

DISPOSITIVOS DE BAJO COSTO PARA EL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

LOW-COST DEVICES FOR THE STUDY OF WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

Rafael Aguilar González

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México
r.aguilar@xanum.uam.mx

Alfonso Prieto Guerrero

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México
apg@xanum.uam.mx

Enrique Rodríguez de la Colina

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México
erod@xanum.uam.mx

Resumen

Los equipos de laboratorio representan un costo considerable para cualquier institución educativa. Esto impacta el trabajo de investigación, pero, sobre todo, limita la comprobación de los conocimientos teóricos en la práctica. Los cursos relacionados a telecomunicaciones requieren de equipo como analizadores de espectro para visualizar conceptos fundamentales, en especial en las comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, el costo económico de este equipo lo hace difícil de adquirir. Con la aparición del radio definido por software (SDR) es posible adquirir dispositivos de bajo costo que pueden ser utilizados como analizadores de espectro. Estos dispositivos conocidos como adaptadores RTL-SDR pueden reducir considerablemente el costo del equipo necesario en el laboratorio. En este trabajo se presentan los beneficios de considerar equipo basado en SDR en los laboratorios. También, se describen brevemente las opciones de hardware y software que pueden considerarse para mejorar el aprendizaje de las comunicaciones inalámbricas.

Palabras Clave: Comunicaciones inalámbricas, dispositivos de bajo costo, equipo de laboratorio, radio definido por software.

Abstract

The laboratory equipment represents a considerable cost for any educational institution. This impacts the research work, but most important, limits the verification of theoretical knowledge in practice. The courses related to telecommunications require equipment such as spectrum analyzers, to visualize fundamental concepts, especially in wireless communications. However, the economic cost of this equipment makes it difficult to acquire. With the appearance of software-defined radio (SDR), it is possible to acquire low-cost devices that can be used as spectrum analyzers. These devices known as RTL-SDR dongles can greatly reduce the cost of the equipment needed in the laboratory. This paper presents the benefits of considering equipment based on SDR in laboratories. Also, the hardware and software options that can be considered to improve the learning of wireless communications are briefly described.

Keywords: *Laboratory equipment, low-cost devices, software defined radio, wireless communications.*

1. Introducción

El mundo de las telecomunicaciones a nivel mundial ha crecido en los últimos años. Hoy en día gran parte de la población hace uso en casi todo momento de servicios tales como telefonía celular, internet, radio FM, entre otros. Por lo tanto, existe un gran número de usuarios demandando más y mejores servicios. Aunado a esto, también han surgido diversas empresas que intentan satisfacer estas demandas, proporcionar mejores servicios y ser atractivas para los usuarios. Por lo tanto, es claro que las empresas proveedoras de servicios de telecomunicaciones requieren y requerirán de personal calificado para mantener la calidad de sus sistemas de comunicación. Por lo cual, es indispensable preparar adecuadamente a estudiantes interesados en áreas a fin a estas empresas, sobre todo buscando un enfoque práctico que los ayude a entender los sistemas de comunicaciones actuales y futuros.

Sin embargo, México desde hace tiempo por falta de inversión, enfrenta un rezago en el ámbito experimental y de investigación [ANUIES, 2018]. Motivo por el cual,

carece de herramientas tecnológicas de última generación que faciliten el aprendizaje para los alumnos, especialmente en las escuelas de educación superior de carácter público. Esto puede ser visto con mayor claridad en la creación de laboratorios tecnológicos. Convencionalmente, este tipo de laboratorios requieren bastantes recursos económicos, debido al alto costo de los equipos necesarios. Lo cual provoca que muchos espacios no cuenten con equipo para realizar experimentos básicos y poner en práctica los conocimientos teóricos.

En el caso de las telecomunicaciones y en especial en las comunicaciones inalámbricas, es de alta importancia entender cómo se da su funcionamiento. Las señales radioeléctricas provenientes de estos sistemas de comunicación nos rodean en casi todo momento, pero debido a su longitud de onda, no se pueden apreciar a simple vista [Tomasi, 2011]. Estas señales están cambiando continuamente en el tiempo y son afectadas por el entorno donde se propagan. Una forma adecuada de estudiarlas es mediante el análisis espectral en frecuencia, donde por medio de la teoría de Fourier, se obtiene el comportamiento de una señal de forma clara y precisa [Oppenheim, 1998].

En la actualidad gran parte de los interesados en telecomunicaciones que realizan análisis espectral, lo hacen mediante equipos profesionales llamados *analizadores de espectros* [Final test, (2019)]. Estos dispositivos proporcionan de forma inmediata la respuesta en frecuencia de diversas señales, facilitando el estudio de las comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, aunque estos aparatos son comerciales, el precio que tienen en el mercado los hace difíciles de adquirir. Debido a esto, muchos laboratorios de instituciones educativas o empresas del sector privado no cuentan con analizadores de espectros disponibles o funcionales. Limitando, el estudio práctico de las comunicaciones inalámbricas.

