

# Software Defined Radio as an Educational Learning Tool in Wireless Communications

Ruth Cueva<sup>1</sup>, Master en Pedagogía Profesional, Jaime Calderón<sup>2</sup>, MBA, María José Vallejo<sup>3</sup>, Máster en Química Sostenible, Julián Simbaña<sup>4</sup>, Máster en Automatización, Nelson Media, Dr. En Ciencias Físicas y Matemáticas.

<sup>1, 3, 4</sup>Departamento de Ciencias, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, [ruth.cueva@epn.edu.ec](mailto:ruth.cueva@epn.edu.ec), [maria.vallejo@epn.edu.ec](mailto:maria.vallejo@epn.edu.ec),  
[julian.simbana@epn.edu.ec](mailto:julian.simbana@epn.edu.ec)

<sup>2</sup>Rectorado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, [jaime.calderon@epn.edu.ec](mailto:jaime.calderon@epn.edu.ec)

**Abstract—** *Usually in the wireless communications courses, the practical application of abstract theoretical concepts is not evident. This article presents an intuitive way of the how Software Defined Radio and GNU Radio can be used to understand these concepts. It describes the paradigm, its applications and practical examples related to the reception of Family Radio Service signals and interference characterization in the electromagnetic spectrum.*

**Keywords--** *GNU Radio, bladeRF, LimeSDR, RTL-SDR USRP, HackRF One, FRS, IoT, Interference*

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.115>  
ISBN: 978-0-9993443-1-6  
ISSN: 2414-6390

# La Radio Definida por Software como Herramienta de Aprendizaje Educativa en Comunicaciones Inalámbricas

Ing. Kiara Navarro, Ing. Francisco Canto, y PhD Héctor Poveda  
Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá,  
{ kiara.navarro, francisco.canto, hector.poveda }@utp.ac.pa

**Resumen—**Usualmente en los cursos de comunicaciones inalámbricas no resulta evidente la aplicación práctica de conceptos teóricos abstractos. Este documento presenta de forma intuitiva la utilización de las herramientas SDR y GNU Radio para la comprensión de estos conceptos. Se describe su paradigma, aplicaciones, además de ejemplos prácticos relacionados a la recepción de señales Family Radio Service y caracterización de interferencia en el espectro electromagnético.

**Keywords—**Radio Definida por Software, GNU Radio, RTL-SDR, LimeSDR, bladeRF, USRP, HackRF One, FRS, Caracterización, Interferencia

## I. INTRODUCCIÓN

La Radio Definida por Software (SDR) no es un concepto nuevo. La primera referencia se remonta en los años 80 cuando E-Systems, ahora Raytheon, utiliza el término “software radio” en su boletín de noticias [1]. Sin embargo, no es hasta la década de 1990 cuando Joseph Mitola III, hace la primera publicación científica que describe los principios tradicionales de arquitectura en el artículo “Software Radio: Survey, Critical Analysis and Future Directions” [2].

La primera implementación conocida del concepto SDR se dio para el año 1991 en el proyecto militar estadounidense SpeakEasy, cuyo objetivo principal era implementar más de diez tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas – que en su momento eran las más usadas por las Fuerzas Armadas de Estados Unidos – en un equipo programable, el cual operaría en una banda de frecuencias que abarcaba desde los 2 MHz hasta los 200 MHz. Una meta adicional del proyecto era que el prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código fuente para que así se pudieran tener en cuenta los estándares futuros. Aunque el proyecto inició en 1991, no fue hasta 1995 que se pudo conseguir los objetivos establecidos [3].

Los dispositivos SDRs poseen la particularidad de implementar las etapas de una radio convencional por medio de software sobre una computadora o un sistema empujado, reduciendo abismalmente el tiempo de desarrollo. Debido a esta característica, es posible analizar e interactuar con señales electromagnéticas en tiempo real estudiadas en las materias académicas de comunicaciones inalámbricas en períodos de tiempo no extensivos, todo esto, a un costo de adquisición accesible para las universidades y estudiantes sin tener que rediseñar o modificar la tarjeta física. Las áreas de

conocimiento inmersas en esta filosofía de diseño son diversas. En la Fig. 1 se presenta algunas de las más sobresalientes. A partir de las experiencias de laboratorio, se da inicio a un mar de oportunidades que utilicen todas estas áreas involucradas para la creación de propuestas innovadoras que ayuden a mejorar la transmisión de información dentro del espectro electromagnético, desarrollando el pensamiento analítico del estudiante en su etapa académica.

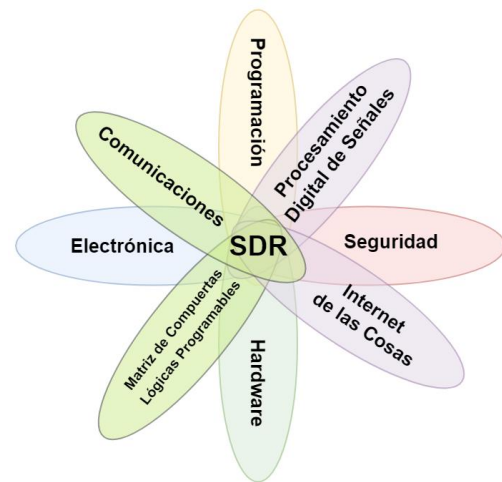


Fig. 1 Áreas de conocimiento que reúne el SDR.

El uso de SDRs en experiencias de laboratorio no es el único campo de aplicación dentro de la academia. Cuando se habla de investigación y desarrollo en comunicaciones inalámbricas, los SDRs tienden a ser la primera opción como herramienta de prototipado ya que permiten fases de verificación y pruebas de concepto en un período de tiempo corto. En los últimos años se ha dado un auge en la exposición de artículos científicos que utilizan plataformas de SDRs para verificar sus análisis teóricos [4-10]. Debido al rápido crecimiento y proliferación de dispositivos inalámbricos que facilitan las actividades del ser humano orientadas a la transmisión de datos, se ha propulsado el uso dentro del espectro RF, de la banda Industrial, Científica y Médica (ISM) que alberga muchas de las tecnologías utilizadas para la conexión de estos dispositivos como: WiFi (IEEE 802.11), Bluetooth, LoRa, SigFox, Zigbee (IEEE 802.15.4). Todas estas tecnologías listadas anteriormente, pueden ser analizadas mediante una placa SDR que cubra la banda ISM. Una de las ventajas de interactuar con estos protocolos inalámbricos es

que, al ser empleados por dispositivos de uso diario para el ser humano, es posible conocer, observar y analizar su funcionamiento mediante una herramienta como el SDR.

