



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de
modulación y análisis espectral en sistemas WRAN en radios
cognitivas**

AUTOR:

Prócel Contreras, Julio Ricardo

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 8 de febrero del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Prócel Contreras, Julio Ricardo** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

MSc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 8 de febrero del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Prócel Contreras, Julio Ricardo**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **“Implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN en radios cognitivas”**, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 8 de febrero del 2021

EL AUTOR

Prócel Contreras, Julio Ricardo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Prócel Contreras, Julio Ricardo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Maestría titulada: **“Implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN en radios cognitivas”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 8 de febrero del 2021

EL AUTOR

Prócel Contreras, Julio Ricardo

REPORTE DE URKUND


Fernando Palacios Meléndez (edwin_pala)

Documento [Procel_Julio_Final2021.docx](#) (D93684589)

Presentado 2021-01-26 14:54 (-05:00)

Presentado por fernandopm23@hotmail.com

Recibido edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

Mensaje Revisión TT Julio Procel [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 28 páginas, se componen de texto presente en 8 fuentes.

Lista de fuentes Bloques

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	https://core.ac.uk/download/pdf/23459275...
	https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handi...
	Tesis Santiago Cruz.pdf
	http://dspace.unl.edu.ec:9001/jspui/bitstre...
	JEFFERSON HENRY CANDO CANDO_133818...
	https://www.researchgate.net/publication/...
	https://www.researchgate.net/profile/Andr...

62% # 1 Activo Fuente externa: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bit...> 62% 1 Advert

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN
TELECOMUNICACIONES

TEMA: Implementación

de escenarios de simulación mediante técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN en radios cognitivas

AUTOR: Prócel Contreras, Julio Ricardo

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 10 de enero del 2021

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN Certificamos que el presente trabajo fue

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN
TELECOMUNICACIONES

TEMA: Implementación

de esquemas de modulación digital para sistemas de banda ancha utilizando

AUTOR:
Murillo, Efraín

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Grado Académico de MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR: Paz Romero, Manuel de Jesús

Ecuador 11 de junio de 2018

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN

Dedicatoria

Dedico este logro a mi esposa Ani Arias y mis padres Julio Prócel y Lilia Contreras, por darme su apoyo incondicional, y así poder alcanzar con toda normalidad la meta que me propuse desde que inicié la maestría.

JULIO RICARDO PRÓCEL CONTRERAS

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por permitirme terminar de excelente manera esta etapa muy importante de mi vida.

A mi esposa Ani y mis hijos Julio y Daniel quienes han sido mi inspiración en todo este camino.

A mis padres por formarme como persona y guiarme hasta lo que hoy soy, un reflejo de ellos.

A mis suegros por darme su confianza.

A mi hermano quien me ha enseñado con hechos que si se es constante se puede conseguir lo que uno se proponga.

JULIO RICARDO PRÓCEL CONTRERAS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

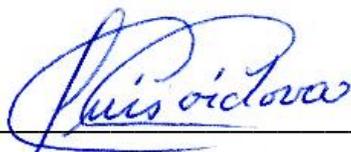
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. 

M. Sc. QUEZADA CALLE, EDGAR RAUL
REVISOR

f. 

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. 

M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
Resumen	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes.....	16
1.3. Definición del problema a investigar.....	17
1.4. Objetivos.....	17
1.5. Hipótesis.....	18
1.6. Metodología de investigación.....	18
Capítulo 2: Estado del arte.....	19
2.1. Descripción general de radio cognitiva.....	19
2.2. Teoría y requisitos de radio cognitiva (CR).....	20
2.2.1. Características de las radios cognitivas.....	21
2.3. Radio definido por software utilizando cognitivo.....	22
2.4. Transceptor de radio cognitivo.....	23
2.5. Arquitectura de red de radio cognitiva.....	27
2.5.1. Red Primaria.....	27
2.5.2. Red de radio cognitiva.....	28
2.6. Detección de espectro.....	29
2.6.1. Métodos de la detección de espectro.....	29
2.6.2. Retos de la detección de espectro.....	30
2.6.3. Detección de espectro multidimensional.....	31
2.7. Métodos de detección de espectro para radio cognitiva.....	32
2.7.1. Detección de energía.....	32
2.7.2. Detección de ondículas.....	34
2.7.3. Detección de ciclo estacionario.....	35
2.7.4. Filtro emparejado.....	35

2.7.5.	Comparación entre métodos de detección.....	36
2.8.	Detección cooperativa del espectro.....	36
2.9.	Gestión del espectro.....	38
2.9.1.	Análisis de espectro.	38
2.9.2.	Decisión de espectro.....	39
2.10.	Movilidad del espectro.....	39
2.11.	Compartir espectro.....	40
2.12.	Principios de acceso dinámico al espectro radioeléctrico (ERE)....	41
2.12.1.	Modelo dinámico exclusivo.....	42
2.12.2.	Modelo compartido abierto.....	43
2.12.3.	Modelo de acceso jerárquico.....	43
2.12.4.	Acceso oportunista al espectro (OSA).....	44
Capítulo 3:	Diseño, Implementación y resultados.....	46
3.1.	Descripción general del sistema WRAN.....	46
3.2.	Técnicas de modulación digital para el sistema WRAN.....	48
3.2.1.	Modulación de amplitud en cuadratura (QAM).....	48
3.2.2.	Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK).....	48
3.3.	Implementación del sistema WRAN en Simulink.....	50
3.3.1.	Transmisor del sistema WRAN.....	52
3.3.2.	Receptor del sistema WRAN.....	55
3.4.	Detección de espectro en sistema WRAN en radio cognitiva:.....	55
3.5.	Análisis de resultados obtenidos de la detección de espectro utilizando MatLab.....	59
3.6.	Análisis de resultados obtenidos del sistema WRAN en Simulink.....	63
Conclusiones	68
Recomendaciones	69
Bibliografía	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama funcional de una radio cognitiva (CR).	20
Figura 2. 2: Comparación funcional de los distintos tipos de equipos de RF.	22
Figura 2. 3: Diagrama de bloques del transceptor SDR.....	24
Figura 2. 4: Diagrama de bloques del transceptor CR.....	26
Figura 2. 5: Arquitectura de radio cognitiva.	29
Figura 2. 6: Diversos aspectos de la detección de espectro para CR.....	30
Figura 2. 7: Implementación digital de detección de energía (a) con periodograma, y (b) con prefiltro analógico y dispositivo de ley cuadrática. 33	
Figura 2. 8: Implementación del detector de energía en el dominio de la frecuencia.	34
Figura 2. 9: Detección cooperativa del espectro en redes de radio cognitiva.	37
Figura 2. 10: Clasificación del espectro compartido en radio cognitiva.....	40
Figura 2. 11: Clasificación del acceso dinámico al espectro.....	42
Figura 2. 12: Representación del DSA en los espacios en blancos del ERE.	44
Figura 2. 13: Uso del espectro radio eléctrico (ERE).....	45

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Circuito equivalente que produce la modulación 16-QAM.	49
Figura 3. 2: Circuito equivalente que produce la modulación QPSK.....	50
Figura 3. 3: Diagrama de constelación para el sistema QPSK.	50
Figura 3. 4: Implementación del sistema WRAN en SIMULINK.....	51
Figura 3. 5: Diagrama de bloques del transmisor QPSK para el sistema WRAN.....	52
Figura 3. 6: Bloque de parámetros de generación binaria mediante distribución de Bernoulli.....	52

Figura 3. 7: Módulos del subsistema 1 para el transmisor QPSK.	53
Figura 3. 8: Bloque de parámetros de la modulación QPSK.....	54
Figura 3. 9: Módulos del subsistema 2 para el transmisor QPSK.	54
Figura 3. 10: Diagrama de bloques del receptor QPSK para el sistema WRAN.	55
Figura 3. 11: Módulos del subsistema 3 para el receptor QPSK.....	55
Figura 3. 12: Módulos del subsistema 4 para el receptor QPSK.....	55
Figura 3. 13: Flujo circular de las tareas de entornos de radio cognitiva.	57
Figura 3. 14: Espectro de bandas utilizado y de bandas no utilizadas.....	59
Figura 3. 15: Primera banda no utilizada agregada al 1er usuario secundario.	60
Figura 3. 16: Segunda banda no utilizada agregada al 2do usuario secundario.	60
Figura 3. 17: Tercera banda no utilizada agregada al 3er usuario secundario.	61
Figura 3. 18: Todas las bandas del espectro están operativas.	61
Figura 3. 19: Espectro del sistema WRAN para una SNR= 11 dB.....	62
Figura 3. 20: Espectro del sistema WRAN para una SNR= 17 dB.....	62
Figura 3. 21: Diagrama de constelación para el sistema QPSK.	64
Figura 3. 22: Diagrama de constelación para el sistema 16-QAM.....	64
Figura 3. 23: Diagrama de constelación para el sistema 64-QAM.....	65
Figura 3. 24: BER no codificado para QPSK, 16-QAM y 64-QAM.....	66
Figura 3. 25: BER codificado para QPSK con diferentes tasas de código...	66
Figura 3. 26: BER codificado para 16-QAM con diferentes tasas de código.	67
Figura 3. 27: BER codificado para 64-QAM con diferentes tasas de código.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Ventajas y desventajas de las técnicas de detección de espectro.	36
---	----

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Generación de las comunicaciones inalámbricas y sus respectivos estándares.	46
Tabla 3. 2: Parámetros de servicios del sistema WRAN.....	58
Tabla 3. 3: Parámetros de simulación para el sistema WRAN.	63

Resumen

El presente documento se desarrolla la implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN basados en radio cognitiva (CR). La CR es más eficaz para trabajar en un entorno de desastre. Su asignación de frecuencia, agilidad, imaginabilidad y capacidad también son aceptables. La detección del espectro y sus funciones pueden brindarnos un gran rendimiento en la nueva gestión del espectro. La red IEEE 802.22 es una red basada en tecnología cognitiva que mejorará el rendimiento de los sistemas de comunicación 4G y de sistemas de TV en zonas rurales. La función principal de la radio cognitiva es identificar el espectro de frecuencias a partir de la señal de radio requerida. En este proyecto, se revisa el concepto de simular un sistema de radio cognitivo para reprocesar el espectro no utilizado localmente para aumentar la capacidad total del sistema. Este trabajo se centra en el análisis práctico de los sistemas de radio cognitivos. Para probar el rendimiento de la radio cognitiva, se ha utilizado MATLAB para la simulación.

Palabras claves: Modulación, Espectro, Radio, Frecuencia, Rendimiento, Simulación.

Abstract

This document develops the implementation of simulation scenarios using modulation techniques and spectral analysis in WRAN systems based on cognitive radio (CR). CR is most effective for working in a disaster environment. Its frequency allocation, agility, imaginability and capacity are also acceptable. Spectrum detection and its functions can give us great performance in new spectrum management. The IEEE 802.22 network is a network based on cognitive technology that will improve the performance of 4G communication systems and TV systems in rural areas. The main function of cognitive radio is to identify the frequency spectrum from the required radio signal. In this project, the concept of simulating a cognitive radio system is reviewed to reprocess unused spectrum locally to increase the total capacity of the system. This work focuses on the practical analysis of cognitive radio systems. To test the performance of cognitive radio, MATLAB has been used for simulation.

Keywords: Modulation, Spectrum, Radio, Frequency, Performance, Simulation.

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

En la actualidad el espectro radio eléctrico en el Ecuador es considerado un recurso natural limitado, aunque este se propaga por el espacio, el Estado se reserva el derecho de administrarlo, regularlo y controlarlo, con el fin de evitar congestiones en el uso de las telecomunicaciones. (Agencia De Regulación y Control De Las Telecomunicaciones, 2017).

Existen varios servicios de telecomunicaciones que usan el espectro radio eléctrico para ser transmitidos como servicios de telefonía y datos móviles, televisión, radio difusión, etc. y como es conocido en ocasiones el uso del espectro radio eléctrico no es eficiente por lo que se estaría subutilizando.

En el Ecuador existen sitios rurales donde la población no cuenta con servicios de internet ya sea por la geografía, por distancia o porque la densidad de población es muy baja haciendo que la implementación de este servicio sea muy costosa y poco rentable para los proveedores de servicios de internet.

Convergiendo los dos puntos anteriores es ahí donde podría utilizarse los sistemas basados en radio cognitiva, siendo el estándar IEEE 802.22 el método de acceso que trabaja sobre la banda de TV, aprovechando los TVSW por sus siglas en inglés (TV White Spaces) y así poder brindar servicio de internet a poblaciones que se encuentran en zonas rurales alejadas de baja densidad poblacional contribuyendo a la disminución de la brecha digital en el Ecuador.

1.2. Antecedentes.

Para el común denominador de las personas en la actualidad consideran sumamente importante contar o tener acceso al internet, el cual prácticamente

se ha convertido en un derecho del ser humano para mantenerse comunicado y conectado con el mundo.

En el presente existen tecnologías como GSM-UMTS-LTE-Advanced que permiten a las masas humanas estar siempre conectadas a internet y en movimiento, eso quiere decir que estos servicios utilizan el espectro radio eléctrico para propagarse, no obstante, con el nuevo 5G se están buscando liberar y buscar nuevas frecuencias para que esta tecnología pueda trabajar. Sin embargo, con esto continúa la problemática de la subutilización del espectro radio eléctrico y del no acceso a las tecnologías en zonas muy poco pobladas o alejadas.

Con la utilización de sistemas de radio cognitiva puede aprovecharse para trabajar en bandas de frecuencias licenciadas de TV, las cuales según estudios en otras partes del mundo son subutilizadas y pueden ser empleadas para la transmisión de datos de manera oportunista sin interferir a las transmisiones de TV. (Zhao, y otros, 2007)

1.3. Definición del problema a investigar.

La necesidad de realizar la implementación de modelado de simulación utilizando técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN basados en radio cognitiva.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General:

Demostrar que la banda de TV en sitios rurales está disponible para su reutilización por sistemas de radio cognitiva, específicamente el estándar IEEE 802.22.

1.4.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir el estado del arte de radio cognitiva y aspectos relevantes del estándar IEEE 802.22.

- ✓ Diseñar el modelo de una WRAN en MatLab/Simulink utilizando técnicas de modulación y detección espectral basado en radio cognitiva.
- ✓ Evaluar los resultados obtenidos del sistema WRAN propuesto.

1.5. Hipótesis

Se pretende demostrar que existen espacios en blanco en la banda de TV, para reutilización del espectro radioeléctrico, que está siendo subutilizado y así poder implementar sistemas basados en radio cognitiva en zonas rurales alejadas o con baja densidad poblacional.

1.6. Metodología de investigación.

El presente trabajo de titulación tiene un enfoque cuantitativo ya que se utiliza software de simulación para la adquisición de datos de manera hipotética, ya que las plataformas de simulación emulan una red en tiempo real. Se emplean dos métodos de investigación científica, tales como, descriptivo y exploratorio.

Capítulo 2: Estado del arte.

El presente capítulo trata el estado del arte de la radio cognitiva y radio definido por software que son parte fundamental para el estudio espectral del sistema WRAN.

2.1. Descripción general de radio cognitiva.

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) es responsable de la regulación de las telecomunicaciones interestatales, la administración y la concesión de licencias del espectro electromagnético dentro de los Estados Unidos y hace cumplir los requisitos sobre interferencia entre estaciones en todas las bandas de frecuencia de radio. La licencia de la FCC se segmenta a usuarios particulares en áreas geográficas particulares. Se dejaron abiertas unas pocas bandas pequeñas sin licencia para que cualquiera las usara siempre que siguieran ciertas regulaciones de energía. Con el reciente auge de las tecnologías inalámbricas personales, estas bandas sin licencia se han llenado de todo, desde redes inalámbricas hasta teléfonos inalámbricos digitales. (Márquez Ramos, 2013)

Para combatir el hacinamiento, la FCC ha estado investigando nuevas formas de administrar los recursos de RF. La idea básica es encontrar huecos en el espectro y utilizarlos. Algunas bandas de espectro tienen licencia y pueden ser utilizadas por una tecnología y servicios específicos. Estas bandas están controladas por agencias reguladoras como FCC y ETSI. Por otro lado, hay bandas de espectro que son abiertas y gratuitas para ser utilizadas por cualquiera, como las bandas industriales, científicas y médicas (ISM). (Zhang, 2008)

La radio cognitiva (*Cognitive Radio, CR*) puede detectar inteligentemente el entorno y adaptarse a sus características cambiantes al alterar sus parámetros de transmisión, como modulación, frecuencia, formato de trama, etc. En los primeros días de las comunicaciones, había radios fijas en las que los parámetros del transmisor eran fijados y configurados por sus operadores.

La nueva era de las comunicaciones incluye la Radio Definida por Software (*Software Defined Radio, SDR*). Una SDR es una radio que incluye un transmisor en el que los parámetros de funcionamiento, incluido el rango de frecuencia, el tipo de modulación o la potencia de salida máxima radiada o conducida, pueden modificarse mediante un cambio en el software sin realizar cambios en el hardware.

Para solucionar esto, las bandas ISM se proporcionan como una buena solución para manejar este tipo de redes. Sin embargo, después de un tiempo, las bandas ISM se congestionan y sobre utilizan, lo que afecta la calidad de la comunicación en esas bandas y, para superar esto, se ha propuesto como una solución prometedora la SDR seguida de las redes de radio cognitiva (CR) basadas en el acceso dinámico al espectro. En la figura 2.1 se muestra el diagrama funcional de un dispositivo CR.