Por lo tanto, es necesario utilizar tecnologías de bajo costo para impulsar el desarrollo y la creación de equipos de laboratorio que ayuden a mejorar el proceso de enseñanza/aprendizaje en licenciaturas que necesitan el respaldo de un laboratorio de prácticas, por ejemplo, ingeniería electrónica o telecomunicaciones, entre otras. Lo anterior es posible para el caso especial de las comunicaciones inalámbricas, gracias al Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés

de *Software Defined Radio*) [ITU, (2019)]. Esta tecnología consiste en configurar mediante software diversos parámetros indispensables en los sistemas de comunicación tales como frecuencia y potencia de transmisión, modulaciones o filtros; lo cual reduce el número de componentes físicos y el costo de los transceptores de radio. En este aspecto, diversos aparatos que en un principio funcionaron como sintonizadores para Televisión Digital Terrestre (TVD-T), hoy en día son usados en diversas aplicaciones en la educación y en la investigación. Estos dispositivos están basados en un receptor con tecnología SDR, en el mercado son conocidos como adaptadores RTL-SDR (dongle RTL-SDR) [Blog RTL-SDR, (2019)]. El costo aproximado de estos adaptadores oscila entre los \$20.00 y \$30.00 dólares para modelos básicos. En el caso de la transmisión de señales con SDR, existe el dispositivo denominado Hack RF One [Hack RF One, 2019]. Por lo cual, mediante un poco de procesamiento de señales es posible tener analizadores de espectro a bajo costo para realizar prácticas de laboratorios.

Este trabajo tiene como objetivo difundir entre los interesados algunas opciones que existen para considerar equipo de bajo costo para el estudio de las comunicaciones inalámbricas. En lo siguiente, se define de forma breve el SDR y su importancia en la educación. Después, se describen de forma general los receptores RTL-SDR y sus aplicaciones. De igual forma, se presenta un dispositivo comercial de bajo costo basado en SDR que puede transitar y recibir señales en diversas frecuencias. También, son mencionadas algunas aportaciones hechas a la literatura que han utilizado los RTL-SDR para crear analizadores de espectro de bajo costo. Por último, se describe brevemente de qué forma se están utilizando estas nuevas tecnologías en los cursos de comunicaciones en la UAM-I.

2. Métodos

Radio Definido por Software (SDR)

El término asignado para SDR según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés de *International Telecommunications Union*), el SDR es un dispositivo de recepción o transmisión que, mediante programas informáticos, puede modificar parámetros tales como

frecuencia de transmisión, potencia de transmisión, modulación, etc. El concepto de SDR, fue presentado en la década de los 90's por Joseph Mitola III, donde se hablaba básicamente de un radio con la capacidad de reconfigurarse [Mitola, (1999)]. Las ventajas de un SDR contra un radio convencional son significativas. En el caso del segundo, el transmisor y el receptor son diseñados para funcionar en una determinada frecuencia. Sin embargo, para operar en otra banda es indispensable volver a diseñar los circuitos, adquirir componentes y ensamblar. Esto, incrementa el costo económico del sistema en todos los sentidos. Contrario a esto, SDR ofrece la posibilidad de transmitir o recibir señales en diferentes frecuencias sin necesidad de cambiar el diseño original del circuito. SDR puede realizar esto mediante programación, esta tecnología considera un arreglo de compuertas programables en campo (FPGA, por sus siglas en inglés de *Field-Programmable Gate Array*) dentro de su circuitería básica [NI, (2019)].

Los SDR han tenido un gran interés entre la comunidad científica, dentro de algunas aportaciones ha surgido el Radio Cognoscitivo (CR, por sus siglas en inglés de *Cognitive Radio*) [Haykin, (2005)].

CR es una tecnología que tiene la capacidad de utilizar bandas del espectro radioeléctrico desocupadas para mejorar la calidad de los sistemas de comunicación y que basa su funcionamiento en el SDR. En términos de dispositivos, el SDR ha sido presentado en diversas plataformas de comunicaciones como el caso de los transceptores periféricos de radio por software universal (USRP, por sus siglas en inglés de *Universal Software Radio Peripheral*). Estos dispositivos han sido de los primeros en aparecer en el mercado, pueden transmitir o recibir señales en diversas bandas y para diversas tecnologías como FM, bandas de radas, etc. Sin embargo, tienen un costo considerable (un modelo básico se encuentra a partir de los \$765.00 dólares [Ettus, (2019)]) y no son sencillos de utilizar. Por lo tanto, la comunidad científica ha buscado otros dispositivos con funciones similares, pero de mucho menor costo que brinden la posibilidad de adquirirlos y experimentar con ellos.

A continuación, se definen algunos de estos dispositivos, sus operaciones y capacidades para ser considerados dentro de la parte educativa.

