

Radio definida por software: una mirada a las tendencias y aplicaciones

Software-Defined Radio: A Look at Trends and Applications

Carlos Vicente Niño Rondón¹
Wilfrey Andrés Contreras Gómez²
Karla Cecilia Puerto López³
Finales Guevara Ibarra⁴

¹Universidad Francisco de Paula Santander, Santander, Colombia. Email: carlosvicentenr@ufps.edu.co

²Universidad Francisco de Paula Santander, Santander, Colombia. Email: wilfredandreycg@ufps.edu.co

³Universidad Francisco de Paula Santander, Santander, Colombia. Email: katlaceciliapl@ufps.edu.co

⁴Universidad Francisco de Paula Santander, Santander, Colombia. Email: dinalegi@ufps.edu.co

 OPEN ACCESS



Copyright:

©2023. La revista *Ingenierías USBmed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución no comercial SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de artículo: Investigación.

Recibido: 04-08-2022.

Revisado: 30-08-2023.

Aprobado: 02-29-2022.

Doi: 10.21500/20275846.6048

Referenciar así:

C. V. Niño Rondón, W. A. Contreras Gómez, K. C. Puerto López y F. Guevara Ibarra, "Radio Definida por Software: Una mirada a las tendencias y aplicaciones," *Ingenierías USBMed*, vol. 14, n.º 1, pp. 58–69, 2023.

Disponibilidad de datos:

todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses:

los autores han declarado que no hay conflicto de intereses.

Editor: Andrés Felipe Hernández.
Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

Resumen. El concepto de radio definida por software ha tomado relevancia en los últimos años dada su funcionalidad para el control de funciones, principalmente, en dispositivos de comunicaciones y sensores tipo radar. Por ello, se considera que su rápida expansión se debe a la facilidad de implementar a nivel aficionado, profesional y didáctico para la enseñanza. En este artículo se presenta un análisis de tendencias de la radio definida por software con clasificación por continentes, donde la información de datos bibliográficas de alto impacto se somete a tres filtros de palabras en una ventana observación entre los años 2015 a 2022. El análisis de las tendencias y aplicaciones de la radio definida por software en los continentes muestra el uso de esta tecnología en procesos de enseñanza, aplicaciones biomédicas y de sensorica, empleando herramientas tanto de software licenciado como herramientas de código abierto, y con énfasis en el uso de técnicas de aprendizaje computacional.

Palabras Clave. Radio definido por software, código abierto, software licenciado, educación en ingeniería, sistemas de comunicaciones.

Abstract. The concept of software-defined radio has become relevant in recent years given its functionality to control functions, mainly in communications devices and radar-type sensors. For this reason, it is considered that its rapid expansion is due to the ease of implementation at an amateur, professional, and didactic level for teaching. In this article we present an analysis of software-defined radio trends with classification by continents, where high-impact bibliographic data information is subjected to three-word filters in an observation window between the years 2015 to 2022. The analysis of the trends and applications of software-defined radio in the continents shows the use of this technology in teaching processes, biomedical and sensory applications, using both licensed software tools and open-source tools, and with emphasis on the use of techniques of computational learning.

Keywords. Software Defined Radio, Open-Source, Licensed Software, Engineering Education, Communications.

I. Introducción

Radio definido por software (SDR) hace referencia a un sistema de comunicación por radio que emplea componentes de software para modular y demodular las señales de radio con la utilidad de cantidades significativas orientadas en el procesamiento digital de señales o de una pieza digital electrónica reconfigurable con el fin de generar una radio con la capacidad de recibir y transmitir un protocolo de radio mediante la ejecución de un nuevo software [1]. Desde el inicio de las transmisiones inalámbricas, las técnicas de transmisión por radio siguen una tendencia hacia la posibilidad de ofrecer conexiones con velocidades crecientes para transmisión de información. De hecho, las tecnologías basadas en radio definida por software han permitido a los sistemas de comunicaciones mayor flexibilidad y la adaptación en función del canal para utilizar recursos limitados [2].

Los sistemas basados en SDR emplean técnicas digitales con el objetivo de reemplazar herramientas de hardware tradicionales [3]. De ese modo, un mismo dispositivo puede emplearse para múltiples tareas de AM, FM y CW, entre otros, obteniendo una radio flexible y reconfigurable. Asimismo, su implementación es diversa respecto a las plataformas de hardware empleadas, que van desde procesadores de propósito general, procesadores digitales de señales, FPGA y unidades gráficas de procesamiento. En complemento, en los procesos basados en radio definido por software se busca mantener al mínimo los niveles de consumo de energía, así como la disminución de costos de herramientas y equipos a utilizar. Además, se vela por desarrollar sistemas con diseños explícitos y expeditos.

En este artículo se presenta un análisis de las tendencias y aplicaciones de radio definido por software mediante una revisión bibliográfica con enfoque en América, Europa, Asia África y Oceanía por su proyección y desarrollo en sistemas de comunicaciones. Para la revisión se consideran documentos de las bases de datos bibliográficas *Springer Link*, *Elsevier*, *IEEE Xplore* y *Google Scholar*, filtrados mediante búsqueda por palabras claves, con criterio de inclusión para los documentos publicados entre los años 2015 y 2022. Luego, se hace una clasificación geográfica por continente con el objetivo de mirar las tendencias de la radio definida por software y de los documentos se analiza información correspondiente a la aplicación dada a esta tecnología.

III. Metodología

Para el análisis acerca de las tendencias y aplicaciones de radio definido por software se propone una metodología basada en dos etapas: la primera de selección de información y filtrado por palabras clave, la segunda de clasificación y análisis de la información.

A) Selección de información y filtrado por palabras clave

La búsqueda documental se desarrolla en las bases de datos bibliográficas *IEEE Xplore Digital Library*, *SpringerLink*, *ScienceDirect* y *Google Scholar*. En donde se consideraron artículos científicos, *Conference Proceedings* y trabajos de pregrado y posgrado de América, Europa, Asia, África y Oceanía. Los documentos considerados se someten a filtrados por tres palabras claves: radio definido por software, aplicación e implementación. Al aplicar el primer filtro se identifican en total 1154 documentos, mientras que la cifra se reduce a 738 y a 216 al aplicar los dos siguientes filtros de búsqueda. Finalmente, se seleccionan los documentos que se encuentren en la ventana de búsqueda entre 2015 y 2022, considerando al final un total de 63 documentos, los estudiados en esta revisión.

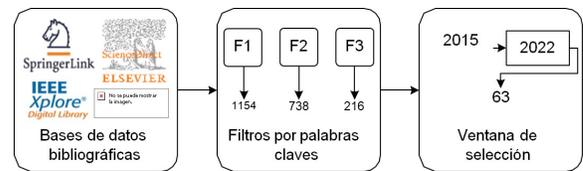


Figura 1. Proceso de selección de información.

Fuente: construcción propia

B) Clasificación y Análisis de la Información

Con el objetivo de determinar las tendencias de la radio definida por software, la información se clasifica por continentes, considerando América, Europa, Asia por separado, y África y Oceanía en una sola sección. Asimismo, para el análisis de la información se indaga en los documentos considerados la aplicación de radio definido por software desarrollada. En la Tabla 1 se presenta la relación de documentos considerados, clasificados por continente: 26 documentos para el continente americano, 10 y 16 para los continentes europeo y asiático, respectivamente. Además, se estudian 11 documentos para los continentes de África y Oceanía.