Este documento presenta una forma práctica, real y rápida en la aplicación de conceptos teóricos aprendidos que muchas veces resultan no evidentes a primera instancia, en los cursos de comunicaciones inalámbricas. Para esto, se propone el uso de la herramienta SDR, un dispositivo que ha revolucionado la forma en que se entiende y gestiona las radiocomunicaciones. Se describen las etapas que lo conforman, así como una comparativa general de las placas existentes más utilizadas. Adicionalmente, se presentan algunas de sus aplicaciones. En conjunto con el SDR, se propone el uso de la plataforma GNU Radio, un software diseñado para el post-procesamiento de señales en el dominio digital que brinda alta flexibilidad en la configuración de parámetros y una amplia compatibilidad con un gran número de placas. Se detallan las características más sobresalientes de esta plataforma que hasta ahora, ha sido una de las alternativas más populares para la implementación de aplicaciones reales con el objetivo de propulsar aún más su uso en el desarrollo de experiencias de laboratorio universitario. Para comprobar su alta flexibilidad y rápida iteración de implementación en el estudio de conceptos teóricos de comunicaciones inalámbricas, se presenta la implementación de un sistema *Radio Family Service* (FRS) en GNU Radio utilizando como componente transmisor el *bladeRF* y como componente receptor el *RTL-SDR*. Además, se presentan algunas mediciones de densidad espectral de potencia para la creación de un hardware capaz de caracterizar la interferencia del espectro electromagnético.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la Sección II se detalla la arquitectura general de un SDR, en la Sección III, se explica qué es GNU Radio, cómo nació, en qué está basado y su relación con el paradigma SDR. En la Sección IV se describen las placas de hardware comúnmente utilizadas en la academia e investigación. En la Sección V se despliegan algunas aplicaciones en las cuales se pueden utilizar los SDRs. En la Sección VI se presentan los resultados de pruebas experimentales: un sistema de transmisión/recepción FRS y algunos resultados que dan inicio a un prototipo de hardware capaz de caracterizar la interferencia dentro del espectro electromagnético, todo esto con el propósito de mostrar el potencial y utilidad de los SDRs y GNU Radio como herramientas de aprendizaje educativas en los cursos académicos de comunicaciones inalámbricas. Finalmente, en la Sección VII se exponen las conclusiones.

## II. PRINCIPIOS BÁSICOS

Una de las grandes razones por las cuales surge el SDR fue debido a la necesidad de encontrar una forma en la cual una plataforma de hardware permitiese cambios en su modo de operación y procesamiento en sus etapas de modulación, demodulación, detección, mezclado, amplificación, filtrado y codificación a través de software, eliminando casi por su

totalidad el paradigma convencional de efectuar estos cambios en hardware.

En un principio las radios eran diseñadas empleando placas electrónicas con escasos elementos de control a través de software, por lo que su período de vida era reducido llevando a las radios a ser temporalmente reemplazadas e inclusive, descartadas en su totalidad.

Conforme el paso del tiempo, la capacidad de procesamiento de datos en las computadoras aumentó, dando cabida a la sustitución de componentes analógicos dentro de una radio por un conjunto de programas residentes en las computadoras, que trabajarían sobre la señal ejecutando las funciones equivalentes realizadas anteriormente por aquellos elementos analógicos tradicionales.

El principio básico de un SDR es digitalizar la señal de radiofrecuencia (RF) lo más cerca posible de la antena, según las capacidades de los conversores analógicos-digitales. Esta señal RF digitalizada, es entregada a una computadora tradicional u otro dispositivo de procesamiento como ordenador de placa reducida (SBC) donde se aloja un software que realiza el post-procesamiento de la señal, convirtiendo todos los elementos anteriormente analógicos en funciones ejecutadas (modulación, control automático de ganancia, reducción del ruido, entre otros) por un procesador digital. Esto hace que la tecnología SDR expanda el período de vida de las placas electrónicas dedicadas a la transmisión y recepción de señales inalámbricas, a su vez, proporcionando una alta flexibilidad de procesamiento [11].

A pesar de que existen muchos niveles de SDR en la actualidad, y que dependiendo de su aplicación particular así mismo puede variar su diseño, es cierto que todos ellos comparten características generales en su arquitectura. A continuación, se describen los bloques generales:

1) Sección RF: es la responsable de transmitir/recibir las señales de RF adecuándolas y convirtiéndolas a señales de frecuencia intermedia (IF), o bien, amplificarlas o modularlas. La amplificación generalmente se hace mediante amplificadores de bajo ruido (LNA) los cuales, en la etapa de recepción incrementan el nivel de amplitud de señal. A su vez, eliminan la mayor cantidad de ruido proveniente del canal. En la transmisión, sirven para adecuar la potencia de la señal a un valor apto para su envío al canal.

2) Sección IF: es aquella que sirve de puente entre el dominio analógico y el digital. Ya que aquí se da esa transición, la sección IF viene a ser la más significativa dentro de la arquitectura, principalmente debido a la velocidad en que los componentes de conversión realizan las operaciones. En ella se encuentran los módulos analógicos digital o digital analógicos (ADC/DAC) y los bloques de *digital up/down converter* (DDC/DUC). Aquí, en la parte de la recepción, la señal de IF pasa a Banda Base. El proceso inverso ocurre para el caso de la transmisión. En seguida se detalla en mayor profundidad, el funcionamiento de cada uno de ellos.

2.1) Los módulos ADC/DAC: toman la señal de IF analógica y la digitalizan. En algunos SDRs, estos módulos se pueden encontrar comúnmente en los chips transceptores de RF y su frecuencia máxima de muestreo suelen llegar hasta los tantos MHz. Los ADC/DAC no tienen una tarea fácil, y se les conoce como el corazón del SDR, ya que son los que determinan realmente el desempeño del sistema [12]. El motivo de no encontrar hasta ahora tasas de muestreo más elevadas es por evitar, entre otras cosas, resoluciones menores [13]. Cuando se tienen resoluciones bajas, se trabaja consecuentemente con un rango dinámico menor, lo cual, en ciertas aplicaciones no es deseable.

2.2) Los módulos DDC/DUC: se encargan de trasladar las señales de IF digitalizadas a Banda Base dando como resultado una señal en fase-cuadratura (I-Q), esto en la parte de transmisión. El proceso inverso sucede en la etapa de recepción. Los DDC/DUC ayudan a que las etapas de filtrado y requerimientos de procesamiento en los ADC/DAC sean fácilmente más realizables [14]. Estos módulos, para llevar a cabo su función hacen uso de componentes electrónicos elementales como mezcladores, osciladores y filtros pasa baja. Aunque los DDC/DUC se pueden encontrar en los chips transceptores de RF, existe la posibilidad de tenerlos implementados en una matriz de puertas programables (FPGA) [15].

3) Sección Banda Base: Durante la transmisión se encarga de extraer la señal digitalizada en banda base, a una velocidad relativamente baja mediante algún puerto de comunicación para su posterior tratamiento a través de software. Lo opuesto sucede para el caso de la recepción. El tratamiento de la señal, una vez se encuentra en el ordenador, se hace por medio de un procesador de propósito general, donde se ejecutan funciones como: establecimiento de sesión, ecualización, manejo de tiempos de bit, entre otros [16].