Adaptador RTL-SDR

El adaptador RTL-SDR también conocido en inglés como *dongle*, es un dispositivo que fue desarrollado en un principio para captar Televisión Digital Terrestre (TVDT) de forma adecuada en diversos aparatos electrónicos. El RTL-SDR contiene principalmente dos componentes, un sintonizador y un demodulador. Hoy en día, en la mayoría de los casos, el sintonizador es el circuito integrado (CI) RT820T o RT820T2 de Rafael Micro [Rafael micro, (2019)] y el demodulador RTL2832U de Realtek [REALTEK, (2019)]. En este último CI, fue donde Antti Palosaari pudo apreciar mediante una aplicación desarrollada por él mismo, que era posible obtener señales moduladas de diversas frecuencias. Desde ese entonces, algunos entusiastas en el tema comenzaron a investigar diversas características y desarrollar programas, entre ellos Eric Fry y Steve Markgraf de Osmocom [Blog RTL-SDR, (2019)].

En la actualidad, existen diversos fabricantes que proporcionan adaptadores RTL-SDR, esto debido a que no existe una patente oficial. Lo anterior proporciona aún mayores ventajas al reducir el costo de venta de estos dispositivos, haciéndolos de mejor alcance. Los RTL-SDR dependiendo del modelo, pueden recibir frecuencias desde los 20 o 30 MHz hasta los 1.7 o 1.8 GHz. Regularmente, tienen un ancho de banda de aproximadamente 2.4 MHz y una resolución de 8 bits. En general el precio de estos oscila entre los \$20.00 y \$30.00 dólares. Sin embargo, existen productos genéricos que pueden encontrarse a menores precios. La tabla 1 muestra un listado de algunos RTL-SDR existentes en el mercado que han sido adquiridos por los autores de este trabajo. También, se resumen las características, precios y el lugar donde se puede adquirir cada uno de ellos. Es posible apreciar como la compañía Nooelec ofrece una gran cantidad de opciones y el soporte necesario para instalación de los diferentes adaptadores [Nooelec, (2019)]. También, esta misma empresa brinda diferentes accesorios para incrementar el alcance de percepción de los RTL-SDR. Otra opción interesante, es la proporcionada por el blog de RTL-SDR [Store RTL-SDR, (2019)], la cual se encuentra en la tercera versión de su dispositivo.

Tabla 1 Algunas opciones de adaptadores RTL-SDR disponibles en el mercado.

RTL-SDR	Fabricante	Rango de operación	Precio *	Sitios de compra
NESDR Nano 3	Nooelec	25 MHz - 1.7 GHz	\$28-33.00	www.amazon.com www.nooelec.com
NESDR Mini 2+		25 MHz - 1.7 GHz	\$24.00	
NESDR Mini		25 MHz - 1.7 GHz	\$20.00	
NESDR Mini 2+		25 MHz - 1.7 GHz	\$24.00	
NESDR SMARt		25 MHz - 1.7 GHz	\$30.00	
NESDR SMARt Tee XTR		65 MHz - 2.3 GHz	\$39.00	
NESDR SMART con adaptador para HF		100 kHz - 1.7 GHz	\$90.00	
RTL-SDR Blog V3	RTL-SDR Blog	500 kHz -1.7 GHz	\$30.00	www.rtl-sdr.com
DVB-T+DAB +FM+SDR	Desconocido	500 kHz - 1.7 GHz	\$19.00	www.aliexpress.com
NEW GEN		25 MHz - 1.7 GHz	\$18.00	
Software Radio HF+FM+RTL-SDR receptor con antena		100 kHz - 1.7 GHz	\$32.00	

*Todos los precios están en dólares, se debe considerar el costo de envío.

Hoy en día, hay una gran variedad de adaptadores genéricos en el mercado. Los autores de este trabajo sólo han tenido la posibilidad de manipular los últimos tres mostrados en la tabla 1, pero las opciones son inmensas. El problema con estos dispositivos genéricos es que, en muchos casos, se desconoce el fabricante y no se tiene certeza sobre la calidad del producto. Sin embargo, pueden ser una buena opción para comenzar a trabajar con los adaptadores RTL-SDR.

Existen diversas formas de procesar las señales provenientes de los RTL-SDR. La forma más sencilla consiste en descargar alguna de las opciones de software disponibles en la red. También, es posible obtener las señales del espectro y procesarlas en Matlab, Python o GNU radio. Sin embargo, esto requiere de mayores conocimientos relacionados al procesamiento de señales. En la tabla 2, se resumen las principales opciones de software disponibles, donde el orden de las opciones representa el grado de recomendación desde el punto de vista de los autores de este trabajo. Estas opciones de software se encuentran en su mayoría disponibles para Windows, Linux o Mac; recientemente han aparecido algunas opciones disponibles para Android.

Tabla 2 Algunas opciones de software para utilizar los adaptadores RTL-SDR.