Tabla 1. Relación de documentos considerados

Documentos considerados		
Continente	Cantidad	Proporción
América	26	41.2%
Europa	10	15.8%
Asia	16	25.4%
África y Oceanía	11	17.6%
Total	63	100%

IV. Revisión Documental

A continuación, se presenta la revisión documental clasificada según el continente de origen y desarrollo de la investigación.

A) América

En [4] se presenta un diseño de un sistema de acceso al medio y modulación en banda base, utilizando radio definido por software. El autor involucra el diseño del equipo de transmisión para la comunicación de largo alcance entre boyas, buscando la manera de reducir costes en la recolección de la información. Este trabajo propone una arquitectura de red en modalidad ad hoc, trabajando sobre la banda de HF que permite juntar la información de varias boyas en una sola. Además, se realiza la selección e implementación de un esquema de modulación en banda base sobre SDR con una arquitectura de procesadores ARM que hace parte del sistema del radio transmisor, la cual es ventajosa en costos y facilidad de programación [4]. Adicionalmente, en [5] se presenta un enfoque de la radio definida por software hacia la implementación y análisis de rendimiento de la evolución a largo. El autor aborda el estudio de dos técnicas de acceso múltiple para redes de telecomunicaciones: OFDMA (acceso de multiplexación por división de frecuencia ortogonal) y SCFDMA (acceso de multiplexación por división de frecuencia de portador único). También, se implementa el sistema LTE con estas técnicas de acceso múltiple en GNU Radio y se evalúa su rendimiento en términos de BER y PAPR [5].

En [6] se utiliza la radio definida por software para la implementación de un transmisor de ISDB-T abierto. Los autores desarrollan un sistema de transmisión de televisión digital de punta a punta, de modo que la implementación lograda en gr-isdbt-tx es capaz de modular por completo una señal ISDB-T *fullseg*. Esto se consigue utilizando OFDM y dividiendo el espectro en 13 grupos de portadores idénticos. De manera alternativa es posible simular todo el sistema concatenado transmisor-receptor dentro de GNU Radio [6]. Desde otro contexto, en [7] se estudia la incidencia de la radio definida por software en la enseñanza de las comunicaciones inalámbricas. Los autores exponen los principios de la utilización de herramientas SDR y GNU Radio y se describen paradigmas, aplicaciones y ejemplos prácticos relacionados con la recepción de las señales y caracterización en el espectro radio eléctrico [7]. En [8] se presenta un estudio experimental de la potencia de transmisión para una radio definida por software USRP, donde el documento presenta un estudio experimental de la potencia de transmisión para la placa USRP SDR de la serie B de *Ettus Research*. Específicamente, se usa un USRP B200 SDR para configurar mediciones extensas de la potencia de transmisión de salida en su rango de frecuencia cubierto y se evalúa la variación de potencia con la frecuencia junto con su dependencia del parámetro de ganancia de transmisión en el controlador de hardware (UHD) de USRP [8]. A nivel general, en [9] desarrollan una revisión relacionada con las arquitecturas SDR, sus principales componentes y las tendencias de diseño. Además, se

incluyen una serie de comparaciones entre las distintas arquitecturas SDR según diferentes criterios [9].

En [10] se desarrolla un estudio enfocado a SDR-Fi: posicionamiento en interiores basado en aprendizaje profundo a través de radio definida por software, donde presenta una nueva forma de localización en interiores basada en huellas dactilares wifi que utiliza mediciones de señal CSI (*Channel State Information*) en lugar de mediciones de intensidad de señal RSS (*Radio Signal Strength*). La plataforma SDR-Fi (*Software Defined Radio-Fi*) utiliza un receptor de radio 802.11n basado en LabVIEW para medir los datos de CSI pasivamente a partir de marcos de baliza piloto, lo que permite estimar la ubicación en interiores de un dispositivo en una red wifi [10]. Adicionalmente, en [11] se presenta un diseño propio de una radio definida por software en la cual parte de un proceso de arquitectura modular genérica, posteriormente, define una arquitectura de componentes definidos, hasta el desarrollo de la PCB, el diseño cubre rangos de frecuencia de 70MHz hasta 6GHz, emplea una interfaz externa y una FPGA Artix-7 como unidad de control y procesamiento, siendo programable por USB, esto permite experimentar las siguientes señales: FM, TV broadcast, celular, wifi, entre otros. La placa puede usarse en laboratorios de todos los cursos de comunicaciones, para lo que requiere un par de antenas y una computadora donde se programa el tipo de datos, empleando el software abierto de GNU Radio [11]. Asimismo, en [12] se propone un modelo de capa física WLAN utilizando radio definida por software. También, realiza un modelo de capa física del protocolo IEEE 802.11, donde se emplean técnicas de transmisión de datos de espectro extendido por secuencia directa y multiplexación por división de frecuencias ortogonales con el uso del software de simulación Matlab/Simulink, destinando diferentes algoritmos de codificación para analizar el comportamiento del modelo en diferentes escenarios observando el parámetro de razón de error de bit [12].

En [13] se presenta una implementación y verificación de un sistema receptor de comunicaciones basado en software definido por radio. El autor desarrolla un software que procesa, capta y decodifica la información en tiempo real sobre los aviones, así como datos que pueden radiar a 1.090MHz mediante el estándar de comunicaciones “*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*” o Sistema de Vigilancia Dependiente Automática de aviación (ADS-B). El software se compone de la captación de las señales mediante el decodificador de televisión Realtek R820T, empleando módulos de software de SDR (Radio definida por software) en Matlab. También empleando los parámetros captados permite conocer algunos parámetros concretos como la velocidad del avión, su posición y la matrícula. Finalmente, el autor concluye que la necesidad que emplea métodos de cifrado para proteger la información de posibles usos

inadecuados [13]. En [14] se dispone de la información necesaria para implementar un análisis basado en radio cognitiva. Para la implementación se emplea el software libre de GNU Radio, en donde se dispone el sistema de comunicación que incluye el detector del espectro seleccionado y se pone en manifiesto la necesidad de Radio Cognitiva (RC) que debe ser consiente del entorno radioeléctrico con fines de optimización. Además, se emplean herramientas de radio definida por software que realiza tareas de radiocomunicación como procesamiento de banda base y las diferentes configuraciones para la banda en UHF (ultra alta frecuencia), logrando establecer un enlace de comunicaciones basado en radio cognitiva [14]. En adición, en [15] se elabora unas guías prácticas para la materia de comunicación digital, empleando herramientas que se encuentran a disposición de los estudiantes, como lo son GNU Radio y equipos USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) NI 2920. En primer lugar, describe los fundamentos de la tecnología y se especifican los diferentes dispositivos que operan bajo esta tecnología. Además, se explica la funcionalidad de GNU Radio [15]. En [16] se presenta la experiencia del transceptor IoT con plataforma de radio definida por software asequible donde afirma que el rápido crecimiento de IoT (Internet de las cosas) está superando a la fuerza laboral actual con los conocimientos y habilidades necesarios para las comunicaciones de IoT. Para abrir un camino a los futuros ingenieros de comunicación de nivel de entrada, se desarrolla un módulo de aprendizaje basado en proyectos que utiliza una plataforma SDR con pedagogía de aprendizaje. Los materiales de aprendizaje se desarrollan con base en objetivos definidos. Donde no solo interactúan con las señales inalámbricas del mundo real por aire en tiempo real, sino que también mejorarán sus habilidades prácticas de programación [16].

