



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

**FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y  
LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**



**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).**

*TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERA EN  
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES*

**AUTORA:**

ANDREA KATHERINE GUAMO MOROCHO

**DIRECTOR:**

ING. ANDY FABRICIO VEGA LEÓN, MG. SC.

LOJA-ECUADOR

2019


## CERTIFICACIÓN

Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.  
**DIRECTOR DE TESIS**

### CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“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)”**, previo a la obtención del título de Ingeniero (a) en **Electrónica y Telecomunicaciones**, realizado por la señorita egresada: **Andrea Katherine Guamo Morocho**, mismo que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 20 de Junio del 2019



Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.  
**DIRECTOR DE TESIS**

## AUTORÍA

Yo, **ANDREA KATHERINE GUAMO MOROCHO**, declaro ser autora del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

FIRMA: .....

**Cédula:** 1104857444

**Fecha:** 04 de Julio del 2019

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DE LA AUTORA, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.**

Yo, **ANDREA KATHERINE GUAMO MOROCHO**, declaro ser autora de la tesis titulada: **“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)”**, como requisito para optar al grado de: **INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la reproducción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los cuatro días del mes de Julio del dos mil diecinueve.

**Firma:** 

**Autor:** Andrea Katherine Guamo Morocho.

**Cédula:** 1104857444

**Dirección:** Loja (Barrio La Pradera)      **Correo electrónico:** akguamom@unl.edu.ec

**Teléfono:** (07) 2-102-653      **Celular:** 0989413943

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director de Tesis:** Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.

**Tribunal de Grado:** Ing. John Jossimar Tucker Yépez, Mg. Sc.

Ing. Marianela del Cisne Carrión González, Mg. Sc.

Ing. Rodolfo Pabel Merino Vivanco, Mg. Sc.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado primeramente a Dios, Padre Celestial que me ha brindado amor y fortaleza en cada paso que he dado, por no abandonarme en ningún instante y mostrarme aún en mis momentos más desolados su inmenso amor por mí.

A mis amados padres: Edgar y María, por ser un pilar fundamental para mí y lo que soy, a mi Padre por ser un hermoso ángel que me guía en mi diario vivir, y mi Mamá por ser mi ejemplo de vida, por su dedicación, determinación y su lucha, los tengo en mi corazón.

A mis hermanos, la luz de mi vida: Edgar y Juan Pablo, por ser mi motivación y el regalo más grande que Dios me ha concedido, por sus palabras de aliento y su amor incondicional.

A mis queridos amigos, por las anécdotas y vivencias compartidas, he aprendido de cada uno de ustedes y soy muy afortunada por contar con su amistad.

*Andrea Katherine Guamo Morocho*

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja, a la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables y a la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, quienes participaron activamente de mi formación académica y para la finalización de la misma.

De manera especial, agradezco al Ing. Andy Fabricio Vega León, director del presente trabajo, por su guía y asesoramiento profesional el cual fue pilar fundamental para cumplir con la meta propuesta, mi profundo agradecimiento por el tiempo dedicado.

De igual manera, agradezco a la Ing. Alba Vargas, encargada del Laboratorio de Antenas y Telecomunicaciones de la Facultad, por la oportuna apertura y las facilidades prestadas a lo largo del desarrollo del Trabajo de Titulación.

Hago extensivo este agradecimiento a mi familia y a cada una de las personas que de alguna u otra manera me orientaron en forma oportuna y desinteresada.

## TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	II
AUTORÍA .....	III
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
TABLA DE CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS.....	XIV
1. TÍTULO .....	1
2. RESUMEN.....	2
3. INTRODUCCIÓN .....	4
4. REVISIÓN LITERARIA .....	5
4.1. RADIO COGNITIVA.....	5
4.1.1. Antecedentes de Redes de Radio Cognitiva .....	5
4.1.2. Definición de Radio Cognitiva .....	6
4.1.3. Características Principales de un dispositivo CR .....	8
4.1.4. Ciclo Cognitivo.....	9
4.1.5. Arquitectura de la Red de Radio Cognitiva (CRN).....	12
4.1.6. Estándar IEEE 802.22 – WRAN .....	13
4.1.6.1. Introducción .....	13
4.1.6.2. Capacidad del Servicio.....	14
4.1.6.3. Características de Modulación y Codificación.....	15
4.1.7. Técnicas de Detección del Espectro .....	15
4.1.7.1. Detector de Energía.....	18

4.1.7.1.1.	Cálculo del Umbral .....	20
4.1.7.1.2.	Incertidumbre en Potencia de Piso de Ruido .....	21
4.2.	RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE.....	22
4.2.1.	Introducción.....	22
4.2.2.	Definición y Aspectos Importantes de SDR.....	22
4.2.3.	Niveles de SDR .....	24
4.2.4.	Arquitectura de SDR .....	25
4.2.5.	SDR Ideal y Práctico .....	27
4.2.6.	Ventajas y Desventajas de SDR .....	28
4.2.7.	Relación SDR para el desempeño de CR .....	29
4.3.	SITUACIÓN ACTUAL DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN ECUADOR .....	31
4.3.1.	Introducción.....	31
4.3.2.	Espectro Radioeléctrico.....	32
4.3.3.	División del Espectro Radioeléctrico .....	32
4.3.4.	Asignación de Frecuencias en el Ecuador .....	33
4.3.5.	Selección del Espectro considerado .....	34
5.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	35
5.1.	Materiales .....	35
5.1.1.	Equipo de Medida Espectral.....	35
5.1.2.	Hardware Seleccionado .....	36
5.1.3.	Software Seleccionado .....	37
5.2.	Métodos.....	41
5.3.	Esquema del Enlace a Implementar .....	42
5.4.	Consideraciones Generales para implementación del Detector Energía .....	44
5.5.	Creación de Bloques Personalizados .....	44
5.5.1.	Módulo Out-Of-Tree .....	44



5.6.	Análisis y Evaluación Espectral.....	45
5.6.1.	Espectrogramas de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables.....	46
5.6.1.1.	Análisis Espectral Sub-banda 1 (54-88 MHz).....	47
5.6.1.2.	Análisis Espectral Sub-banda 2 (88-108 MHz).....	48
5.6.1.3.	Análisis Espectral Sub-banda 3 (174-216MHz).....	49
5.6.1.4.	Análisis Espectral Sub-banda 4 (470-698 MHz).....	50
5.6.1.5.	Análisis Espectral Sub-banda 5 (825-960 MHz).....	51
5.7.	Ancho de Banda de Transmisión.....	53
6.	RESULTADOS.....	56
6.1.	Transmisión Usuario Primario.....	56
6.2.	Detección y Transmisión del Transmisor Cognitivo.....	58
6.3.	Sincronización entre Transmisor Cognitivo y Receptor.....	59
6.4.	Creación de nuevos bloques en el entorno GNU Radio.....	59
6.4.1.	Transmisor Cognitivo.....	60
6.4.1.1.	Bloque Detector de Energía.....	60
6.4.1.1.1.	Curva ROC Detector de Energía.....	61
6.4.1.2.	Bloque Comparador.....	63
6.4.2.	Receptor Cognitivo.....	64
6.4.2.1.	Comparador RX SU.....	65
6.5.	Comparativa entre Enlace normal de Comunicación y un Enlace basado en sistemas de Radio Cognitiva.....	67
7.	DISCUSIÓN.....	70
8.	CONCLUSIONES.....	72
9.	RECOMENDACIONES.....	75
10.	BIBLIOGRAFIA.....	76
11.	ANEXOS.....	80
11.1.	ANEXO I: INSTALACION DE GNU RADIO.....	80