Software	Sistema operativo	Acceso	Enlace
SDRSharp	Windows / Linux / Mac	Libre	https://airspy.com/download
High Definition Software Defined Radio (HSDR)	Windows / Linux / Mac	Libre	www.hdsdr.de
SDR-Radio	Windows / Linux / Mac	Libre	www.sdr-radio.com
Gqrx SDR	Linux / Raspberry	Libre	http://gqrx.dk
GNU radio	Windows / Linux	Libre	www.gnuradio.org
Matlab	Windows / Linux / Mac	Pago	www.mathworks.com/hardware-support/rtl-sdr.html
RTLSDR Scanner	Windows / Linux / Mac	Libre	https://eartoearoak.com/software/rtlsdr-scanner
RF Analyzer	Android	Libre	https://play.google.com/

La gran mayoría del software de la tabla 2 cuenta con una interfaz en donde se puede apreciar la potencia espectral en una determinada frecuencia, lo cual es similar a tener un analizador de espectro profesional. Algunas de ellas, como el caso de SDRSharp y RF Analyzer permiten grabar muestras en la computadora y procesarlas por separado. En algunos casos las opciones de software son de pago, por ejemplo, Matlab que requiere de una licencia para operar su plataforma completa. Sin embargo, en este caso existe gran cantidad de información desarrollada considerando los RTL-SDR [Stewart, 2015].

Hack RF One

Los adaptadores RTL-SDR son dispositivos adecuados para la recepción de señales, pero no tienen la posibilidad de transmitir. Diseñar o adquirir equipo que tenga la capacidad de transmitir alguna señal radioeléctrica en muchas de las ocasiones resulta costoso y complicado. Esto, sin mencionar que es necesario tener una frecuencia de transmisión asignada o transmitir en las bandas de acceso libre. Entonces, en la parte educativa un tema difícil de llevar a la práctica es la transmisión de señales, en donde uno de los principales tópicos a reafirmar es la modulación.

Desde hace algunos años existen diversas tecnologías para realizar una transmisión de datos de forma inalámbrica, tales como Zigbee, Bluetooth y Lora

entre otras. Sin embargo, el costo de estos dispositivos y la frecuencia de transmisión a la que trabajan los limita para ciertas aplicaciones. Contrario a estos, en el mercado existe un dispositivo que utiliza el SDR para recibir y transmitir señales en modo half dúplex, este dispositivo es conocido como Hack RF One [Hack RF One, 2019]. Entre sus principales características se encuentra el rango de operación que va desde 1 MHz hasta los 6 GHz, con un ancho de banda de 20 MHz. Este dispositivo puede ser visto como un dongle RTL-SDR en la recepción, pero cuenta con una potencia de transmisión desde los -10 dBm hasta los 15 dBm dependiendo del filtro utilizado y la frecuencia de transmisión. También, es posible recibir hasta 20 millones de muestras por segundo con 8 bits en cuadratura. El costo es de aproximadamente \$300 dólares, pero comparado con un analizador de espectro o equipo de transmisión, mantiene un costo inferior. No requiere de una fuente de alimentación extra, basta con conectarlo a un puerto USB.

Hasta el momento una desventaja del Hack RF One comparado con los RTL-SDR es el software de programación. El Hack RF One en su modo de recepción es compatible con la gran mayoría de software de la tabla 2; sin embargo, en su modo de transmisión es operado principalmente mediante GNU radio, lo cual limita las posibilidades de procesamiento. Existen diversas fuentes que presentan ejemplos para realizar modulaciones analógicas y digitales, pero es importante mencionar que GNU radio es un lenguaje complicado de asimilar. Por lo tanto, lo más recomendable es empezar por algún ejemplo e ir modificando los diferentes bloques de programación; esto con el fin de facilitar la curva de aprendizaje y entendimiento [Rodríguez de Haro, 2017].

Analizador de espectro de bajo costo

Después de haber mencionado los dispositivos anteriores, podemos decir que el analizador de espectro de bajo costo es posible y viable. El desempeño de este dependerá del monto deseado para invertir y la aplicación correspondiente. La figura 1 presenta algunas opciones que se pueden tener para percibir el espectro radioeléctrico. En ella se muestran de forma general los componentes principales de los adaptadores RTL-SDR y las opciones de equipo de procesamiento de

señales. En la misma figura se muestra al Hack RF One, con el cual se pueden recibir y transmitir señales. Este último dispositivo, en la parte de transmisión, es preferible que sea instalado con una computadora reciente de más de un núcleo en el procesador.

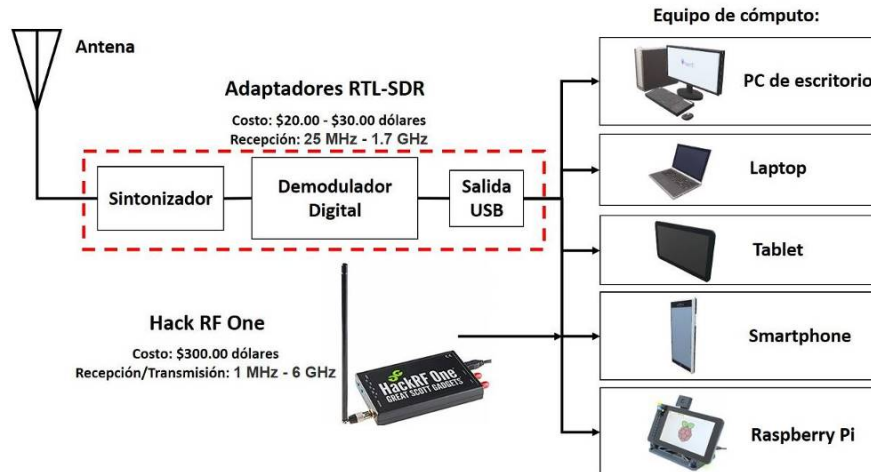


Figura 1 Opciones de dispositivos de SDR y equipo de cómputo para generar un analizador de espectro de bajo costo.

