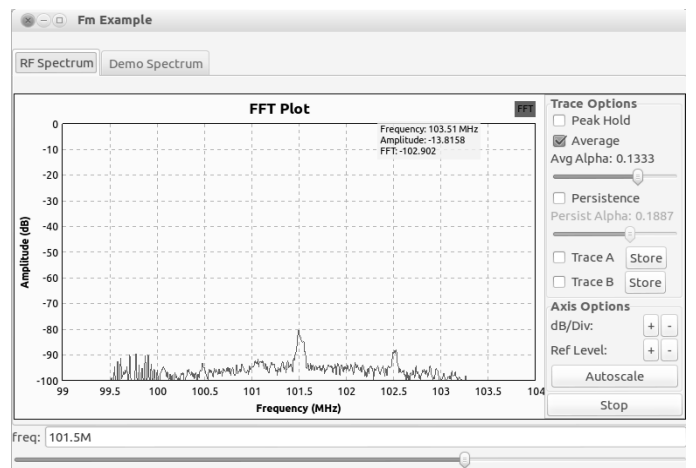


Fig. 7. Espectro en RF.

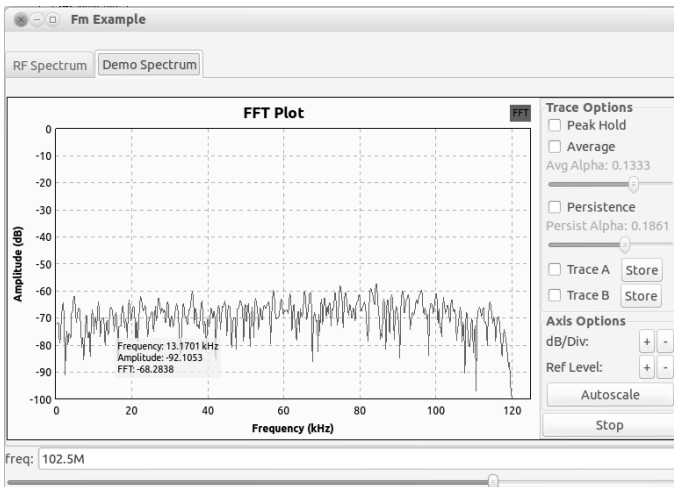


Fig. 8. Espectro de la señal BB demodulada.

C. Transmisor de radio FM

En este proyecto se implementó un transmisor de radio FM, el cual nos permite transmitir un archivo de audio en cualquiera frecuencia deseada, utilizando una modulación WBFM. El área de cobertura de este sistema está limitada por la potencia del USRP, la cual es menor que 1Watt. En las pruebas realizadas se pudo transmitir hasta aproximadamente 10 metros. El diagrama de bloque de este proyecto es el que se muestra en la Fig. 9, y los resultados obtenidos correspondientes a la transmisión son los que aparecen en la Fig. 10 y Fig. 11.

La Fig. 10 muestra el espectro de la señal transmitida, la cual tiene un ancho de banda aproximadamente de 100kHz y en la Fig. 11 se puede observar claramente como la señal transmitida cambia de frecuencia.

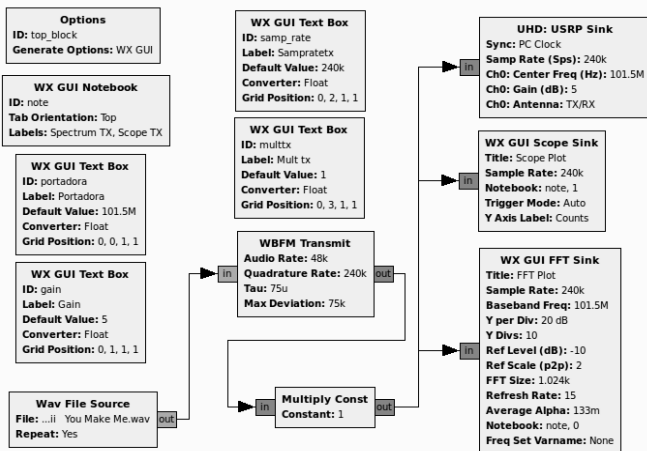


Fig. 9. Transmisor de Radio FM.

El funcionamiento de este sistema es muy parecido al del receptor de radio FM, la diferencia es que en uno se transmite y en el otro se recibe. Para implementar este sistema solo se necesitan 4 bloques los cuales son: USRP Sink, WBFM Transmit, Wav File Source y el de Options.