11.2.	ANEXO II: INSTALACION DE BLOQUES OSMOSDR E IIO .....	82
11.2.1.	INSTALACION GR-OSMOSDR .....	82
11.2.2.	INSTALACION GR-IIO .....	83
11.3.	ANEXO III. CREACIÓN DE UN NUEVO BLOQUE (MODULO OUT-OF_TREE).....	85
11.4.	ANEXO IV: CODIGO FUENTE: DETECTOR DE ENERGIA.....	91
11.5.	ANEXO V: ANALISIS ESPECTRAL .....	94
11.6.	IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN BASADO EN PRINCIPIOS DE RADIO COGNITIVA .....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Niveles de funcionabilidad de un CR .....	9
<b>Tabla 2.</b> Parámetros básicos el Estándar IEEE 802.22 .....	15
<b>Tabla 3.</b> Características de las técnicas fundamentales de detección de espectro .....	18
<b>Tabla 4.</b> Ventajas y Desventajas de los Dispositivos SDR.....	29
<b>Tabla 5.</b> Bandas de Frecuencias.....	32
<b>Tabla 6.</b> Rango de Frecuencias conforme a cada región .....	33
<b>Tabla 7.</b> Características del Equipo HF-6065.....	36
<b>Tabla 8.</b> Comparación de dispositivos SDR representativos.....	36
<b>Tabla 9.</b> Características de los firmwares disponibles para SDRs.....	37
<b>Tabla 10.</b> Frecuencias de Operación de Quad-band Cellular Duck Antennas .....	39
<b>Tabla 11.</b> Parámetros de Operación de Quad-band Cellular Duck Antennas.....	40
<b>Tabla 12.</b> Coordenadas del Lugar de Implementación del Enlace .....	43
<b>Tabla 13.</b> Parámetros para configuración de Detector de Energía .....	44
<b>Tabla 14.</b> Sub-bandas de medida.....	45
<b>Tabla 15.</b> Parámetros de configuración del analizador de espectros .....	46
<b>Tabla 16.</b> Resultados de la ocupación espectral de la Ciudad de Loja .....	52
<b>Tabla 17.</b> Parámetros de evaluación de desempeño para detector de energía .....	62
<b>Tabla 18.</b> Comparativa entre Enlace normal de Comunicaciones y un Enlace basado en sistemas de Radio Cognitiva.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Radio Cognitiva en el dominio del Tiempo. [8] .....	7
<b>Figura 2.</b> Ciclo Cognitivo según Mitola. [9] .....	11
<b>Figura 3.</b> Usuarios: Primarios y Secundario en un Red CR .....	13
<b>Figura 4.</b> Métodos de Detección del Espectro[16] .....	17
<b>Figura 5.</b> Diagrama de bloques del detector de energía[18].....	18
<b>Figura 6.</b> Representación gráfica de las probabilidades $PFA$ y $(1 - PD)$ [20].....	20
<b>Figura 7.</b> Comparación en la construcción entre Radio Convencional y Radio Definido por Software [21].....	23
<b>Figura 8.</b> Niveles de SDR.....	25
<b>Figura 9.</b> Arquitectura de Hardware y Software de SDR [27]. .....	26
<b>Figura 10.</b> Diagrama de sistemas definidos por software ideal y práctico.[30] .....	28
<b>Figura 11.</b> Relación entre SDR y CR [30].....	30
<b>Figura 12.</b> Regiones a nivel mundial para la atribución de frecuencias según la UIT ..	33
<b>Figura 13.</b> Esquema de medida .....	35
<b>Figura 14.</b> Hardwares seleccionados a) Blade RF b) PlutoSDR c) RTL-SDR [35][36][37] .....	37
<b>Figura 15.</b> Interfaz del programa GNU Radio.....	38
<b>Figura 16.</b> Vista general de Quad-band Cellular Duck Antennas .....	39
<b>Figura 17.</b> Vista general de antenas 433 MHz y UHF .....	40
<b>Figura 18.</b> Arquitectura del Sistema a Implementar.....	42
<b>Figura 19.</b> Cadena de Tx y Rx del Enlace .....	43
<b>Figura 20.</b> Ubicación geográfica del lugar para la Implementación .....	43
<b>Figura 21.</b> Espectrograma: Rango de frecuencias (54MHz a 88MHz) .....	47
<b>Figura 22.</b> Espectrograma: Rango de frecuencias (88 a 108 MHz) .....	48
<b>Figura 23.</b> Espectrograma: Rango de frecuencias (174 a 216 MHz) .....	49
<b>Figura 24.</b> Espectrograma: Rango de frecuencias (470 a 698 MHz) .....	50
<b>Figura 25.</b> Espectrograma: Rango de frecuencias (850a 960 MHz) .....	51
<b>Figura 26.</b> Porcentaje de espectro disponible en cada sub banda de estudio .....	53
<b>Figura 27.</b> Diagrama de bloques de TX de PU.....	56
<b>Figura 28.</b> Implementación de OFDM y posterior Transmisión de PU .....	57
<b>Figura 29.</b> Señal de Transmisión de PU generada en GNU Radio.....	58
<b>Figura 30.</b> Detección y Transmisión ejecutadas por el Transmisor Cognitivo .....	59

<b>Figura 31.</b> Librería actualizada en el entorno GNU Radio.....	61
<b>Figura 32.</b> Visión general del bloque Detector de Energía .....	61
<b>Figura 33.</b> Característica de funcionamiento del receptor para el detector de energía..	62
<b>Figura 34.</b> Vista general de bloque Comparador.....	63
<b>Figura 35.</b> Diagrama de bloques de Transmisor Cognitivo.....	64
<b>Figura 36.</b> Vista general de bloque Comparador RX SU .....	65
<b>Figura 37.</b> Diagrama de bloques de Receptor Cognitivo .....	66

## GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

<b>ARCOTEL</b>	Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones
<b>AWGN</b>	Ruido blanco Gaussiano. ( <i>Additive White Gaussian Noise</i> )
<b>CR</b>	Radio Cognitiva. ( <i>Cognitive Radio</i> )
<b>CFAR</b>	Frecuencia de Falsa Alarma Constante. ( <i>Constant False Alarm Rate</i> )
<b>CRN</b>	Red de Radio Cognitiva. ( <i>Cognitive Radio Network</i> )
<b>DSA</b>	Acceso Dinámico al Espectro. ( <i>Dynamic Spectrum Access</i> )
<b>ED</b>	Detector de Energía. ( <i>Energy Detector</i> )
<b>FCC</b>	Comisión Federal de Comunicaciones. ( <i>Federal Communications Commission</i> )
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. ( <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> )
<b>IF</b>	Frecuencia Intermedia ( <i>Intermediate Frequency</i> )
<b>ITU</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones. ( <i>International Telecommunication Union</i> )
<b>OFDM</b>	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal. ( <i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> )
<b>PBS</b>	Estación Base Primaria. ( <i>Primary Base Station</i> )
<b>PU</b>	Usuario Primario. ( <i>Primary User</i> )
<b>RF</b>	Radio Frecuencia. ( <i>Radio Frequency</i> )
<b>SDR</b>	Radio definido por Software. ( <i>Software Defined Radio</i> )
<b>SNR</b>	Relación Señal Ruido ( <i>Signal-to-Noise Ratio</i> )
<b>SR</b>	Software Radio
<b>SU</b>	Usuario Secundario ( <i>Secondary User</i> )
<b>UHF</b>	Frecuencias Ultra altas ( <i>Ultra High Frequency</i> )
<b>WRAN</b>	Redes Inalámbricas de Área Regional ( <i>Wireless Regional Area Network</i> )

## **1. TÍTULO**

**“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)”**

## **2. RESUMEN**

La presente tesis muestra la implementación de un enlace de comunicación basado en Radio Cognitiva en el Laboratorio de Antenas y Telecomunicaciones 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).

El proyecto de investigación, requiere de diferentes medios, iniciando con un análisis bibliográfico acerca de la tecnología Radio Cognitiva y los diferentes elementos necesarios para su implementación; seleccionando el detector de energía como detector de espectro para el respectivo sensado del recurso natural y determinar oportunamente si la frecuencia seleccionada se encuentra disponible o por el contrario presenta una señal de un Usuario y no puede ser usada. En adición a esto, se realizó la revisión de la modulación a utilizar, si bien la tecnología de CR es relativamente nueva no presenta un estándar expresamente para su uso, es de esta manera que para su implementación se tomó como referencia el estándar IEEE 802.22 es donde especifica la modulación OFDM.

La herramienta informática utilizada para lograr la implementación propuesta es GNU Radio. Los datos de medición espectral son realizados de manera previa para contar con antecedentes de la utilización del espectro en la Facultad. Las herramientas de software que se han utilizado son SDR.

Al término del trabajo, se observa la implementación del enlace de Comunicación el cual pone en manifiesto la definición de Radio Cognitiva en un ambiente real.



## **ABSTRACT**

This thesis shows the implementation of a communication link based on Cognitive Radio in the Antennas and Telecommunications Laboratory in the Faculty of the Energy, Industries and Non-Renewable Natural Resources of the National University of Loja through SDR (Software Defined Radio).

The research project, different means have been required, starting with a bibliographic analysis about the Radio Cognitive technology and the different necessary elements for its implementation, selecting the energy detector as a spectrum detector for the respective sensing of the natural resource and to determine promptly in a timely if the selected frequency is available or on the contrary it presents a signal from a User and cannot be used. In addition to this, the modulation to be used was reviewed, although the CR technology is relatively new, it does not present a standard expressly for its use, it is in this way that for its implementation the IEEE standard 802.22 was taken as a reference is where it specifies OFDM modulation.

The computer tool used to achieve the proposed implementation is GNU Radio. The spectral measurement data are made in advance to have a background of the use of the spectrum in the Faculty. The software tools that have been used are SDR.

At the end of the work, the implementation of the Communication link is observed, which shows the definition of Cognitive Radio in a real environment.

### 3. INTRODUCCIÓN

El continuo avance tecnológico en los últimos 50 años ha sido mucho mayor que en los 500 años pasados, esto se debe a la creciente demanda de nuevas tecnologías y servicios de comunicaciones inalámbricas que buscan adaptarse a las necesidades de los usuarios, de esta manera el uso óptimo del espectro radioeléctrico juega un papel importante ya que es el recurso esencial para la provisión de servicios de telecomunicaciones inalámbricas de última generación. Es indiscutible que el uso del espectro radioeléctrico asignado de manera estática como se lo maneja hoy en día está resultando ineficiente.

Tradicionalmente, el espectro radioeléctrico es administrado por las agencias reguladoras mediante la asignación de porciones fijas de espectro a usuarios individuales en forma de licencias renovables. Aunque este enfoque regulatorio garantiza comunicaciones sin interferencias entre terminales de radio, sufre una utilización ineficiente del espectro. En un entorno de radiocomunicaciones de acceso dinámico al espectro, la disponibilidad de los canales inalámbricos puede cambiar frecuentemente en el tiempo, el sistema en cuanto detecte la presencia de un Usuario Primario en la banda de frecuencia en uso liberará inmediatamente para los usuarios con licencia trasladándose al espacio frecuencial que este más cercano y no se encuentre en uso.

Existen diversas investigaciones sobre el acceso dinámico y la detección del espectro, la mayor parte abordan la investigación desde un punto de vista teórico, muy pocos de los resultados obtenidos han sido verificados en la práctica. Es de esta manera que se establecerá un enlace de comunicación inalámbrica entre un transmisor y receptor cognitivo, en donde podrán en manifiesto un acceso al espectro de forma dinámica presentando las cualidades de Radio Cognitiva, como principal ventaja que presentará este enlace es la reducción de la electrónica asociada con el transmisor y receptor, además de proporcionar más flexibilidad al sistema, facilitando además la capacidad de una rápida reconfiguración del enlace y de sus parámetros, realizando un uso más eficaz del espectro radioeléctrico mejorando la eficiencia espectral sin causar interferencias ni afectar a los usuarios con licencia. La implementación consistirá en una combinación de software libre y hardware flexible que permita la realización de un enlace de bajo costo.