Cada uno de los bloques mencionados se pueden observar mediante un diagrama de bloques que se muestra en la Fig. 2

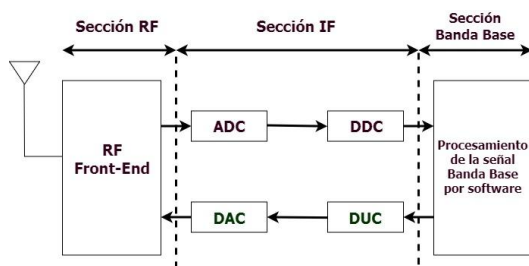


Fig. 2 Diagrama de bloques de un SDR para la transmisión/recepción de señales.

Se dice que el SDR ideal sería aquel que utilice la menor cantidad de componentes de hardware posible. No obstante, hasta ahora esto no es posible debido a la dificultad que implica la construcción de módulos ADCs con tasas de muestreo elevadas. Esto obliga a que se introduzca,

inherentemente, etapas de hardware *front-end* que trasladen la señal de alta frecuencia a una frecuencia intermedia que los ADCs actuales puedan muestrear sin mayor dificultad [17]. A pesar de esto, paulatinamente gracias a la propuesta emergida proveniente del SDR hoy día se tiene una mayor flexibilidad de implementación y fácil modificación de parámetros en los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

### III. GNU RADIO

En esta sección se aporta una breve introducción de la herramienta de procesamiento digital de señales GNU Radio. Incluyendo un poco de historia, descripción de su funcionamiento, así como la razón de por qué este proyecto ha tenido tanto auge y popularidad en los últimos años.

GNU Radio [18] es un proyecto multiplataforma de software libre y código abierto iniciado en el año 2001 y desarrollado mayoritariamente en el lenguaje de programación C++. Fue creado inicialmente por Eric Blossom con el objetivo de proporcionar un conjunto de bloques de procesamiento digital de señales (DSP) que serían utilizados posteriormente, en la simulación y construcción de dispositivos SDRs.

Trabajar con código C++ no es trivial. Se sabe que este lenguaje es no interpretado, de mediano-bajo nivel y que para manejarlo de forma correcta y eficiente, se requiere un extenso grado de conocimiento en cuanto a propiedades de arquitectura de hardware. Si bien C++ ofrece características inherentes como un mayor control en la configuración y rendimiento del hardware a utilizar, también es cierto que añadir capas de abstracción en la manipulación del código, despierta el interés de desarrollo por parte de usuarios que no desean emplear tanto tiempo en conocer a profundidad cómo sacar el máximo provecho al hardware que compila el código, sino más bien en la implementación de aplicación final. Por tal razón, dentro del proyecto GNU Radio, se creó una interfaz gráfica de usuario (GUI) desarrollada por Josh Blum en los años 2006 y 2007 conocida como GNU Radio Companion (GRC), escrita en el lenguaje de programación de alto nivel Python. Esta GUI es el puente de interacción entre el usuario y las librerías de GNU Radio creadas en C++. Permite la conexión de bloques DSP a través de un flujo gráfico, gracias a la implementación de encapsulados de Python (Python wrappers) para los bloques DSP nativos de GNU Radio en C++. Con esta interfaz gráfica, se alcanza un nivel apropiado de abstracción con respecto a la unión lógica de bloques haciendo posible que una persona pueda construir o implementar sistemas de comunicaciones inalámbricas de forma intuitiva y rápida. Cabe destacar, que muchas de las funcionalidades básicas para implementar un sistema de comunicación ya vienen preinstaladas por defecto en GNU Radio, los usuarios, con el conocimiento suficiente, pueden crear sus propios bloques de procesamiento y añadirlos al flujo sin mayor problema.

GRC, ofrece a primera instancia, la oportunidad de ejecutar simulaciones al ciento por ciento mediante software sin la intervención de ningún tipo de hardware. En segunda instancia, permite la interacción con el mundo real mediante su integración con los SDRs. Esto es gracias a un paquete conocido como Osmocom [19], encargado de proporcionar una capa de abstracción entre GNU Radio y los drivers de las distintas placas. Su fácil integración con la vasta gama de SDRs en el mercado [20], es lo que ha llevado al proyecto a obtener gran popularidad en la comunidad internacional de desarrolladores y usuarios de Radio Definida. Uno de los SDRs más comúnmente utilizados en conjunto con GNU Radio es el SDR-RTL del cual se expondrá información en la Sección III.

GNU Radio no es la única opción en la actualidad para trabajar con dispositivos SDRs. Sin embargo, lo que destaca a esta herramienta del resto de otros proyectos y posicionarse como uno de los *frameworks* más poderosos hasta la fecha, es la forma en la cual las muestras se desplazan a lo largo de la cadena de procesamiento. Existe un *scheduler* [21] en el código base de GNU Radio, encargado de mover las muestras de un bloque DSP a otro. Su atributo principal consiste en el desplazamiento de extensos bloques de muestras almacenados en memoria, en vez de moverlos muestras por muestras. Esto trae como consecuencia que el procesamiento de los datos sea más eficiente, robusto y, por consiguiente, más rápido, lo cual es un factor fundamental a la hora de trabajar en aplicaciones de procesamiento digital de señales en tiempo real.

Existe un sin número de aplicaciones donde GNU Radio ha sido utilizado. Por ejemplo, en la decodificación de señales de TV Digital en DVB-T, otras, en la creación de estaciones GSM, etc. Adicionalmente, GNU Radio es utilizado como herramienta demostrativa de tecnologías inalámbricas, entre las cuales se encuentran: RFID, ZigBee, WiFi, LTE, por mencionar algunas. Al ser un proyecto libre y de código abierto, cuenta con el apoyo de un amplio equipo de usuarios y desarrolladores dedicados a mejorar las funcionalidades técnicas y a esparcir el conocimiento de la plataforma. Uno de los eventos anuales de mayor influencia es el GNU Radio Conference [22], iniciado desde el 2001, donde se exponen conferencias, talleres y demostraciones de conceptos teóricos aplicados a la práctica por parte tanto de la industria, gobierno, aficionados y academia (universidades, estudiantes e investigadores).

#### IV. DISPOSITIVOS SDRS MÁS UTILIZADOS

El SDR utiliza un concepto que tiene como objetivo integrar varios protocolos de comunicación de ondas electromagnéticas en un mismo dispositivo, pero cada una de estas interfaces ya sea FM, Wi-Fi, Bluetooth, entre otras, requieren de un chip integrado específico que le permita cambiar la señal recibida en voltajes para luego pasarlas a bits y viceversa al recibir y enviar información, ahora el objetivo principal es utilizar un chip o hardware universal que solo

dependa del software, esto quiere decir que con el mismo hardware se pueda implementar virtualmente todos los protocolos de comunicación que se desee, únicamente ejecutando aplicaciones en computadora o cualquier dispositivo interactivo, (inteligente) lo cual simplifica el diseño, disminuye las dimensiones física y reduce costos [23].