En este mismo aspecto, existen algunos trabajos que han implementado analizadores de espectro de bajo costo utilizando RTL-SDR y diversos componentes electrónicos. A continuación, se presenta un breve resumen de algunos de ellos.

Uno de los primeros trabajos que habla de la inclusión de los RTL y sus oportunidades aparece en [Nika, 2014]. Aquí, los autores de este artículo mencionan algunas dificultades que se presentan para realizar mediciones de espectro debido al costo del equipo. Entonces proponen utilizar el RTL-SDR como un dispositivo de bajo costo que puede ser instalado en computadoras o celulares. Los autores hacen uso de una plataforma de *Crowdsourcing* para cooperar y realizar mediciones de espectro.

Otro de los trabajos donde se pretendía crear una plataforma de bajo costo para realizar mediciones de espectro de acceso remoto aparece en [Calvo-Palomino, 2015]. En este trabajo, se considera a una tarjeta Raspberry y mediante la conexión de red, distintas mediciones del espectro son observadas en una página web.

Después y siguiendo estas mismas ideas, se presenta en [Sierra, 2015] un analizador de espectro de bajo costo con una tarjeta Raspberry Pi 2 y un adaptador RTL-SDR. En este trabajo se considera a GNU radio como el software de procesamiento de señales. Los autores muestran los bloques necesarios para mostrar la potencia espectral y el espectrograma de varias frecuencias de 30 MHz a 1.7 GHz. En [Ball, 2017]. Los autores realizan una comparación entre una computadora portátil y una Raspberry Pi 3, ambas opciones incluyendo un RTL-SDR del blog correspondiente. Aunque los resultados muestran gran similitud, los autores señalan una mínima mejora al incluir una computadora portátil. Sin embargo, también realizan la observación del costo, siendo la opción de Raspberry la más económica. En [Jinto, 2017], aparece una contribución más, los autores presentan el desarrollo de una aplicación en Android para un teléfono inteligente. Mediante esta aplicación, es posible medir ancho de banda, ganancias, frecuencia y potencia espectral, entre otros parámetros.

3. Resultados

Experiencia en la UAM Unidad Iztapalapa

Dentro del laboratorio de comunicación de la UAM-I, se ha comenzado a incursionar en el uso de los RTL-SDR y Raspberry para llevar a cabo demodulaciones de AM y FM. También, se han realizado algunas mediciones de espectro a lo largo de la Unidad Iztapalapa. A continuación, se muestran las formas en que se trabajan buscando mejorar el aprendizaje de los alumnos.

Adaptador RTL-SDR, Hack RF One y computadora de escritorio

En esta opción, consideramos una computadora con el sistema operativo Windows. En este equipo hemos instalado SDRSharp, GNU radio y el Nooelec Mini con su adaptador para altas frecuencias. Mediante SDRSharp podemos observar señales de AM, FM y algunas bandas de celulares. De igual forma puede ser usado el Hack RF One, pero es preferible considerarlo para realizar transmisiones. Las prácticas de laboratorio consisten principalmente en realizar mediciones de potencia espectral y modulaciones/demodulaciones de AM y FM.

En la figura 2, se puede apreciar una computadora de escritorio en donde se considera al Hack RF One para transmitir una señal FM en la frecuencia de 106.1 MHz. En la misma figura, se puede apreciar al adaptador RTL-SDR utilizado mediante SDRSharp para recibir la transmisión proveniente del Hack RF.

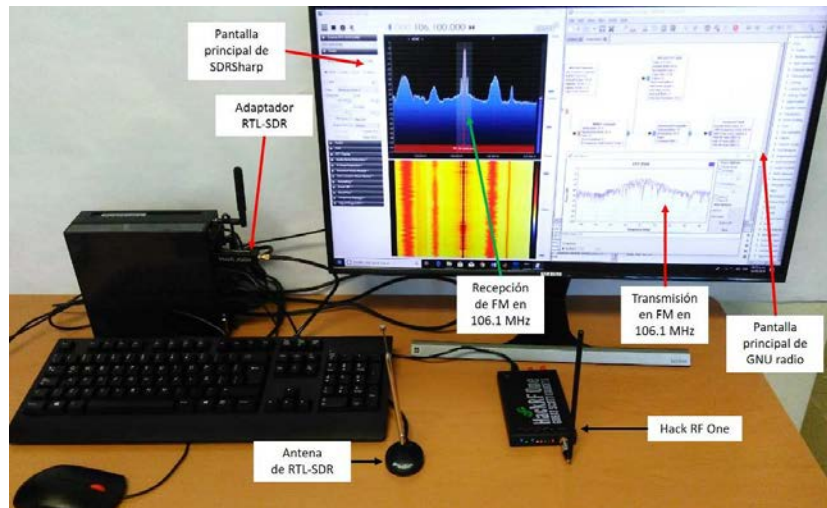


Figura 2 Computadora de escritorio para enviar y recibir señales en diversas frecuencias.