## **4. REVISIÓN LITERARIA**

### **4.1. RADIO COGNITIVA**

#### **4.1.1. Antecedentes de Redes de Radio Cognitiva**

El continuo crecimiento tecnológico y la inserción de nuevas aplicaciones inalámbricas, hace necesario que replanteemos la asignación del espectro radioeléctrico, debido a la manera ineficiente de distribución del mismo que es actualmente de forma estática.

La proliferación de dispositivos y servicios inalámbricos para usos tales como las comunicaciones móviles, la seguridad pública, Wi-Fi<sup>1</sup> y televisión sirven como el ejemplo más indiscutible de cuánto la sociedad moderna se ha vuelto dependiente de espectro radioeléctrico. La creciente escasez en el espectro radioeléctrico disponible está limitando el crecimiento de aplicaciones de gran ancho de banda.

A medida que la tecnología de las comunicaciones inalámbricas evoluciona rápidamente, se empieza a construir dispositivos de radio con distintas funciones específicas, como manipulación del espectro radioeléctrico y la capacidad de adaptación de los parámetros de operación. Es así que, por tal razón empiezan a aparecer radios cuyas propiedades como: la frecuencia, la modulación, el ancho de banda de la señal y el acceso a la red son establecidas y pueden ser manipuladas a través de software; es de esta manera que surgen los denominados Radios Definidos por Software (SDR por sus siglas en inglés, *Software Defined Radio*). [1]

Actualmente ciertas bandas de frecuencias se utilizan masivamente y se encuentran aglomeradas, entretanto otras regiones del espectro están parcial o totalmente infrautilizadas gran parte del tiempo. La baja eficiencia espectral de los esquemas de acceso al medio en bandas no licenciadas, proponen la evidente necesidad de considerar otras políticas complementarias.[2]

Los estudios del espectro radioeléctrico realizados hasta el momento llevados a cabo por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC por sus siglas en inglés, *Federal Communications Commission*), muestra que la utilización del espectro en la banda de 0-6 GHz varía de 15% a 85% [3]. Con todo lo antes descrito existe la presencia de huecos

---

<sup>1</sup> Wi-Fi: Wireless Fidelity es un mecanismo que permite, de forma inalámbrica, el acceso a Internet de distintos dispositivos al conectarse a una red determinada.

en el espectro con licencia en periodos intermitentes de bandas de frecuencias, denominadas más comúnmente como White Spaces<sup>2</sup>.

La radio cognitiva nace como la tecnología que propone una solución a la problemática, una gestión del recurso natural de carácter limitado de manera mucho más eficiente, proponiendo un acceso dinámico al espectro radioeléctrico, presentando así un sistema de radiofrecuencia capaz de modificar sus parámetros de transmisión basándose en la interacción con el medio en el que opera y trabaja, con la premisa fundamental de la no interferencia con los usuarios licenciados o Usuarios Primarios.

#### **4.1.2. Definición de Radio Cognitiva**

Existen numerosas definiciones que se han realizado en el transcurso de los años en relación a la Radio Cognitiva (CR por sus siglas en inglés, *Cognitive Radio*), teniendo como responsables a los organismos de normalización internacional, el mundo académico y líderes en las industrias.

El concepto de radio cognitiva fue propuesto por primera vez por J. Mitola III en un seminario en el Real Instituto de Tecnología de Estocolmo en 1998 y publicado en un artículo en 1999. En él definió a la Radio Cognitiva como:

*"La radio cognitiva (CR) identifica el punto en el que los asistentes digitales personales inalámbricos (PDA) y las redes relacionadas son suficientemente inteligentes computacionalmente sobre el tema de los recursos de radio y las comunicaciones informáticas relacionadas para (a) detectar las necesidades de comunicaciones del usuario como una función del contexto de uso, y (b) para proporcionar recursos de radio y servicios inalámbricos más adecuados a esas necesidades". [4]*

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) se refiere a la CR como:

*"Una radio cognitiva (CR) es una radio que puede cambiar sus parámetros transmisores basado en la interacción con el entorno en el que opera. La mayoría de los radios cognitivos serán probablemente SDR (Software Defined Radio) pero ni tener el software ni siendo programable en campo son requisitos de un radio cognitivo." [5]*

---

<sup>2</sup> White Spaces: Frecuencias que se encuentran reservadas para el uso sin licencia disponible para sistemas de radio cognitiva.

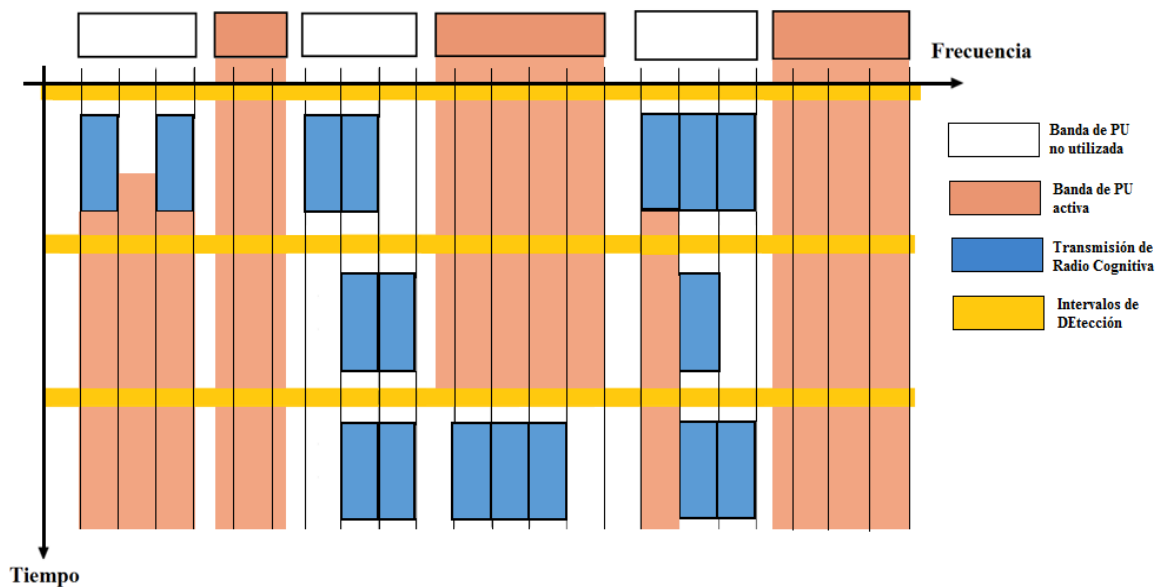
La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés, *International Telecommunication Union*) también presenta una definición para esta tecnología:

*“Una radio o un sistema que detecta y es consciente de su entorno operativo y en consecuencia puede ajustar sus parámetros de funcionamiento de manera dinámica y autónoma”* [6].

Por otra parte, El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE por sus siglas en inglés, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), propuso lo siguiente:

*“Un transmisor/receptor de radiofrecuencia que está diseñado para detectar de forma inteligente si un segmento particular del espectro radioeléctrico está actualmente en uso, y para saltar dentro y fuera de él instantáneamente, siempre que el tiempo de desocupación del espectro lo permita, sin que haya ningún tipo de interferencia con las transmisiones de otros usuarios autorizados”*[7].

Existen diferentes y diversas definiciones para referirse a la tecnología de CR, cada una de ellas con similitud pero en esencia hace referencia a un dispositivo que ha incorporado la conciencia del entorno y es capaz de modificar sus parámetros operativos en base al conocimiento de su alrededor, sin interferir en el servicio con los Usuarios con licencia. La figura 1 muestra la manera en la que trabaja la CR.



**Figura 1.** Radio Cognitiva en el dominio del Tiempo. [8]

### 4.1.3. Características Principales de un dispositivo CR

Existen dos características principales de los dispositivos CR, dichas características se describen a continuación:

- **Capacidad Cognitiva**

Tecnología necesaria para capturar la información de su entorno de radiofrecuencia e identificar las partes del espectro que no estén siendo utilizadas. Para poder obtener la información del entorno radio no es suficiente monitorizar las bandas de frecuencia de interés, además se necesitan técnicas sofisticadas para capturar las variaciones espaciales y temporales del entorno radio.

A partir de la información obtenida, el objetivo de la Radio Cognitiva es operar en determinadas bandas de frecuencia evitando causar interferencia a los usuarios principales de dichas frecuencias. Con esta capacidad se pueden identificar las porciones de espectro que no están siendo utilizadas en un determinado instante y posición en tiempo real determinando los parámetros más apropiados para la comunicación y así adaptarse al entorno. [2]

- **Reconfigurabilidad**

Se refiere a la capacidad que permite variar dinámicamente distintos parámetros relacionados con la Transmisión y Recepción con el objetivo de mejorar la calidad de los servicios ofrecidos sin modificar los componentes de hardware. Las reconfiguraciones están definidas por software, es decir, se realizan activando el software apropiado en el transceptor. La reconfiguración incluye:

- i. **Frecuencia de operación:** En base a la información sobre el entorno radio se determina cual es la frecuencia de operación más conveniente para ser determinada y la comunicación puede ser dinámicamente realizada en la frecuencia de operación idónea.
- ii. **Modulación/Codificación Adaptativa:** Una CR es capaz de seleccionar el tipo de modulación apropiada y adaptable a las condiciones del canal y los requisitos del usuario, por lo que se selecciona el esquema de modulación que permita la eficiencia espectral más alta.