Con los avances tecnológicos que ha tenido el área de semiconductores, ahora es cada vez más accesible la adquisición de placas de circuitos con respecto a décadas pasadas. La producción de Sistemas en Chip (SoC) se ha aumentado, haciendo que los precios de estos sean más accesibles, permitiendo que nuevas plataformas a base de este componente salgan a relucir en el mercado, dentro de aquellas, los SDRs.

El catálogo actual de SDRs en el mercado es amplio. Algunos tienen con un costo de adquisición que van desde 19 USD hasta por encima de 2000 USD. El precio final del equipo está dado, en la mayoría de los casos, por las características técnicas que éste posea.

Las propiedades que influyen en gran proporción el precio del SDR suelen ser: transmisión full o half dúplex, potencia de transmisión variable, integración de chips DSP o FPGA *on-board* listos para usar o de tipo hazlo tú mismo (DIY), capacidad de recepción y/o transmisión, rango de frecuencia, resolución de los ADC/DAC, ancho de banda, frecuencia máxima de muestreo, así como la conectividad y compatibilidad con herramientas de post-procesamiento en software.

En este apartado se presentan de forma general, las plataformas de SDRs más utilizadas en la academia e investigación.

##### A. RTL-SDR

Es el dispositivo SDR de menor costo, usa tanto el chip RTL2832U como el R820T. El RTL2832U es un demodulador con interfaz USB 2.0 y un ancho de banda de 8MHz. El R820T es un sintonizador de baja potencia basado en un amplificador de bajo ruido, un mezclador, un PLL, un regulador de voltaje y un filtro de seguimiento [24].

Entre sus características principales se encuentra: un rango de frecuencia que abarca desde los 42 a 1002 MHz, muestreo de señales hasta 3.2 MHz utilizando una máxima potencia de transmisión de hasta 10 dBm. Existen muchos sitios webs donde este aparato puede ser comprado, así como una diversa variedad de fabricantes que exponen su venta.

El RTL-SDR es la primera opción de compra para iniciantes en el estudio y aprendizaje de las comunicaciones inalámbricas, debido a su precio, y sus características. En la Fig. 3 se presenta una imagen que representa una de las versiones físicas del RTL-SDR.

##### B. bladeRF

bladeRF [25] es una tarjeta SDR de gama media

libre y de código abierto creada por la compañía Nuand financiada sobre la plataforma Kickstarter [26] en el 2003.



Fig. 3 Dongle RTL-SDR.

Sus principales componentes son un FPGA Cyclone IV de Altera en conjunto con el transceptor RF LM6002D. bladeRF es un transmisor/receptor full dúplex que permite captar señales con un ancho de banda máximo de 28 MHz.

Cubre todo el espectro de frecuencia UHF y poco más, ya que va desde los 300 MHz hasta los 3.8 GHz. En su interior, posee unos ADCs/DACs que muestrean la señal a un máximo de 40 Msp/s utilizando una resolución de 12 bits. Ofrece compatibilidad para trabajar con GNU Radio por medio de la capa de abstracción que ofrece Osmocom y se puede conseguir en el mercado actual en aproximadamente 420 USD. En la Fig. 4 se muestra una imagen del bladeRF.



Fig. 4 Placa bladeRF.

### C. LimeSDR

LimeSDR es uno de los SDRs que recientemente han salido en el mercado. En la Fig. 5 se muestra la tarjeta física. Fue creado por la empresa LimeMicro. Su software y hardware es de código abierto. El rango de frecuencia que éste SDR puede trabajar va desde 100 kHz hasta los 3.8 GHz. Sus elementos fundamentales son el transceptor LM7002M, y un FPGA Cyclone V de Altera. Su precio oscila entre los 299 USD.



Fig. 5 LimeSDR. Fuente: [27]

Las aplicaciones en las cuales se ha visto la utilización de esta plataforma han sido en la recepción de paquetes sobre tecnología móviles como UMTS, LTE, GSM, o de Internet de las Cosas tal como: LoRa, Bluetooth, y Zigbee.

### D. HackRF One

HackRF es uno de los primeros SDRs libre y de código abierto que salió a flote en el mercado. Su creador es Michael Ossmann, investigador en el campo de seguridad para comunicaciones inalámbricas y fundador de la empresa Great Scott Gadgets. HackRF One, ofrece un amplio rango frecuencial de operación ya que va desde los 1 MHz hasta los 6 GHz.

Posee una frecuencia de muestreo de hasta 20 Msp/s. Para la conversión analógica digital o digital analógica utiliza ADCs/DACs con una resolución de 8 bits. Puede actuar tanto como transmisor y receptor, pero no al mismo debido a que viene en modo half duplex. Su precio en el mercado oscila alrededor de 328 USD. En la Fig. 6 se muestra el dispositivo HackRF One.



Fig. 6 HackRF One. Fuente: [28]

### E. USRP

USRP es una serie de tarjetas SDRs, quizás las más conocidas a nivel mundial. La empresa de fabricación es Ettus Research, fundada por Matt Ettus, ex-desarrollador del proyecto GNU Radio. A diferencia de los demás equipos mencionados anteriormente, el USRP utiliza en la mayoría de sus dispositivos, un paradigma de implementación ligeramente alterno. En vez de utilizar una única tarjeta principal, emplean dos. Una llamada placa madre (*motherboard*) y otra denominada placa hija (*daughterboard*). La placa madre se encarga de muestrear las señales gracias a los ADCs y DACs que posee en su interior, además de poseer un FPGA que ejecuta procesos críticos de operación. Mientras tanto, la placa hija es la que contiene toda la etapa de RF *front-end*. Al ser una plataforma que utiliza la metodología placa madre-hija, brinda mayor flexibilidad en la cobertura frecuencial de las señales a estudiar, sin embargo, de todos los SDRs mencionados en este artículo, la gama USRP es el que tiene el costo adquisitivo más elevado. Cabe destacar que recientemente Ettus Research lanzó SDRs con el esquema *single-board*. Aun así, la mayoría de sus equipos se basan en el paradigma antes mencionado. Su precio mínimo



ronda los 845 USD. En la Fig. 7 se presenta el USRP N210.



Fig. 7 USRP N210.

La elección del SDR va a depender de las necesidades técnicas de la aplicación o la experiencia de laboratorio que se quiere realizar. En general, todos los equipos mencionados en este apartado pueden servir para implementar modulaciones analógicas y digitales típicas de cualquier curso de comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, cuando se desea tener un conocimiento más adentrado en el área, opciones como el bladeRF tienden a ser más acertadas debido a la vasta modificación de sus parámetros de configuración.

Por otro lado, si el estudiante quiere adentrarse de forma progresiva, la opción recomendada en este caso sería el RTL-SDR, ya que al ser un SDR de gama baja, el costo de adquisición del dispositivo es accesible al público en general, no obstante, éste no posee gran flexibilidad en la modificación de parámetros eléctricos así como en su capacidad de procesar información por medio de hardware, a como se podría hacer con el bladeRF que ya viene con un FPGA integrado preparado para implementación de procesamiento de señales por defecto.