También, en la figura 2, es posible apreciar la pantalla principal de ambas opciones de software, donde aparecen las señales en potencia, el espectrograma y el diagrama a bloques para el caso de GNU radio. Es importante mencionar que, con una computadora de características recientes, es posible transmitir y recibir señales mediante los dispositivos antes mencionados. Para computadoras con procesador de un núcleo, es aconsejable sólo realizar uno de los dos procesos.

Adaptador RTL-SDR, Hack RF One y computadora portátil

En esta segunda opción, es posible considerar el sistema operativo Windows o Linux, en donde se instala el software libre de GNU radio o SDRSharp. En esta opción, se realizan observaciones de señales de 1 MHz hasta los 6 GHz para el Hack RF One o de 20 MHz a 1.7 GHz para el adaptador RTL-SDR. También, es posible realizar demodulaciones de AM y FM. Una parte importante aquí es la opción para modular las señales, entre ellas de AM y FM, lo cual permite realizar una transmisión dentro del laboratorio. De esta manera, los alumnos pueden recibir

diversas señales mediante el RTL-SDR y observar los cambios en el espectro. En la figura 3a, se puede apreciar un Hack RF One conectado a una computadora, utilizando un programa en GNU radio para transmitir una señal de FM en la frecuencia de 105.6 MHz. En la figura 3b, es posible apreciar un RTL-SDR recibiendo esa señal mediante el SDRSharp. La computadora portátil considerada para ambos experimentos es de un núcleo. Por lo tanto, los procesos de transmisión/recepción fueron realizados de forma separada al apreciar que la computadora no tenía la capacidad de llevar a cabo ambas actividades.



a) Computadora portátil y Hack RF One.

b) Computadora portátil y RTL-SDR.

Figura 3 Computadora portátil para recibir y transmitir diferentes señales radioeléctricas.

Adaptador RTL-SDR y Raspberry Pi3

En esta opción, hemos instalado el sistema operativo Raspbian y el software Gqrx SDR en una Raspberry Pi 3. Este equipo, ha sido considerado para realizar mediciones de potencia espectral en distintos lugares y almacenar algunas muestras para su post-procesamiento. En la figura 4 aparece un adaptador RTL-SDR recibiendo algunas señales de FM mediante Gqrx SDR dentro del laboratorio, haciendo uso de una Raspberry Pi 3 conectada a una pantalla. Este equipo puede utilizarse en diferentes lugares dentro del campus universitario e incluso llevar el equipo a casa para realizar tareas o diferentes actividades.

Adaptador RTL-SDR y smartphone

En esta opción, consideramos la aplicación de RF Analyzer y el sistema Android. Esta unión de equipo es considerada para observaciones en múltiples lugares

dentro de la UAM-I, debido a la portabilidad del equipo. En esta conjunción, se realizan observaciones y almacenamiento de muestras de potencia espectral. Los resultados cambian acorde al tipo de antena utilizada y la capacidad de procesamiento del teléfono. Sin embargo, en general proporcionan una buena aproximación de las señales alrededor de las instalaciones educativas.

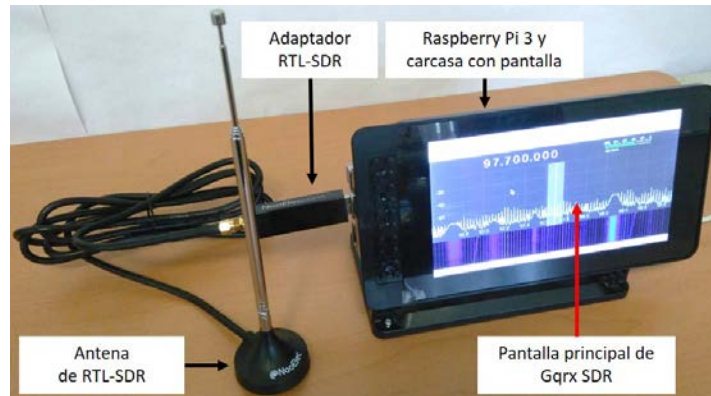


Figura 4 Raspberry Pi 3 y un adaptador RTL-SDR para observar señales radioeléctricas.

En la figura 5, se muestra la aplicación RF Analyzer disponible para Android, incluyendo un NESDR Nano 3. Esta aplicación, en la actualidad es de acceso libre, antes tenía un costo de aproximadamente \$1.00 dólar. Los autores de este trabajo consideran que en definitiva el costo del adaptador y el software están muy por debajo de un analizador de espectro profesional portátil. En este mismo aspecto, otra ventaja es la movilidad proporcionada por ambos dispositivos, lo cual permite hacer observaciones del espectro en casi cualquier lugar.



Figura 5 Analizador de bajo costo considerando un smartphone.