Este último no puede faltar en una aplicación, ya que sin él, el programa manda un error al compilarlo. El único bloque nuevo es el de Wav File Source, el cual nos permite leer un archivo de audio ubicado en la computadora para ser transmitido. Las otras diferencias son la configuración del bloque USRP como transmisor, el bloque WBFM como modulador y la adición del bloque Multiply Const, el cual es un simple multiplicador.

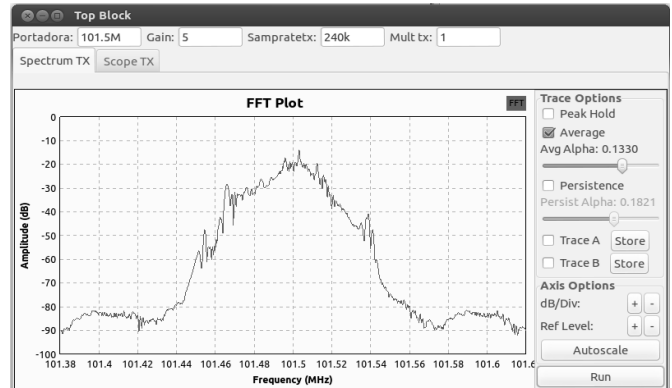


Fig. 10. Espectro de la señal FM transmitida.

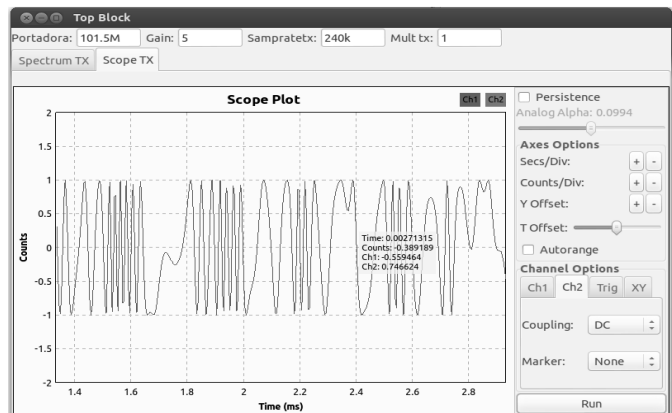


Fig. 11. Señal FM en el dominio del tiempo.

D. Transmisor de televisión digital

Es una de las tecnologías más populares de los últimos años [12]. Gracias al avance tecnológico la tecnología de la televisión ha pasado de ser analógica a digital, utilizando técnicas de modulaciones como OFDM (por sus siglas en inglés, orthogonal frequency-division multiplexing), y la técnica de modulación utilizada en nuestro proyecto GMSK (por sus siglas en inglés, gaussian minimum shift keying). Una ventaja de GNU Radio Companion, es que permite simular previamente los sistemas que se quieran implementar, para así obtener sus resultados y poder llegar a una conclusión.

La Fig. 12 muestra el diagrama de bloque de la simulación del transmisor de televisión digital utilizando una modulación GMSK.

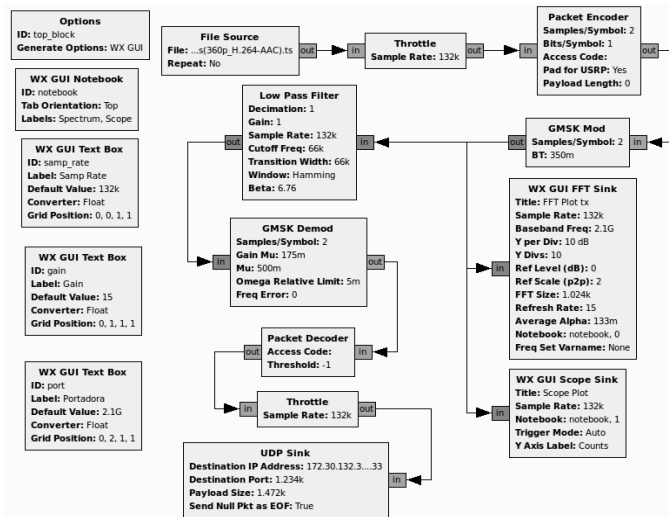


Fig. 12. Diagrama de bloques.

A continuación se explicará el funcionamiento de los bloques que no se han mencionados. Para comenzar explicaremos el funcionamiento del archivos fuente, el cual nos permite leer un archivo de video para su previa transmisión.