## V. APLICACIONES BASADAS EN GNU RADIO Y SDR

Santiago Romero en su artículo, presenta algunas de las aplicaciones de SDR utilizando GNU Radio, como desarrollo de diferentes sistemas de comunicaciones de bajo costo tales como receptores de AM, FM y ADS-B utilizando plataformas de hardware y software libre [29].

Son muchas las universidades de primer mundo que están utilizando GNU-Radio en sus laboratorios. En 2011 Iván Pinar Domínguez y Juan José Murillo Fuentes de la Universidad de Sevilla, publican su libro: Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software, donde se presentan diversos ejemplos utilizando SDR específicamente el USRP, implementados tanto en GNU Radio, como en Matlab. Estos ejemplos incluyen primero el uso del USRP como analizador de espectro y osciloscopio, para pasar luego a presentar sistemas de transmisión con modulaciones QPSK y DQPSK, BPSK, GMSK y OFDM. En sus ejemplos hace énfasis, además, en los aspectos relacionados con el ancho de banda,

muestreo, y los problemas que aparecen en los convertidores, interpoladores y diezmadores [30].

En la actualidad, el alcance de los SDRs se ha extendido no solo en áreas académicas y de investigación, sino también en campos de astronomía, sistema de radar, rastreo aéreo y marítimo, medicina, radio aficionados, estaciones meteorológicas satelitales, estaciones base de telefonía celular [31], transmisión de TV Digital [32] entre otras.

Esta sección se enfoca en describir dos aplicaciones destacables en las cuales los SDRs pueden utilizarse, proporcionando un panorama general de casos de uso.

### A. Construcción de estación base en el Sistemas Global para Comunicaciones Móviles (GSM)

La telefonía celular ha sido una de las industrias que ha mejorado muchas de sus funcionalidades a pasos vertiginosos en los últimos años. Hoy en día, las redes celulares se han convertido en una de las primeras opciones para la conectividad de cosas en el campo de Internet de las Cosas (IoT), gracias a su estabilidad, consolidación y diseminación. Un ejemplo de cosas que puedan fácilmente integrarse a redes celulares son: Electron de Particle [33] o GPy de PyCom [34]. Dentro de estas redes, se encuentra la tecnología de segunda generación GSM, utilizada para el envío de mensajes cortos.

El alcance de GNU Radio y el paradigma SDR es tan versátil que es posible crear una estación base (BST) de GSM con estas dos herramientas. Quizás uno de los proyectos de mayor relevancia, debido a que implementa en su totalidad el *stack* de GSM es OpenBTS. Una prueba experimental se presenta en [35] donde los autores describen proyectos relacionados, introducen el hardware utilizado, siendo en este caso un SDR de la familia USRP de la compañía Ettus Research y presentan finalmente los pasos para su implementación a bajo costo reducido en comparación con el sistema tradicional.

### B. Rastreo aéreo

Es común que las compañías aéreas brinden información en tiempo real sobre el estado de sus vuelos activos tanto al equipo que maneja el tráfico de control en los aeropuertos de llegada/salida, así como a sus clientes. Para ello, convencionalmente se utiliza dentro de los aviones el Sistema de Vigilancia Dependiente Automática (ADS-B) que abre paso a la adquisición de variables como: posición exacta, velocidad, altura con respecto al suelo, código de vuelo, tiempo de vuelo, horarios de despegue y aterrizaje entre otras. Este tipo de sistemas es automático, lo que quiere decir que el piloto no debe realizar una acción específica para que la información de variables sea transmitida. Integrar este tipo de estándar permite una serie de ventajas, entre las que resaltan: eficiencia en el conocimiento del estado del tráfico aéreo activo en una determinada región y mejoramiento en la

asesoría a pilotos de cabina en caso de situaciones de emergencia, por mencionar algunas.

En la actualidad, existe programas que corren sobre distintas plataformas de software o lenguajes de programación que permiten a una placa SDR, ya sea de gama baja o avanzada, recibir la información enviada a través de este estándar sin mayor dificultad. Un ejemplo de ello se ilustra en [36] donde se utiliza un RTL-SDR como dispositivo receptor y se muestra cada uno de los pasos a seguir para la construcción apropiada de antenas, así como la configuración de cada uno de los softwares involucrados para finalmente visualizar los datos en un mapa mediante un explorador web.

## VI. ESTUDIOS EXPERIMENTALES: TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE SEÑALES EN FRS, CARACTERIZACIÓN DE INTERFERENCIA EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Una vez teniendo conocimiento de las aplicaciones en las cuales se puede usar el SDR, se muestra en esta sección los resultados de estudios experimentales realizados con los dispositivos bladeRF y el RTL-SDR. Como primer punto, se describe cómo crear un sistema de comunicación FRS utilizando GNU Radio y GQRX. El objetivo principal de esta demostración, es promover la adopción de la tecnología SDR en conjunto con las herramientas de software, principalmente GNU Radio Companion, para el aprendizaje académico en cursos de comunicaciones inalámbricas dictados en la academia. Es necesario recalcar que este ejemplo no es una contribución enteramente propia ya que parte de un estudio base en [38]. En este sistema, existen ciertas diferencias destacables a las expuestas en este artículo, como la utilización de una señal pre-grabada de voz, un SDR-RTL como dispositivo receptor de hardware, además de analizar la señal por medio del software de visualización GQRX. Esto es con la meta de aseverar las ventajas y resaltar las características mencionadas en este artículo sobre el potencial académico de los SDRs.

El estándar FRS contiene un total de catorce canales, cada uno con un ancho de banda de 12.5 kHz que van desde 462.5625 MHz hasta 467.7125 MHz. Se utiliza en aplicaciones de corta distancia, siendo el ejemplo más la comunicación por *walkie talkies*. Su uso ha sido ampliamente adoptado en compañías que buscan una solución de bajo costo para la comunicación inalámbrica de sus integrantes. Las radios convencionales que ofrecen compatibilidad en FRS utilizan Frecuencia Modulada en Banda Estrecha (NBFM) con una desviación máxima de frecuencia de 2.5 kHz.

Para el diseño del transmisor FRS se tuvo en consideración el siguiente esquema mostrado en la Fig. 8. Allí, los bloques representan las funcionalidades específicas que ejercen cada uno de los bloques principales en GNU Radio.

Para llevar a cabo una transmisión de este tipo, se ha decidido utilizar un bladeRF configurado a un ancho de banda de 6 MHz, con una frecuencia de muestreo de 8 Mbps a una

frecuencia central de 464.9375 MHz. Estos parámetros no han sido seleccionados al azar, se ha establecido así ya que ofrecen la transmisión de varios canales sin necesidad de ejecutar un cambio de frecuencia por hardware. El primer bloque “Fuente de Audio” es utilizado como el mensaje de voz a enviar. Su representación en GNU Radio es mediante el bloque “Wav File Source”.