La figura 6a, muestra algunos de las opciones de RF Analyzer para procesar la información proveniente del espectro. Esta aplicación también permite grabar las frecuencias observadas en un archivo .iq, tal como puede apreciarse en la figura 6b. Sin embargo, unos cuantos segundos de grabación podrían generar archivos de gran tamaño, por lo cual no es recomendable realizar este proceso.

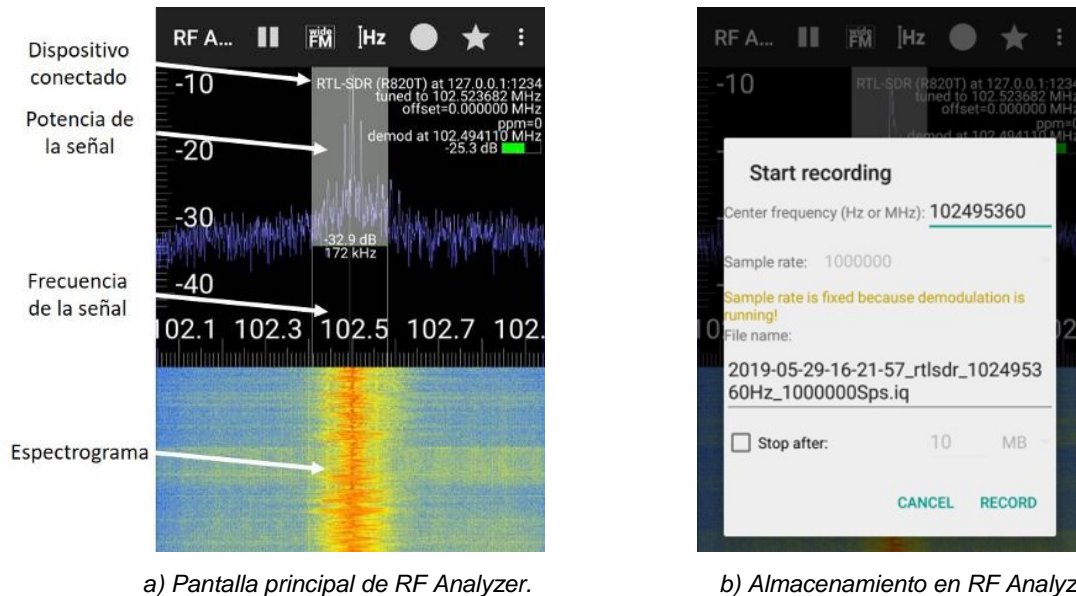


Figura 6 Características importantes del RF Analyzer.

4. Discusión

A continuación, ofrecemos un balance de las posibilidades existentes en la literatura y en el mercado para comparar los precios de las posibles formas de obtener un analizador en cualquiera de sus modalidades. La intención de esta discusión es generar ideas sobre cuáles son las mejores opciones acorde a cada necesidad. Es importante recordar que estas opciones son presentadas principalmente para reducir el costo de la adquisición de analizadores de espectro en el laboratorio. También, es importante mencionar, que en muchos de los casos ya se cuenta con una computadora, motivo por el cual los montos económicos pueden reducirse enormemente. Sin embargo, en la tabla 3 se considera que se parte desde cero y se presenta un costo estimado de los dispositivos SDR en conjunto con diversas opciones de cómputo.

Tabla 3 Comparación de precios y características para obtener un analizador de espectros de bajo costo.

Opción	Costo *, **	Portabilidad	Precisión	Lugar de uso	Capacidad
Analizador de espectros profesional	Desde \$30 000.00	Nula	Excelente	Laboratorios	Recepción
Analizador de espectros profesional portátil	Desde \$100 000.00	Buena	Excelente	Cualquier lugar	Recepción
Computadora de escritorio + RTL-SDR	Desde \$10 000.00	Nula	Buena	Laboratorio y casa	Recepción
Computadora de escritorio + Hack RF One	Desde \$16 000.00	Nula	Buena	Laboratorio y casa	Recepción/transmisión
Laptop + RTL-SDR	Desde \$12 000.00	Buena	Buena	Cualquier lugar	Recepción
Raspberry Pi 3 + RTL-SDR	Desde \$3 000.00	Buena	Buena	Cualquier lugar	Recepción
Raspberry Pi 3 + Hack RF One	Desde \$9 000.00	Buena	Buena	Cualquier lugar	Recepción/transmisión
Adaptador RTL-SDR y smartphone	Desde \$5 000.00	Excelente	Buena	Cualquier lugar	Recepción
Hack RF One y smartphone	Desde \$7 000.00	Excelente	Buena	Cualquier lugar	Recepción

*Los costos de los equipos de cómputo pueden variar **Todos los costos están estimados en pesos mexicanos.