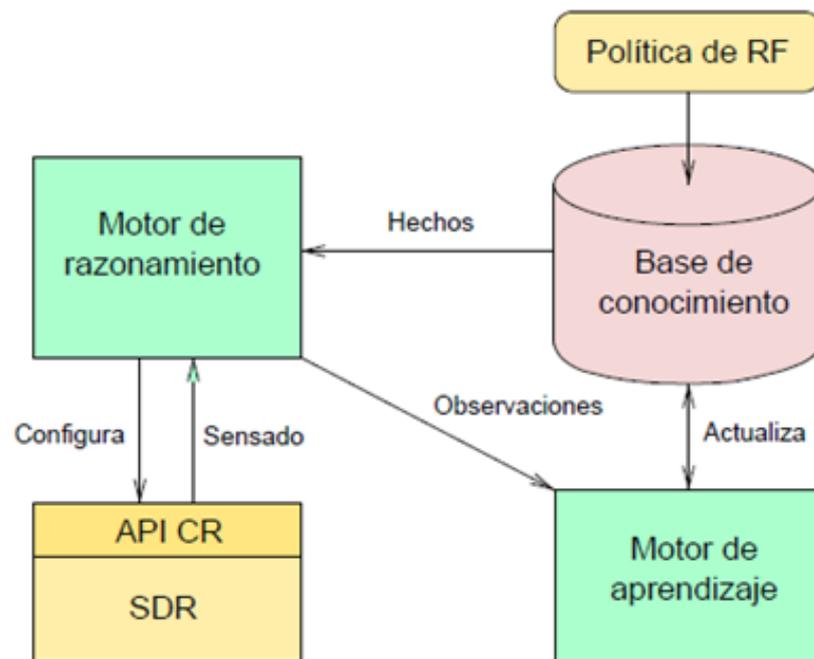


Figura 2. 1: Diagrama funcional de una radio cognitiva (CR).
Fuente: (Clancy III, 2006)

2.2. Teoría y requisitos de radio cognitiva (CR).

La radio cognitiva es una radio inteligente que puede detectar, analizar y compartir información para tomar la mejor decisión. Se utiliza para

aprovechar al máximo el ancho de banda de la radio. La radio cognitiva necesita parámetros variables para la descripción del espacio de optimización. SDR es responsable de la gestión de estos parámetros. El objetivo principal de esta tecnología es respaldar las necesidades a un costo mínimo y proporcionar un mayor rendimiento y una mejor calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*).

Para la implementación de la funcionalidad real de la red, la radio cognitiva requiere una Red Adaptable por Software (*Software Adaptable Network, SAN*) y de la misma manera para la modificación del funcionamiento de la radio, por ejemplo, forma de onda, ancho de banda, tiempo, espacialidad, etc., la radio cognitiva depende de una Radio Definida por Software (SDR).

2.2.1. Características de las radios cognitivas.

Las radios cognitivas (CRs) poseen 3 características fundamentales para diferenciarse de los radios tradicionales. La primera es la capacidad de obtener conocimientos, dicho conocimiento hace referencia a la obtención de información interna y externa del CR, como posición geográfica para el análisis y sensado del espectro radio eléctrico, ancho de banda y frecuencia, área de cobertura, patrones de uso del ERE, usuarios que se encuentran utilizando el canal de transmisión con el fin de no causar interferencias; inclusive el estado propio del CR frecuencia, potencia, protocolos y más parámetros de configuración (Guamo M., 2019).

La segunda es capacidad de cambiar parámetros de funcionamiento, esto toma forma con el conocimiento obtenido de experiencias anteriores, sin la intervención del usuario, es decir, que lo realiza de forma autónoma y dinámica, respetando las políticas definidas para seleccionar la configuración más idónea de tecnología de acceso, frecuencia, potencia, modulación. Esta capacidad se la puede implementar de dos maneras con módulos de hardware o lo que ahora se conoce como radio definido por software (SDR).

La tercera es capacidad de aprender de los resultados obtenidos, para mejorar y predecir su performance, esto se logra con la data almacenada de experiencias anteriores y sus resultados, implementando así algoritmos y modelos que calculan cada hecho ejecutado por el CR optimizando de forma permanente los parámetros de operación de este (Hernández & Carro, 2016).

2.3. Radio definido por software utilizando cognitivo.

Según la UIT-R, (2017) una SDR consiste en “un transmisor y/o receptor radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite fijar o modificar mediante plataformas informáticas los parámetros de funcionamiento de RF (frecuencias, modulación, potencia de salida, entre otras) salvo los cambios de los parámetros de funcionamiento que se producen durante el funcionamiento normal preinstalado y predeterminado de un sistema radioeléctrico con arreglo a una especificación del sistema o a una norma. Es decir, las funciones del radio tradicional son implementadas utilizando software.

Con la ayuda de los SDR el diseño de los CR se podría simplificar a un solo hardware que realice las funciones de los diferentes módulos que conformarían un CR basado solo en hardware. En la Figura 2.2 se muestra la representación en bloques de un equipo de radio tradicional.

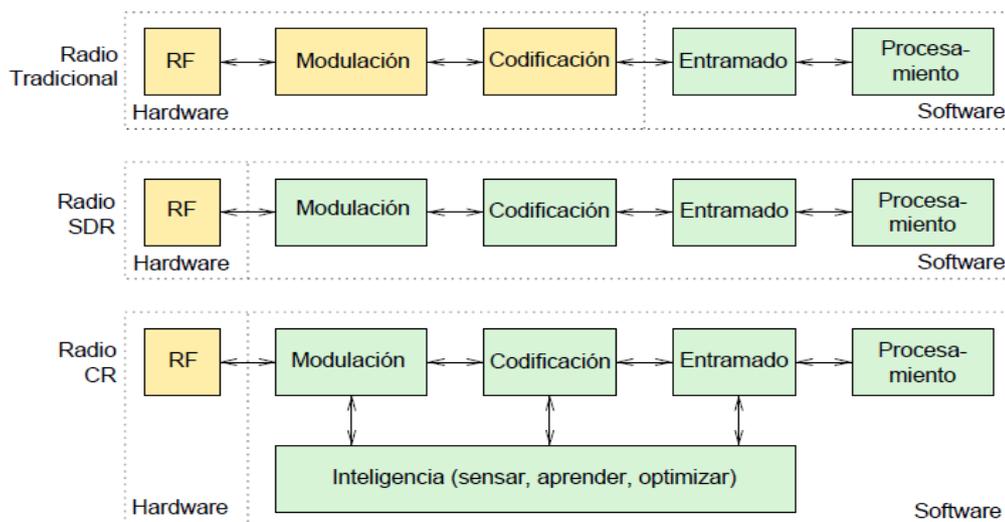


Figura 2. 2: Comparación funcional de los distintos tipos de equipos de RF.
Fuente: (Clancy III, 2006)

De la figura 2.2 el hardware se encarga de la parte RF, modulación y codificación mientras el entramado y el procesamiento son funciones que se realizan utilizando software; un equipo de radio definido por software, donde la parte RF es netamente hardware y el resto de componentes sus funciones son implementadas via software y finalmente un radio cognitivo definido por software, donde el hardware es la parte RF y el resto de sus funciones son implementadas utilizando SDR inclusive la parte cognitiva del CR que sería la inteligencia (censar, aprender, optimizar).

La radio definida por software (SDR) se introdujo para manejar más de una tecnología de comunicación (por ejemplo, GSM, CDMA, entre otras): los terminales pueden cambiar su funcionamiento con respecto al software. También mejora los dispositivos inalámbricos con capacidades cognitivas como conciencia, aprendizaje, detección y razonamiento. También puede proporcionar una conexión global sin problemas. La SDR juega un papel vital para darse cuenta de las características de la CR. La radio cognitiva se encarga del ancho de banda, la frecuencia, la potencia y la modulación de acuerdo con el entorno de radio actual. Entonces, para disminuir la complejidad del hardware, la SDR proporciona funcionalidades de radio variables.

La CR basada en SDR ajusta automáticamente sus funciones según los objetivos deseados. Por lo tanto, SDR es una plataforma de radio genérica que tiene la capacidad de operar en diferentes anchos de banda sobre un gran número de frecuencias, así como utilizar diferentes esquemas de modulación y formatos de forma de onda. Como resultado de esto, la SDR puede admitir múltiples estándares como GSM, WCDMA, WIMAX, LTE y esquemas de acceso múltiple como TDMA, OFDM y SDMA.

2.4. Transceptor de radio cognitivo.

La función del dispositivo transceptor inalámbrico es transferir información mediante el uso de radiofrecuencia (RF) como parte del espectro

electromagnético. En el pasado, la Radio Definida por Hardware (*Hardware Defined Radio, HDR*) clásica no tenía la capacidad de realizar un conjunto de funciones de radio, pero era muy limitada y solo podía realizar unas pocas funciones que solo pueden modificarse mediante intervención física, donde todas las modulaciones y demodulaciones se realizaron en el dominio analógico.

HDR tiene una flexibilidad limitada, es muy caro y no admite varios estándares de señal. Durante las últimas dos décadas, los sistemas de radio analógicos están siendo reemplazados por sistemas de radio digitales para varias aplicaciones de radio en espacios civiles, militares y comerciales. Como resultado, Mitola & Maguire, (1999) introdujeron la idea de Radios Definidas por Software (SDR).

La tecnología SDR simplifica la implementación de la mayoría de las funcionalidades de radio como modulación y demodulación, codificación y generación de señales. En módulos de software que se ejecutan en la misma plataforma de hardware. SDR contiene todos los bloques funcionales que se implementan en la radio digital, pero como software en lugar de hardware (por ejemplo, mezclador, filtros, moduladores, demoduladores).

La arquitectura SDR consta de tres unidades principales (véase la figura 2.3): interfaz RF sintonizable por software, convertidor analógico-digital (*Analog-to-Digital Converter, ADC*) de banda ancha y convertidor digital a analógico (*Digital-to-Analog Converter, DAC*) que convierte la implementación de la sección de frecuencia intermedia (IF) y radio de banda base digital reconfigurable por software (Abdulsattar & Hussein, 2012).

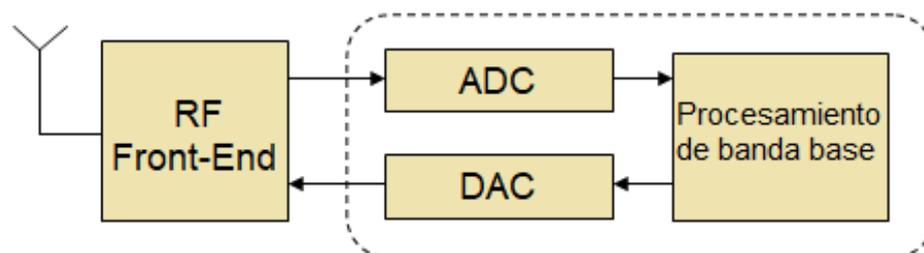


Figura 2. 3: Diagrama de bloques del transceptor SDR.

Fuente: (Abdulsattar & Hussein, 2012; Marwanto et al., 2009; Mate et al., 2011)

De la figura 2.3 RF Front-End (extremo frontal) se refiere a los circuitos analógicos entre la antena y los convertidores de datos. La función principal de la interfaz de RF es modular y demodular la portadora con y desde los datos, respectivamente. Los convertidores ADC y DAC son la conexión entre el mundo físico de las señales analógicas continuas y el mundo de las muestras digitales discretas manejadas por software. Mientras, que las operaciones de procesamiento de señales de banda base se definen mediante diseños programables que se ejecutan en hardware digital (módulos reconfigurables por software, filtrado de conversión, modulación-demodulación, codificación-decodificación).

Este dispositivo está disponible en varias formas en circuitos integrados (IC) personalizados de un solo chip, de los cuales los más comúnmente utilizados para software de radio son los procesadores de señales digitales (DSP), matrices de puertas programables en campo (FPGA), procesadores de propósito general (GPP), circuitos integrados de aplicaciones específicas (ASIC) y sistemas en chip (SoC) con aceleradores de hardware (Abdulsattar & Hussein, 2012).

Dado que SDR se basa en el procesamiento de señales digitales basado en software junto con componentes de radiofrecuencia sintonizables por software, representa una plataforma de radio muy flexible y general que es capaz de operar con muchos anchos de banda diferentes en una amplia gama de frecuencias y utilizando muchas formas de onda y modulación diferentes. formatos (Abdulsattar & Hussein, 2012).

Como resultado, SDR puede soportar múltiples estándares, es decir, GSM, EDGE, LTE, WCDMA, CDMA2000, Wi-Fi, WiMAX y tecnologías de acceso múltiple como el acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*), acceso múltiple por división de código (*Code Division Multiple Access, CDMA*), acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA*).

Un transceptor CR tiene la capacidad de detectar el entorno y puede adaptar los parámetros de su capa física de acuerdo con las condiciones ambientales. La CR con SDR da como resultado un sistema altamente flexible, ya que SDR con las últimas técnicas de comunicación es el núcleo de la radio cognitiva. La figura 2.4 muestra la relación entre la arquitectura SDR y la CR: al agregar un módulo de inteligencia artificial a una arquitectura SDR, es factible obtener un dispositivo adaptable y flexible capaz de aprender de forma independiente y reaccionar a los estímulos externos de manera adecuada.

Según el conjunto de criterios que se tengan en cuenta a la hora de decidir la transmisión y recepción de los cambios, existen dos tipos principales de CR:

- CR completa (radio Mitola) en el que se tienen en cuenta todos los posibles parámetros observables por un usuario secundario (*Secondary User, SU*).
- CR de detección de espectro (radio Haykin) en el que solo se considera el espectro de radiofrecuencia.

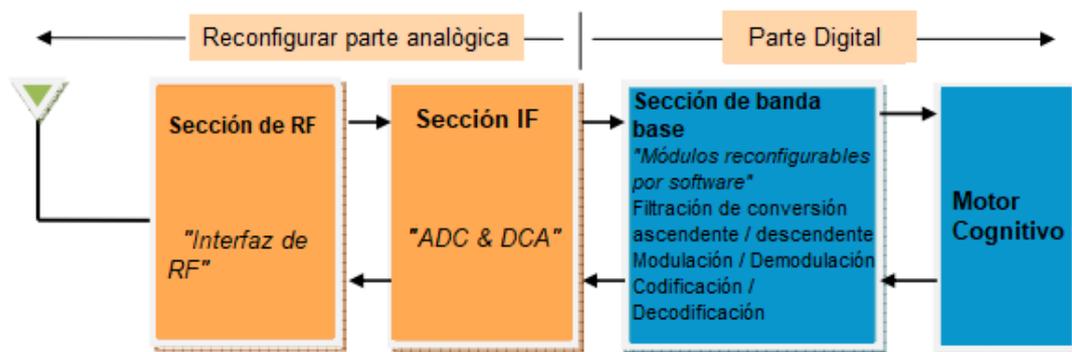


Figura 2. 4: Diagrama de bloques del transceptor CR.

Fuente: (Abdulsattar & Hussein, 2012)

No se espera que la radio Mitola se implemente por completo antes de 2030, hasta que todo el hardware SDR esté disponible en un tamaño adecuado. También se puede distinguir los tipos de RC en términos de las partes del espectro disponibles.

- CR de banda con licencia: es un CR utilizado en las bandas que se utilizan y venden por licencia. El estándar IEEE 802.22 define un

sistema para una red de área regional inalámbrica (WRAN) que utiliza huecos de espectro dentro de las bandas de TV entre 54 y 862 MHz. Para lograr sus objetivos, el estándar 802.22 utiliza tecnología CR para garantizar que no se produzcan interferencias indebidas en los servicios de televisión que utilizan las bandas de televisión. La norma está en desarrollo y actualmente se encuentra en forma de borrador (Abdulsattar & Hussein, 2012).

- CR de banda sin licencia: solo puede utilizar partes sin licencia del espectro de radiofrecuencia. Existe un sistema en el grupo de tareas (*Task Group 2, TG2*) de coexistencia para el estándar IEEE 802.15, que se centra en la coexistencia de WLAN y Bluetooth (Abdulsattar & Hussein, 2012).

2.5. Arquitectura de red de radio cognitiva.

Para Dhillon & Andrews, (2014) las arquitecturas de redes inalámbricas existentes emplean heterogeneidad en términos de políticas de espectro y tecnologías de comunicación. Además, algunas partes del espectro de radio tienen licencia para diferentes tecnologías y algunas bandas permanecen sin licencia como ISM. Una descripción clara de la arquitectura de la red de radio cognitiva es esencial para el desarrollo de protocolos de comunicación. La arquitectura de radio cognitiva consta de dos componentes: redes primarias y secundarias que se describen en las secciones 2.5.1 y 2.5.2.

2.5.1. Red Primaria.

El usuario principal es un usuario con licencia que tiene una banda específica que está controlada por la estación base principal, pero que no tiene más mejoras como compartir el espectro. La estación base primaria es una red de infraestructura fija que opera en una banda específica para una tecnología específica como BTS en el sistema celular y WiMAX, pero no tiene la capacidad de funcionar con la red de radio cognitiva porque la estación base primaria requiere algunas modificaciones como la necesitan tener protocolos

de radio cognitivos y con licencia para el acceso a la red principal de los usuarios de CR.

2.5.2. Red de radio cognitiva.

Una red que tiene la capacidad de acceder al espectro sin licencia solo de manera oportunista, se denomina Red de radio cognitiva. Sus componentes principales son los siguientes:

- **Usuario de radio cognitiva:** también llamado usuario sin licencia ya que no tiene licencia de espectro, por lo que se necesitan funcionalidades adicionales para compartir la banda del espectro.
- **Estación base de radio cognitiva:** se diferencia de la estación base principal, la estación base secundaria tiene nuevas modificaciones con capacidades de CR. No ceder a diferentes redes para una conexión perfecta con el usuario de CR. La arquitectura de red de CR (véase la figura 2.5) muestra diferentes tipos de redes de acceso a la red primaria, con red CR basada en infraestructura, sin red de CR basada en infraestructura (red ad-hoc). Las redes de CR operan tanto en bandas con licencia como sin licencia (entorno de espectro mixto) y hay tres tipos de acceso que son:
 - a) **Acceso a la red CR:** Los usuarios de CR pueden acceder a la estación base CR no solo a las bandas con licencia sino también a las bandas de espectro sin licencia.
 - b) **Acceso ad hoc de CR:** los usuarios de CR se comunican con diferentes usuarios de CR a través de la conexión ad hoc en bandas con licencia y sin licencia.
 - c) **Acceso a la red primaria:** Las bandas con licencia son medios para los usuarios de CR a través de los cuales acceden a la estación base primaria.