- iii. **Potencia de transmisión:** el control de la potencia permite la reconfiguración de ésta para la transmisión dinámica dentro del límite de potencia permisible. Si no se solicita una potencia de operación elevada, la CR reduce la potencia del transmisor para disminuir la interferencia y permitir que más usuarios accedan al mismo espacio de espectro.
- iv. **Tecnología de comunicación:** Una CR puede ser usado para brindar interoperabilidad entre sistemas de comunicaciones distintos y tecnologías de acceso radio. [2]

Los parámetros de transmisión de una radio cognitiva pueden ser reconfigurados no sólo a principios de la transmisión sino también durante la misma.

#### 4.1.4. Ciclo Cognitivo

Para que un dispositivo de CR pueda obtener todas las características antes mencionadas, en su tesis doctoral Mitola[9], considera que existen nueve niveles en el incremento de la capacidad cognitiva de un sistema, tal y como se muestra en la Tabla 1:

NIVEL	CAPACIDAD	TAREAS CARACTETRISTICAS
0	Preprogramado	La radio no tiene capacidad de razonamiento basada en modelos
1	Razonamiento impulsado por los objetivos	Elección basada en objetivos de banda de RF, interferencia de aire y protocolo.
2	Conocimiento del contexto.	Infiere el contexto de las comunicaciones externas (participación mínima del usuario)
3	Radio consciente	Razonamiento flexible sobre arquitecturas internas y de red
4	Capacidad de planificar	La razón sobre los objetivos en función del tiempo, los espacios y el contexto
5	Realiza Negociaciones	Expresar argumentos para planes alternativos para usuarios, pares, redes
6	Aprender Ruta	Determina de forma autónoma la estructura del entorno
7	Adapta Ruta	Modifica de forma autónoma los planes a medida que cambian las rutas aprendidas.
8	Adapta Protocolos	Autónomo propone y negocia nuevos protocolos.

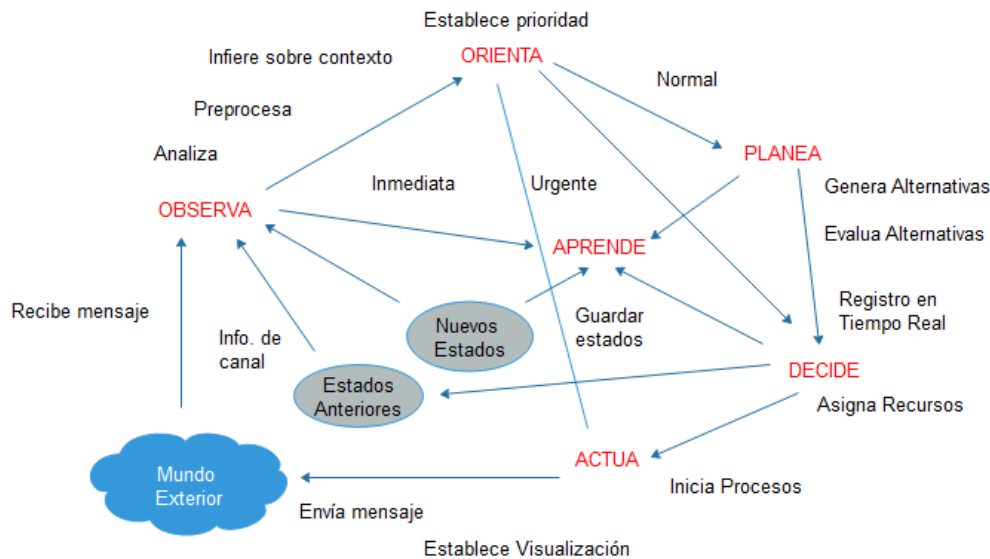
**Tabla 1.** Niveles de funcionabilidad de un CR.[9]

Los niveles están estructurados de la siguiente manera:

- El nivel 0 representa un SDR o radio de software convencional.
- En el nivel 1, se eligen los parámetros de transmisión necesarios para cumplir el objetivo principal QoS (*Quality of Service* u otros), lo cual requiere que el sistema sea consciente del entorno que le rodea. Este nivel de capacidad requiere un conjunto de sensores de entorno y RF multibanda.
- El nivel 2 implica que el sistema es consciente de lo que su usuario desea, incluye la detección de eventos significativos que pueden dar forma al entorno
- El nivel 3 supone un conocimiento tanto de los componentes como de los de distintas redes en las que pueda operar, conocimiento útil para respaldar las decisiones locales.
- En el nivel 4, el sistema posee la capacidad de analizar la situación (es decir, los niveles 2 y 3), determinar los objetivos a cumplir y formular los planes necesarios.
- En el nivel 5, el sistema es capaz de negociar con otros dispositivos radio, la realización de negociaciones con otras entidades de radio requiere la capacidad de ejecutar protocolos de negociación.
- Los tres últimos niveles requieren aprendizaje automático, son los que asumen en cierta forma, el mayor grado de inteligencia del sistema.[9]

Cada nivel del ciclo cognitivo tiene una determinada función que lleva a una compleja radio autoconsciente, de esta forma irá aprendiendo de acuerdo a la experiencia, tomando decisiones, realizando planes. En la Figura 2 se pueden observar los niveles del ciclo cognitivo.





**Figura 2.** Ciclo Cognitivo según Mitola. [9]

Debido a que todo el proceso de aprendizaje definido por Mitola puede ser muy costoso y que no es necesario para muchas de las futuras aplicaciones propuestas, muchos investigadores han asumido unos niveles más bajos de funcionalidad en sus sistemas de CR, centrándose principalmente en las fases de Observación, Orientación, Decisión y Actuación (OODA).

- **Observación:** En esta primera fase, se detecta y percibe el entorno de radio, constituye la etapa de detección, mediante esta fase se localizan las bandas libres en el espectro que no se estén utilizando en un determinado instante de tiempo, por lo que se pueden seleccionar los parámetros adecuados para una correcta y óptima transmisión, sin interferencias con otros usuarios. [10]
- **Orientación:** En esta fase, se analizan las bandas libres de frecuencias detectadas, las cuales constituyen los White Spaces que serán utilizados para las transmisiones por parte de los Usuarios Secundarios. De estas bandas se extraen el valor de parámetros de transmisión como la velocidad de datos, el tipo de modulación y el ancho de banda. [10]
- **Decisión:** En esta fase, tras percatarse del resultado de las dos fases anteriores, se elige la banda libre que más se ajusta a los parámetros del usuario para llevar a cabo la transmisión con éxito. [10]
- **Actuación:** En esta fase, se lleva efecto la transmisión. Como se sabe el entorno es cambiante, el sistema debe estar preparado para actuar ante cualquier situación. Al referirnos al entorno cambiante hablamos del hecho de la aparición

de un usuario con mayor prioridad de transmisión o por la indisponibilidad del canal generando nuevas alternativas y definiendo nuevos criterios de evaluación. [10]

#### 4.1.5. Arquitectura de la Red de Radio Cognitiva (CRN)

En esta sección se definen los principales elementos que componen una red de Radio Cognitiva o red CR y también aquellos elementos que interactúan con los mismos:

**Red Primaria o Principal:** Es la utilizada por los usuarios primarios. Está constituida por:

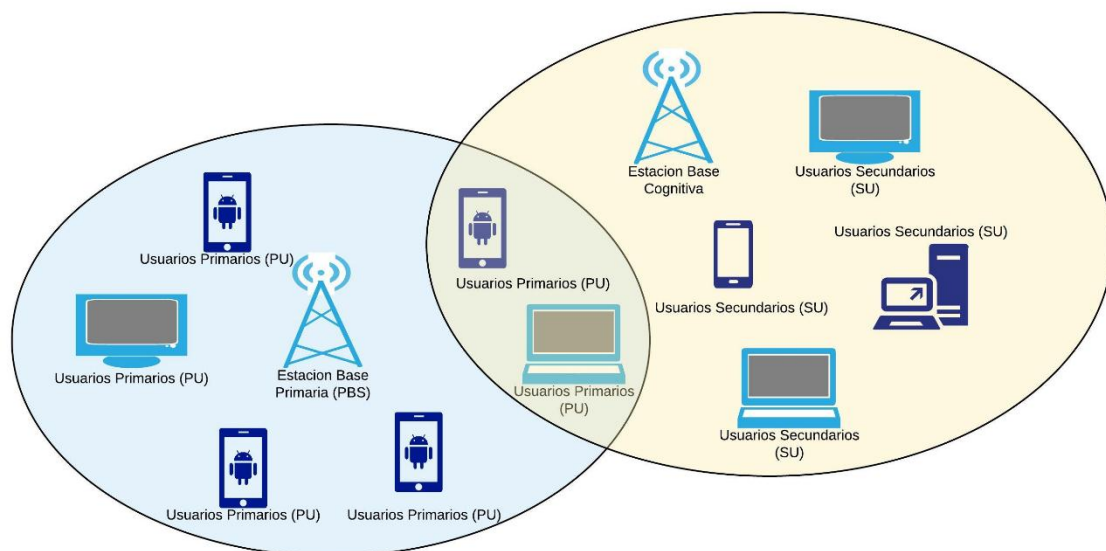
- **Usuario Primario:** Los usuarios primarios (PU por sus siglas en inglés, *Primary User*) tienen una licencia para hacer uso en exclusividad de un determinado recurso del espectro radioeléctrico. Este acceso puede ser controlado por su estación base o por un protocolo entre los propios usuarios primarios y no debería ser afectado por las operaciones de cualquier otro usuario no autorizado. Los PU no necesitan ninguna modificación o funciones adicionales para coexistir con los usuarios de la red CR. [11]
- **Estación Base Primaria:** La estación base primaria (PBS por sus siglas en inglés, *Primary Base Station*) es un componente fijo de la infraestructura de red la cual tiene una frecuencia licenciada. En principio, la estación base no tiene ninguna capacidad de radio cognitivo para compartir el espectro con usuarios de radio cognitivo. Sin embargo, las estaciones de base primarias pueden ser obligadas a tener protocolos de radio cognitivas o tradicionales para el acceso a la red primaria de usuarios de radio cognitiva. [11]