En [17] se presenta una plataforma de receptor de radio definida por software de código abierto para aplicaciones de radar. Este trabajo describe el desarrollo y la integración de un receptor de radio definido por software de código abierto y rentable en un sistema completo de radar pulsado para estudiar los reflejos de meteoritos en la atmósfera terrestre. El uso de la tecnología SDR en aplicaciones de radar no es nuevo, pero los detalles relacionados con la construcción del procesamiento, el formateo y el almacenamiento de *backend* no se han discutido ampliamente. Específicamente, los sistemas SDR se utilizan para proporcionar un enlace de comunicación, lo que significa que la hora precisa de llegada y los niveles de la señal no son de importancia primordial, pero estos parámetros son críticos en un sistema de radar. El trabajo aborda en detalle el rediseño de un receptor de código abierto existente en un sistema de radar sincronizado por pulsos para que lo use cualquier persona interesada en soluciones rentables de adquisición de datos de radar [17]. En [18] se

presenta un diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNU Radio. También se desarrolla un prototipo de radar con la finalidad de realizar pruebas de distancia y velocidad para establecer las configuraciones necesarias para afinar el radar a objetivos móviles. De igual forma, se emplea el equipo USRP B200mini-full dúplex en banda de frecuencia que va desde los 70 MHz hasta 6GHz, antenas tipo cornetas rectangulares y software GNU Radio. El desarrollo del proyecto emplea un objetivo móvil sobre rieles en un espacio cerrado con la finalidad de tener en entorno controlado para la configuración del radar [18]. En [19] se desarrolla una revisión técnica de la seguridad inalámbrica para Internet de las cosas, donde se da enfoque a los ataques a través de dispositivos conectados a internet (Internet of Things, o IoT en inglés) que están aumentando y esto ha expuesto vulnerabilidades en diferentes tipos de dispositivos y redes. Estos ataques pueden afectar a las tecnologías inalámbricas que dan conectividad a IoT y se pueden realizar usando radio definida por software, donde se encuentra que las vulnerabilidades en las capas superiores de IoT (la capa de percepción en particular) son las más comunes. Los futuros sistemas de ciberseguridad basados en tecnologías SDR pueden tener ventajas significativas, pero es necesario afrontar los desafíos de seguridad de IoT [19].

En [20] se presenta la extensión de cobertura de plataformas de radio definidas por software para redes de acceso de radio 3GPP 4G/5G. Los autores muestran cómo se pueden ampliar las coberturas de las redes de acceso inalámbrico 3GPP 4G/5G mediante el uso de equipos externos. Para ello, se modela la comunicación entre el equipo de usuario (UE) y el eNodeB/gNodeB, se extraen los parámetros que afectan la potencia de la señal transmitida y recibida, y se analiza el impacto de estos parámetros en la cobertura celular. Los resultados obtenidos muestran que se pueden lograr diferentes tamaños de celdas 4G/5G mediante el uso de equipos externos apropiados [20]. En [21] se presenta la mejora de detección de espectro basada en aprendizaje automático para aplicaciones de radio definidas por software. Se comparan cuatro modelos de aprendizaje automático supervisado: clasificador Naïve Bayes, máquina de vectores de soporte, máquina de aumento de gradiente y bosque aleatorio distribuido. Además, se realiza un análisis de componentes principales (PCA) para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos complejo mientras se preserva la variabilidad útil. El rendimiento se evalúa posteriormente calculando sus curvas de características operativas del receptor. Luego, los algoritmos completos se implementan y demuestran utilizando la plataforma de radio GNU (GNU's Not Unix) y una tarjeta electrónica basada en SDR, HackRF One [21]. En [22] se presenta un estudio de la tecnología radio definida por software, se describe

la evolución histórica de la tecnología SDR, sus herramientas y capacidades en la actualidad. Los autores abordan, con criterio práctico, talleres de laboratorio donde una parte del hardware puede ser configurado por software, logrando de esta manera abarcar la descripción de la tecnología que utiliza SDR (radio definida por software) [22].

En [23] se propone un diseño y elaboración de prácticas de laboratorio para la materia de fundamentos de comunicaciones, usando radio definida por software, empleando GNU Radio, el cual permite el desarrollo de aplicaciones de comunicación inalámbrica, empleando el dispositivo USRP-2920. También describen los comportamientos de los dispositivos y el uso de estos diseñando prácticas de laboratorio y manuales sobre el uso del software y el hardware [23]. En [24] se presenta un algoritmo de volcado del tráfico de datos para redes inalámbricas sobre una red definida por software. Las redes SDR proveen una implementación en los servicios de la red de manera dinámica y escalable, lo que garantiza que un nodo o *host* que esté conectado a una red mantenga una alta disponibilidad frente a cualquier tipo de imprevisto; además, proporciona una alternativa para el transporte de gran cantidad de datos, donde se emplea el concepto de volcado de datos [24]. En [25] se presenta la implementación de estación base GSM recepción de señales LTE aplicando radio definido por software. La implementación de la estación base emite recursos inalámbricos que aprovisionan servicios de mensajería de texto corto y llamada de voz, el sistema de recepción de señales LTE 4G es desarrollado en el software GNU Radio y permite replicar de una forma sencilla y didáctica el proceso de generación y recepción de servicios básicos de telecomunicaciones móviles [25]. En adición, en [26] se presenta el desarrollo de un sistema de comunicación basado en radio definido por software para un robot modular en el que implementan un sistema de comunicación emisor y receptor de señales en Raspberry pi 3 para enviar instrucciones de movimiento al controlador de un robot modular de tipo cadena. Todo el sistema se basa en tecnología wifi basada en SDR. La incorporación de dicha tecnología se ejecuta a través de un algoritmo que evalúa todos los canales wifi del Raspberry pi 3 y determina cual es el mejor canal para establecer la conexión con el controlador del robot. Finalmente, se envía los movimientos del robot mediante un protocolo de datagrama de usuario [26]. Adicionalmente, en [27] se presenta una implementación de una herramienta de radio definido por software que emule una red de telefonía celular móvil para ser usada en la enseñanza dentro del programa de ingeniería electrónica. En este trabajo se utiliza el dispositivo USRP N210, el software OpenBTS y Asterisk en el sistema operativo de Ubuntu. Además, se emplea un estándar de comunicación GSM. El desarrollo se realiza en cuatro fases: en

la primera se identifican los elementos y características de un prototipo en *OpenBTS*, en la segunda se definen los componentes de software y hardware, en la tercera se desarrolla la implementación y la configuración del sistema propuesto, y en la cuarta etapa se comprueba el sistema, analizando el alcance de la señal en espacio libre y urbano [27].