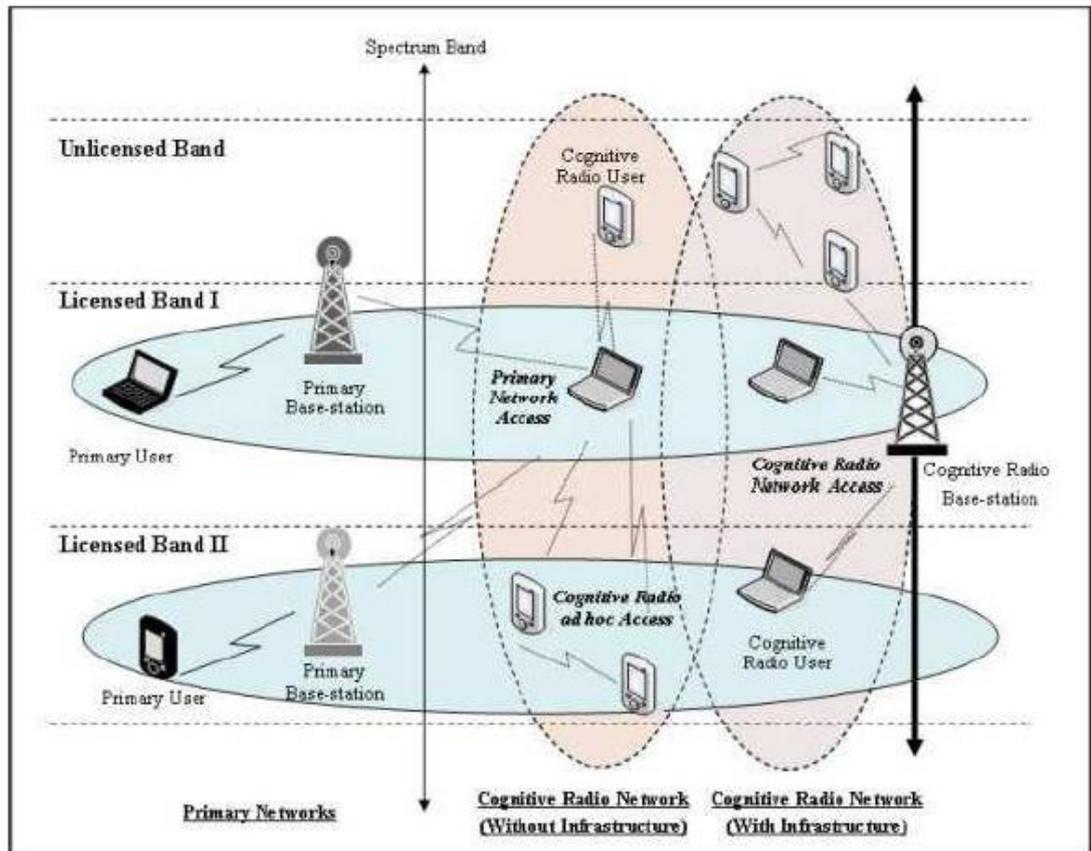


Figura 2. 5: Arquitectura de radio cognitiva.

Fuente: (Parvin et al., 2012)

2.6. Detección de espectro.

La detección del espectro es la parte más importante del sistema de radio cognitivo porque sin ella, se producirán interferencias y la llamada se interrumpirá. Además, la detección del espectro determinará los huecos o la parte libre del espectro (canales libres) que el usuario secundario podría utilizar en la red cognitiva. La figura 2.6 muestra el concepto del sistema propuesto de detección del espectro y todos los aspectos relacionados (técnicas de detección del espectro, tipos de detección del espectro y desafíos, etc.)

2.6.1. Métodos de la detección de espectro.

Las técnicas más importantes utilizadas en la detección de espectro son:

- a) Detección basada en detectores de energía
- b) Filtrado emparejado
- c) Detección basada en ciclos estacionarios
- d) Detección de ondículas
- e) Otros métodos de detección

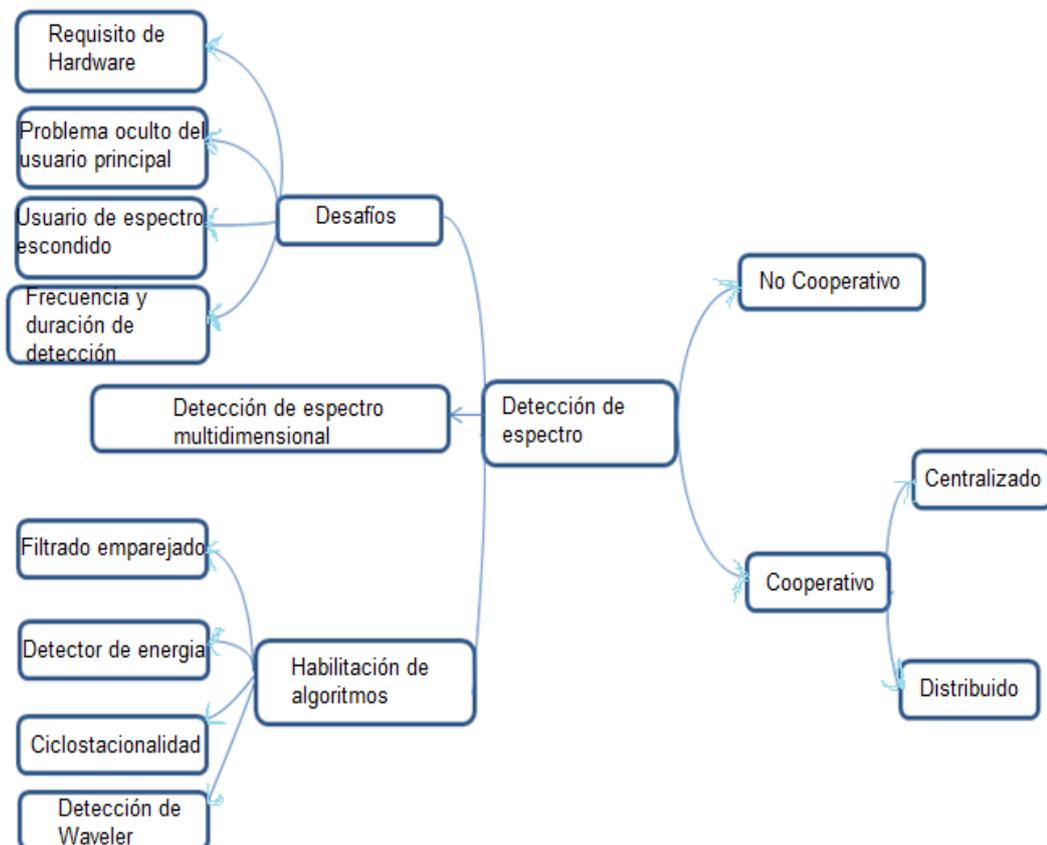


Figura 2. 6: Diversos aspectos de la detección de espectro para CR.

Fuente: (Patel et al., 2018)

2.6.2. Retos de la detección de espectro.

Hay algunos desafíos que deben tenerse en cuenta para una detección de espectro eficiente

- **Requisitos de hardware:** existe la necesidad de una antena que tenga la capacidad de operar en un ancho de banda mayor, también existe la necesidad de un convertidor analógico-digital (ADC) con procesador de señal de alta velocidad para la red de radio cognitiva.

- **Problema del usuario primario oculto:** el sombreado o el desvanecimiento de múltiples rutas crea el usuario primario oculto para que el sistema cooperativo pueda superar estos problemas.
- **Usuarios primarios de espectro ensanchado:** en el espectro ensanchado, la potencia del usuario primario (*Primary User, PU*) se dispersa y se extiende por un amplio rango de frecuencias que es difícil de detectar mientras que la información real es más estrecha.
- **Detección de tiempo:** conocida como período tranquilo donde todos los usuarios cognitivos dejan de transmitir y recibir datos, así que debe haber una sincronización entre todos los usuarios secundarios porque si cualquiera de los datos de las SUS transmisiones en este período, las SU se ocupará de él como si él es una PU, por lo que evitará que las SU utilicen la banda y hará interferencia a las PU. Este problema se puede solucionar si hay una buena sincronización.

2.6.3. Detección de espectro multidimensional.

Los usuarios cognitivos deben encontrar el espectro libre que el usuario principal no usa en un momento y una posición geográfica específicos. Por lo tanto, la frecuencia, el tiempo y el espacio del espectro de espacios en blanco deben tenerse en cuenta durante la detección del espectro. También en el espacio geográfico, el espectro puede estar ocupado en alguna parte del área y disponible en la otra parte en un momento dado.

Este punto es beneficioso y aprovecha la pérdida de trayectoria en el espacio ya que las mediciones detectan si hay un usuario principal o no que determina si habrá interferencia o no, pero teniendo cuidado con el problema oculto del usuario. Además, el ángulo del transmisor puede contribuir a evitar interferencias. Por ejemplo, si un usuario principal está transmitiendo en una dirección específica, el usuario secundario puede transmitir en otras direcciones sin crear interferencia para el usuario principal.

2.7. Métodos de detección de espectro para radio cognitiva.

La detección de espectro es esencial y necesaria en el sistema de CR para evitar interferencias dañinas. Al detectar y adaptarse al entorno, CR puede llenar los agujeros del espectro y servir a sus usuarios. La detección perdida del usuario sin licencia provoca un conflicto de canal que afecta a los usuarios con licencia, y la falsa alarma en la detección provocó una pérdida en la oportunidad del canal para los usuarios sin licencia. Se han propuesto varios métodos diferentes para verificar la existencia de los usuarios principales o no en un ancho de banda específico.

2.7.1. Detección de energía.

Es el método más fácil de implementar debido a su simplicidad y no depende de ningún conocimiento previo de la señal del usuario principal. La señal se detecta si el nivel de energía de la señal recibida es superior al nivel de umbral. Los desafíos de este método aparecen cuando la relación señal/ruido (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*) es baja y cercana al nivel de ruido, entonces este método tendrá un rendimiento pobre en este caso. Para el análisis matemático del detector de energía, para lo cual se supondrá una señal recibida tiene la siguiente forma:

$$y(n) = s(n) + w(n)$$

Donde $y(n)$ es la señal recibida, $s(n)$ es la señal detectada, y $w(n)$ es la muestra de ruido blanco gaussiano aditivo y n es el índice de muestra. La métrica de decisión para el detector de energía se puede escribir como:

$$M = \sum_{n=1}^N |y(n)|^2$$

Al comparar la métrica de decisión M con un umbral λ_E , se toma la decisión de ocupación del espectro. La decisión se toma distinguiendo entre $y(n) = w(n)$ y $y(n) = s(n) + w(n)$. La probabilidad de detección (P_D) y la

probabilidad de falsa alarma (P_F) se utilizan para analizar el rendimiento del detector de espectro. P_D es la probabilidad de detectar una señal de usuario primaria en el espectro de frecuencia considerado cuando la señal está realmente presente. Por tanto, se desea una gran probabilidad de detección. Puede formularse como:

$$P_D = Pr(M > \lambda_E | H1).$$

$$P_F = Pr(M > \lambda_E | H0).$$

P_F es la probabilidad de detección falsa que indica que la prueba decide incorrectamente que la señal del usuario principal está presente mientras no está presente en el espectro de frecuencia de prueba. Por lo tanto, la P_F debe mantenerse lo más pequeña posible para evitar la subutilización de las oportunidades de transmisión. El umbral de decisión λ_E puede seleccionarse de tal manera que proporcione valores óptimos de P_D y P_F . La detección de probabilidad perdida se expresa como:

$$P_M = 1 - P_D$$

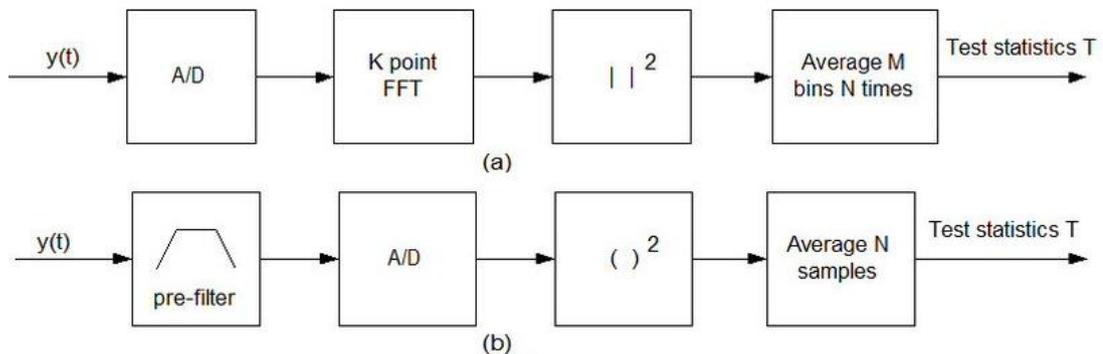


Figura 2. 7: Implementación digital de detección de energía (a) con periodograma, y (b) con prefiltro analógico y dispositivo de ley cuadrática.

Fuente: (Rawat & Yan, 2011)

La figura 2.7 muestra la implementación digital del detector de energía donde la función del filtro es eliminar el ruido, y luego convertir la señal analógica a digital y luego integrar el cuadrado y comparamos el último valor con un umbral para saber si hay usuarios principales.

El umbral λ_E se determina a partir del valor del nivel de ruido y aumentar el rendimiento de este método utilizando un usuario secundario de múltiples antenas y, por lo tanto, se mejorará la SNR. Además, el sistema cooperativo aumentará el rendimiento de este método, lo que se traduce en una mejora de la probabilidad de detección del espectro. Dado que el detector de energía se ha utilizado principalmente en radiometría. El detector de energía se puede implementar como un analizador de espectro, toma los contenedores de frecuencia promedio de una Transformada Rápida de Fourier (FFT), tal como se muestra en la figura 2.8.

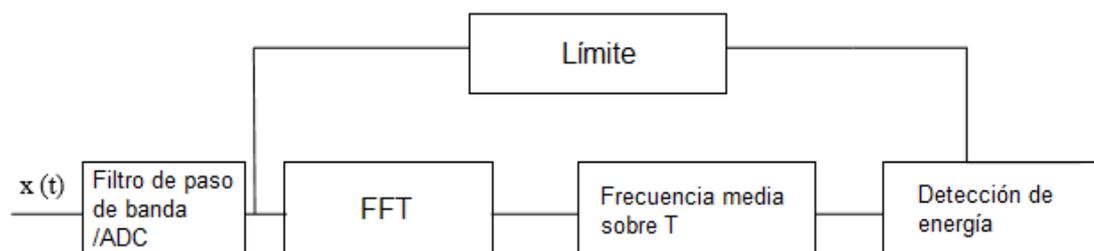


Figura 2. 8: Implementación del detector de energía en el dominio de la frecuencia.
Fuente: (Rawat & Yan, 2011)

La señal de entrada entra primero en el convertidor A/D seleccionado por el filtro pasa banda y allí se obtendrá el umbral. Después de obtener la salida del integrador, que se compara con el umbral, se establece la presencia de los usuarios principales. El tamaño N de la FFT y el tiempo de observación T influirán en la ganancia de procesamiento, si se aumenta N , mejorará la resolución de frecuencia que es adecuada para la detección de señales de banda estrecha. Por otro lado, si T aumenta, la potencia de ruido disminuye, por lo que aumentará la SNR.

2.7.2. Detección de ondículas.

Este método necesita información sobre el patrón de la señal como el preámbulo y los patrones piloto transmitidos, etc. que se utilizan con fines de sincronización. En este método, la señal recibida se correlacionará con una copia conocida de sí misma. Se utiliza para anchos de banda más grandes ya que tiene altas tasas de muestreo.

2.7.3. Detección de ciclo estacionario.

Este método se utiliza para detectar los usuarios primarios en función de las características ciclo estacionarias de la señal recibida que son causadas por la periodicidad en la señal o en sus estadísticas como la media y la autocorrelación. Este método puede resolver el problema de limitación del método de detección de energía, ya que puede diferenciar las señales de usuario primarias de diferentes tipos de transmisiones y ruido. La función de correlación cíclica se utiliza para detectar señales en el espectro deseado.

En la tecnología basada en OFDM como WIMAX, las subportadoras Piloto se utilizan para la sincronización de canales y para generar firmas específicas del sistema o frecuencias cíclicas en determinadas frecuencias. Incluso algunas veces la secuencia del preámbulo contiene información de la red primaria. Una limitación de este método de detección es que todos los usuarios secundarios (SU) necesitan un conocimiento previo de las características cíclicas de las señales de usuarios primarios (PU). Las PU y SU deben tener diferentes frecuencias cíclicas para distinguirlas.

2.7.4. Filtro emparejado.

Es el método óptimo que se utiliza para detectar usuarios primarios, pero necesita tener conocimientos previos sobre los usuarios primarios como ancho de banda, frecuencia de operación, tipo y orden de modulación, modelado de pulsos y formato de trama. Para utilizar este método, el sistema de radio cognitivo necesita receptores para todo tipo de señales y su implementación es muy compleja.

A una SNR baja, el número de muestras requeridas es del orden $1/snr$ en contraste con las muestras $1/snr^2$ requeridas por el detector de energía. Ésta es una ventaja significativa. Sin embargo, el rendimiento se degrada en presencia de desplazamientos de frecuencia y temporización, así como de desvanecimiento y dispersión del retardo (que requiere ecualización).

2.7.5. Comparación entre métodos de detección.

La tabla 2.1 muestra un resumen rápido y la comparación de las ventajas y desventajas de los métodos discutidos anteriormente para el sistema no cooperativo.

Tabla 2. 1: Ventajas y desventajas de las técnicas de detección de espectro.