**Red Secundaria o Cognitiva:** Red de usuarios sin licencia que hacen uso dinámico de un determinado recurso del espectro radioeléctrico. El acceso de este usuario al espectro solamente puede ser tolerado en tanto no afecte a la operación de la red primaria establecida. Las redes CR también se pueden implementar tanto con un esquema de infraestructura o distribuidas (ad-hoc). Los componentes de una red secundaria son los siguientes:

- **Usuario Secundario o Cognitivo:** Los usuarios secundarios de CR (SU por sus siglas en inglés, *Secondary User*) no tienen frecuencias de operación licenciadas. Por lo tanto, el acceso al espectro es permitido solamente de una

manera oportunista. La funcionalidad de los usuarios de CR incluyen el monitoreo y definición de la banda espectral a usar y de los respectivos protocolos de transporte y ruteo, se asume que los usuarios de radio cognitivo tengan funcionalidades para comunicarse no solo a las estaciones base si no a otros usuarios de radio cognitivo. [11]

- **Estación Base de radio cognitivo:** Las estaciones base de radio cognitivo son componentes fijos de la infraestructura de red con funcionalidades de radio cognitiva. Las estaciones base proveen una conexión directa a usuarios de radio cognitivo sin licencias; lo anteriormente descrito se puede visualizar en la figura 3. [11]



**Figura 3.** Usuarios: Primarios y Secundario en un Red CR  
**Fuente:** Elaboración Propia

#### 4.1.6. Estándar IEEE 802.22 – WRAN<sup>3</sup>

##### 4.1.6.1. Introducción

El Comité de Estándares de Redes de Área Local (LAN/MAN) del IEEE inició el Proyecto IEEE 802.22 sobre CR habilitado para WRAN. El trabajo dio lugar a un estándar también conocido como Wi-FAR<sup>4</sup> que fue aprobado en 2011 que propone utilizar los canales de banda de televisión no utilizados en las bandas VHF y UHF para

<sup>3</sup> WRAN (Wireless Regional Area Network o Redes Inalámbricas de Área Regional): es una tecnología de red que utiliza partes infrutilizadas del espectro de radiofrecuencia para brindar conectividad a Internet para hogares y diferentes entidades, especialmente en áreas desatendidas.

<sup>4</sup> WI-FAR (Wireless for FAR – Larger Areas): nombre recientemente registrado por White Spaces Alliance (WSA) que hace referencia al estándar inalámbrico 802.22.

proporcionar comunicaciones nómadas de alto rendimiento y de largo alcance [12]. De esta manera, éste es el primer estándar para incorporar completamente el concepto de CR.

El estándar IEEE 802.22 WRAN tiene como objetivo admitir dispositivos exentos de licencia sin interferir en el espectro que se asigna al servicio de transmisión de TV. Con velocidades de datos operativos comparables a las que ofrecen muchos servicios DSL/ADSL<sup>5</sup>, puede proporcionar conectividad de banda ancha utilizando un espectro que se asigna nominalmente a otros servicios sin causar interferencias indebidas. Así pues, IEEE 802.22 hace un uso efectivo del espectro disponible sin la necesidad de nuevas asignaciones[13].

En dicho estándar se especifican los umbrales para desocupar un canal ante la presencia de las siguientes señales:

- Televisión Digital: -116dBm sobre un canal de 6MHz.
- Televisión Analógica (NTSC): -94dBm en el pico de la portadora.
- Micrófonos inalámbricos: -107dBm en un ancho de banda de 200kHz.

#### 4.1.6.2.Capacidad del Servicio

El estándar ha sido definido para permitir a los usuarios alcanzar un nivel de rendimiento similar al de los servicios DSL. Esto equivale a una velocidad descendente o descarga de alrededor 1,5 Mbps en la periferia y un enlace ascendente de 384 Kbps. Estas cifras suponen 12 usuarios simultáneos. Para lograr esto el sistema en general debe tener una capacidad de 18 Mbps en dirección descendente [14]. En la tabla 2 se resumen los parámetros básicos de este estándar.

<b>PARAMETROS BÁSICOS</b>	<b>ESPECIFICACIÓN</b>
Radio típico de la célula (km).	30 – 100
Metodología	Sensores de espectro para identificar canales libres.
Ancho de banda del canal (MHz)	6
Modulación	OFDM
Capacidad de Usuario	18 Mbps
Capacidad del usuario	Downlink: 1.5 Mbps Uplink: 384 Kbps

<sup>5</sup> DSL/ADSL: Digital Subscriber Line / Analog Subscriber Line.

## Tabla 2. Parámetros básicos el Estándar IEEE 802.22

Fuente: Elaboración propia

### 4.1.6.3. Características de Modulación y Codificación

En noviembre de 2005, el estándar IEEE 802.22 WRAN recibió 9 propuestas PHY, y la mayoría de las propuestas se basaron en las técnicas de multiplexación ortogonal por división de frecuencia (OFDM<sup>6</sup>). Esto se debe a que OFDM es más adecuado que cualquier otra técnica para proporcionar una gestión flexible del espectro, lo que hace que los sistemas CR reutilicen efectivamente los recursos de frecuencia. Todas las propuestas se fusionaron con una PHY basada en OFDM en una reunión en marzo de 2006.

Al usar esta técnica de compartición del espectro se puede hacer un uso más eficiente del limitado ancho de banda en el que un sistema de radiocomunicaciones opera. Para que las componentes con mayor densidad espectral de potencia de cada una de las sub-portadoras optimicen el uso de la porción del espectro radioeléctrico utilizado, se ubican las portadoras del canal de comunicaciones separadas 90° entre sí [14].

### 4.1.7. Técnicas de Detección del Espectro

Las técnicas de Detección de Espectro o Sensado del Espectro, se convierte en el mecanismo esencial y crucial, que permite a la CR detectar oportunidades de transmisión. Para minimizar la interferencia causada por los Usuarios Primarios, la tarea de detección de espectro realizada por la CR debe ser confiable y rápida.

Esta operación especial necesita un consumo de energía adicional, por lo que debemos seleccionar el modelo específico correcto para la aplicación. Debemos tener en consideración que las altas tasas de muestreo generan una gran cantidad de muestras para procesar, lo que afecta la velocidad y el consumo de energía.

Las características específicas que deben tenerse en cuenta en el proceso de detección de espectro son las siguientes [15]:

- **Probabilidad de detección ( $P_D$ ):** la probabilidad de que el dispositivo CR determine correctamente la presencia o ausencia de una Usuario Primario.

---

<sup>6</sup> OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access o Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal): es una forma de modulación de señal que divide un flujo de modulación de alta velocidad de datos, colocándolos en varias sub-portadoras de banda estrecha de espacio estrecho y de esta manera es menos sensible al desvanecimiento selectivo de frecuencia.

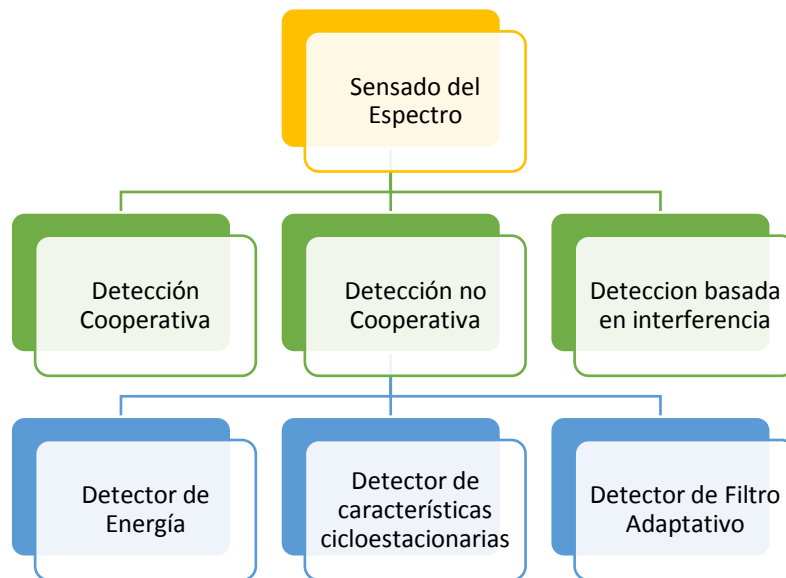
- **Probabilidades de falsa alarma ( $P_{FA}$ ):** la probabilidad de que el dispositivo CR decida que el PU ocupe la banda cuando no la tiene, y que no está presente cuando realmente lo está, respectivamente.
- **Relación Señal/Ruido:** hay un nivel de SNR<sup>7</sup> por debajo del cual, el dispositivo CR ya no puede detectar la señal de PU debido a la incertidumbre en la variación de ruido. Por lo tanto, para poder identificar señales débiles, se requiere un receptor más complejo y costoso. Por lo tanto, cuando se implementa un algoritmo de detección de espectro, se debe lograr una compensación razonable entre el precio y la SNR.
- **Rango de frecuencia de operación:** también se define el espectro específico que se detectará, dependiendo del escenario. El ancho de banda tiene influencia sobre el método de detección. Puede que no sea posible que el terminal CR realice la detección en toda la banda al mismo tiempo.
- **Velocidad de detección:** se requiere que el algoritmo sea capaz de evaluar rápidamente las condiciones del entorno de radio para que la SU pueda utilizar el espectro desocupado si se encuentra.