B) Europa

En [28] se propone la radio definida por software en dispositivos de bajo coste, como el dispositivo RTL2832U, centrándose en el aspecto didáctico de las comunicaciones. Los autores emplean Matlab/Octave como lenguaje de programación para probar varios esquemas demodulación sobre señales capturadas con el dispositivo. Además, se obtiene la señal SDR y finalmente muestrean la señal FM con el programa GNU Radio mostrando las gráficas de espectro, señales de audio monofónico y estéreo, y señal SDR [28]. En [29] se presenta un sistema de alerta de espectro basado en radio definida por software y Raspberry Pi. El objetivo de este artículo es diseñar e implementar un sistema de alerta de espectro (SAS) económico y genérico, basado en radio definida por software utilizando el dispositivo USB RTL-SDR y un microprocesador Raspberry Pi de bajo consumo. El SAS analiza una parte predeterminada del espectro electromagnético para establecer un patrón de referencia y, posteriormente, monitorea el espectro para descubrir señales no identificadas dentro de este espectro. Las señales maliciosas o no identificadas detectadas se registran y se envía un mensaje de alerta por correo electrónico al analista de inteligencia de señales para una mayor investigación [29]. En [30] se presenta un enfoque híbrido para mejorar las redes de sensores inalámbricos cognitivos con capacidades de radio definidas por software de bajo consumo donde establecen el problema de escasez de espectro limita la eficiencia y confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas, especialmente para dispositivos que funcionan con baterías. Para mitigar esto, se propone una metodología híbrida que explota la tecnología SDR solo para aquellas acciones que requieren su alta flexibilidad usando transceptores tradicionales de hardware fijo para las tareas restantes. La plataforma propuesta reduce significativamente el consumo de energía en comparación con los SDR de baja potencia existentes [30]. En [31] se presenta un modelado de un sistema de posicionamiento interior reconfigurable basado en arquitectura de radio definida por software. Este artículo describe un modelo de un sistema de posicionamiento interior configurable por software en el que el hardware de los nodos activos se basa en la arquitectura de radio definida por software. La arquitectura permite variar las propiedades de la señal transmitida en función de la precisión y la exactitud requeridas por diversas aplicaciones y condiciones de operación. Las posiciones de destino se extraen utilizando un algoritmo comple-

tamente digital implementado con un FPGA que se puede ampliar o modificar fácilmente para mejorar el rendimiento general del sistema [31]. Asimismo, en [32] se presenta la inhibición de señales GSM en SDR. En este proyecto se implementa un inhibidor de frecuencias de la red GSM en tecnología SDR. Este inhibidor bloquea la comunicación entre el terminal móvil y la estación base, impidiendo que el terminal se sincronice con esta última. Para lograr esto, se emite una señal de ruido igual a las señales de sincronización utilizadas por la estación base de la red GSM con la diferencia de que las nuestras llevan un ruido mayor [32].

En [33] se presentan unos métodos de optimización y paralelización para radio definida por software. El estudio propone analizar los algoritmos más costosos en términos de tiempo de cómputo en las cadenas de comunicación digitales actuales. Estos algoritmos suelen estar presentes en los decodificadores de códigos de corrección de errores en el nivel del receptor. El objetivo es proponer implementaciones de software optimizadas para cada una de las tres familias de códigos. También se implementa un transmisor y un receptor compatibles con el estándar DVBS2 [33]. De igual forma, en [34] se presenta una implementación y análisis de rendimiento de radio cognitiva con algoritmo de actualización de frecuencia en plataforma de radio definida por software, donde describen que las comunicaciones inalámbricas se están utilizando en todos los estándares de comunicación. Sin embargo, cada día que pasa la escasez de ancho de banda se ha convertido en una preocupación importante para las próximas tecnologías inalámbricas. Para abordar esta inquietud se han diseñado diversas técnicas basadas en inteligencia artificial. De igual forma se ha ideado la radio inteligente básica denominada radio cognitiva. De lo anterior, se identifica que funciona según el principio básico de la detección del espectro y la detección de la frecuencia libre para la transmisión del usuario secundario. Este trabajo propone una técnica eficiente que ha sido desarrollada para diseñar radio cognitiva basada en la plataforma SDR. Se ha añadido el algoritmo de actualización de frecuencia para la evaluación del rendimiento de la técnica propuesta. El análisis postula que, por cada aumento de 10 dB en el ruido gaussiano, la tasa de error de bits del transmisor secundario y el sensor de espectro provoca un incremento del 19.59% y el 29.39%, respectivamente [34]. Además, en [35] se presenta una implementación de radio definida por software en sistemas de comunicaciones actuales. Este proyecto tiene como objetivo proporcionar información sobre la tecnología RTL-SDR, así como profundizar en todos sus aspectos a nivel físico, de componentes y de aplicación. Para ello se utilizarán los resultados obtenidos con el kit RTL-SDR de Nooelec [35]. Adicionalmente, en [36] se presenta un estudio la recepción de imágenes meteorológicas transmitidas por los satélites NOAA. Finalmente, se discuten aspectos

como el diseño de la antena helicoidal cuadrifilar, el uso de un dispositivo de radio definido por software para recibir ondas de radio y el software informático especializado para decodificar la información recibida y mostrar imágenes meteorológicas.

C) Asia

En [37] se presenta un control de latencia en redes vehiculares de borde móvil definidas por software. El objetivo es examinar los trabajos recientes sobre redes vehiculares definidas por software y proponer una serie de diseños de redes definidas por software de última tecnología, enfatizando particularmente la función más crucial del control de latencia para admitir posibles aplicaciones inalámbricas para las máquinas de conducción de próxima generación [37]. Adicionalmente, en [38] se presenta un radar multifunción basado en radio definido por software para aplicaciones IoT. El documento propone un radar multifunción basado en radio definido por software para la detección de la frecuencia respiratoria y la velocidad de movimiento, así como el alcance que se puede utilizar para proporcionar detección y seguimiento del cuerpo humano en aplicaciones IoT centradas en humanos. Dado que se adopta el concepto SDR, la misma plataforma de hardware podría compartirse con las comunicaciones inalámbricas periódicamente mediante la redefinición [38]. En [39] se presenta una prueba de la técnica de detección de espectro para transceptores 16QAM y 64QAM en un banco de pruebas SDR. Además, aborda la detección práctica de señales y el impacto de los métodos filtrado de ventanas en las señales detectadas [39].

En [40] se presenta aplicaciones de radio definidas por software para Mini GSM BTS y analizador de espectro con BladeRF. En este estudio se emplea un BladeRF SDR con un rango de frecuencia de 300 MHz - 3,8 GHz y capacidad de transmisión full-dúplex se configurará como una BTS (estación transceptora base) GSM. Una placa Raspberry Pi se utiliza como procesador para proporcionar una mayor portabilidad. También se utiliza un repetidor GSM que está conectado al BladeRF para amplificar la señal hasta 41 dB y puede aumentar el rango de cobertura a unos 70 metros. Aunque la confiabilidad de la comunicación de voz y SMS es solo del 50% y el 85% respectivamente, BladeRF aún puede proporcionar un sistema de comunicación alternativo ad hoc en tiempos de emergencia o en áreas remotas [40]. Por otra parte, en [41] se presenta una nueva arquitectura definida por software para redes satelitales de próxima generación, llamada SoftSpace. Esta arquitectura explota la virtualización de funciones de red, la virtualización de red y la radio definida por software para facilitar la incorporación de nuevas aplicaciones, servicios y tecnologías de comunicación satelital. Esto puede reducir los gastos de capital y los gastos operativos, así como también integrar las redes

satelitales con las redes terrestres [41]. Adicionalmente, en [42] se desarrolla una arquitectura de sistema de radio definida por software de alto rendimiento y un entorno de desarrollo para una amplia gama de aplicaciones. El trabajo propone una arquitectura de sistema de radio definida por software de alto rendimiento escalable, programable y parametrizable, que utiliza núcleos de procesamiento heterogéneos. La arquitectura propuesta se ha implementado y probado en una placa de desarrollo multinúcleo heterogénea y ha demostrado ser eficiente en una variedad de escenarios, utilizan diferentes técnicas de modulación [42].