Enfoque de detección de espectro	Ventajas	Desventajas
Detección de energía	<ul style="list-style-type: none">• No necesita información previa• Bajo costo computacional	<ul style="list-style-type: none">• No funciona con SNR bajo• No se puede distinguir al usuario• Compartiendo el mismo canal
Filtro emparejado	<ul style="list-style-type: none">• Rendimiento de detección óptimo• Bajo costo computacional	<ul style="list-style-type: none">• Requiere un conocimiento previo del usuario primario.
Ciclo estacionario Detección	<ul style="list-style-type: none">• Robusto en SNR bajo• Robusto a la interferencia	<ul style="list-style-type: none">• Requiere información parcial del usuario principal• Alto costo computacional
Detección de ondículas	<ul style="list-style-type: none">• Efectiva para señal de banda ancha	<ul style="list-style-type: none">• No funciona para Spread• Alto costo computacional

Elaborado por: Autor.

2.8. Detección cooperativa del espectro.

El objetivo de esta técnica es mitigar el desvanecimiento, el sombreado debido a obstáculos o problemas de nodos ocultos y, al utilizar este método, se producirán muchas mejoras en el proceso de detección. En este método, los SUs se incorporarán para la detección de los PUs. Por lo tanto, los SUs pueden utilizar cualquier método que se haya discutido anteriormente para la detección de PUs, pero la decisión final se logra mediante la fusión de datos o la fusión de decisiones de la información recibida de las SUs para la detección cooperativa de las PUs.

La figura 2.9 muestra que CR3 está ensombrecido por un edificio alto sobre el canal de detección. En tal caso, la CR no detecta la presencia del usuario principal y, como consecuencia, se permite el acceso al canal mientras que, por otro lado, la PU todavía está en funcionamiento. Para hacer frente a este problema, se pueden organizar múltiples CR para realizar la detección del espectro de forma cooperativa. Debido a investigaciones recientes, la detección cooperativa puede aumentar en gran medida la probabilidad de detección en canales que se desvanecen. En general, la detección cooperativa del espectro consta de los siguientes pasos:

- Cada CR realiza de forma independiente mediciones para su detección de espectro local y luego toma una decisión binaria en el centro de Fusión de datos como en la Figura 3.5 para verificar si la PU está presente o no.
- Estas decisiones binarias tomadas por todos los CR se envían a un receptor común que es una estación base (BS) en una red celular o un punto de acceso (AP) en una LAN inalámbrica.
- Esas decisiones binarias son combinadas por un receptor común y se toma una decisión final para inferir la ausencia o presencia de la PU en la banda observada.

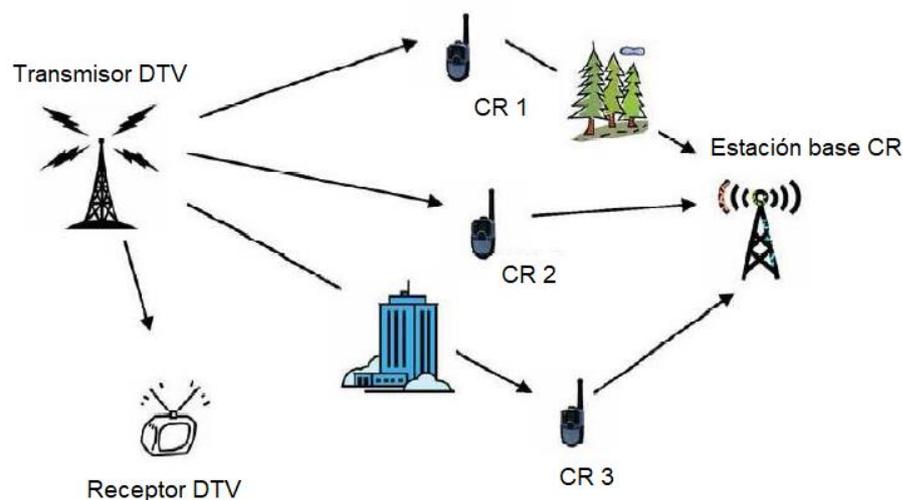


Figura 2. 9: Detección cooperativa del espectro en redes de radio cognitiva.
Fuente: (Rawat & Yan, 2011)

Para construir una red de detección cooperativa, se puede hacer cooperación entre CR y sensores externos. En el primer caso, la cooperación

se implementa de dos formas: centralizada o distribuida. Estos métodos son sensores externos y se describen a continuación:

a. Detección centralizada:

Los datos de los SUs se recopilan como una forma de bits para disminuir el ancho de banda compartido a una estación base de radio cognitiva y luego estos datos se analizarán como se discutió anteriormente para encontrar los huecos libres del espectro y mitigar los efectos de atenuación y sombreado.

b. Detección distribuida:

Los datos de los SUs intercambiados entre ellos y los Sus tomarán decisiones individualmente con respecto a la presencia de los usuarios primarios en función de la información compartida. También se puede utilizar un canal piloto como el canal de conectividad y acceso a la red (NACCH) para compartir los resultados de la detección.

2.9. Gestión del espectro.

La tecnología de radio cognitiva promete no interferir con los usuarios principales. Para eso, la radio cognitiva debe encontrar el mejor espectro disponible para cumplir con los requisitos de calidad de servicio (QoS) de acuerdo con el entorno de radio que varía en el tiempo.

2.9.1. Análisis de espectro.

Luego de encontrar un hueco o un espectro libre, se realiza un análisis para hacer un uso productivo de la banda del espectro de acuerdo con los requerimientos. Cada agujero del espectro se definirá de acuerdo con el entorno variable en el tiempo y la información de la banda como frecuencia y ancho de banda. Luego, se verifica la calidad de estas bandas encontrando parámetros como interferencia, tiempo de retención, pérdida de ruta, retardo de la capa de enlace, errores de enlace inalámbrico. Estos parámetros se definen de la siguiente manera:

- **Interferencia:**

Si se utiliza la banda del espectro, se producirán interferencias. La potencia permisible de un usuario de CR se calcula a partir de la cantidad de interferencia que se utiliza para calcular la capacidad del canal.

- **Tiempo de espera:**

Es el tiempo que el usuario cognitivo puede utilizar el espectro con licencia antes de su interrupción. Es mejor tener este tiempo el mayor tiempo posible para una mejor calidad.

- **Pérdida de ruta:**

La potencia recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Además, la potencia recibida depende de la frecuencia. Si la frecuencia de operación aumenta, la pérdida de trayectoria aumentará y el rango de distancia disminuirá, por lo que la potencia de la señal no debe ser constante para evitar este problema.

- **Errores de enlace inalámbrico:**

La tasa de error del canal cambia según el tipo de modulación y la cantidad de nivel de interferencia.

- **Retardo de la capa de enlace:**

Se produce un retardo cuando se requieran diferentes tipos de protocolos de capa de enlace para abordar la pérdida de ruta, interferencia y errores de enlace inalámbrico.

2.9.2. Decisión de espectro.

Cuando se finaliza con el análisis de las bandas de espectro a partir de la detección del espectro libre, se seleccionará una banda de espectro de acuerdo con los requisitos de QoS. Las reglas de decisión se centran en el costo de la comunicación y la equidad.

2.10. Movilidad del espectro.

El último paso de la gestión del espectro es la gestión de la movilidad del espectro. Después de que una CR detecta el mejor espectro disponible, la

actividad del usuario principal en el espectro seleccionado puede requerir que el usuario cambie su(s) banda(s) operativa del espectro, lo que se conoce como movilidad del espectro. Por tanto, habrá un nuevo tipo de traspaso denominado traspaso de espectro. La latencia se producirá durante el proceso de transferencia, por lo que el propósito de la gestión de la movilidad del espectro es garantizar una transición suave y rápida que conduzca a una degradación mínima del rendimiento durante un proceso de transferencia del espectro.

La gestión de la movilidad debería tener conocimiento de la duración del traspaso del espectro, a partir del algoritmo de detección. Cuando la gestión de movilidad se entera de la latencia, su trabajo es confirmar que la comunicación del usuario de radio cognitiva (CR) debe sufrir una degradación mínima del rendimiento. De la misma manera, se necesitan documentos multicapa (admite la gestión de la movilidad para diferentes tipos de aplicaciones) para lograr las funcionalidades de la movilidad del espectro.

2.11. Compartir espectro.

Es la parte principal del sistema de radio cognitivo, ya que el objetivo es encontrar bandas de espectro libre y asignar canales de acuerdo con políticas específicas sin superposición y también tener la capacidad de moverse entre bandas libres si el usuario principal aparece repentinamente. Se puede clasificar en tres partes principales (véase la figura 2.10): arquitectura, comportamiento de asignación del espectro y técnicas de acceso al espectro.



Figura 2. 10: Clasificación del espectro compartido en radio cognitiva.

Fuente: (Rawat & Yan, 2011)

- **Uso compartido centralizado del espectro:**

Lo controla el centro de fusión que recibe los datos de todos los usuarios, decide y luego responde el resultado a los usuarios que lo envían.

- **Compartición de espectro distribuido:**

Si la construcción de una infraestructura no es posible o adecuada, se proponen soluciones de espectro distribuido.

- **Compartición cooperativa del espectro:**

Para minimizar la interferencia, la compartición cooperativa es la solución mediante la recopilación de datos de un grupo de nodos. Cada nodo envía su medida al centro de fusión y obtiene la mejor opción. Luego, el centro de fusión devolverá sus resultados a los nodos.

- **Compartir espectro no cooperativo:**

Llamada solución egoísta ya que otros nodos no la ayudarán si su decisión es falsa. Las soluciones no cooperativas son la utilización mínima del espectro reducido ya que no habla con ningún nodo.

- **Compartición de espectro de superposición:**

esta compartición de espectro de superposición también se conoce como la técnica de acceso al espectro. El nodo accede a la red utilizando esa parte que no está bajo el uso del usuario con licencia (*Licensed User, LU*).

- **Compartición de espectro subyacente:**

La técnica de compartición de espectro subyacente aprovecha las técnicas de espectro ensanchado que se han desarrollado específicamente para redes celulares. La compartición del espectro subyacente requiere tal técnica de espectro ensanchado desde la cual puede utilizar un gran ancho de banda.

2.12. Principios de acceso dinámico al espectro radioeléctrico (ERE).

Como se conoce alrededor del mundo el manejo de ERE o la administración de este se encuentra regulado por los gobiernos manteniendo el paradigma del uso estático del ERE, el cual no es eficiente. Con el fin de cambiar el paradigma del uso del espectro y poder aprovecharlo de la mejor manera, la FCC planteo cambiar la manera de administra el ERE (Aguilar

Rentería & Navarro Cadavid, 2011), y es donde nace el acceso dinámico al espectro (*Dynamic Spectral Access, DSA*) de tal manera que existen 3 modelos los cuales hacen referencia al licenciamiento, espacio y tiempo, relacionándose con la CR, tal como se muestra en la figura 2.11.

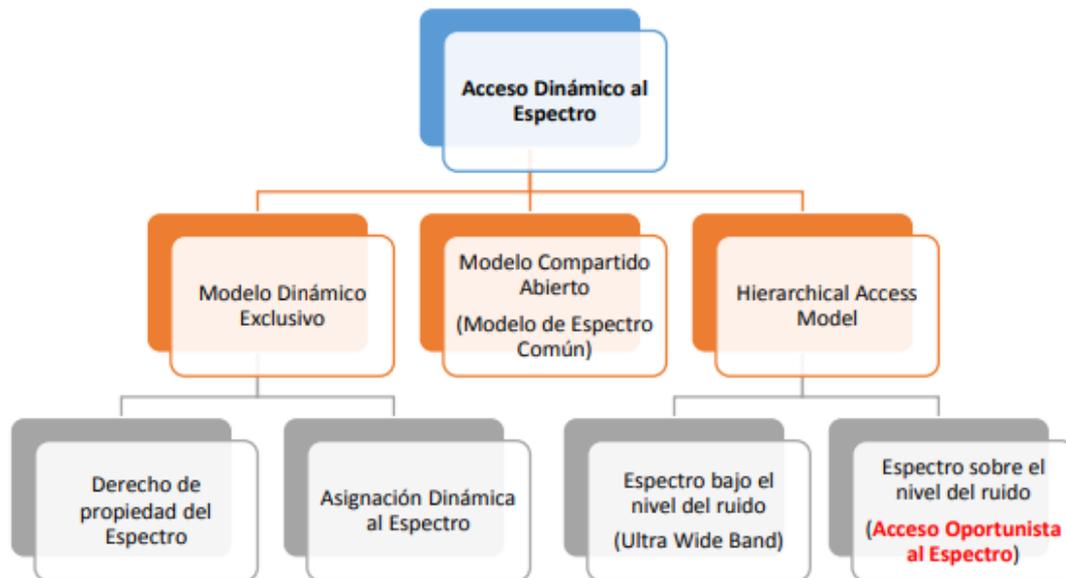


Figura 2. 11: Clasificación del acceso dinámico al espectro.

Fuente: (Galvis Quintero, 2008)

2.12.1. Modelo dinámico exclusivo.

Este modelo mantiene la estructura básica de la actual política de regulación donde se otorgan derechos exclusivos al propietario para el uso del espectro bajo ciertas reglas. El propósito de este modelo es mejorar la eficiencia en el espectro introduciendo flexibilidad en la administración espectral, el mismo que presenta dos enfoques. (Zhao & Sadler, 2007)

Derecho de propiedad del espectro: posibilita a los usuarios ya licenciados o concesionados alquilar o arrendar parte del espectro que está siendo utilizado por ellos, además les permitiría seleccionar el sistema a implementar inclusive sacar rédito económico. Cabe indicar que lo mencionado no es concebido aun por el ente regulador. Asignación dinámica del espectro: como lo indica su nombre este modelo se basa en la asignación dinámica del espectro, mediante el uso de estadística de ocupación en tiempo y espacio, con el fin de aprovechar de una mejor manera el ERE. Esto no

implica que atacará a fondo la problemática de la subutilización del espectro radio eléctrico.

2.12.2. Modelo compartido abierto.

El modelo compartido abierto o modelo del espectro común, es un modelo donde actualmente conviven sistemas que operan en la banda ISM, como es conocido estos sistemas, no se encuentran regulados por entidades gubernamentales es decir son de acceso público. Permite a los sistemas administrar la banda en la que operan con el fin evitar congestión y que ocurra interferencia entre ellos, sin embargo, continúan los estudios e interrogantes en contorno a este modelo. (Wygliniski, Nekovee and Y., & Hou, 2010)

2.12.3. Modelo de acceso jerárquico.

El modelo de acceso jerárquico como su nombre lo indica, se basa en el uso del espectro por dos tipos de usuario, los primarios o licenciados y los secundarios o no licenciados. La idea radica en que los usuarios secundarios puedan utilizar la porción del ERE ya concesionada a los usuarios primarios sin interferir en su transmisión, por lo tanto este modelo se divide en dos:

- a) **Espectro bajo el nivel de ruido:** consiste en que los usuarios secundarios pueden transmitir al mismo tiempo que los usuarios primarios con la restricción de controlar su potencia y modulación a la que emiten sus señales esto quiere decir que podrían transmitir una gran cantidad de datos a una corta distancia y con muy baja potencia.
- b) **Espectro sobre el nivel de ruido:** consiste en que los usuarios secundarios podrán transmitir cuando el usuario primario no lo hace, es decir este enfoque condiciona al usuario secundario en que tiempo y frecuencia debe emitir su señal, para no interferir así en la transmisión del usuario licenciado. Es donde este trabajo de titulación

se basa en los sistemas de radio cognitiva que buscan ocupar el espectro de forma oportunista.

2.12.4. Acceso oportunista al espectro (OSA)

Según lo comentado en el punto anterior, se hace referencia a que este trabajo se enfoca sobre el modelo jerárquico, específicamente en el espectro sobre el nivel de ruido (spectrum overlay), donde se podrían aprovechar los espacios en blanco (White Spaces) con los sistemas basados en radio cognitiva. En la figura 2.12 se puede apreciar gráficamente los espacios en blanco que dejan los usuarios primarios en el tiempo y frecuencia mientras transmiten dejando huecos o espacios disponibles en el espectro radio eléctrico que pueden ser usados por sistemas de radio cognitiva de manera oportunista. (Hernández & Carro, 2016)

En la figura 2.13, en la primera gráfica se puede visualizar el uso del espectro radio eléctrico en un periodo de 24 horas con diferente intensidad de potencia de recepción, además se pueden observar los espacios en blanco en la banda de frecuencias de 0 a 3 GHz. Mientras que en la segunda gráfica de la figura 2.13 se muestra el perfil de la potencia, la cual indica que hay frecuencias en la que se está recibiendo niveles bajos, que dependiendo la hora del día también podrían ser utilizadas por sistemas basados en radio cognitiva.

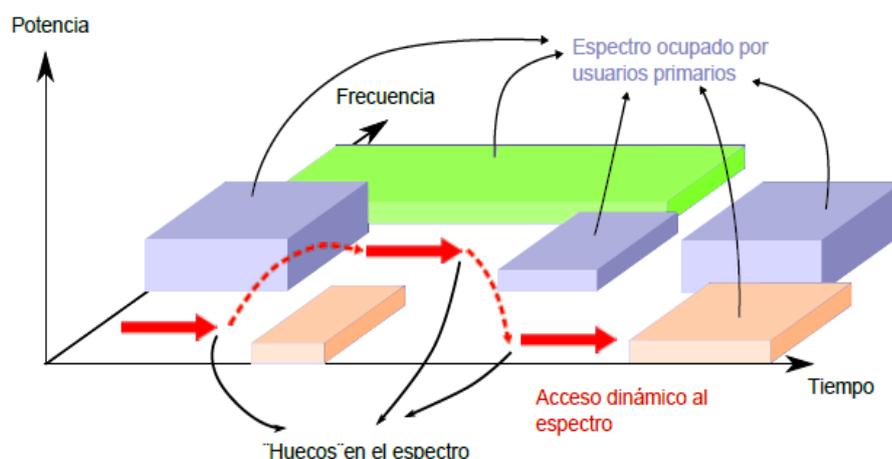


Figura 2. 12: Representación del DSA en los espacios en blancos del ERE.