Diferentes enfoques tienen diferentes beneficios e inconvenientes, entre las técnicas más ampliamente estudiadas tenemos las que se presentan en la figura 4, estas son:

- 1) **Detección Cooperativa**
- 2) **Detección No cooperativa**
  - a) Detector de Energía
  - b) Detector de Filtro Adaptivo
  - c) Detector de Características del Ciclo estacionario
- 3) **Detección basada en la interferencia**

---

<sup>7</sup> SNR (Signal-to-Noise Ratio o Relación Señal/Ruido): se define como la relación entre la potencia de la señal y la potencia de ruido



**Figura 4.** Métodos de Detección del Espectro[16]

En los métodos no cooperativos, cada CR debe tener la capacidad de determinar la presencia o ausencia de los PU en un espectro específico. Los métodos cooperativos incluyen escenarios donde grupos de CR comparten información sobre el espectro. Y, por último, los métodos de detección basados en interferencias funcionan bajo la suposición de que si su señal puede ser interferida, otro transmisor está dentro del rango.

La tabla 3 presenta una recopilación de las distintas ventajas y desventajas de los métodos mencionados.

<b>SENSADO DEL ESPECTRO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>Detector de Energía</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de implementar.</li> <li>• No requiere conocimiento previo de las señales primarias.</li> <li>• Requiere la menor cantidad de potencia computacional en los nodos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La precisión depende en gran medida de las variaciones de nivel de ruido.</li> <li>• Alta falsa alarma debido a la incertidumbre del ruido.</li> </ul>
<b>Detector de características cicloestacionarias</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más robusto en contra de la incertidumbre del ruido y mejor detección de señales de baja SNR que el detector de energía.</li> <li>• Puede distinguir entre diferentes tipos de transmisiones y sistemas primarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las características particulares de la señal pueden necesitar ser introducidas</li> <li>• Características específicas</li> </ul>

<b>Detector de Filtro Adaptativo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Más robusto ante la incertidumbre del ruido y mejor detección de señales de baja SNR que el detector de características cicloestacionarias.</li> <li>• Requiere menos muestras de la señal para conseguir una buena detección.</li> <li>• Necesita una duración de detección más corta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere información a priori sobre las transmisiones de PU y hardware adicional en los nodos para la sincronización con las PU.</li> <li>• Alta complejidad.</li> </ul>
--------------------------------------	---	---

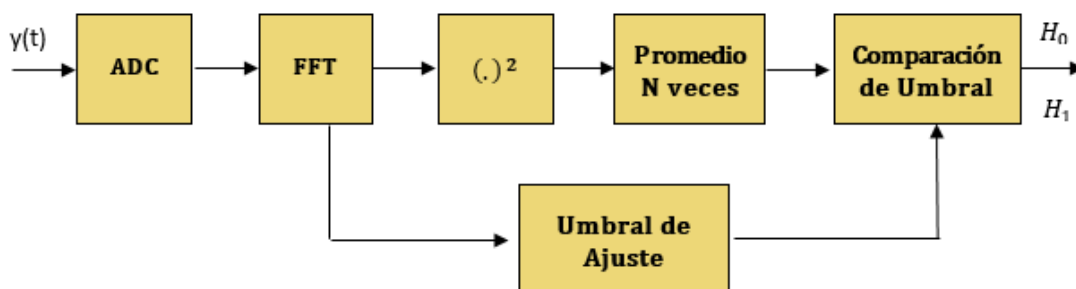
**Tabla 3.** Características de las técnicas fundamentales de detección de espectro[16]

De los métodos antes mencionados, el que se seleccionó y que hoy en día se usa ampliamente por no requerir a priori el conocimiento de las propiedades de la señal transmitida, la información del canal, o incluso el tipo de modulación, es el Detector de Energía.

#### 4.1.7.1. Detector de Energía

El Detector de energía (ED por sus siglas en inglés, *Energy Detector*) es el método de detección que se utilizará debido a la simplicidad de la implementación y, lo que es más importante, no se requiere ningún conocimiento previo de la señal.

El ED también conocido como radiometría o periodograma, es un método de análisis de detección de espectro en el dominio del tiempo que permite obtener estimaciones sobre la utilización del espectro en muy poco tiempo, basándose en operaciones simples[17]. Este enfoque, basado en pruebas de hipótesis, permite resolver problemas de decisión binaria (presencia o ausencia de señal válida) a través de la observación de muestras recibidas. El ED está diseñado para detectar el nivel de energía de una señal potencial y compararlo con un umbral ( $\lambda$ ). En la figura 5 se muestra el diagrama de bloques del ED.



**Figura 5.** Diagrama de bloques del detector de energía[18].



El problema del sensado de espectro puede ser modelado como un test de hipótesis, lo cual es equivalente a decidir entre 2 hipótesis [19]:

$$y(t) \begin{cases} H_0 = n(t) & \text{Señal Ausente} \\ H_1 = s(t) + n(t) & \text{Señal Presente} \end{cases} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

$y(t)$ : es la señal recibida por el usuario CR

$H_1$ : indica que hay una señal presente

$H_0$ : indica ausencia de señal

$s(t)$ : es señal transmitida por el PU

$n(t)$ : ruido blanco Gaussiano indica aditivo de media nula (AWGN);

$H_0$  es la hipótesis nula, de ausencia de señal emitida por el PU, y  $H_1$  es la hipótesis alternativa, de presencia de señal emitida por el PU. En este modelo simple, el canal no tiene memoria y la respuesta es instantánea.

El estadístico utilizado generalmente por este tipo de detectores es la energía media del total de las muestras observadas: [19]

$$T = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t)|^2 \geq \lambda \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $T$  es el tamaño del vector de observación. El funcionamiento de cualquier detector debe ser descrito mediante la probabilidad de falsa alarma  $P_{FA}$ , y la probabilidad de detección,  $P_D$ . Una falsa alarma se da cada vez que  $T < \lambda$  en el caso de que  $H_0$  sea cierta, mientras que la detección ocurre cuando  $T > \lambda$  siendo  $H_1$  cierta, lo anteriormente descrito se presenta en forma matemática en las siguientes ecuaciones.

[19]

$$P_{FA} = P_r (T > \lambda | H_0) = Q \left( \frac{\lambda - (\sigma_s^2 - \sigma_n^2)}{(\sigma_s^2 - \sigma_n^2) \sqrt{\frac{2}{N}}} \right) \quad \text{Ec. 3}$$

$$P_D = P_r (T > \lambda | H_1) = Q \left( \frac{\lambda - \sigma_n^2}{\sigma_n^2 \sqrt{\frac{2}{N}}} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde función Q es: [20]

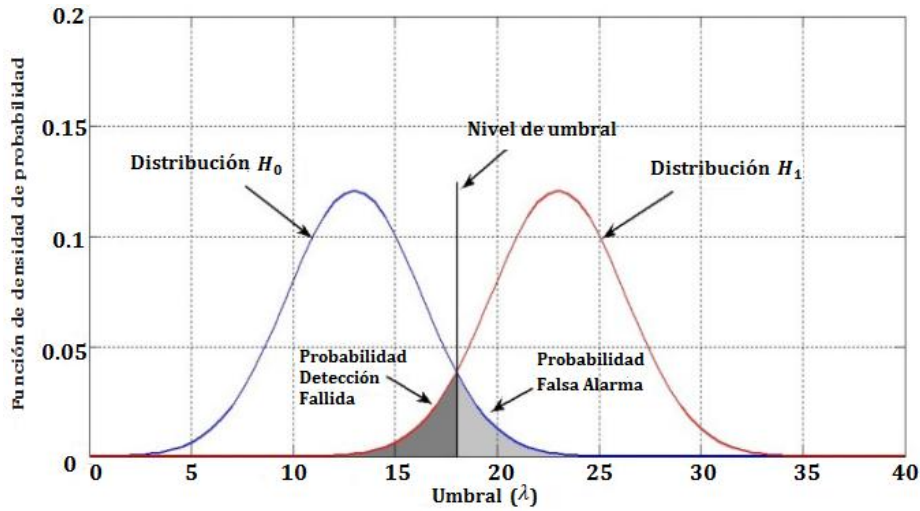
$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \left( \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \right) \quad \text{Ec. 5}$$

$\sigma_n^2$  y  $\sigma_s^2$  son la desviación estándar del ruido y la señal PU respectivamente, se define la Señal a Ruido (SNR) como:

$$SNR = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2} \quad \text{Ec. 6}$$

La demostración gráfica de las probabilidades detalladas en las Ecuaciones 3 y 4 se muestra en la figura 6, así como también la probabilidad de detección fallida representada por la Ecuación 7. [20]

$$P_{df} = 1 - P_D \quad \text{Ec. 7}$$



**Figura 6.** Representación gráfica de las probabilidades  $P_{FA}$  y  $(1 - P_D)$  [20]

#### 4.1.7.1.1. Cálculo del Umbral

El principal objetivo de los distintos métodos de detección basados en energía consiste en la búsqueda de un umbral adecuado para la decisión. Dicho umbral se lo determina mediante la ecuación 8 en donde  $Q^{-1}$  es la función inversa de  $Q$  evaluada en la Probabilidad de Falsa Alarma y equivale al número de muestras tomadas. Tal y como se puede observar el umbral se puede obtener tanto de la Ecuación 3 y 4 realizando el respectivo despeje en cada ecuación, el criterio en el que se basa dicha decisión es el criterio Neyman-Pearson, el mismo que establece un límite en la  $P_{FA}$  y luego maximizar la  $P_D$  dentro de esta restricción. Este criterio es también llamado Frecuencia de Falsa Alarma Constante (CFAR por sus siglas en inglés, *Constant False Alarm Rate*). En este

trabajo consideramos este enfoque para la selección del umbral y evaluamos el rendimiento de detección a través de simulaciones.