El “throttle” tiene como función definir la tasa de símbolos en el sistema, ya que sin él, el archivo de video se transmitiría por completo en unos pocos segundos, y no en tiempo real. El GMSK Mod es el bloque modulador GMSK y el bloque demodulador es el GMSK Demod. El Packet Encoder y el Packet Decoder son bloques codificadores y decodificadores, y son necesarios al momento de utilizar la modulación GMSK. El bloque UDP Sink tiene como función, transmitir la señal demodulada a través de la red. Los resultados obtenidos de está simulación se pueden observar en las siguientes figuras. En la Fig. 13 se observa el espectro de la señal transmitida, en la cual se ve la forma característica de la modulación GMSK.

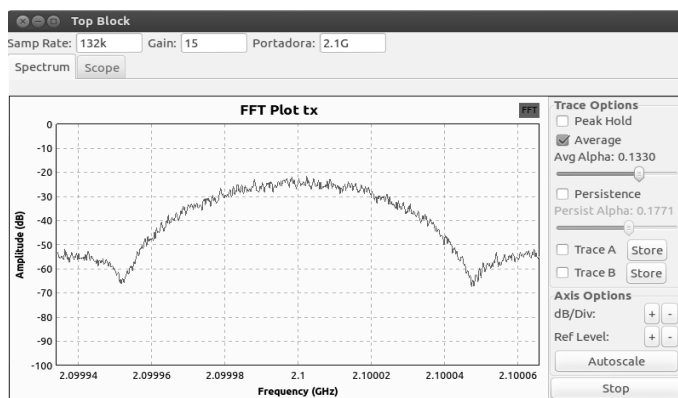


Fig. 13. Espectro de una modulación GMSK.

En la Fig. 14 se ve la señal en el dominio del tiempo. El resultado obtenido con la demodulación fue transmitido a través de la red y reproducido en otra computadora como se puede ver en la Fig. 15.

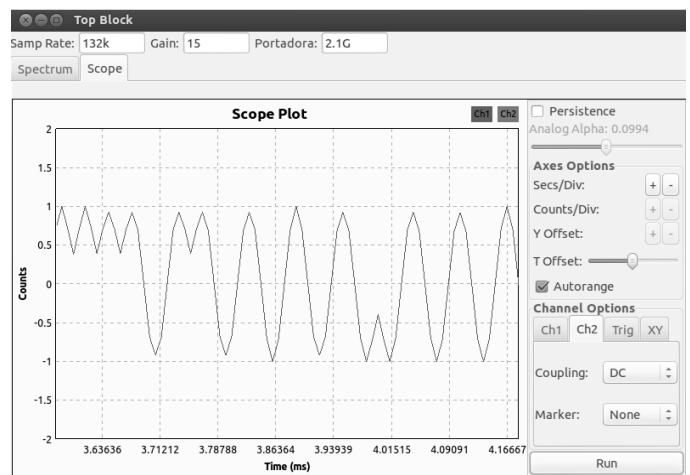


Fig. 14. Señal GMSK en el dominio del tiempo.

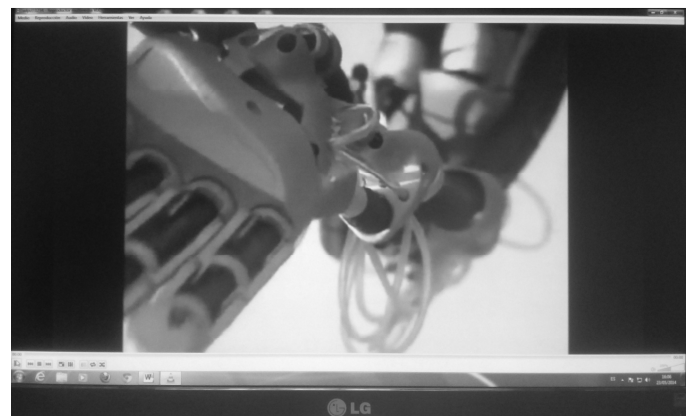


Fig. 15. Video recibido a través de la red.

IV. UTILIZACIÓN DE USRP EN UN LABORATORIO DE CLASE

Estos equipos tienen relevancia para la academia en el área de las telecomunicaciones. Con estos equipos, se pueden simular e implementar diferentes sistemas de comunicaciones, tanto los sistemas analógicos como los sistemas digitales [13].