Fuente: (Hernández & Carro, 2016; Hernández-Suárez et al., 2020)

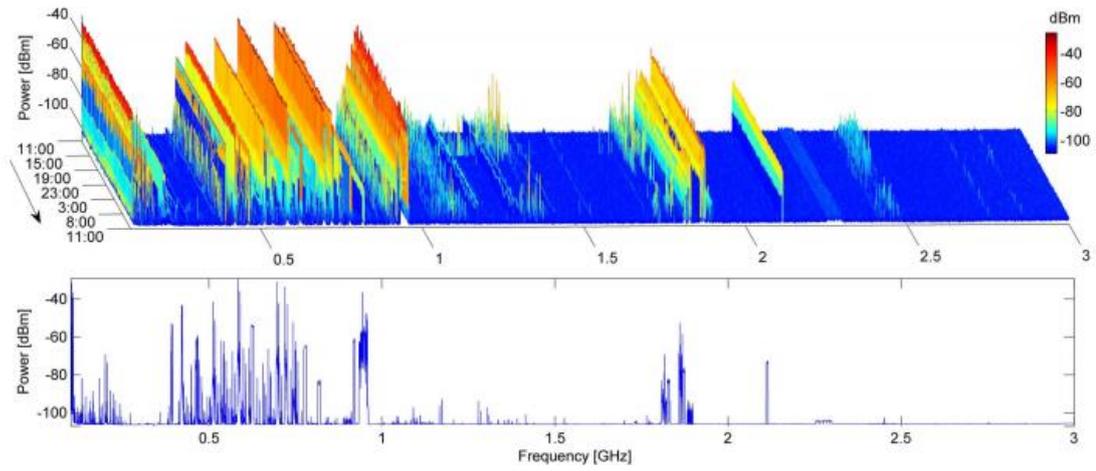


Figura 2. 13: Uso del espectro radio eléctrico (ERE).
Fuente: (Valenta et al., 2010)

Existe el estándar IEEE 802.22; el que será tratado posteriormente; que ha normado el acceso a los WS en la banda de TV dando así origen al término TVWS o TV White Spaces.

Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados

En el presente capítulo se describe, diseña e implementa el sistema WRAN utilizando Simulink de Matlab.

3.1. Descripción general del sistema WRAN.

La comunicación inalámbrica está experimentando el desarrollo más rápido en los campos de la tecnología y la informática en el mundo, es decir, que se convierte en una necesidad fundamental de la vida diaria personal. Hay varias generaciones de comunicación inalámbrica debido a este requisito y varios estándares que lo tratan, tal como los descritos en la tabla 3.1. Con los avances en la tecnología inalámbrica, el alcance del espectro tecnológico se ha ampliado. Esto lleva al usuario con muchas opciones, cada una de las cuales ofrece ventajas únicas. En este momento, se requiere una plataforma para acomodar muchas tecnologías en un módulo para que el usuario pueda beneficiarse de cada tecnología.

Tabla 3. 1: Generación de las comunicaciones inalámbricas y sus respectivos estándares.

Generación	Estándares inalámbricos	Ancho de banda
1G	NMT, AMPS, TACS	2 kbps
2G	GSM	14.4 – 64 kbps
3G	WCDMA	2 Mbps
4G	LTE, WiMAX	100 Mbps – 1 Gbps
5G	MIMO, mm Waves	> 1 Gbps

Fuente: (Net-informations, 2020)

Elaborado por: Autor.

Como ya se ha mencionado en el capítulo 2, la radio cognitiva (CR) es un concepto que ha atraído la atención de los investigadores y, por lo tanto, con un esfuerzo global, IEEE desarrolló el estándar 802.22 llamado Red de Área Regional Inalámbrica (*Wireless Regional Area Network, WRAN*). WRAN tiene como objetivo utilizar técnicas de radio cognitiva para permitir el intercambio de espectro no utilizado geográficamente asignado al servicio de transmisión de televisión, sin interferencias, para brindar acceso de banda ancha de alcance, áreas de baja densidad de población, típicas de entornos rurales, y tiene el potencial de una amplia aplicabilidad en todo el mundo.

Las WRANs están diseñadas para funcionar en las bandas de transmisión de televisión y, al mismo tiempo, garantizar que no se produzcan interferencias dañinas en la operación titular: transmisión de TV digital y TV analógica, y dispositivos con licencia de baja potencia, como micrófonos inalámbricos. Recientemente se han realizado muchos desarrollos en la misma zona. Pocos han optado por la implementación, ya que se supone que el comportamiento de este nuevo sistema debe analizarse en varios escenarios de canales.

Para el sistema WRAN, IEEE define a la capa física (PHY) y control de acceso a medios (MAC) para todos los estándares basados en la red. La capa PHY debe poder adaptarse a diferentes condiciones y también debe ser flexible para saltar de un canal a otro sin errores en la transmisión o pérdida de clientes. Esta flexibilidad también es necesaria para poder ajustar dinámicamente los esquemas de ancho de banda, modulación y codificación.

Este trabajo permite encontrar la fuerza del módulo de capa física del estándar IEEE 802.22 contra el canal de desvanecimiento de Rayleigh de múltiples rutas. Teniendo esto en cuenta, se estudian las especificaciones de la capa PHY y su entorno. Se desarrolla un modelo de simulación en SIMULINK del software MATLAB, que se ha configurado de acuerdo con los modos establecidos en la capa PHY, que se da en el estándar.

3.2. Técnicas de modulación digital para el sistema WRAN.

Para el diseño del sistema WRAN se utilizará la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) y modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), que se describen brevemente en la sección 3.2.1 y 3.2.2.

3.2.1. Modulación de amplitud en cuadratura (QAM).

QAM es una técnica de modulación que se combina con la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK). QAM consta de dos amplitudes de onda y se denomina cuadratura cuando las amplitudes de 90° están desfasadas entre sí. El bit por símbolo para el nivel M-QAM utilizado en este proyecto es 16-QAM y 64-QAM. En la figura 3.1 se muestra el circuito que produce el método de modulación 16-QAM.

La técnica QAM se puede expresar como:

$$s(t) = A_I \cos(2\pi f_c t) + A_Q \sin(2\pi f_c t)$$

Donde, A_I y A_Q son la fase (I) y cuadratura (Q) donde el flujo de bits de datos dividido en I y Q se agrupan utilizando el modulador QAM y se mapean en un símbolo complejo. El símbolo complejo se transmite y se divide en el receptor utilizando un demodulador QAM para obtener los datos de salida.

3.2.2. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK).

La modulación por desplazamiento de fase (PSK) cambia la fase de la portadora modulando la señal con la fase medida en relación con el intervalo de bits anterior. En la modulación M-aria donde dos o más bits se han agrupado para formar un símbolo y una señal, $s(t)$. Este proyecto utiliza la modulación 4-PSK (también llamada QPSK) donde $M = 2^n$, $n = 2$ muestra la transmisión de 2 bits por símbolo para ser mapeados en la fase. Esto también

se conoce como PSK de cuatro niveles, donde cada elemento representa más de un bit. En el cada símbolo contiene dos bits y utiliza el cambio de fase de $\pi/2$, lo que significa 90° en lugar de cambiar la fase 180° .

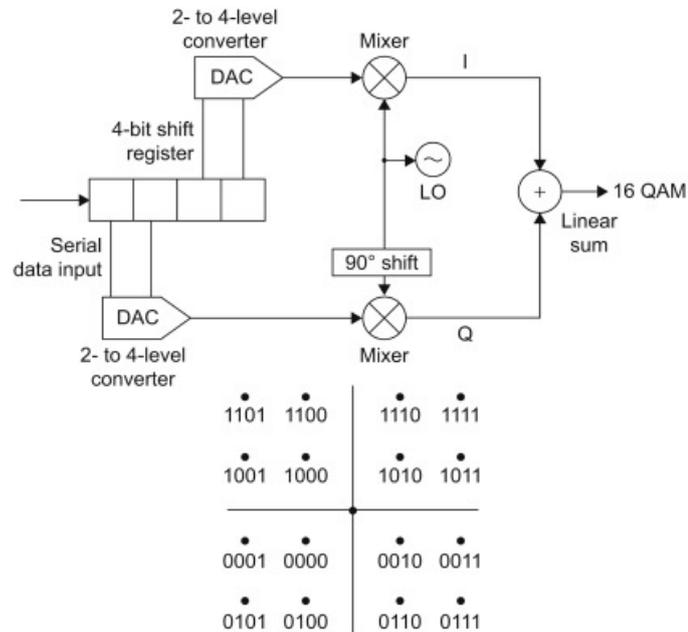


Figura 3. 1: Circuito equivalente que produce la modulación 16-QAM.
Fuente: (Frenzel, 2018)

La técnica de modulación QPSK se puede expresar como:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta)$$

Donde, f_c es la frecuencia de portadora y $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ es un desplazamiento de fase de la señal moduladora. En la figura 3.2 se muestra el diagrama de bloques del circuito equivalente que produce la modulación QPSK.

Por ejemplo, la constelación consta de cuatro puntos (véase la figura 3.3), pero la decisión siempre se toma en dos bits. Este mecanismo puede garantizar el uso eficiente del ancho de banda y una mayor eficiencia espectral. Para cada punto del diagrama de constelación del sistema QPSK se expresa de la siguiente manera:

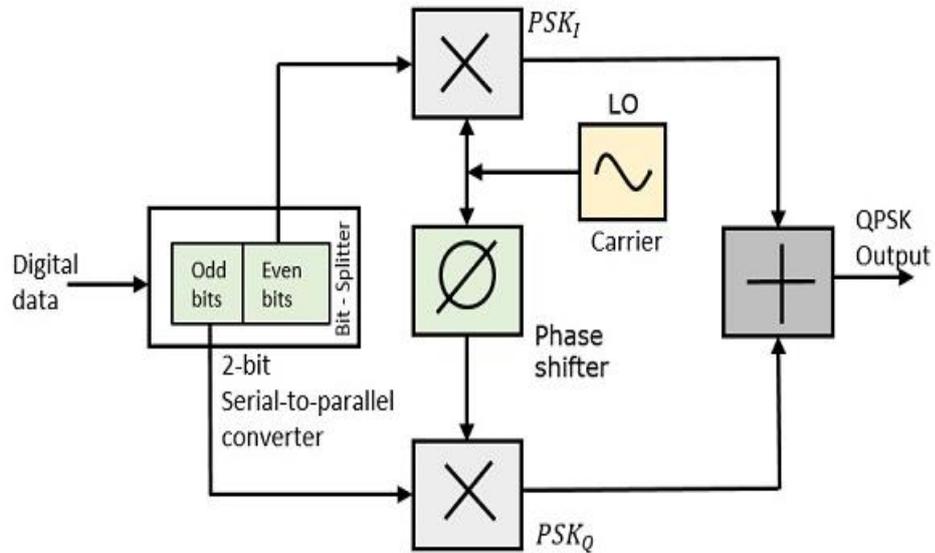


Figura 3. 2: Circuito equivalente que produce la modulación QPSK.
Fuente: (Rameshkumar & Swaminathan, 2020).

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t + 45^\circ) & \text{para binario 11} \\ A \cos(2\pi f_c t + 135^\circ) & \text{para binario 01} \\ A \cos(2\pi f_c t - 135^\circ) & \text{para binario 00} \\ A \cos(2\pi f_c t - 45^\circ) & \text{para binario 10} \end{cases}$$

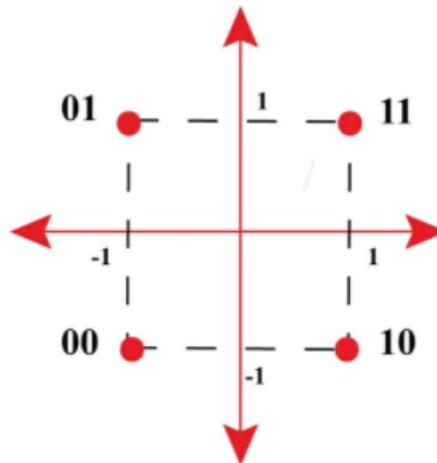


Figura 3. 3: Diagrama de constelación para el sistema QPSK.
Fuente: (Huang & Yu, 2020).
Elaborado por: Autor.

3.3. Implementación del sistema WRAN en Simulink.

En esta parte se describe el sistema WRAN implementado en Simulink en tres escenarios de simulación, en la que se utilizan las tres técnicas de

modulación QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Para efectos del modelado se especifica en esta sección el sistema WRAN mediante la modulación QPSK. El sistema desarrollado se muestra en la figura 3.4 y se utiliza el módulo generador binario de Bernoulli que permite generar bits de datos para la simulación. Además, se utiliza un bloque codificador para convertir la secuencia binaria en una secuencia aleatoria para evitar largas cadenas de ceros o unos, que afectan principalmente la sincronización.

Luego, se utiliza el módulo codificador convolucional que realiza la codificación de los datos a una tasa de 1/2, es decir, para cada bit de entrada, se generan 2 bits en la salida. Aunque se pueden obtener otras tasas de codificación, tales como 2/3, 3/4, y 5/6. Los bits codificados se envían al intercalador. QPSK permite modular digitalmente los datos entrelazados. Posteriormente, los bits de datos se asignan a un diagrama de constelación. El multiplicador detrás del módulo modulador realiza la función de normalización para lograr la misma potencia promedio.

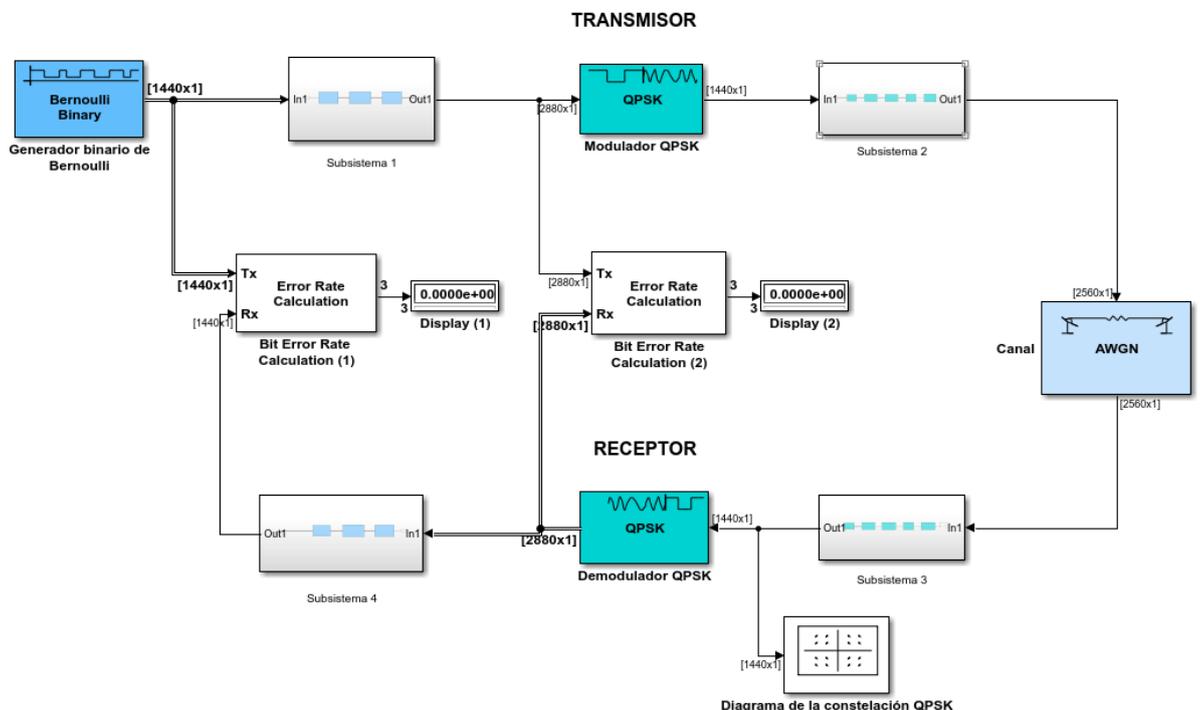


Figura 3. 4: Implementación del sistema WRAN en SIMULINK.

Elaborado por: Autor.

El sistema WRAN se simula sobre una capa física utilizando el canal AWGN en MATLAB R2018a. El sistema propuesto permite analizar la tasa de error de bits (*Bit Error Rate, BER*) del sistema WRAN utilizando las técnicas de modulación descritas en la sección 3.2.1 y 3.2.2. En la sección de los resultados obtenidos se muestran las constelaciones de cada modulación, la comparativa de la tasa de error de bits (BER) y el espectro del sistema.

3.3.1. Transmisor del sistema WRAN.

En esta sección se explica brevemente el transmisor del sistema WRAN. En la figura 3.5 se muestra el diagrama de bloques del transmisor QPSK. En la figura 3.6 se muestra el bloque de configuración de parámetros del generador de bits de Bernoulli, este emplea la distribución de Bernoulli para producir una probabilidad de un 0. En Simulink, la probabilidad de un parámetro 0 especifica p , y puede ser cualquier número real entre 0 y 1.