El umbral se obtiene según la ecuación 7: [21]

$$\lambda = \sigma_n^2 (Q^{-1}(P_{FA})\sqrt{2N} + N) \quad Ec. 8$$

La función inversa Q se puede relacionar con las funciones inversas de error y se representa de la siguiente manera:

$$Q^{-1}(y) = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2y) = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2y) \quad Ec. 9$$

Donde *erfc* (·) es la función de error complementaria que se define como:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad Ec. 10$$

Se observa que es necesario tener conocimiento del piso de ruido de manera de poder determinar de manera correcta el umbral.

#### 4.1.7.1.2. Incertidumbre en Potencia de Piso de Ruido

Es importante tener un conocimiento el piso de ruido existente de esta manera se determinará el correcto valor de umbral y poder garantizar para cualquier nivel de SNR cierta probabilidad de detección. Considerando que la potencia de piso de ruido varía en el intervalo  $\frac{1}{\tau} \sigma_n^2$  a  $\tau \sigma_n^2$  y la condición  $\tau \geq 1$ , a continuación se muestra la ecuación de la  $SNR_{wall}$ : [21]

$$SNR_{wall} = \frac{\tau^2 - 1}{\tau} \quad Ec. 11$$

Es así que la incertidumbre de piso de ruido se define como  $\tau - 1$ , considerando esto último se reescribe la ecuación del umbral en función a la probabilidad de falsa alarma de la siguiente forma:

$$\lambda_{FA} = \tau \sigma_n^2 \left[ \frac{Q^{-1}(P_{FA})}{\sqrt{\frac{N}{2}}} + 1 \right] \quad Ec. 12$$

La ecuación 12 es la que se utiliza para el diseño del detector implementado, el detector de Energía.

## 4.2. RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

### 4.2.1. Introducción

Desde su introducción en 1991, SDR se ha definido como una plataforma de radio cuya funcionalidad se modifica o implementa al menos parcialmente en el software. En consecuencia, cualquier forma de onda definida en la memoria de la plataforma SDR puede emplearse en cualquier frecuencia. Aunque inicialmente estuvo limitado por el proceso de conversión entre los dominios de señalización analógica y digital, la aparición de convertidores digital a analógico de alta velocidad (DAC, por sus siglas en inglés *Digital-to-Analogic Convert*) y convertidores analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés, *Analogic-to-Digital Convert*) ha traído el concepto ideal de SDR de una comunicación totalmente de software más cerca de una realidad[22].

Los dispositivos inalámbricos que se pueden describir como SDR de hecho han existido por varias décadas. Inicialmente fueron empleados en aplicaciones militares antes de encontrar aplicaciones en el sector comercial. Los programas como SPEAKeasy<sup>8</sup> buscaron habilitar la comunicación y la interoperabilidad entre varios estándares militares. Aunque ambicioso, el proyecto SPEAKeasy produjo un prototipo funcional, a pesar de las elecciones de diseño involucradas en la programación de formas de onda el uso de lenguaje ensamblador de bajo nivel significaba que el software no era compatible.

### 4.2.2. Definición y Aspectos Importantes de SDR

Los desarrollos en radios inteligentes y adaptivas se han enmarcado a lo que hoy es un Radio Definido por software, el cual es definido, según el Wireless Innovation Forum (Foro de Innovación Inalámbrica), de la siguiente manera:

*Radio que provee un control por medio de software de las técnicas de modulación, operación del ancho de banda, funciones de seguridad de la comunicación, los requerimientos de la transmisión y de las normas regulatorias por las mismas[23].*

El Wireless Innovation Forum, anteriormente llamado SDR Forum, fue fundada en 1996, es una corporación sin ánimo de lucro que respalda la utilización innovadora del espectro y el desarrollo de sistemas de comunicaciones inalámbricas, incluidos los

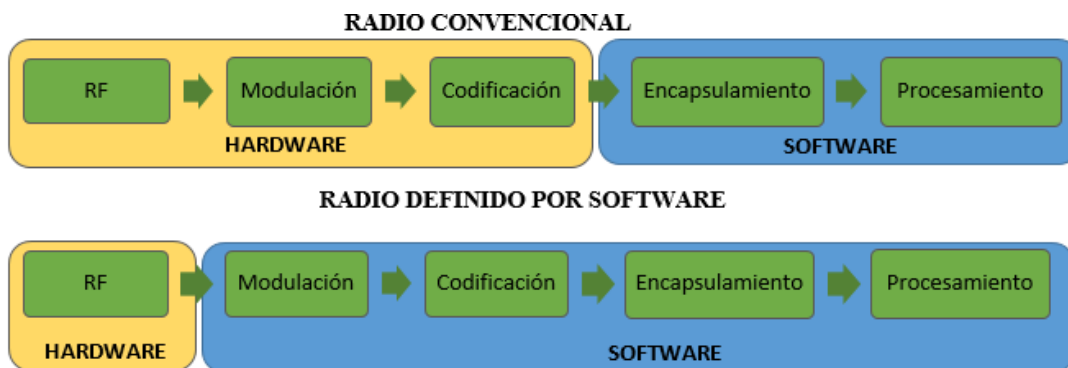
---

<sup>8</sup> SPEAKeasy: programa militar desarrollado desde finales de los 70 cuyo principal propósito fue incorporar nuevos estándares de codificación y modulación.

sistemas de comunicaciones esenciales o críticos. Los miembros del foro aportan una amplia base de experiencia entorno a las tecnologías de SDR, CR y DSA<sup>9</sup> y aquello que gira en torno a la comunicación inalámbrica, para reducir los costes, acelerar el desarrollo de la familia de productos, tecnologías y servicios.

Por otra parte la FCC, considera a SDR como “*aquellos radios que incluyen un transmisor cuyos parámetros de operación, como bandas de frecuencias, tipo de modulación o potencia máxima de salida, pueden ser alterados mediante cambios en software sin realizar cambios a los componentes de hardware, que se relacionan con la emisión de radiofrecuencias*”[24].

Debido a que los SDRs y por ende los CRs, pueden ser configurados a sí mismos de forma autónoma para cualquier tipo de transmisión, organismos reguladores del espectro electromagnético necesitan algún mecanismo para garantizar que estos dispositivos tengan un impacto limitado sobre los sistemas autorizados o primarios. Es por ello que los entes reguladores internacionales se encuentran estableciendo normas o reglas dentro de la fabricación de SDRs, configuración y uso de los dispositivos, por lo cual, dentro de su desempeño puede haber limitaciones o requerimientos regulatorios de carácter técnico, como niveles mínimos y máximos de potencia de transmisión, bandas de frecuencia a utilizar en determinados lugares geográficos, entre otros todos ellos deben ser tomados en cuenta entre los requerimientos de transmisión para la configuración de los mismos [25]. La Figura 7 muestra la comparación entre la radio convencional y SDR.



**Figura 7.** Comparación en la construcción entre Radio Convencional y Radio Definido por Software [21]

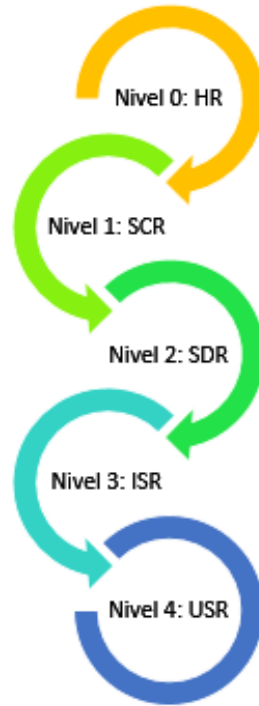
<sup>9</sup> DSA (Dynamic Spectrum Access o Acceso Dinámico al Espectro): es un nuevo paradigma de uso compartido del espectro que utiliza los orificios o huecos del espectro (White Spaces) y, por lo tanto, aporta a él problema de la escasez del espectro y aumenta la utilización del mismo.

### 4.2.3. Niveles de SDR

El Wireless Innovation Forum ha definido varios niveles en los cuales se explica las partes configurables de la radio y el término con el que se los denomina.