Algunas de las modulaciones en amplitud que se pueden implementar son las siguientes: DSB-SC, DSB+C, USB-SC, USB+C, LSB-SC, LSB+C, VSB-SC, VSB+C y QAM. De la modulación angular se pueden implementar las modulaciones FM, WBFM, NBFM y PM. Algunas de las modulaciones digitales que se pueden implementar son: ASK, FSK, M-PSK, M-DPSK, M-QAM, OFDM, GMSK, entre otras. Estos son sólo algunos temas que se suelen abordar en cursos técnicos del área de las telecomunicaciones en las universidades. Sin embargo, las aplicaciones del USRP pueden ir más allá.

En efecto, estos equipos no solo permiten el desarrollo de sistemas conocidos y estandarizados, sino que igualmente, permite el desarrollo de nuevos sistemas. Actualmente, se están desarrollando nuevas tecnologías, tales como Cognitive Radio, que se consideran la base de la próxima generación de los sistemas inalámbricos y de tecnología celular. Igualmente, se tiene como visión que muchos de los componentes de

sistemas de redes de telecomunicaciones cableados e inalámbricos sean basados en sistemas de tipo SDR. Todos estos elementos, motivan a la incorporación de este tipo de sistema en las sesiones técnicas o de laboratorios en las Universidades y Centros de Educación de Ingeniería.

V. CONCLUSIÓN

En este artículo, se presenta el gran potencial que tienen las plataformas SDR, en nuestro caso los USRP. Ya que implementar sistemas de comunicaciones en estas plataformas de manera fácil y rápida.

Los USRP nos permiten hacer pruebas de sistemas que aún están en investigación [14], un ejemplo de esto pueden ser los sistemas de “cognitive radio”. Cabe destacar que a nivel mundial ya se han hecho competencias entre universidades y empresas la cual consiste en implementar sistemas de “cognitive radio” en plataformas SDR.

Los dispositivos presentados en este documento pueden resultar de mucho interés para la telefonía celular, ya que estas plataformas serán las bases para las próximas generaciones de telefonía celular.

VI. REFERENCIAS

- [1] I. Galal, Islam, M. Ibrahim, and H. Ahmed. "Exploring frequency tuning policies for USRP-N210 SDR platform and GNU radio." *Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP), 2013 Conference on.* IEEE, 2013.
- [2] N. Truong., and C. Yu. "Investigating Latency in GNU Software Radio with USRP Embedded Series SDR Platform." *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2013 Eighth International Conference on.* IEEE, 2013.
- [3] Y. Ren, D. Yao and X. Zhang. "The implementation of TETRA using GNU Radio and USRP." *Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), 2011 IEEE 4th International Symposium on.* IEEE, 2011.
- [4] M. Abirami, V. Hariharan, M. Sruthi, R. Gandhiraj and K. Soman, "Exploiting GNU radio and USRP: an economical test bed for real time communication systems." *2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT).* IEEE, 2013.
- [5] M. Kassab, C. Gransart, M. Wahl, M. Berbineau and J. Ehrlich, "Simulation of automotive cooperative system based on Software Defined Radio (SDR)." *ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on.* IEEE, 2011.
- [6] X. Chen, B. Einarsson, and P-S. Kildal. "Improved MIMO Throughput with Inverse Power Allocation—Study using USRP Measurement in Reverberation Chamber." *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE* , vol.13, no., pp.1494,1496, 2014.
- [7] Acerca de Ettus Research. <http://www.ettus.com/site/about>
- [8] F. Berizzi, M. Manterolla, D. Petri, M. Conti and A. Capria, "USRP technology for multiband passive radar." *Radar Conference, 2010 IEEE.* IEEE, 2010.
- [9] A. Mate, K.-H. Lee, and I-T. Lu. "Spectrum sensing based on time covariance matrix using GNU radio and USRP for cognitive radio." *Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), 2011 IEEE Long Island.* IEEE, 2011.
- [10] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal." *Personal Communications, IEEE* 6.4, pp. 13-18, 1999.
- [11] Wiki de GNU RADIO COMPANION.
<http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/GNURadioCompanion>
- [12] S. Jeng, Shiann-Shiun, H. Lin, C. Yin and C. Tsung, "Design of multimode modulator utilizing SDR technology for DVB-T/Wireless Communication Systems." *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, 2008 IEEE International Symposium on.* IEEE, 2008.
- [13] T. Welch and S. Shearman. "Teaching software defined radio using the USRP and LabVIEW." *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2012 IEEE International Conference on.* IEEE, 2012.
- [14] N. Le and B. Scheers. "Implementation of an adaptive OFDMA PHY/MAC on USRP platforms for a cognitive tactical radio network." *Communications and Information Systems Conference (MCC), 2012 Military.* IEEE, 2012.