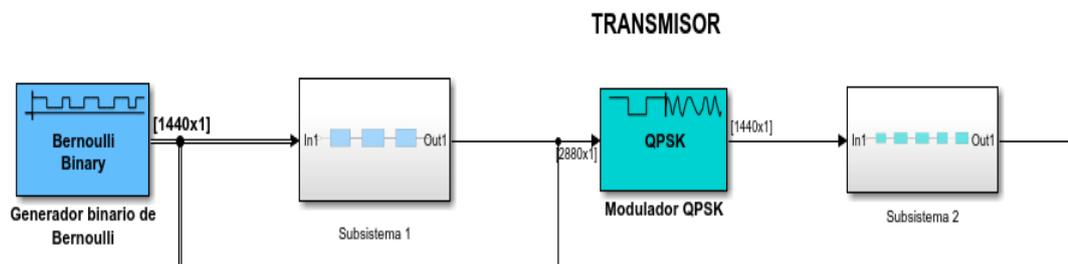


Figura 3. 5: Diagrama de bloques del transmisor QPSK para el sistema WRAN.
Elaborado por: Autor

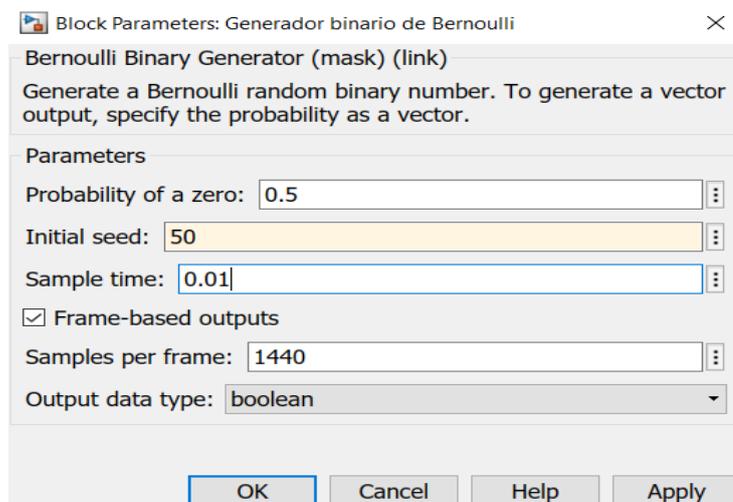


Figura 3. 6: Bloque de parámetros de generación binaria mediante distribución de Bernoulli.
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.7 se muestra los bloques (aleatorizador, codificador convolucional y entrelazador) correspondientes del subsistema 1 (véase la figura 3.5). El aleatorizador se utiliza para evitar largas secuencias continuas de ceros o unos. Consiste en un generador de secuencia pseudoaleatoria o secuencia PN (pseudo-ruido) y un operador OR exclusivo (XOR). El módulo generador de secuencia PN utiliza un registro de desplazamiento de retroalimentación lineal de 15 bits (LFSR) para generar una secuencia numérica binaria pseudoaleatoria.

El módulo codificador convolucional tiene la capacidad de detectar y corregir errores, es decir, que es una de las tecnologías más utilizadas para la protección de señales de datos. La codificación convolucional con decodificación de Viterbi es una de las tecnologías más adecuadas en canales donde la señal transmitida es destruida por factores nocivos que reducen su calidad.

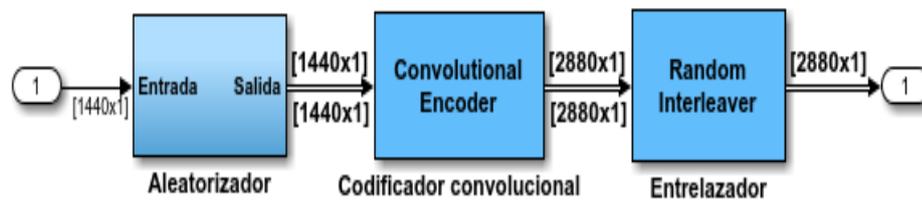


Figura 3. 7: Módulos del subsistema 1 para el transmisor QPSK.
Elaborado por: Autor.

El entrelazado (Interleaver) de tiempo se utiliza en la transmisión de datos digitales para proteger la información de ráfagas de errores al extender los bits ligados a la codificación en el tiempo, por lo que no todos los bits se ven afectados al mismo tiempo, lo que facilita la corrección. error. El bloque de entrelazado aleatorio de Simulink utiliza la permutación aleatoria para reposicionar los elementos de su vector de entrada.

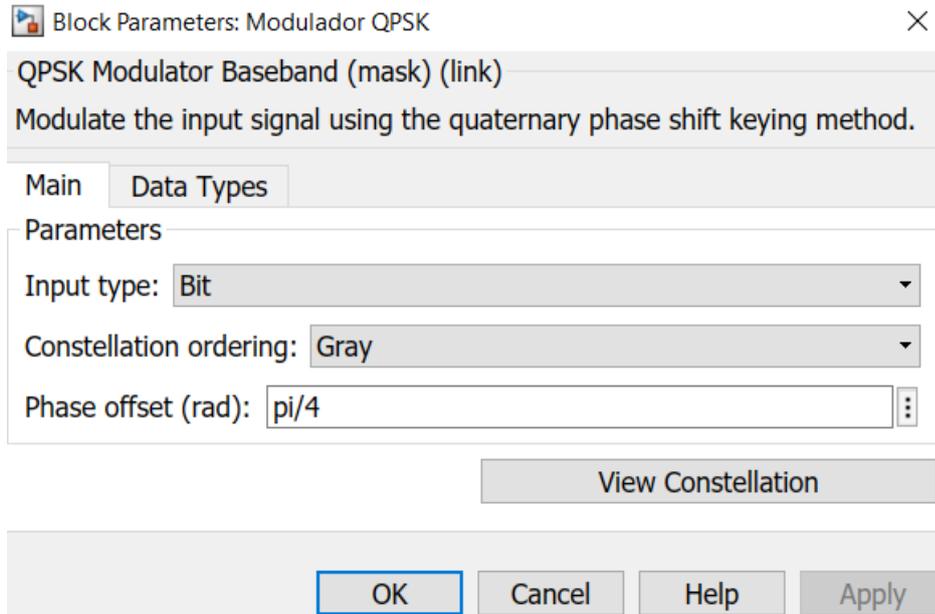


Figura 3. 8: Bloque de parámetros de la modulación QPSK.
Elaborado por: Autor.

Para el estándar IEEE 802.22 del sistema WRAN se utilizan las modulaciones digitales QPSK (véase la figura 3.4), 16-QAM y 64-QAM. Todas estas modulaciones digitales son implementadas en el presente trabajo con la finalidad de realizar la comparativa del desempeño del sistema WRAN propuesto. En la figura 3.8 se muestra la configuración de los parámetros del bloque de la modulación QPSK. El tipo de entrada de datos que se utiliza es tipo 'bit', el orden de la constelación se utiliza 'Gray' y por último se configura el desplazamiento de fase donde el primer punto de constelación es $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$ para el dicit 11, tal como se explicó en la sección 3.2.2.

En la figura 3.9 se muestra los bloques (amplificador, inserción de pilotos, inserción de subportadoras, IFFT y agregar prefijo cíclico) correspondientes del subsistema 2 (véase la figura 3.5).



Figura 3. 9: Módulos del subsistema 2 para el transmisor QPSK.
Elaborado por: Autor.

3.3.2. Receptor del sistema WRAN.

En esta sección se explica brevemente el receptor del sistema WRAN. En la figura 3.10 se muestra el diagrama de bloques del transmisor QPSK junto con los subsistemas 3 y 4.

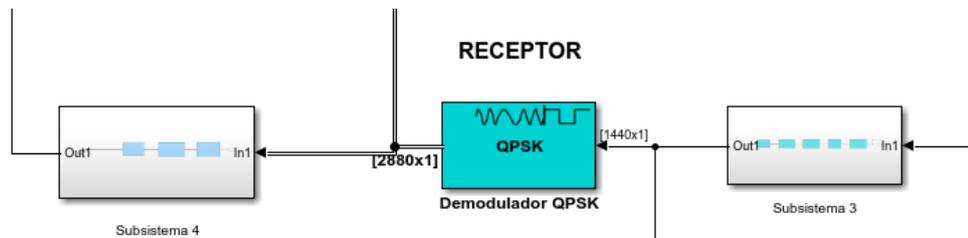


Figura 3. 10: Diagrama de bloques del receptor QPSK para el sistema WRAN. Elaborado por: Autor.

En la figura 3.11 se muestra la estructura interna del subsistema 3 (remover prefijo cíclico, FFT, remover subportadoras y pilotos, amplificador) que realiza el proceso inverso de transmisión (véase la figura 3.9). Mientras, que en la figura 3.12 se muestra la estructura interna del subsistema 4 (decodificador de Viterbi, entrelazador y aleatorizador inversos).

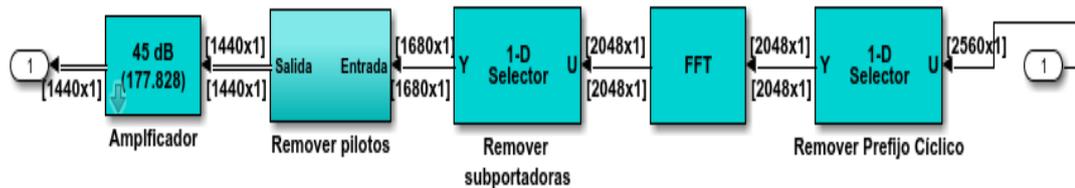


Figura 3. 11: Módulos del subsistema 3 para el receptor QPSK. Elaborado por: Autor.

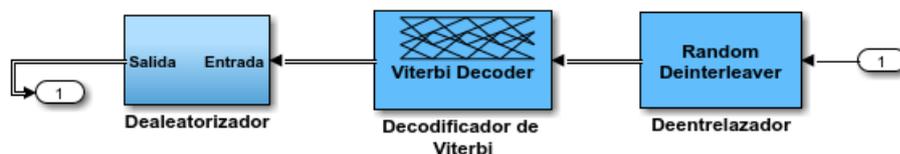


Figura 3. 12: Módulos del subsistema 4 para el receptor QPSK. Elaborado por: Autor.

3.4. Detección de espectro en sistema WRAN en radio cognitiva:

La Radio Cognitiva es una radio para comunicaciones inalámbricas en la que una red o un nodo inalámbrico cambia sus parámetros de transmisión

o recepción en función de la interacción con el entorno para comunicarse de manera efectiva sin interferir con los usuarios con licencia. Las dos principales características importantes de la radio cognitiva son:

- a) Capacidad cognitiva: la capacidad cognitiva se refiere a la capacidad de la tecnología de radio cognitiva para capturar o sentir la información de su entorno de radio.
- b) Re-configurabilidad: La re-configurabilidad permite que la radio cognitiva se programe dinámicamente de acuerdo con el entorno de la radio.

En la figura 3.13 se muestra el ciclo de entornos de radio cognitiva. A continuación, se explica brevemente los cuatro pasos en el ciclo cognitivo:

- i. Detección de espectro: se refiere a detectar el espectro no utilizado y compartirlo sin interferencias perjudiciales con otros usuarios. Es un requisito importante de la red de radio cognitiva detectar los agujeros del espectro, la detección de los usuarios principales es la forma más eficiente de detectar los agujeros del espectro.
- ii. Gestión del espectro: es la tarea de capturar el mejor espectro disponible para satisfacer los requisitos de comunicación de los usuarios.
- iii. Movilidad del espectro: se define como el proceso en el que el usuario cognitivo intercambia su frecuencia de operación
- iv. Compartición del espectro: se refiere a proporcionar un método de programación de espectro justo entre los usuarios. Compartir es el mayor desafío en el uso del espectro abierto.

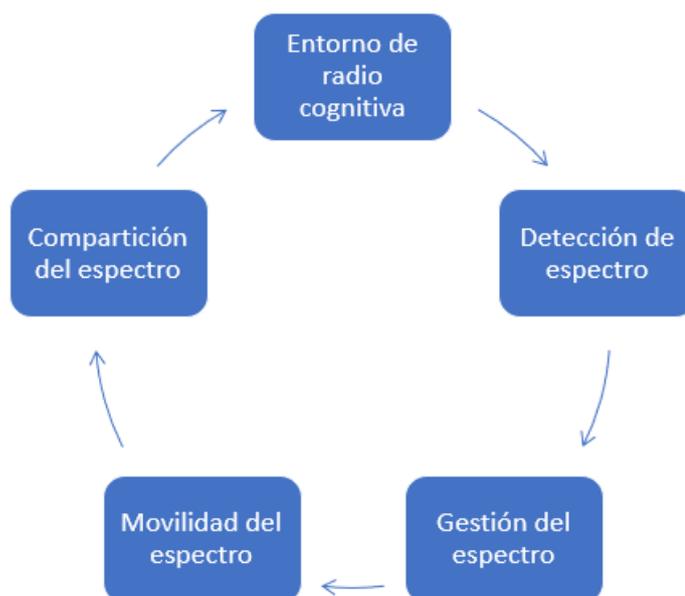


Figura 3. 13: Flujo circular de las tareas de entornos de radio cognitiva.
Elaborado por: Autor.

La red de área regional inalámbrica (IEEE 802.22) define la interfaz aérea para su uso por dispositivos exentos de licencia sin interferir en las bandas de VHF y UHF (54-862 MHz), que también se conocen como espacios en blanco de TV. Este estándar 802.22 utiliza tecnología de radio cognitiva para garantizar que no se produzcan interferencias indebidas en los servicios de televisión que utilizan las bandas de televisión. De esta manera, 802.22 es el primer estándar que incorpora completamente el concepto de radio cognitiva.

Esta nueva norma, que operará en las bandas de televisión, utiliza técnicas como la detección del espectro, la detección y elusión de operadores establecidos y la gestión del espectro para lograr una coexistencia eficaz y un intercambio de recursos radioeléctricos con los servicios autorizados existentes. WRAN puede tener una ventaja sobre otros tipos de redes en lo que respecta al área de cobertura, ya que su objetivo es proporcionar una cobertura de aproximadamente 100 km frente a la cobertura máxima de 15 km ofrecida por la red WAN más grande. WRAN propone tener áreas de cobertura mucho más grandes que las redes inalámbricas actuales. Esto puede deberse principalmente a una mayor potencia y características de propagación favorables de las bandas de TV. Si la energía no es un problema,

la cobertura BS puede llegar hasta los 100 km. Algunos parámetros importantes de esta norma se resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2: Parámetros de servicios del sistema WRAN.

Parámetros	Datos
Eficiencia espectral	0.5 – 5 bit/s/Hz
Eficiencia espectral media	3 bits/s/Hz
Rendimiento	a. Downstream - 1.5 Mbps por CPE b. Upstream – 384 Kbps
Cobertura	100 km
Rango de frecuencia operacional	41- 910 MHz
Canal de banda ancha	6,7 y 8 MHz
Umbral para canales desocupados	-116 dBm sobre un canal de 6 MHz (Digital TV) -94dBm en el pico de NTSC
Servicios	Datos de voz, audio y video

Elaborado por: Autor.

El proceso de simulación en Matlab se explica a continuación:

- a. Inicialización: inicializar las 7 bandas de frecuencia de portadora para los usuarios y también inicializar la frecuencia del mensaje y la frecuencia de muestreo.
- b. Modulación: modular los datos del usuario en la banda de frecuencia respectiva utilizando modulación de amplitud.
- c. Sumador: adición de todas las señales moduladas para crear una señal portadora.
- d. Período: para la estimación de la densidad espectral de potencia.
- e. Asignación de espacio no utilizado: cuando llega un nuevo usuario, se le asigna el primer agujero espectral.
- f. Vaciar una ranura: si todas las ranuras están ocupadas, pida al usuario que vacíe una ranura específica.
- g. Adición de ruido: cantidad de ruido que se agregará.

h. Atenuación: porcentaje de atenuación requerido

3.5. Análisis de resultados obtenidos de la detección de espectro utilizando MatLab.

En los resultados que se muestran a continuación se utilizó el software MatLab R2018a para la detección de energía. En este sistema de asignación se asumieron 7 usuarios principales. Donde se proporciona al 1er, 2do y 5to usuarios principales que están presentes, mientras que el 3er, 4to, 6to y 7mo no están presentes. Después de asumir los primeros usuarios principales (usuarios 1, 2 y 5), el siguiente paso de la señal de energía en la ranura parece disminuir. Eso fue determinado por la detección de energía de FFT y también detectado en el agujero del siguiente espectro. En el primer paso de ejecutar el programa, si el primer usuario principal estará presente, definitivamente el espacio de usuario secundario estará vacío.

Aquí, los 7 usuarios principales tienen la frecuencia de señal portadora que son, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 MHz, respectivamente. Se utiliza una frecuencia de muestreo de 30 MHz y la tasa de uso del espectro de frecuencia en la ranura lleva aproximadamente el 85% del valor de muestreo. La densidad espectral de potencia de la señal se calcula mediante su valor predefinido para determinar la presencia de usuarios primarios, tal como se muestra en la figura 3.14.

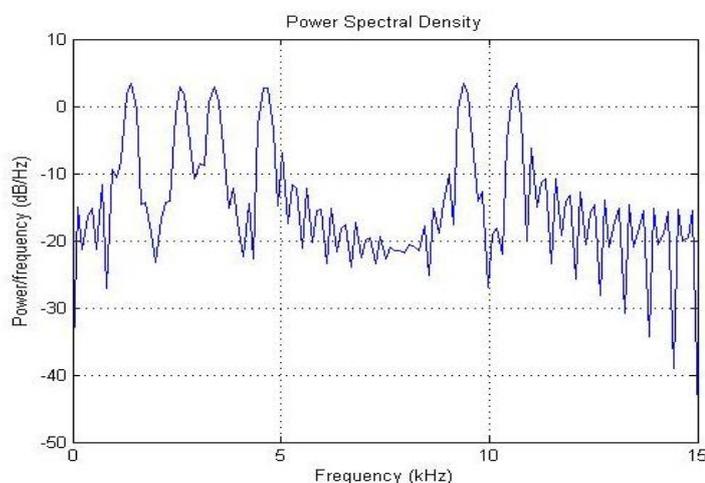


Figura 3. 14: Espectro de bandas utilizado y de bandas no utilizadas.
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.14 se muestra el primer paso para ejecutar el programa en el que se asume que el 1er, 2do y 5to usuarios principales, están presentes. Mientras que el 3er, 4to, 6to, y 7mo usuarios no están presentes. Los usuarios también se denominan entrada de la señal. Aquí, el agujero del espectro de la ranura puede asignarlo automáticamente a un usuario secundario. Ahora los huecos espectrales agregaron los usuarios secundarios a los agujeros espectrales, tal como se muestran en las figuras 3.15, 3.16 y 3.17.