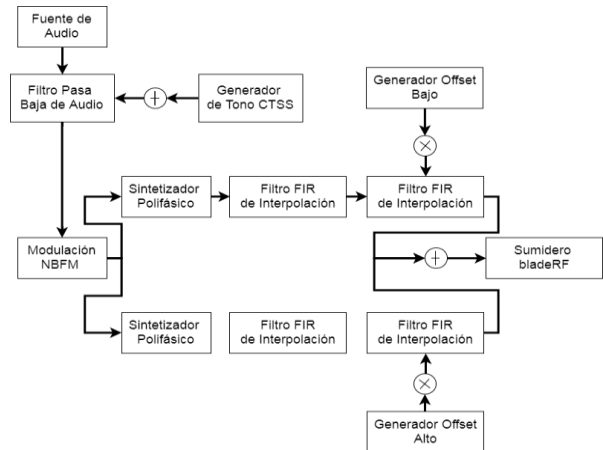


Fig. 8 Diseño representativo del transmisor FRS en GNU Radio.

Posteriormente, se agrega un filtro pasa baja que asegure que las componentes de frecuencia a transmitir, en efecto sean las que se encuentran dentro del rango de voz humano, aproximadamente 3.125 kHz. Un generador de tono *Continuous Tone-Coded Squelch Sytem* (CTSS) es agregado al sistema con motivo de proporcionar al receptor una forma de filtro para reducir la interferencia que puede haber al tener varias fuentes cercanas transmitiendo por el mismo canal. Esta implementación se hace mediante el bloque “Interpolation FIR Filter”. Luego, se introduce la modulación NBFM mediante el bloque “NBFM Transmit”.

Así pues, una vez teniendo la señal de audio modulada, ésta es ingresada a dos sintetizadores polifásicos que combinan los diferentes canales de FRS para formar una única señal. El por qué de utilizar dos en vez de uno, es debido a que el sistema divide los catorce canales de FRS en dos partes iguales para su futura traslación a una frecuencia baja y alta desfasada con respecto a la frecuencia central. El primer filtro entonces combina los canales 1 a 7 y mientras que el otro los 8 al 14. En GNU radio, estos filtros polifásicos se agregan con el bloque “Polyphase Synthesizer”. Los siguientes filtros de interpolación se encargan de aumentar la frecuencia de muestreo a la establecida en el bladeRF. La utilización de dos filtros en cada ramal es para aliviar la carga computacional y su implementación en GNU Radio es a través de los bloques “Interpolating FIR Filter”.

Paralelo a eso, se utilizan el Generador Offset Bajo y Alto para trasladar las señales en banda base provenientes de los filtros de interpolación, a una frecuencia baja y alta desfasadas con respecto a la frecuencia original de transmisión FRS. Esto,



para evitar problemas de balance IQ. Para ello, se han utilizado los bloques “Signal Source”.

Finalmente, estas dos señales se suman para ser enviadas al medio inalámbrico mediante el bladeRF. El módulo Osmocom a través de su bloque “osmocom Sink” es el encargado de integrar el bladeRF con GNU Radio.

La Fig. 9 muestra el diagrama en cascada de la transmisión en GNU Radio de una señal de voz por el canal cinco que equivale a la frecuencia central 462.6625 MHz utilizando bladeRF como SDR transmisor. Se ve claramente como a lo largo del ancho de banda del primer grupo de canales 1 a 7, existe una señal de transmisión de aproximadamente -20 dB de potencia.

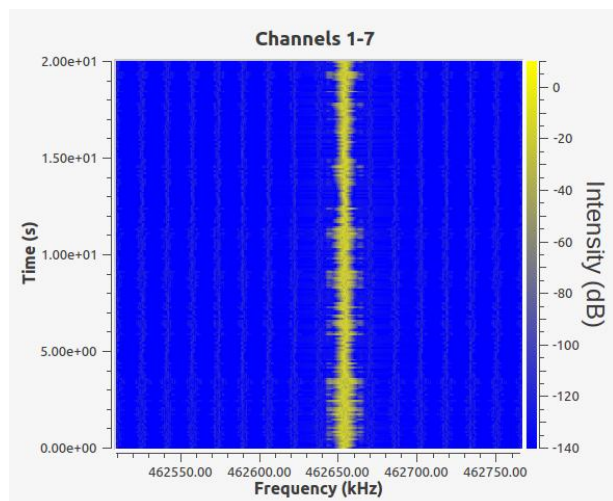


Fig. 9 Diagrama de cascada en la transmisión de señal FRS en GNU Radio con bladeRF.

En la Fig. 10 se muestra una imagen de los resultados obtenidos en la etapa de recepción utilizando el visualizador GQRX y el RTL-SDR como receptor. El diagrama en cascada muestra como la señal proveniente del bladeRF es demodulada a la frecuencia 462.627 MHz. Se sabe que se transmitió la señal en el canal cinco y que este valor no concuerda con la frecuencia exacta. Esto pasa debido al desfasaje de reloj que hay en cada uno de los osciladores locales de los SDR, pero que inminentemente a pesar de eso, la señal se pudo encontrar con facilidad al observar el pico de señal aproximadamente a -20 dB de potencia, similar a lo mostrado en GNU Radio.

En trabajos anteriores como el expuesto en [39], se han visto diferentes sistemas implementados utilizando la familia USRP para la transmisión y recepción de señales FM, video en DVB-T, analizador de espectro, entre otros, en conjunto con GNU Radio. Demostrando que es posible utilizar plataformas SDR para el aprendizaje práctico y rápido de los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, los SDRs, dada su flexibilidad de programación por software, dan paso al desarrollo de nuevos enfoques que pretenden dar soluciones a problemas actuales en la transmisión de señales.

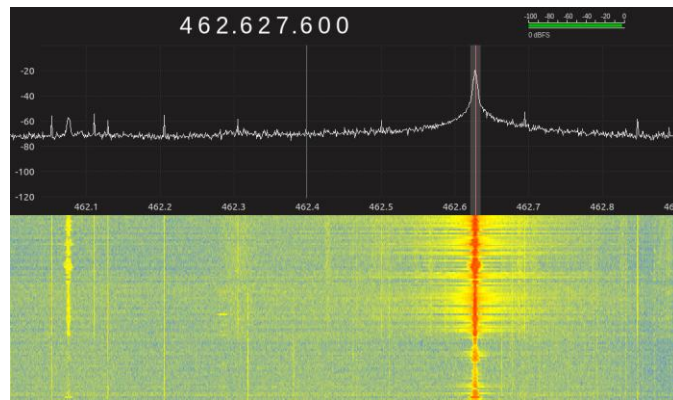


Fig. 10 Recepción de señal FRS en GQRX con RTL-SDR.

Por este motivo, en esta última sección, se presenta los resultados iniciales obtenidos en la creación de un prototipo de hardware para el análisis y caracterización de interferencia en el espectro electromagnético.

En la Fig. 11 y 12 se muestran sin ningún tipo de transmisión activa, la densidad espectral de potencia para las bandas de frecuencia en 0.7 GHz y 1.9 GHz respectivamente centradas en banda base, captadas por el bladeRF con un ancho de banda de 1.5 MHz. Las mediciones se realizaron en ambientes interiores utilizando iteraciones de cinco segundos de duración tomando el valor promedio.