En [43] los autores dan a conocer un artículo sobre verificación de la generación de claves inalámbricas mediante radio definida por software. Donde describen una forma de generar claves secretas compartidas entre dos nodos usando variaciones aleatorias en la fase de la portadora en un entorno de rutas múltiples. La implementación de software de control propuesta permite generar claves en diferentes bandas de frecuencia usando un sistema de radio definido por software (SDR). Los resultados de la verificación experimental indican que el sistema funciona bien en bandas de frecuencia de 433 MHz, 900 MHz y 2400 MHz [43]. En [44] se presenta la primera implementación de un esquema de codificación de red (NC) que utiliza transmisión de múltiples medios, basado en SDR. Los resultados experimentales muestran que al combinar NC y codificación fuente, se puede controlar la calidad de las imágenes recibidas bajo demanda [44]. Por otra parte, en [45] se presentan mediciones de rango y ángulo basadas en plataforma de radio definida por software. Los autores describen un sistema de radar definido por software usando el módulo USRP 2920 de *National Instruments*. El sistema es capaz de medir la distancia y estimar la dirección de llegada de una fuente específica. La resolución de radar máxima obtenida es de 9 metros con una tasa de muestreo de 33,33. Para la medición del ángulo se utiliza el algoritmo MUSIC para estimar el DOA. La implementación del algoritmo MUSIC se realiza en la plataforma de radio definida por software [45].

En [46] se presenta una arquitectura para receptor de radio definido por software multiestándar simultáneo. El objeto de estudio es el desarrollo de un receptor de radio definición multiestándar simultáneo (SMS-SDR). Este receptor será capaz de decodificar simultáneamente la información de varios estándares inalámbricos heterogéneos utilizando el mismo *front-end* de RF. Para lograr este objetivo se están desarrollando diversos algoritmos de procesamiento de señales de banda base que permitan eliminar el ICC (Interferencia entre Canales del mismo Tipo) de los receptores de una y varias antenas [46]. En [47] se presenta un sistema de identificación de señales de radio para la radio definida por software. El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema inteligente para la identificación de señales

de radio en un entorno de alta interferencia. La simulación muestra que el sistema es capaz de transmitir datos a través de un canal de radio y de decodificar señales de radio en presencia de interferencia. Además, se ha construido una red neuronal para la decodificación adaptativa de señales con mucho ruido [47]. En [48] utilizan un SDR e inteligencia artificial para diseñar un sistema de comunicaciones autogestionado con nodos ubicaciones variables. La decisión se toma usando la información de datos instantánea que se lee y se pasa a los nodos de comunicación para tomar su ubicación correcta. El resultado es que la ratio de conectividad y el área de cobertura se optimizan prácticamente el doble mediante el método propuesto [48]. Desde otro punto, en [49] se presenta un artículo sobre la enseñanza del modelado de canales inalámbricos con radio definida por software, el objetivo de este artículo es demostrar que es posible reproducir propiedades fundamentales del canal inalámbrico con experimentos de laboratorio de bajo costo. Estos experimentos se pueden llevar a cabo con radios asequibles definidas por software, lo que permite mejorar la enseñanza de la comunicación con mediciones prácticas de canales reales [49]. En [50] se presenta el impacto del transmisor de radio definido por software en la eficiencia de la transferencia de energía inalámbrica RF. Examinan el impacto de un transmisor de radio digital en la transferencia de energía inalámbrica. El banco de pruebas consiste en un transmisor de radio definido por software, un amplificador de potencia externo, una atenuadora variable para emular las altas pérdidas en la propagación inalámbrica y un receptor de recolección de energía de RF. Los experimentos revelan que una alta relación de potencia pico a potencia media restringe la potencia máxima de salida de RF para señales multisinusoidales. Incluso con una potencia promedio de entrada similar, las formas de onda de RF de una sola senoide producen la mayor eficiencia de receptor y CC-CC [50].

Adicionalmente, en [51] se presenta un sistema de acceso múltiple no ortogonal (NOMA) basados en radio definido por software. Los autores estudian la implementación de sistemas de acceso múltiple no ortogonal en plataformas de radio definidas por software, ya que esta tecnología se ha reconocido como clave para las redes inalámbricas de quinta generación. De igual forma analizan diferentes receptores de cancelación de interferencias que cuentan con análisis matemáticos como el receptor Ideal SIC, el receptor SIC de nivel de símbolo, el receptor SIC de nivel de palabra clave y los receptores basados en la relación de probabilidad logarítmica. Además, se evalúa el rendimiento de los sistemas de acceso múltiple ortogonal y no ortogonal en términos de pares de tasas, eficiencia espectral y eficiencia energética. Revelan que el sistema de acceso múltiple no ortogonal funciona mejor que el sistema de acceso múltiple ortogonal y se destaca que las pla-

taformas de radio definidas por software son flexibles para implementar y probar futuras tecnologías inalámbricas [51]. En [52] los autores implementan redes IoT inalámbricas sensibles al tiempo en radio definida por software. Los autores realizan un estudio investigación cuantitativa de la precisión de sincronización y la latencia de extremo a extremo que puede lograr un sistema inalámbrico SDR. Con este fin se diseña e implementa un sistema inalámbrico de intervalos de tiempo en la plataforma SDR en un USRP, donde se desarrolla un mecanismo de sincronización de tiempo para mantener la sincronía entre los nodos del sistema. Para reducir los retrasos y las fluctuaciones de retraso entre la placa USRP y su PC se idea un algoritmo “*Just-in-time*” para garantizar que los paquetes enviados por la PC al USRP puedan llegar al USRP justo antes de los intervalos de tiempo en los que deben transmitirse [52].

D) África y Oceanía

En [53] se presenta un desarrollo de un dispositivo portátil de obtención de imágenes para el diagnóstico y detección de enfermedades que afectan al cerebro, como los accidentes cerebrovasculares, los tumores cancerosos y las hemorragias causadas por traumatismos, empleando técnicas de microondas combinadas con radio definida por software, además de una red de conmutación de estado sólido para recoger los datos obtenidos por las imágenes, operando en un rango de frecuencias de 0,85 a 2 GHz. El dispositivo es validado mediante datos experimentales siendo capaz de reproducir imágenes en menos de un minuto. A través de un maniquí de pruebas se verifica que los datos obtenidos por el dispositivo correspondían a los tumores y hemorragias cerebrales [53]. Asimismo, se comprueba su funcionalidad en dos objetivos con diferentes permitividades. Las imágenes resultantes son suficientes para localizar los objetivos y el tiempo estimado en un cuerpo bajo prueba fue de alrededor de 26 segundos. El costo del diseño es accesible, debido a los factores clave en emergencias médicas en las que el tiempo es un factor crítico [54].