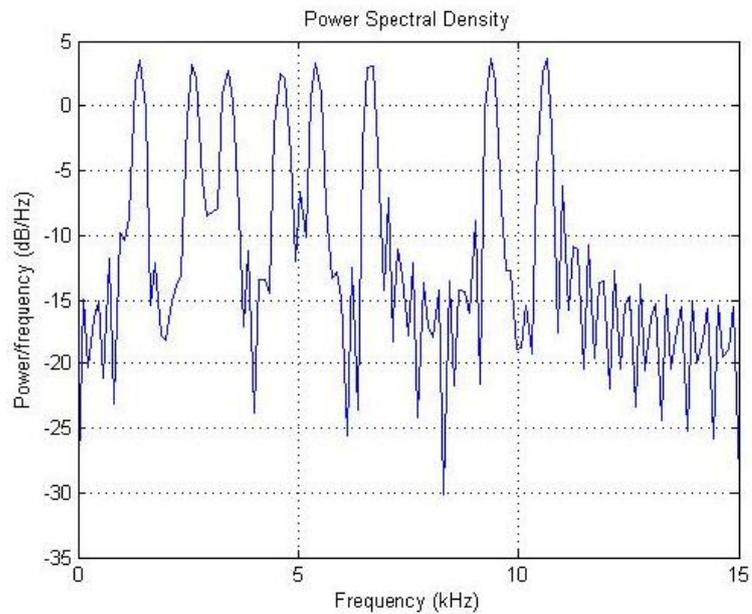


Figura 3. 15: Primera banda no utilizada agregada al 1er usuario secundario.
Elaborado por: Autor.

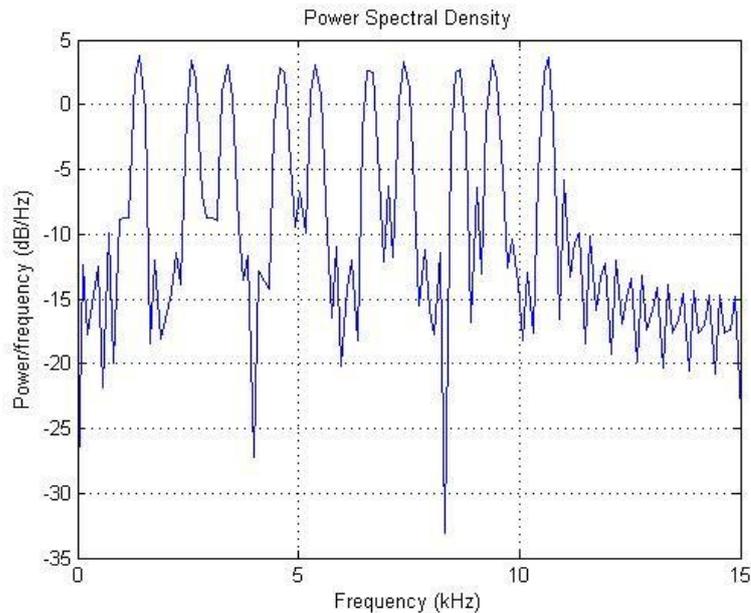


Figura 3. 16: Segunda banda no utilizada agregada al 2do usuario secundario.
Elaborado por: Autor.

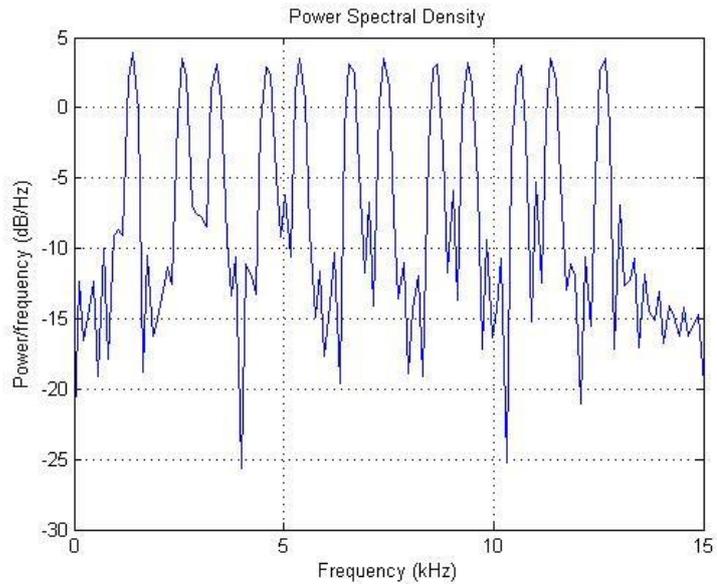


Figura 3. 17: Tercera banda no utilizada agregada al 3er usuario secundario.
Elaborado por: Autor.

Ahora también el agujero del espectro asignó un usuario secundario. Y finalmente el área vacante (agujero del espectro) lo agregó al usuario secundario 4, tal como se muestra en la figura 3.18, es decir, que ahora los 7 usuarios están presentes en la ranura.

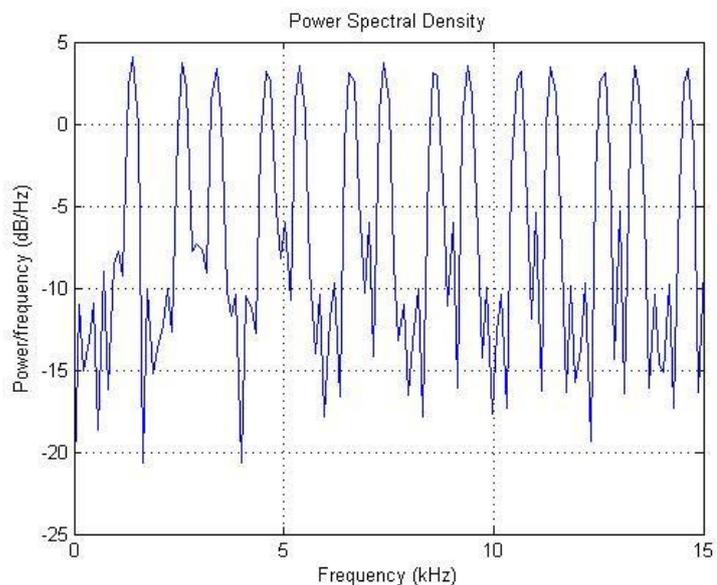


Figura 3. 18: Todas las bandas del espectro están operativas.
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.14 se muestra la señal del espectro de radio cognitivo. El área de pico de ranura se asigna a estos usuarios, que están presentes y el área decreciente se ubica por agujero de espectro. Después de asignar el 2do

usuario secundario también alcanza un pico en la señal del espectro. Continuamente (ver figuras 3.16, 3.17 y 3.18) donde los usuarios secundarios 3, 4, 5 se agregan por el agujero del espectro, también hay picos del espectro en la ranura. Ahora la asignación la cumple la red de radio cognitiva de este experimento. Después de asignar los usuarios secundarios, se utiliza la relación señal a ruido (SNR) de 11 dB y 17 dB. Las figuras 3.19 y 3.20 se muestran a continuación para observar la densidad de potencia espectral para una relación señal a ruido de 11 dB y 17 dB.

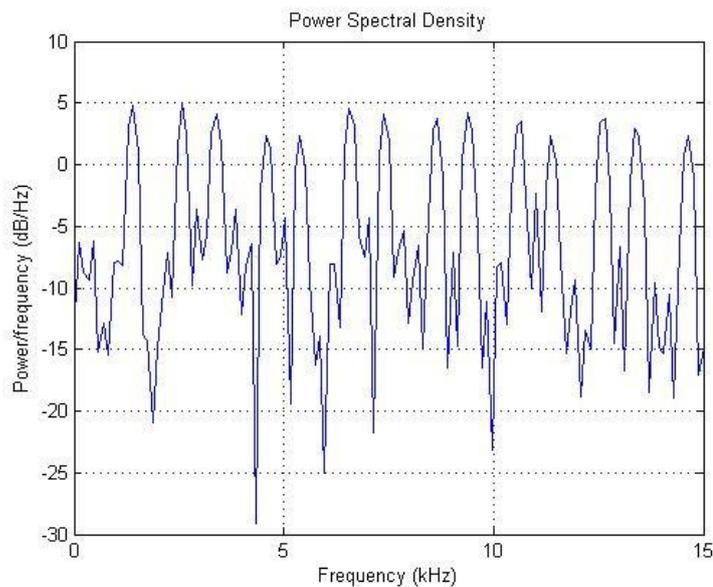


Figura 3. 19: Espectro del sistema WRAN para una SNR= 11 dB.
Elaborado por: Autor.

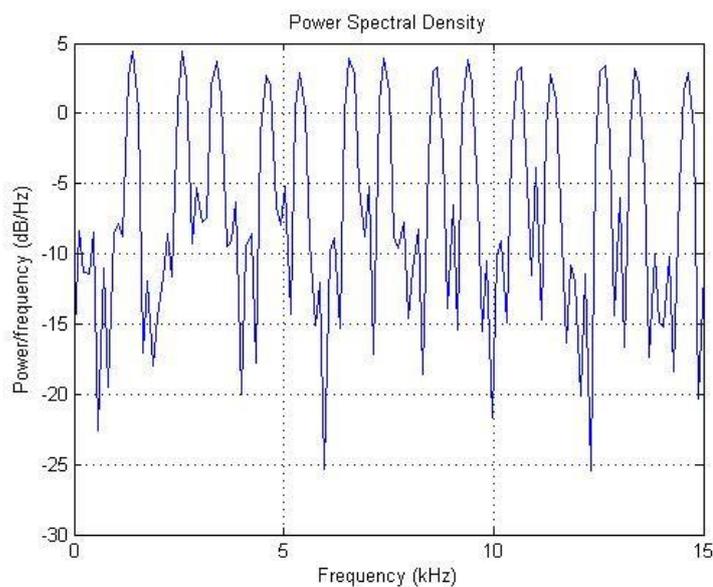


Figura 3. 20: Espectro del sistema WRAN para una SNR= 17 dB.
Elaborado por: Autor.

3.6. Análisis de resultados obtenidos del sistema WRAN en Simulink.

En este trabajo presentado, la mejora del rendimiento del sistema de comunicación WRAN se realiza con la técnica de modulación QPSK y QAM (16-QAM y 64-QAM) para canal AWGN. Se obtienen gráficas de BER versus SNR que muestra cuál modulación es más eficiente el canal AWGN. El modulador y demodulador QPSK (para los otros dos escenarios 16-QAM y 64-QAM) utilizan procesos IFFT (Transformada inversa rápida de Fourier) y FFT (Transformada rápida de Fourier) para realizar sus tareas.

Tabla 3. 3: Parámetros de simulación para el sistema WRAN.

Parámetros	Datos
No. de símbolos	10
Modulación	QPSK 16-QAM 64-QAM
Canal de propagación	AWGN Rician
SNR	0-12
Factor	K=10 K=1

Elaborado por: Autor.

Las figuras 3.21 a 3.23 muestra el rendimiento del sistema de simulación de tres modulaciones utilizadas para la transmisión de datos en el estándar IEEE 802.22: QPSK (ver figura 3.21), 16-QAM (ver figura 3.22) y 64-QAM (ver figura 3.23). Para cada diagrama de constelación se observa que la modulación QPSK es mucho más robusta al ruido que las modulaciones 16-QAM y 64-QAM. Es decir, que la modulación QPSK presenta una menor tasa de errores con relación a las modulaciones 16-QAM y 64-QAM.

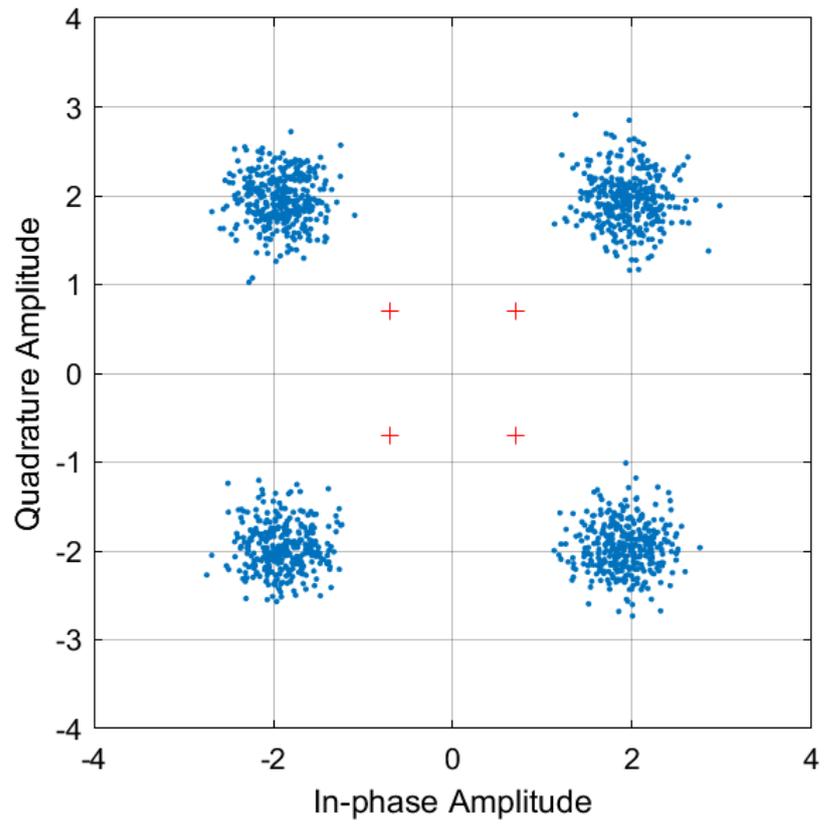


Figura 3. 21: Diagrama de constelación para el sistema QPSK.
Elaborado por: Autor.

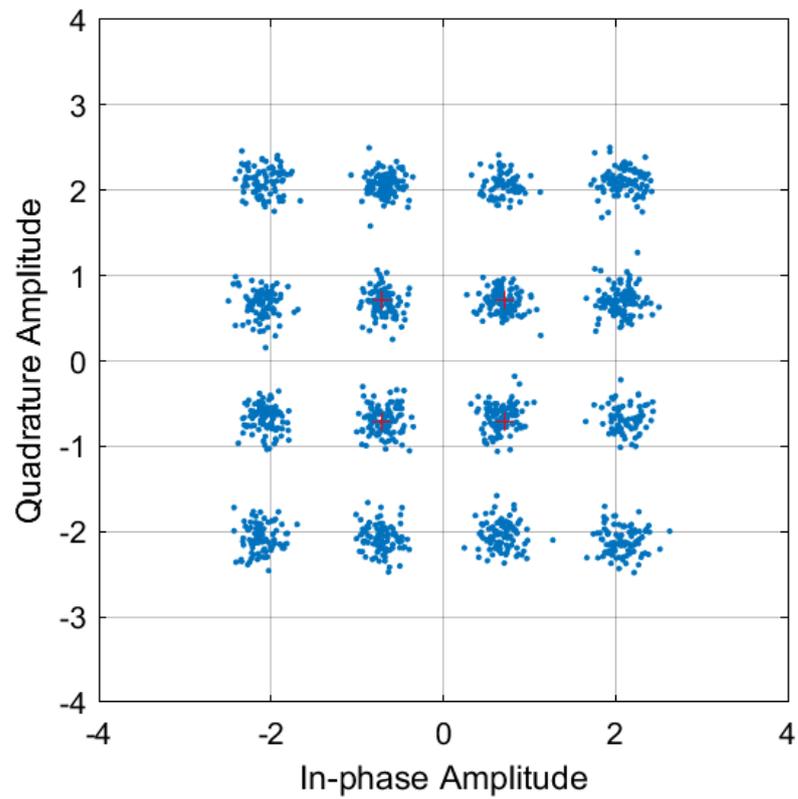


Figura 3. 22: Diagrama de constelación para el sistema 16-QAM.
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.24, se muestran las curvas de la tasa de error de bits (BER) no codificadas obtenidas por simulación en las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM. Dado que los bloques FEC no se aplican a los datos en este caso, las diferencias en las tasas de código no tienen ningún efecto sobre los resultados. Para investigar el efecto de los bloques FEC en el rendimiento del sistema, se utiliza la codificación convolucional.

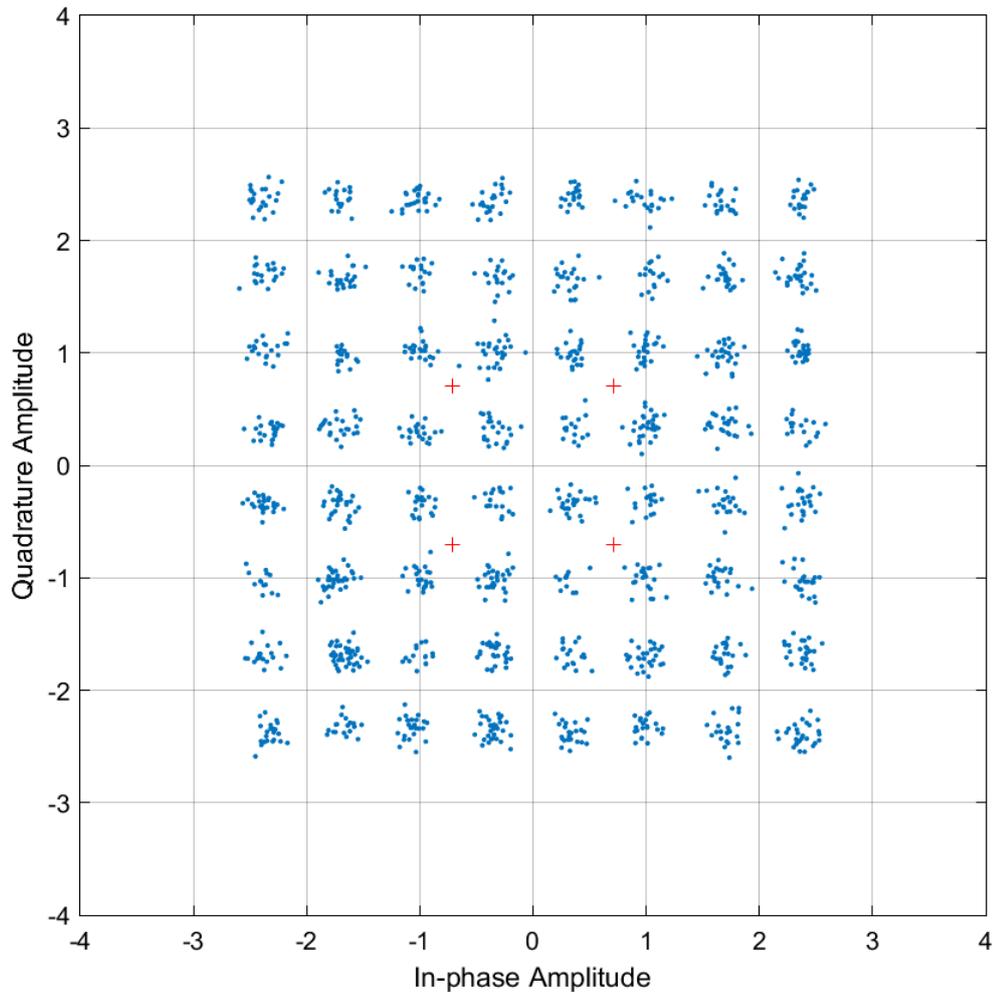


Figura 3. 23: Diagrama de constelación para el sistema 64-QAM.
Elaborado por: Autor.