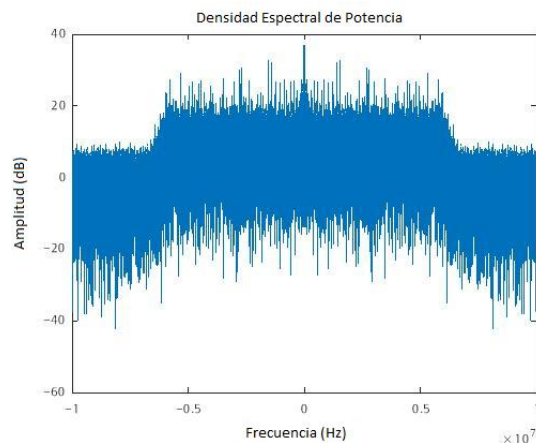


Fig. 11 Densidad Espectral de Potencia para la banda de 0.7 GHz.

Los trabajos futuros relacionados con estos resultados buscan el desarrollo de algoritmos basados en modelos matemáticos que caractericen la interferencia de señales para distintos protocolos de comunicaciones inalámbricas como WiFi, Bluetooth, ZigBee o Lora, siendo éstos aplicados por medio de GNU Radio en los niveles de capa física y enlace de datos.

Hasta ahora, las densidades espectrales de potencia demuestran que es posible crear un prototipo basado en SDR capaz de adaptarse en una vasta mayoría de bandas de

frecuencia, independientemente del protocolo de comunicación utilizado.

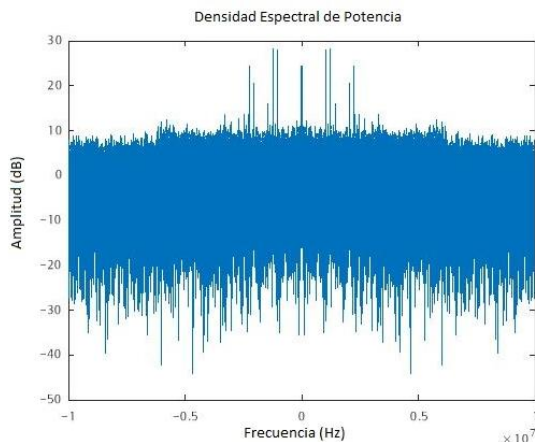


Fig. 12 Densidad Espectral de Potencia para la banda de 1.9 GHz.

## VII. TRABAJOS FUTUROS

La plataforma SDR al ser un paradigma que combina varias áreas asociadas a las comunicaciones inalámbricas y electrónica, puede verse como un componente sumamente enriquecedor en la academia. Por lo tanto, trabajos futuros que implementen actividades de laboratorio utilizando esta herramienta ayudarán a maximizar el impacto de los conceptos teóricos dados de forma transversal en las carreras de ingeniería o de maestría.

## VIII. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado cómo la creciente tecnología SDR puede servir como herramienta de aprendizaje para experimentar y comprender, desde la práctica real, aquellos conceptos abstractos discutidos en cursos de comunicaciones inalámbricas. Al ser los SDRs una plataforma con más de casi treinta años de desarrollo, hoy en día es posible la inclusión de estas placas en laboratorios académicos, e inclusive utilizarlos para la corroboración de resultados teóricos expuestos en investigaciones científicas.

Cabe resaltar que, dentro de la etapa académica de los estudiantes de ingeniería, la interacción que puedan tener con experiencias prácticas es un pilar fundamental, ya que le ayudan a interiorizar su base de conocimiento proporcionándoles mayor seguridad al momento de encarar un proyecto de su carrera profesional. Las aplicaciones de este paradigma tecnológico no solo se limitan a las experiencias de laboratorio e investigación, sino también a la creación de nuevas tesis de licenciatura o maestría que aporten al avance de las radiocomunicaciones, una de las áreas más importantes a nivel mundial.

En la actualidad, no hay cabida alguna que refute cómo la tecnología SDR se ha posicionado como una solución atractiva en el desarrollo de mejores sistemas inalámbricos.

Se concluye que GNU Radio, el popular proyecto libre y de código abierto se ha consolidado a lo largo de los años como la herramienta por excelencia en el análisis de señales de radio mediante las placas SDRs. Gracias a su versatilidad, ultra flexibilidad, alto rendimiento y capacidad de configuración, GNU Radio abre puertas a prototipos reales de hardware que permiten interactuar con tecnologías inalámbricas de punta en un intervalo corto de tiempo.

Con GNU Radio Companion, es posible iniciar el despliegue de sistemas de comunicaciones en tan solo minutos, debido a su implementación en Python para generar la interfaz gráfica dejando toda la parte de procesamiento a los bloques DSP en C++. GNU Radio se considera un instrumento catalizador para despertar el interés de desarrollo en disciplinas profesionales que requieran la elaboración de sistemas de comunicaciones inalámbricas en las capas más bajas y complejas del modelo TCP / IP.

Experimentaciones concretas fueron expuestas en este artículo. Se mostró cómo implementar un sistema FRS para la transmisión y recepción de señales de audio utilizando dos tipos distintos de SDR, el bladeRF de gama media y el RTL-SDR de gama básica. Vale destacar que esta experiencia, no es una contribución enteramente nueva ya que se ha visto antes en otras fuentes, pero que sirve como ejemplo claro y contundente para fortalecer las ideas expuestas en este artículo.

Adicionalmente se mostraron algunos resultados iniciales que muestran la posibilidad de implementar prototipos de hardware basados en tecnología SDR con el objetivo de caracterizar la interferencia dentro del espectro electromagnético, trayendo posibles soluciones en la interacción paralela de varias tecnologías inalámbricas que tienen uso compartido del espectro, con especial interés en aquellas utilizadas para aplicaciones IoT.

La meta principal de este documento ha sido proporcionar un panorama general de las oportunidades que se tiene con la plataforma SDR en conjunto con la herramienta GNU Radio, de forma que los futuros ingenieros o con aspiración a estudios superiores, en sus etapas de educación universitaria tengan la experiencia de aprender haciendo, divertirse, experimentar y desarrollar con mayor libertad aplicaciones de comunicaciones inalámbricas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido el apoyo parcial de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Investigación de Panamá (SENACYT) a través del proyecto “Mejorando la calidad de la educación superior a través del estudio e implementación de una red inalámbrica de 5G (ITE15-021)” y el “Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá (SIN 153-2017)”.