En adición, en [55] se propone un transceptor de microondas reconfigurable para la obtención de imágenes médicas, empleando un dispositivo de radio definida por software para sustituir el costoso analizador vectorial de redes empleado actualmente en la investigación de sistemas de imágenes médicas, presentando técnicas de calibración sobre la tecnología SDR para un sistema de imágenes médicas acoplado a un circulador de RF. Para verificar el sistema propuesto en la obtención de imágenes médicas se emplea un barrido circular, una antena direccional, detectando con éxito pequeños objetivos en un líquido que emula las propiedades de los diferentes tejidos humanos [55].

Por otro lado, en [56] se describe que el rápido crecimiento de tecnologías inalámbricas se verá afectado en los próximos 10 años. También se expone que para

frenar las elevadas demandas de la capacidad de la red provocadas por la explotación de los servicios actuales se deben realizar importantes mejoras en las técnicas de acceso inalámbrico. Además, especifican que es difícil diseñar futuras infraestructuras de comunicación 5G aprovechando las nuevas tecnologías de espectro. Finalmente, discuten acerca de las redes heterogéneas desplegadas por diferentes operadores como lo son las redes reconfigurables, como la radio y las redes cognitivas [56].

Los estándares de comunicaciones obligan a actualizar el hardware para que sea compatible con dispositivos móviles y fijos. Dado esto, en [57] se especifica que una forma de reducir el esfuerzo de actualización y reutilización de hardware es empleando técnicas dinámicamente reconfigurables. La flexibilidad permite que ocupe más lógica dentro de un área más pequeña, lo que resuelve problemas de encajar diseños más grandes en dispositivos más pequeño. Se comprueba empleado un kit de diseño Xilinx Virtex 5 XUPV5-LX110T. Los resultados experimentales demuestran que el DPR aumenta la eficiencia energética con un aumento aceptable de memoria y latencia [57]. Con este modo los sistemas de comunicaciones pueden dividirse en diferentes versiones en una biblioteca y a través de una consulta de datos, es posible reducir la complejidad de diseños y mantener actualizable el sistema en tiempo real [58].

La reconfiguración parcial dinámica como los describe Sadek, es una de las técnicas prometedoras en la implementación de radio cognitiva combinado con radio definida por software permitiendo que el conjunto de hardware pueda usar sistemas de comunicación con diferentes estándares, aumentando sus ventajas como la actualización en tiempo real. El trabajo demuestra la eficiencia de la técnica DPR en la implementación de decodificadores SDR para estándares de comunicación 2G, 3G y WIFI [59]. Por otro lado, en [60] se describen las capacidades de MATLAB empleando radio definida por software para recibir y transmitir una señal de radiofrecuencia. Los autores desarrollan modelos de comunicación a través de MATLAB para identificar señales a partir de las características captadas por el analizador de espectro. Además, analizan y diseñan un sistema en torno a la multiplexación y la conversión a banda base en fase de interfase/cuadratura (IQ) para señales de frecuencia modulada (FM) y de amplitud modulada (AM) [60].

Sumado a esto, en [61] presentan una implementación de software para un receptor reconfigurable de amplitud modulada (AM) en la detección de señales de baja potencia, empleando algoritmo de resonancia estocástica (SR), que es una técnica para detección de señales débiles desarrollada para un receptor AM con tecnología de radio definida por software (SDR) [61]. Considerando que la radio definida por software emplea procesos de modulación y demodulación mediante software, en [62] se emplea un método de recuperación

diferente con muestreo uniformes que son inferiores a la tasa de Nyquist. El algoritmo es empleado para una onda AM empleando una tasa sub muestreada a tasas uniformes variadas. Los resultados muestran una recuperación de la señal del mensaje a velocidad de muestreo inferiores sin emplear ningún tipo de hardware adicional [62]. Finalmente, en [63] ratifican que en el marco del trabajo y la enseñanza de radio definida por software se tiene una amplia gama de aplicaciones como la investigación y el despliegue de prácticas de varias tecnologías inalámbricas de vanguardia. Además, se enfatiza en placas como la USRP B200 y sus frecuencias de funcionamiento ya que estos parámetros no se especifican en la hoja de datos empleando un diagrama de flujo en GNU Radio y un analizador de espectro en un banco de pruebas experimental [63].

V. Conclusiones

Los dispositivos USRP (*Universal Software Radio Peripheral* - Periférico Universal de Radio por Software) se emplean en una amplia gama de aplicaciones y se utilizan activamente para la enseñanza de sistemas de comunicaciones, la investigación, la industria y para el despliegue práctico de varias tecnologías inalámbricas de vanguardia. Esto se demuestra con la gran variedad de aplicaciones desarrolladas internacionalmente, dada su versatilidad y reconfiguración en diferentes sectores de sistemas de comunicación y redes de radio frecuencia. En una arquitectura de comunicación analógica se emplean diferentes elementos físicos para adoptar el estándar de comunicación deseada. Para realizar cualquier cambio en la misma se deben reemplazar o rediseñar los elementos, en la radio definida por software se reemplaza todos estos procedimientos de rediseñar por software otorgándole una reconfiguración y versatilidad a esta tecnología frente a los dispositivos tradicionales, lo que abre la oportunidad de desarrollar una radio heterogénea que abarque diferentes estándares de comunicación, fomentando el uso en la enseñanza, la investigación, la industria y abordando un rápido despliegue de tecnologías inalámbricas de vanguardia en diferentes sectores. Las tendencias de investigación internacionalmente lo demuestran, ya que se abordan diferentes temas que van desde el sector de la medicina hasta sistemas de comunicaciones de vanguardia como lo son la tecnología 5G, radio cognitiva, entre otros, fomentando el uso de radio definido por software en diferentes sectores de la industrial actual.

Las soluciones de radio definido por software son el tema principal en los diferentes estándares de comunicación inalámbrica por su capacidad de reprogramabilidad y sus altos niveles de flexibilidad. En el continente americano se abordan diferentes problemas con radio definido por software, siendo el principal enfoque en sistemas de comunicación como lo son AM, FM, televisión

digital, telefonía celular, wifi entre otros. Tienden a un enfoque general hacia técnicas de modulación y codificación de sistemas de comunicación y abordan los retos de la enseñanza sobre estas áreas fomentando el uso de radio definido por software. A nivel general, los sistemas basados en SDR son considerados como una herramienta fundamental para la investigación, desarrollo y educación dentro del sector de las telecomunicaciones.

Por otra parte, en el continente europeo las tendencias son más variadas, ya que van desde radio cognitiva hasta el mejoramiento de la arquitectura de cómputo en sistemas de radio definido por software. Esto evidencia el alto nivel de versatilidad que posee este tipo de placa de desarrollo en diferentes escenarios de los sectores académicos e industriales.

En Asia, los enfoques generales de radio definido por software se concentran en sistemas de comunicación heterogéneos y desarrollo de aplicaciones con internet de las cosas. Aprovechando la versatilidad que poseen los SDR, plantean escenarios variados con diferentes protocolos de comunicación para desarrollar una radio heterogénea y adaptativa.