Conclusiones

En este trabajo fue señalada la importancia del equipo de laboratorio en el proceso enseñanza/aprendizaje, sobre todo en los cursos de comunicaciones inalámbricas. También, se presentaron algunas opciones para mejorar el equipo mediante la creación analizadores de espectro de bajo costo basados en los adaptadores RTL-SDR. Sin embargo, es importante mencionar que estos dispositivos pueden no ser tan exactos comparados con analizadores de espectro profesionales. No obstante, en la relación costo beneficio los RTL-SDR son la mejor opción. Es posible que en usos prolongados los RTL-SDR presenten variaciones mínimas en sus mediciones. Por lo tanto, el usuario deberá ajustar la opción acorde a sus necesidades. Lo cual quiere decir que, en caso de necesitar extrema certeza sobre la realización de algún estudio con analizadores de espectro, es necesario adquirir equipo profesional de alto costo. Por otro lado, si la intención es llevar a cabo prácticas en un laboratorio donde los alumnos requieran entender conceptos

fundamentales de las comunicaciones y se cuente con pocos recursos económicos, es ampliamente recomendable utilizar los RTL-SDR. Por ahora, nos encontramos realizando estudios para comparar los RTL-SDR y los analizadores de espectro profesionales. De esta manera será posible cuantificar las diferencias entre ambos dispositivos y ofrecer al usuario final más información sobre estas dos opciones.

5. Revisores, recepción y aceptación de artículo

Recepción artículo: 3/junio/2019

Aceptación artículo: 20/junio/2019

Revisor 1:

Nombre: Javier Vázquez Castillo
Institución: Universidad de Quintana Roo
Cédula Profesional: 10205678
Área de conocimiento: Modelado de canal para comunicaciones inalámbricas
Correo electrónico: jvazquez@uqroo.edu.mx

Revisor 2:

Nombre: Marco Aurelio Cárdenas Juárez
Institución: Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Cédula Profesional: 3704169
Área de conocimiento: Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones
Correo electrónico: marco.cardenas@uaslp.mx

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES). *Visión y acción 2030, Propuesta de la ANUIES para renovar la educación superior en México - Diseño y concertación de políticas públicas para impulsar el cambio institucional*. Ciudad de México, 2018.
- [2] Ball, D., Naik, N., & Jenkins, P. *Lightweight and Cost-Effective Spectrum Analyser Based on Software Defined Radio and Raspberry Pi*. European Modelling Symposium (EMS), 2017. doi: 10.1109/ems.2017.51.
- [3] Ettus (2019). USRP B200mini. <http://www.ettus.com/all-products/usrp-b200mini/>.

- [4] Blog RTL-SDR (2019). <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>.
- [5] Calvo-Palomino, R., Pfammatter, D., Giustiniano, D., & Lenders, V. A low-cost sensor platform for large-scale wideband spectrum monitoring. *International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2015. doi: 10.1145/2737095.2737124.
- [6] Final test (2019). ¿Qué es un analizador de espectro? <https://www.finaltest.com.mx/product-p/art-03.htm>
- [7] Hack RF One - Great Scott Gadgets. (2019). <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>.
- [8] Haykin, S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 23, 201–220, 2005. doi: 10.1109/JSAC.2004.839380.
- [9] Mitola, J. & Maguire, G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6, 13–18, 2019. doi: 10.1109/98.788210.
- [10] ITU (2019). Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS). <https://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2152-2009>
- [11] Jinto, J., Rinsa, E., & Safa, S. Low Cost Android Radio Spectrum Analyzer Using RTL-SDR Dongle. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 6 (4), 4, 2017. doi: 10.17148/ijarcce.
- [12] National Instruments (2019). <https://www.ni.com/fpga/esa/>.
- [13] Nika, A., Zhang, Z., Zhou, X., Zhao, B., & Zheng, H. Towards commoditized real-time spectrum monitoring. *ACM Workshop on Hot Topics in Wireless (Hotwireless)*, 2014. doi: 10.1145/2643614.2643615.
- [14] Oppenheim, A., Nawab, S., & Willsky, A. *Señales y sistemas*. Pearson Educación, 1998.
- [15] Rafael micro (2019). Hoja de datos del circuito R820T https://rtl-sdr.com/wp-content/uploads/2013/04/R820T_datasheet-Non_R-20111130_unlocked.pdf.
- [16] REALTEK (2019). Información general del RTL2832U <https://www.realtek.com/en/products/communications-network-ics/item/rtl2832u>.

- [17] Nooelec (2019). Nooelec Home. <https://www.nooelec.com/store/>.
- [18] Rodríguez de Haro, J. Análisis software y hardware del SDR HackRF One (Tesis de Licenciatura), 2017. Universidad de Granada.
- [19] Sierra, E., & Arroyave, G. Low cost SDR spectrum analyzer and analog radio receiver using GNU radio, raspberry Pi2 and SDR-RTL dongle. IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2015. doi: 10.1109/latincom.2015.7430125.
- [20] Stewart, R., Crockett, L., Barlee, K., & Atkinson, D. Software defined radio using MATLAB® & Simulink® and the RTL-SDR (1st ed.). Glasgow, Scotland, UK: University of Strathclyde. 2015.
- [21] Store RTL-SDR (2019). <https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/>.
- [22] Tomasi, W. *Sistemas De Comunicaciones Electrónicas* (2nd ed.). Pearson Educación de México. 2011.