## REFERENCIAS

- [1] M. Dumas. (2013, Consulted Aug 2014). A short history of software-defined radio (SDR) technology. Disponible en: <https://www.nutaq.com/blog/short-history-software-defined-radio-sdr-technology> Visto el: 25-11-2017
- [2] J. Mitola III. Software radios: Survey, critical evaluation and future directions. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 8(4):25–36, 1993.
- [3] Lackey, R. I., & Upmal, D. W. (1995). Speakeasy: the military software radio. *IEEE Communications Magazine*, 33(5), 56-61
- [4] Baldini, G., Sturman, T., Biswas, A. R., Leschhorn, R., Godor, G., & Street, M. (2012). Security aspects in software defined radio and cognitive radio networks: A survey and a way ahead. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(2), 355-379.
- [5] van Rijbergen, K. (2016). The effectiveness of a homemade IMSI catcher build with YateBTS and a BladeRF. University of Amsterdam.
- [6] Sarijari, M. A., Marwanto, A., Faisal, N., Yusof, S. K. S., Rashid, R. A., & Satria, M. H. (2009, December). Energy detection sensing based on GNU radio and USRP: An analysis study. In *Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on* (pp. 338-342). IEEE.
- [7] Costanzo, S., Spadafora, F., Di Massa, G., Borgia, A., Costanzo, A., Alois, G., ... & Moreno, O. H. (2013). Potentialities of USRP-based software defined radar systems. *Progress in Electromagnetics Research B*.
- [8] Berizzi, F., Martorella, M., Petri, D., Conti, M., & Capria, A. (2010, May). USRP technology for multiband passive radar. In *Radar Conference, 2010 IEEE* (pp. 225-229). IEEE.
- [9] Truong, N. B., Suh, Y. J., & Yu, C. (2013, November). Latency analysis in GNU radio/USRP-based software radio platforms. In *Military Communications Conference, MILCOM 2013-2013 IEEE* (pp. 305-310). IEEE
- [10] Chen, Y., Lu, S., Kim, H. S., Blaauw, D., Dreslinski, R. G., & Mudge, T. (2016, March). A low power software-defined-radio baseband processor for the Internet of Things. In *High Performance Computer Architecture (HPCA), 2016 IEEE International Symposium on* (pp. 40-51). IEEE
- [11] F.V. Giró Uribe, A.R. Selva Castañeda, Y. Almaguer Lora, "Implementación de un radio receptor definido por software (SDR) para la banda de (30 kHz – 40 MHz)". *Convención Internacional de Ciencias Técnicas, Universidad de Oriente, Cuba, 2014, Santiago de Cuba, Cuba, 2014.*
- [12] Maximizing the Dynamic Range of Software-Defined Radio. Disponible en: <http://www.analog.com/en/technical-articles/maximizing-the-dynamic-range-of-software-defined-radio.html> Visto el: 10-02-2018.
- [13] Pithadia, S. (2011). Smart Selection of ADC/DAC Enables Better Design of Software-Defined Radio. Texas Instruments, <http://focus.ti.com/lit/an/slaa407/slaa407.pdf>, last accessed on June, 10.
- [14] Kamboj, B., & Mehra, R. (2012). Efficient FPGA implementation of direct digital frequency synthesizer for software radios. *International Journal of Computer Applications*, 37(10), 25-29.
- [15] Maruthi, G. B., Kumar, S. P., & Pratap, M. S. (2015). implementation of High performance DUC and DDC for Software Defined Radio Applications. *International Journal of Computer Applications*, 110(6).
- [16] Galvis, A., Ceballos, C. A., & De Sanctis Gil, L. (2007). SDR: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico. *Semillero de Tecnologías Inalámbricas (STI)-GIDATI. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín.*
- [17] Schmid, T. (2006). Gnu radio 802.15. 4 en-and decoding. UCLA NESL TR-UCLA-NESL-200609-06, Tech. Rep.
- [18] Proyecto GNU Radio. Disponible en: <http://www.gnuradio.org>.
- [19] Proyecto Open source mobile communications (Osmocom). Disponible en: <http://osmocom.org/> Visto el: 25-11-2017.
- [20] Hardware Supported by GNU Radio. Disponible en: <https://wiki.gnuradio.org/index.php/Hardware>
- [21] Explaining the GNU Radio Scheduler. Disponible en: <http://www.trondeau.com/blog/2013/9/15/explaining-the-gnu-radio-scheduler.html> Visto el: 25-11-2017
- [22] GNU Radio Conference. Disponible en: <https://www.gnuradio.org/grcon-2017/about/> Visto el: 25-11-2017
- [23] Jaqueline Kennedy A. Soares, Software Definida por Radio Brasil, Nucleo do Conocimento, 5/10/2016.
- [24] David Carralero Alonso. Radio Definida Por Software En Dispositivos De Bajo Coste. Trabajo De Grado En Ingeniería Electrónica Industrial Y Automática UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA. 2016.
- [25] Nuand, bladeRF manufacturer. Disponible en: <http://www.nuand.com/>
- [26] Kickstarter, herramienta crowdfunding. Disponible en: <https://www.kickstarter.com/> Visto el: 25-11-2017.
- [27] LimeSDR is now the crowdfunding stage. Disponible en: <https://swling.com/blog/2016/04/limesdr-is-now-in-the-crowdfunding-stage/> Visto el: 10-12-2017
- [28] HackRF One. Disponible en: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/> Visto el: 10-12-2017
- [29] Romero, S., Tipantúña, C., Estrada, J. A., & Carvajal, J. (2015). Desarrollo de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B utilizando radio definida por software, hardware y software libre.
- [30] Pinar, I., & Murillo, J. J. (2011). Laboratorio de comunicaciones digitales radio definida por software. Universidad de Sevilla.
- [31] Open BTS <http://www.openbts.org> Disponible en: Visto el: 12-12-2017
- [32] Larroca, F., Guridi, P. F., Sena, G. G., Barbone, V. G., & Belzarena, P. (2016). An Open and Free ISDB-T Full-Seg receiver implemented in GNU Radio. *WinnComm*.
- [33] Electron Development Kit. Disponible en: <https://www.particle.io/products/hardware/electron-cellular-2g-3g-lte/> Visto el: 15-12-2017
- [34] GPy Development Board. Disponible en: <https://pycom.io/product/gpy/> Visto el: 15-12-2017
- [35] Natalizio, E., Loscri, V., Alois, G., Paoli, N., & Barbaro, N. (2010, November). The practical experience of implementing a GSM BTS through Open Software/Hardware. In *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL), 2010 3rd International Symposium on* (pp. 1-5). IEEE.
- [36] RTL-SDR: Cheap ADS-B Aircraft Radar. Disponible en: <https://www.rtl-sdr.com/adsb-aircraft-radar-with-rtl-sdr/> Visto el: 20-12-2017
- [37] ASEP. Ente Regulador del espectro de Radiofrecuencia en Panamá. Disponible en: <http://www.asep.gob.pa> Visto el: 25-11-2017
- [38] An SDR-Based FRS transceiver. Disponible en: [https://www.nuand.com/bladeRF-doc/examples/bladeRF\\_frs.pdf](https://www.nuand.com/bladeRF-doc/examples/bladeRF_frs.pdf) Visto el: 02-02-2017
- [39] Poveda, M., Poveda, H., Merchan F. A more Flexible Communication System: A Software Defined Radio. In *Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?. 2015 13th LACCEI Annual International Conference.*