Las figuras 3.25, 3.26 y 3.27 muestran los resultados de la simulación de la tasa de error de bits (BER) codificada por el sistema frente a la relación señal a ruido (SNR) con diferentes velocidades de código para las modulaciones QPSK, 16-QAM y 64-QAM respectivamente. Como era de esperar, la tasa de error de bits (BER) de los esquemas de modulación más

altos con altas velocidades de datos son más sensibles a la degradación de la relación señal a ruido (SNR).

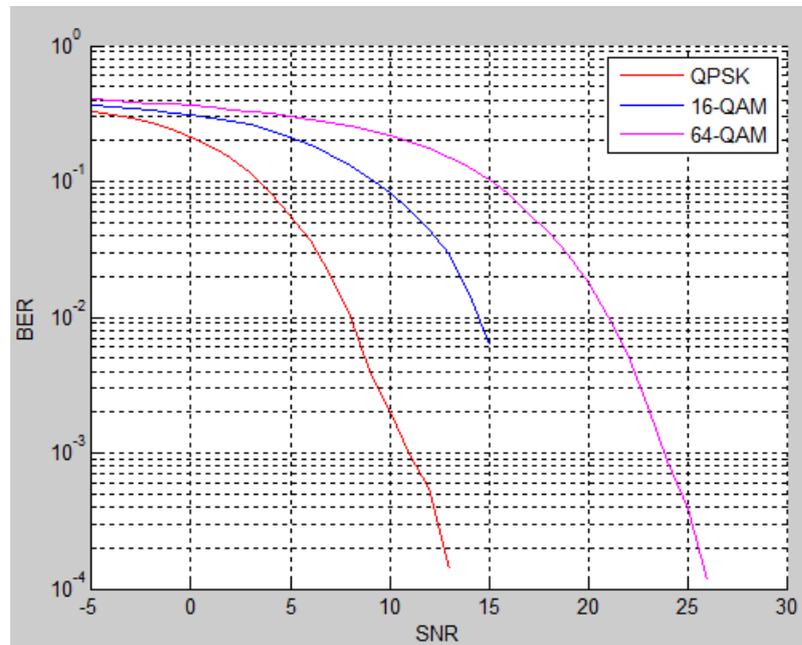


Figura 3. 24: BER no codificado para QPSK, 16-QAM y 64-QAM.
Elaborado por: Autor.

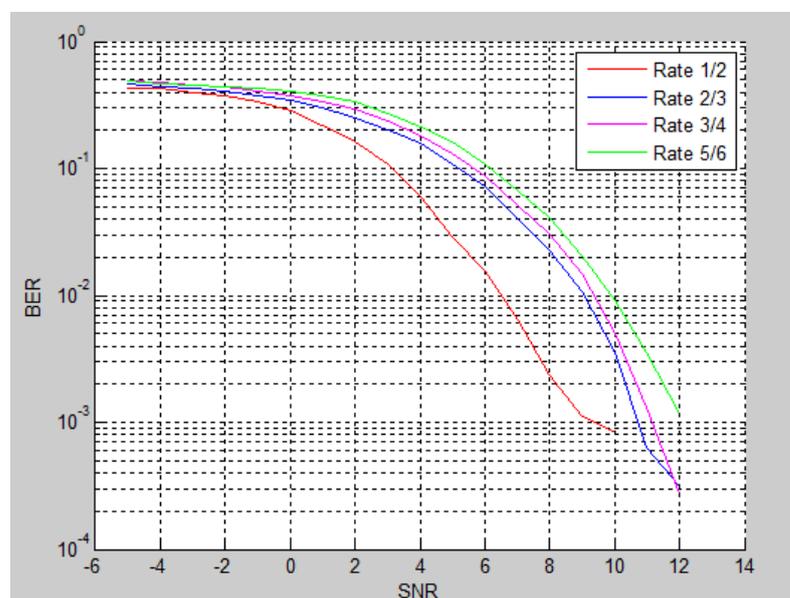


Figura 3. 25: BER codificado para QPSK con diferentes tasas de código.
Elaborado por: Autor.

Por ejemplo, para lograr una BER igual a 10^{-2} en la modulación QPSK y tasa de código $\frac{1}{2}$, se necesita una SNR por encima de 6.6 dB. Pero, para la

modulación 16-QAM y tasa de código 3/4, se necesita una SNR superior a 16 dB. Sin embargo, para la modulación 64-QAM con tasa de código 5/6, la SNR mínima requerida es 22,5 dB.

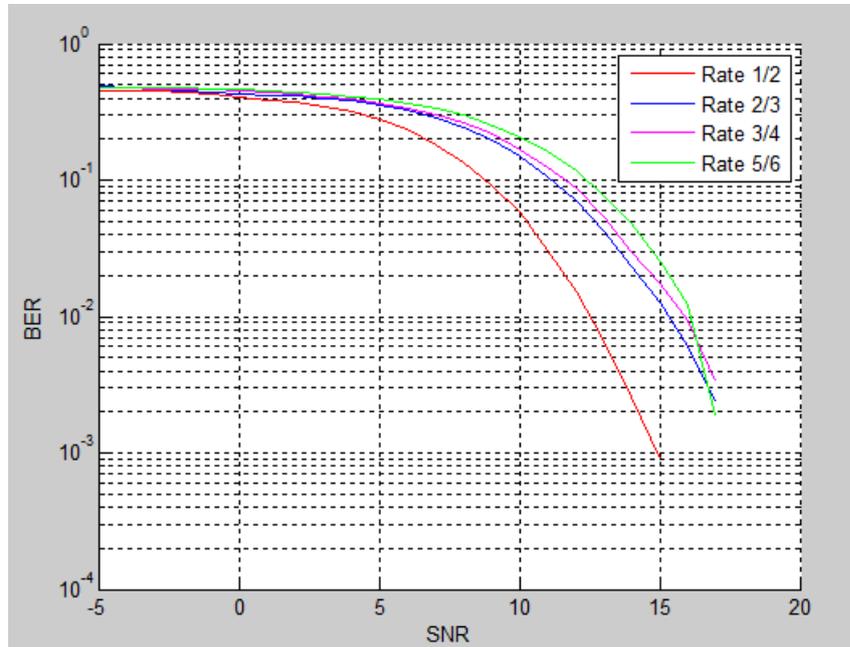


Figura 3. 26: BER codificado para 16-QAM con diferentes tasas de código.
Elaborado por: Autor.

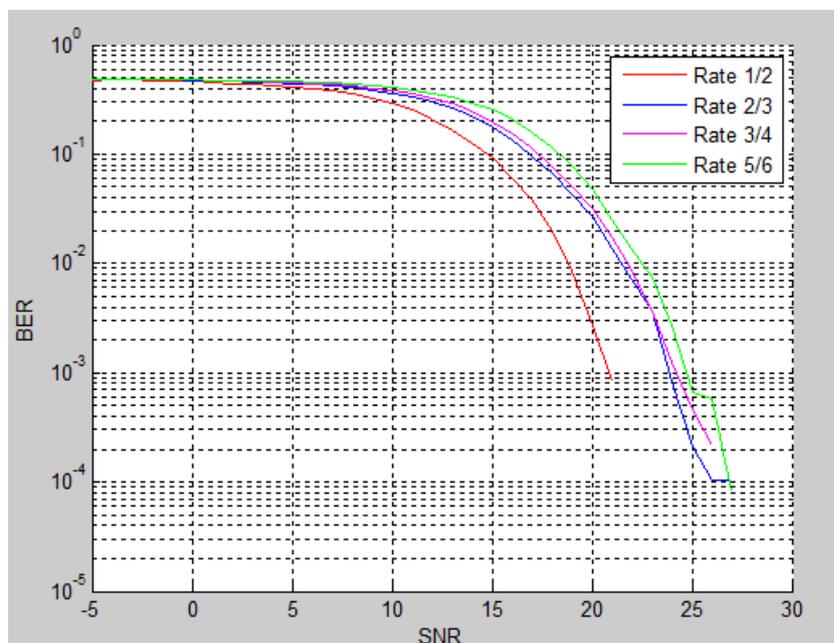


Figura 3. 27: BER codificado para 64-QAM con diferentes tasas de código.
Elaborado por: Autor.

Conclusiones

Para el sistema de asignación de espectro de radio cognitivo, se utilizó el software MatLab R2018a para la simulación y mediante el detector de energía FFT se detectó el espectro. Los resultados de la simulación mostraron cómo funciona la radio cognitiva en una frecuencia cambiante. Se utilizaron siete usuarios primarios y todos los usuarios secundarios se agregan a través del espacio de espectro registrado.

Se comprueba y comprende que la radio cognitiva puede probar con éxito los cambios de frecuencia. La radio cognitiva consta de diferentes parámetros como formato de modulación, redes, frecuencia, etc., que se pueden cambiar para usar los mejores canales inalámbricos para reducir la congestión y la interferencia del sistema.

Finalmente, se efectuó brevemente la descripción de cada componente utilizado para capa PHY del estándar IEEE 802.22 y fue analizado la codificación de canales. Se utilizó el codificador convolucional, el mismo tiene gran influencia y aplicación en los sistemas de comunicaciones modernas. También, se analizó el componente de asignación de subportadoras, porque este admite la inserción de los pilotos y permite una sencilla detección.

Recomendaciones

A continuación, se recomienda trabajos futuros a partir del presente proyecto.

1. Detección del espectro en WRAN basado en temporizadores asíncronos.
2. Modelo de asignación de recursos y detección de espectro de radio cognitivo basado en OFDM.
3. Comparativa de la BER versus SNR en sistemas MIMO usando la modulación basado en radio cognitiva.

Bibliografía

- Abdulsattar, M. A., & Hussein, Z. A. (2012). Energy Detection Technique for Spectrum Sensing in Cognitive Radio: A Survey. *International journal of Computer Networks & Communications*, 4(5), 223–242. <https://doi.org/10.5121/ijcnc.2012.4514>
- Aguilar Rentería, J. H., & Navarro Cadavid, A. (2011). Cognitive radio – State of the Art. *Sistemas y Telemática*, 9(16), 31. <https://doi.org/10.18046/syt.v9i16.1028>
- Bhimte, R., Bhole, K., & Shah, P. (2018). Fractional Order Fuzzy PID Controller for a Rotary Servo System. *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 538–542. <https://doi.org/10.1109/ICOEI.2018.8553867>
- Clancy III, T. C. (2006). *Dynamic spectrum access in cognitive radio networks* [Thesis, University of Maryland]. <https://www.cs.umd.edu/~jkatz/THESES/clancy.pdf>
- Dhillon, H. S., & Andrews, J. G. (2014). Downlink Rate Distribution in Heterogeneous Cellular Networks under Generalized Cell Selection. *IEEE Wireless Communications Letters*, 3(1), 42–45. <https://doi.org/10.1109/WCL.2013.110713.130709>
- Frenzel, L. E. (2018). Cell Phones. En *Electronics Explained* (pp. 195–216). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811641-8.00008-4>
- Galvis Quintero, A. (2008). Acceso dinámico al espectro: Estado actual, tendencias y retos. *Entre Ciencia e Ingeniería*.
- Guamo M., A. K. (2019). *Implementación de un enlace de comunicaciones basado en principios de sistemas de radio cognitiva en la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de*

la Universidad Nacional de Loja a través de SDR (Radio Definido por Software). [Trabajo de Titulación]. Universidad Nacional de Loja.

Hernández, P., & Carro, G. (2016). *Principios, normas y soluciones de Radio Cognitiva* [Proyecto Fin de Carrera]. Univeridad de la República.

Hernández-Suárez, C. A., Giral-Ramírez, D. A., & Pedraza-Martínez, L. F. (2020). Retardo en Redes Inalámbricas Colaborativas. *Revista Científica*, 1(37), 122–130. <https://doi.org/10.14483/23448350.15022>

Huang, Y., & Yu, J. (2020). Low complexity QPSK/8QAM millimeter-wave signal generation at D-band without phase pre-coding. *Optics Communications*, 474, 126062. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126062>

Márquez Ramos, H. R. (2013). Arquitecturas de radio cognitiva: Una revisión actual. *Revista Tecnura*, 18(39), 181. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.1.a13>

Marwanto, A., Sarijari, M. A., Fisal, N., Yusof, S. K. S., & Rashid, R. A. (2009). Experimental study of OFDM implementation utilizing GNU Radio and USRP - SDR. *2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, 132–135. <https://doi.org/10.1109/MICC.2009.5431480>

Mate, A., Lee, K.-H., & Lu, I.-T. (2011). Spectrum sensing based on time covariance matrix using GNU radio and USRP for cognitive radio. *2011 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/LISAT.2011.5784217>

Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13–18. <https://doi.org/10.1109/98.788210>

- Net-informations. (2020). 1G Vs. 2G Vs. 3G Vs. 4G Vs. 5G. <http://net-informations.com/q/diff/generations.html>
- Parvin, S., Hussain, F. K., Hussain, O. K., & Faruque, A. A. (2012). Trust-based Throughput in Cognitive Radio Networks. *Procedia Computer Science*, 10, 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.06.091>
- Patel, A., Khan, Md. Z. A., Merchant, S. N., Desai, U. B., & Hanzo, L. (2018). How Many Cognitive Channels Should the Primary User Share? *IEEE Wireless Communications*, 25(5), 78–85. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700382>
- Rameshkumar, R., & Swaminathan, J. N. (2020). A New Hardware Design and Implementation of QPSK Modulator in Normal and 4-QAM Mode for 5G Communication Networks. En S. Smys, R. Bestak, & Á. Rocha (Eds.), *Inventive Computation Technologies* (Vol. 98, pp. 255–262). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33846-6_29
- Rawat, D. B., & Yan, G. (2011). Spectrum Sensing Methods and Dynamic Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Survey. *International Journal of Research and Reviews in Wireless Sensor Networks*, 1(1), 13.
- UIT-R. (2017). *Principios, retos y problemas de la gestión del espectro relacionados con el acceso dinámico a las bandas de frecuencias mediante sistemas de radiocomunicaciones con capacidades cognitivas* (Informe UIT-R SM.2405-0). Unión Internacional de Telecomunicaciones.
- Valenta, V., Maršálek, R., Baudoin, G., Villegas, M., Suarez, M., & Robert, F. (2010). Survey on spectrum utilization in Europe: Measurements, analyses and observations. *Proceedings of the 5th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and*

Communications. 5th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Cannes, France. <https://doi.org/10.4108/ICST.CROWNCOM2010.9220>

Zhang, Y. (2008). Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio Wireless Networks. *2008 IEEE International Conference on Communications*, 4927–4932. <https://doi.org/10.1109/ICC.2008.923>

Zhao, Q., & Sadler, B. M. (2007). A Survey of Dynamic Spectrum Access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(3), 79–89. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.361604>

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Procel Contreras, Julio Ricardo** con C.C: # 0923050272 autor del trabajo de titulación: Implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN en radios cognitivas, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 8 de febrero del 2021

f. 

Nombre: **Prócel Contreras, Julio Ricardo**

C.C: 0923050272

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN en radios cognitivas		
AUTOR(ES)	Prócel Contreras, Julio Ricardo		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Quezada Calle, Edgar Raúl; M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	8 de febrero del 2021	No. DE PÁGINAS:	75
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Inalámbricas, Teoría de la Comunicación		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Modulación, Espectro, Radio, Frecuencia, Rendimiento, Simulación		
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>El presente documento se desarrolla la implementación de escenarios de simulación mediante técnicas de modulación y análisis espectral en sistemas WRAN basados en radio cognitiva (CR). La CR es más eficaz para trabajar en un entorno de desastre. Su asignación de frecuencia, agilidad, imaginabilidad y capacidad también son aceptables. La detección del espectro y sus funciones pueden brindarnos un gran rendimiento en la nueva gestión del espectro. La red IEEE 802.22 es una red basada en tecnología cognitiva que mejorará el rendimiento de los sistemas de comunicación 4G y de sistemas de TV en zonas rurales. La función principal de la radio cognitiva es identificar el espectro de frecuencias a partir de la señal de radio requerida. En este proyecto, se revisa el concepto de simular un sistema de radio cognitivo para reprocesar el espectro no utilizado localmente para aumentar la capacidad total del sistema. Este trabajo se centra en el análisis práctico de los sistemas de radio cognitivos. Para probar el rendimiento de la radio cognitiva, se ha utilizado MATLAB para la simulación.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0969493736	E-mail: jprocell6@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			