En Oceanía como en África las tendencias son variadas respecto a radio definida por software, desde aplicaciones en el sector médico hasta el desarrollo de aplicaciones en sistemas de comunicación. El desarrollo en el sector médico respecto al análisis con microondas es donde más avance se tiene debido a la versatilidad del SDR y al poco espacio que ocupa para dispositivos médicos portátiles. También el desarrollo en África respecto a sistemas de comunicación resaltan la enseñanza y la alta gama de aplicaciones que se puede emplear activamente en el sector con la herramienta de SDR.

Referencias

- [1] R. G. Machado y A. M. Wyglinski, "Software-defined radio: Bridging the analog-digital divide," *Proc. IEEE*, vol. 103, n.º 3, págs. 409-423, mar. de 2015.
- [2] J. Jagannath, "Artificial neural network based automatic modulation classification over a software defined radio testbed," en *IEEE International Conference on Communications*, vol. 2018, May, 2018, págs. 1-6.
- [3] G. Kakkavas, K. Tsitseklis, V. Karyotis y S. Papavassiliou, "A Software Defined Radio Cross-Layer Resource Allocation Approach for Cognitive Radio Networks: From Theory to Practice," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 6, n.º 2, págs. 740-755, 2020.
- [4] G. González Martínez, "Diseño de un sistema de acceso al medio y modulación en banda base utilizando radio definido por software para comunicación de largo alcance entre boyas," en *Centro de Investigación Científica y de Educación*, Superior de Ensenada, Baja California, 2016.
- [5] K. Bhusal, *Implementation and Performance Analysis of Long Term Evolution Using Software Defined Radio*. University of Texas at Tyler, 2017.
- [6] J. Hernández y S. Castro, *Implementación de un transmisor de ISDB-T abierto bajo el paradigma de radio definida por software*. Universidad de La República, 2018.
- [7] K. Navarro, F. Canto y H. Poveda, "Software Defined Radio as an Educational Learning Tool in Wireless Communications," en *16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion"*, 2018, pág. 11.
- [8] M. W. O'Brien, J. S. Harris, O. Popescu y D. C. Popescu, "An Experimental Study of the Transmit Power for a USRP Software- Defined Radio," en *2018 12th International Conference on Communications, COMM 2018 - Proceedings*, 2018, págs. 377-380.
- [9] R. Akeela y B. Dezfouli, "Software-defined Radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges," *Comput. Commun.*, vol. 128, n.º July, págs. 106-125, 2018.
- [10] E. Schmidt, D. Inupakutika, R. Mundlamuri y D. Akopian, "SDR-Fi: Deep-Learning-Based Indoor Positioning via Software- Defined Radio," *IEEE Access*, vol. 7, págs. 145 784-145 797, 2019.
- [11] O. López Cabrebra, *Diseño de una Radio Definida por Software*. Universidad Nacional Río Negro, 2019.
- [12] J. Cruz Sandoval, *Modelo de capa física WLAN utilizando Radio Definido por Software*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2019.
- [13] J. Magaldi, *Implementación y verificación de un sistema receptor de comunicaciones basado en software definido por radio*. Universidad Autónoma de Madrid, 2019.
- [14] A. F. Vega León y A. Guamo, "Comunicación Basada en Radio Cognitiva sobre Radio Definido por Software," *Rev. Tecnológica - ESPOL*, vol. 32, n.º 2, págs. 43-50, 2020.
- [15] M. D. Carchi Sañay, *Implementación de prácticas de laboratorio para la materia de comunicación digital utilizando Radio Definida por Software y GNU Radio*. Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [16] L. Hong, "Experience of IoT transceiver with affordable software defined radio platform," en *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, no. August 2003., vol. 2020-June, 2020.
- [17] R. Seal y J. Urbina, "GnuRadar: An Open-Source Software- Defined Radio Receiver Platform for Radar Applications," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 35, n.º 2, págs. 30-36, 2020.
- [18] M. A. Silva Yáñez y C. J. J. Izquierdo, *Diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definido por software y gnradio*. Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil, 2021.
- [19] J. J. Rugeles Uribe, E. P. Guillen y L. S. Cardoso, "A technical review of wireless security for the internet of things: Software defined radio perspective," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, n.º 7, págs. 4122-4134, 2021.
- [20] D. M. Molla, H. Badis, L. George y M. Berbineau, "Coverage Extension of Software Defined Radio Platforms for 3GPP 4G/5G Radio Access Networks," en *Proceedings of the 13th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference, WMNC*, 2021, págs. 55-62.
- [21] S. Aghabeiki, C. Hallet, N. E. R. Noutehou, N. Rassem, I. Adjali y M. Ben Mabrouk, "Machine-learning-based spectrum sensing enhancement for software-defined radio applications," *2021 IEEE Cognitive Communications for Aerospace Applications Workshop, CCAAW 2021*, n.º June, 2021.
- [22] D. F. Romero y J. A. Zamora, *Estudio de la Tecnología Radio Definido por Software*. Fundación Universitaria Agustiniiana, 2017.
- [23] Á. I. Monteros Túquerres, *Diseño y Elaboración de Prácticas de Laboratorio para la Materia de Fundamentos de Comunicaciones usando Radio Definida Por Software*. Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [24] J. Sanchez Huertas y S. Romero Avedaño, *Algoritmo de volcado del tráfico de datos para redes inalámbricas sobre una red definida por software*.

- Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2019.
- [25] G. A. Chica Pedraza, A. D. N. esguerra, Á. F. Díaz Sánchez y M. Espinosa Buitrago, "Implementación de estación base GSM recepción de señales LTE aplicando radio definido por software," *Rev. ITECKNE*, vol. 17, n.º 1, págs. 19-30, 2020.
- [26] H. A. Gomez Pérez y N. Porras Garzón, *Desarrollo De Un Sistema De Comunicación Basado En Radio Definido Por Software Para Un Robot Modular*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020.
- [27] A. J. Ospino Polanco y D. C. A. Villadiego, *Implementación de una herramienta de radio definido por software que emule una red de telefonía celular móvil para ser usada en la enseñanza dentro del programa de ingeniería electrónica*. Universidad de La Costa, 2022.
- [28] D. Carralero Alonso, *Radio Definida Por Software En Dispositivos De Bajo Coste*. Universidad de La Laguna, 2016.
- [29] D. Ball, N. Naik y P. Jenkins, "Spectrum Alerting System Based on Software Defined Radio and Raspberry Pi," en *Signal Process. Def. Conf. SSPD 2017*, vol. 2017-Janua, 2017, págs. 1-5.
- [30] R. Utrilla, A. Rozas, J. Blesa y A. Araujo, "A hybrid approach to enhance cognitive wireless sensor networks with energy-efficient software-defined radio capabilities," en *International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, 2017, págs. 294-299.
- [31] G. Piccinni, G. Avitabile, G. Coviello y C. Talarico, "Modeling of a re-configurable indoor positioning system based on software defined radio architecture," en *2018 New Generation of CAS, NGCAS 2018*, 2018, págs. 174-177.
- [32] Á. Rojo Ortego, *Inhibición de señales GSM en Software Defined Radio*, Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [33] A. Cassagne, *Optimization and parallelization methods for software-defined radio*. Univeristé de Bordeaux, 2021.
- [34] J. Phull, N. Grewal, S. Singh y A. Rani, "Implementation and Performance Analysis of Cognitive Radio with Frequency Updating Algorithm on Software-defined Radio Platform," *Recent Adv. Electr. Electron. Eng. (Formerly Recent Patents Electr. Electron. Eng.*, vol. 14, n.º 3, págs. 268-275, dic. de 2020.
- [35] Á. Rivera, *Implementación de Software Defined Radio en sistemas de comunicaciones actuales*. Universidad de Sevilla, 2017.
- [36] I. Georgescu, N. Angelescu, D. C. Puchianu, G. Predusca y L. D. Circumarescu, "Software defined radio applications - Receiving and decoding images transmitted by weather satellites," en *Proc. 13th Int. Conf. Electron. Comput. Artif. Intell. ECAI 2021*, jul. de 2021.
- [37] D. J. Deng, S. Y. Lien C. C. Lin, S. C. Hung y W. B. Chen, "Latency Control in Software-Defined Mobile-Edge Vehicular Networking," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, n.º 8, págs. 87-93, 2017.
- [38] Y. Ma, Y. Zeng y S. Sun, "A software defined radio based multi- function radar for IoT applications," en *2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2018*, vol. 2, 2019, págs. 239-244.
- [39] B. Siva Kumar Reddy, *Experimental validation of spectrum sensing techniques using software-defined radio*. Springer Singapore, 2019, vol. 511.
- [40] I. Martoyo, A. Coandi, D. Pratigny, H. Y. Kanalebe, H. P. Uranus y M. Pardede, "Software defined radio applications for mini GSM BTS and spectrum analyzer with bladeRF," en *Proceedings - 2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications, ICRAMET*, 2018, págs. 108-111.
- [41] S. Xu, X. Wang y M. Huang, "Software-Defined Next- Generation Satellite Networks: Architecture, Challenges, and Solutions," *IEEE Access*, vol. 6, n.º c, págs. 4027-4041, 2018.
- [42] T. Hussain, "A high performance software defined radio system architecture and development environment for a wide range of applications," en *2018 Int. Conf. Comput. Math. Eng. Technol. Inven. Innov. Integr. Socioecon. Dev. iCoMET 2018 - Proc*, vol. 2018-Janua, 2018, págs. 1-5.
- [43] A. Sulimov, A. Galiev, A. Karpov y V. Markelov, "Verification of Wireless Key Generation Using Software Defined Radio," en *2019 International Siberian Conference on Control and Communications*, 2019, págs. 1-6.
- [44] T. T. T. Quynh, T. V. Khoa, L. Nguyen y N. Linh-Trung, "Network coding with multimedia transmission: A software-defined- radio based implementation," *Proceedings - 2019 3rd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications and Computing, SigTelCom 2019*, n.º ii, págs. 109-113, 2019.
- [45] S. A. Alawsh, O. O. Al Basheer, A. O. Sirag y A. H. Muqaibel, "Range and angle measurements based on software defined radio platform," en *2019 IEEE 10th GCC Conference and Exhibition, GCC*, 2019, págs. 1-5.
- [46] S. Kumar, *Architecture for Simultaneous Multi-Standard Software Defined Radio Receiver*. Sorbonne Universite, 2019.
- [47] D. Shumakher, G. Nikonova y L. Shchapova, "Radiosignal Identification System for the Software-Defined Radio," en *2019 International Seminar*

- on *Electron Devices Design and Production, SED 2019 - Proceedings*, 2019, págs. 1-5.
- [48] F. A. M. Bargarai, A. M. Abdulazeez, V. M. Tiryaki y D. Q. Zeebaree, “Management of wireless communication systems using artificial intelligence-based software defined radio,” *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 14, n.º 13, págs. 107-133, 2020.
- [49] D. Bykhovsky, “Teaching wireless channel modeling with software- defined radio,” *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 28, n.º 2, págs. 314-323, 2020.
- [50] N. Ayir y T. Riihonen, “Impact of software-defined radio transmitter on the efficiency of RF wireless power transfer,” en *2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference, WPTC*, 2020, págs. 83-86.
- [51] B. S. K. Reddy, K. Mannem y K. Jamal, “Software Defined Radio Based Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) Systems,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 119, n.º 2, págs. 1251-1273, 2021.
- [52] J. Liang, H. Chen y S. C. Liew, “Design and Implementation of Time-Sensitive Wireless IoT Networks on Software-Defined Radio,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, n.º 3, págs. 2361-2374, 2022.
- [53] A. E. Stancombe, K. S. Bialkowski y A. M. Abbosh, “Portable microwave head imaging system using software-defined radio and switching network,” *IEEE J. Electromagn. RF Microwaves Med. Biol.*, vol. 3, n.º 4, págs. 284-291, 2019.
- [54] A. E. Stancombe y K. S. Bialkowski, “Portable biomedical microwave imaging using software-defined radio,” en *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC*, vol. 2018, Novem, 2019, págs. 572-574.
- [55] J. Marimuthu, K. S. Bialkowski y A. M. Abbosh, “Software- defined radar for medical imaging,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, n.º 2, págs. 643-652, 2016.
- [56] R. Y.-M. Huang, V. C. Leung, C.-F. Lai, S. Mukhopadhyay y R. Lai, “Reconfigurable Software Defined Radio in 5G Mobile Communication System,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 25, n.º December, págs. 12-14, 2015.
- [57] A. Sadek, H. Mostafa, A. Nassar e Y. Ismail, “Towards the implementation of Multi-band Multi-standard Software-Defined Radio using Dynamic Partial Reconfiguration,” *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 30, n.º 17, págs. 1-12, 2017.
- [58] A. Sadek, H. Mostafa y A. Nassar, “On the use of dynamic partial reconfiguration for multi-band/multi-standard software defined radio,” en *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, 2016, págs. 498-499.
- [59] D. Rouffet y W. König, “Dynamic channel coding reconfiguration in Software Defined Radio,” en *2015 27th International Conference on Microelectronics (ICM)*, Casablanca, Morocco, 2015, págs. 13-16.
- [60] S. O. Ugwuanyi y M. A. Ahaneku, “Radio frequency and channel investigation using software defined radio in MATLAB And simulink environment,” *Niger. J. Technol.*, vol. 37, n.º 4, pág. 1049, 2018.
- [61] T. Kokumo Yesufu, “Weak Amplitude Modulated (AM) Signal Detection Algorithm for Software-Defined Radio Receivers,” *Int. J. Intell. Inf. Syst.*, vol. 4, n.º 4, pág. 79, 2015.
- [62] T. Kokumo, J. Otolorin y A. Olawole, “An Algorithm for a Sub-Nyquist Rate AM and FM Software-Defined Radio Based on the Market Paradigm,” *Sci. J. Circuits, Syst. Signal Process.*, vol. 4, n.º 3, pág. 18, 2015.
- [63] S. Ajala, E. Adetiba, M. B. Akanle, O. O. Obiyemi, S. Thakur y J. Abolarinwa, “Experimentations on the Transmit Power of a Universal Software Radio Peripheral Using GNU Radio Framework and a Handheld RF Explorer,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 655, n.º 1, págs. 1-7, 2021.