- **Nivel 0:** una radio de hardware no configurable, también denominada HR (por sus siglas en inglés, *Hardware Radio*), es decir, una que no puede ser modificada por el software. No puede ser considerada como una SDR, la tecnología SDR más simple comienza con el Nivel 1.
- **Nivel 1:** Una radio controlada por software donde las funciones limitadas son controlables, denominada SCR (por sus siglas en inglés, *Software Controller Radio*). Estos pueden ser niveles de potencia, interconexiones, entre otras, pero no modo o frecuencia.[26]
- **Nivel 2:** En este nivel hay una proporción significativa de la radio que se puede configurar por software. Las SDR reconfigurables se presentan el Nivel 2, estos sistemas SDR incluyen la reconfiguración al permitir el control sobre las técnicas de modulación, las funciones de seguridad y los requisitos de forma de onda en un amplio rango de frecuencias proporcionado por el software. Los SDR de nivel 2 incluyen aplicaciones de procesamiento tales como circuitos integrados de aplicación específica (ASIC por sus siglas en inglés, *Application Specific Integrated Circuit*), Arrays de puertas programables en campo (FPGA por sus siglas en inglés, *Field-Programmable Gate Array*) y procesadores de señales digitales (DSP, por sus siglas en inglés, *Digital Signal Processor*).
- **Nivel 3:** también denominados ISR (por sus siglas en inglés, *Ideal Software Radio*), basándose en las posibilidades extendidas de programación para todo el sistema, la conversión analógica se realizará completamente solo por la antena, los micrófonos y los altavoces. Los componentes de mezcla heterodinos, que cumplen la función de convertir la frecuencia de radio entrante a una frecuencia constante, se eliminan en las ISR, así como componentes para amplificación analógica[26].
- **Nivel 4:** denominados USR (por sus siglas en inglés, *Ultimate Software Radio*) la mejor radio de software o una etapa más allá de ISR. Esta forma de radio definida por software no solo tiene una capacidad de programación completa, sino que también es compatible con una amplia gama de funciones y frecuencias al mismo tiempo, por el momento este nivel se define solo con fines de

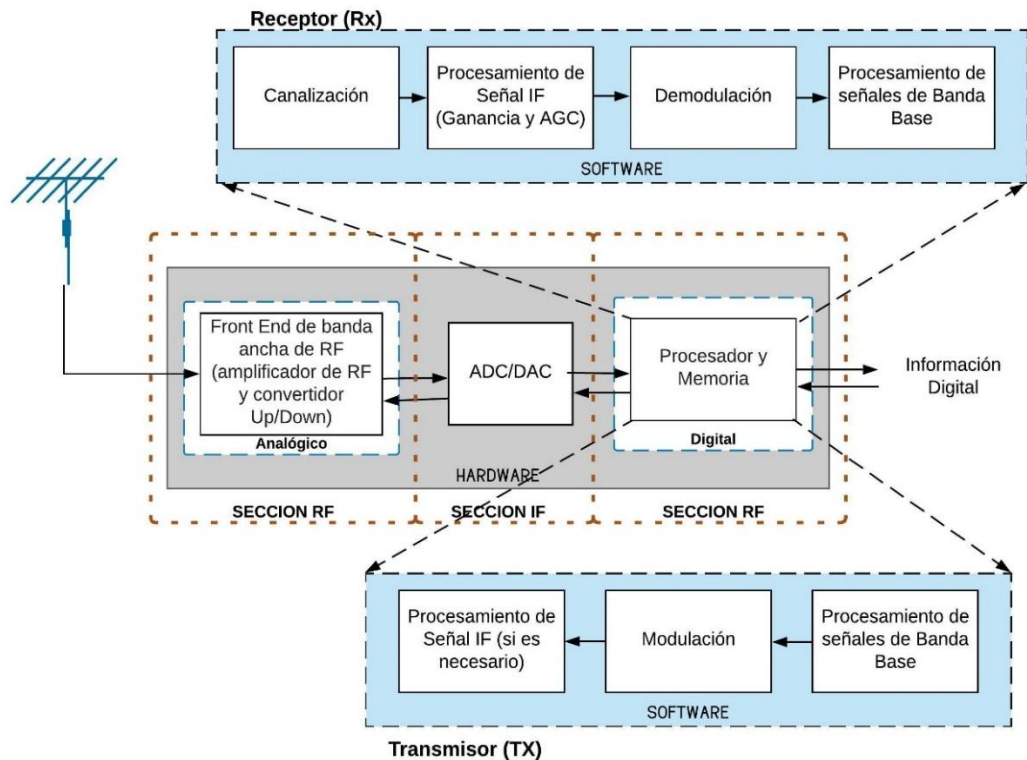
comparación[26]. La figura 8 muestra una recopilación de los niveles antes expuestos.



**Figura 8.** Niveles de SDR  
**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.2.4. Arquitectura de SDR

La arquitectura SDR está desarrollada en base a funciones de radio convencionales. La diferencia es que todas las funciones de procesamiento de señales en la radio convencional se llevan a cabo completamente mediante hardware, mientras que las funciones de procesamiento de señales en SDR se llevan a cabo lo más posible por software. La clave principal en la creación de SDR es la colocación de los componentes ADC y DAC como divisor entre el dominio analógico y el dominio digital, por lo que el procesamiento de la señal se puede llevar a cabo utilizando un software. La arquitectura SDR se puede ver en términos de software y hardware tal y como se lo visualiza en la figura 9.



**Figura 9.** Arquitectura de Hardware y Software de SDR [27].

La estructura del sistema SDR se compone de tres etapas[27]:

- La etapa o sección, de Radiofrecuencia tiene como función:
  - En transmisión, el procesamiento de las señales de IF ajustándolas de manera que, posteriormente, puedan ser transmitidas vía radio.
  - En recepción, adecuar las señales de RF mediante filtrado y convertirlas a frecuencia intermedia.
- La etapa o sección, de Frecuencia Intermedia se ocupa de:
  - En transmisión, convertir las señales de banda base a IF DUC (por sus siglas en inglés, *Digital Up Conversion*) y, posteriormente, convertir dichas señales digitales en señales analógicas.
  - En recepción, digitalizar las señales de IF ADC (por sus siglas en inglés, *Analog-Digital Conversion*) y, después, convertirlas a banda base DDC (por sus siglas en inglés, *Digital Down Conversion*).
- La etapa o sección, de Banda Base BB (por sus siglas en inglés, *Base Band*) es la encargada, tanto en transmisión como en recepción, de todo el procesado digital en banda base de las señales.



La frecuencia de muestreo de los convertidores A/D debe fijarse para todas las señales y debe elegirse de tal manera que se cumplan las condiciones del teorema de muestreo de Shannon para que se procese la señal más amplia. Antes de poder adaptar la frecuencia de muestreo al estándar de la señal, deben corregirse las degradaciones del procesamiento de la señal de dos ramas que proviene de los mezcladores y filtros analógicos, así como de los convertidores A/D. Al ser un dispositivo cuyas funcionalidades son controladas por software, SDR tiene relevancia para el concepto de CR, ya que este tipo de control permite una rápida adaptación a las operadoras de radio, provee un mecanismo lógico en donde se puede implementar los algoritmos y procesos necesarios para el entendimiento del entorno, y pueda realizar un cambio en su operación para alcanzar un determinado objetivo en base a una necesidad del dispositivo o de la red de radiocomunicaciones. Esto corresponde a determinar la forma apropiada y características de la señal electromagnética para la transmisión de radio, definidos por algoritmos de la capa física[27].

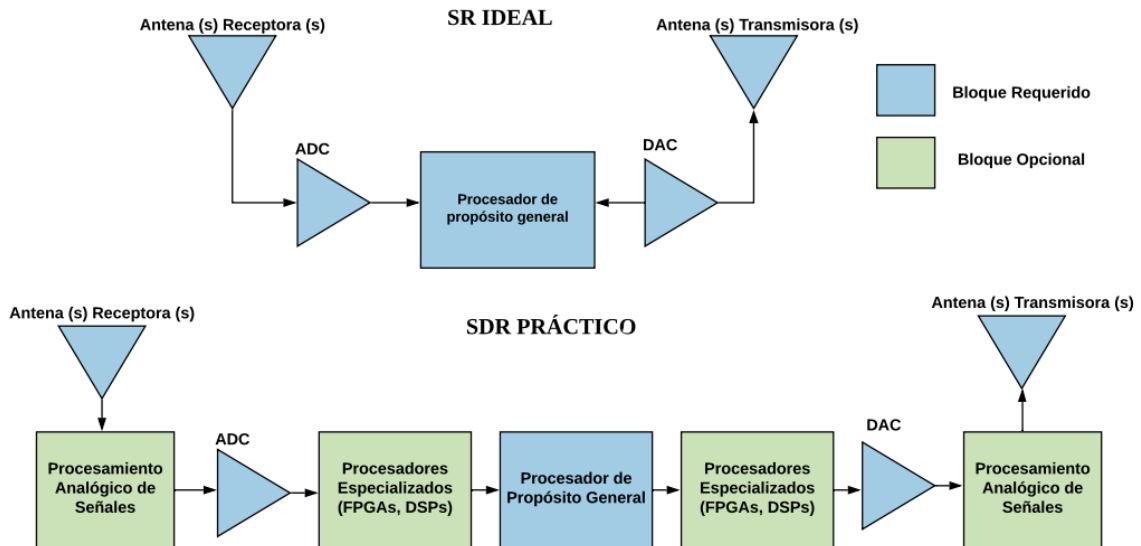
#### **4.2.5. SDR Ideal y Práctico**

Es preciso explicar las diferencias entre los SDR ideales (SR) y los SDR prácticos con el fin de una mejor comprensión de estas arquitecturas.

- Los SR definen por software todos los aspectos de la cadena de transmisión y recepción incluyendo modulación, demodulación, filtrado y selección de bandas de frecuencias incluyendo la interfaz física del aire[28]. Para algunas interfaces aéreas, como el Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha (W-CDMA, por sus siglas en inglés *Wideband Code Division Multiple Access*), tal implementación ideal puede no ser práctica. El SR consiste en una combinación de un ADC o DAC conectado directamente a una antena y un procesador de señal digital (DSP, por sus siglas en inglés, *Digital Signal Processor*). Los requerimientos de hardware para esta plataforma aun no son viables, al menos no con la tecnología actual.
- Los SDR prácticos, contextualizados en las limitaciones de los procesadores actuales disponibles hoy en día, SDR se usó para mostrar una clase de radio que podría reconfigurarse o reprogramarse, lo que resultó en una aplicación de comunicación inalámbrica con modo y banda de frecuencia determinada por la función del software utilizando una mezcla apropiada de circuitos especializados

(ASICs, por sus siglas en inglés, *Application Specific Integrated Circuit*), arreglos de compuertas programadas en campo (FPGAs, siglas en inglés de *Field Programmable Gate Arrays*), Procesadores Digitales de Señales (DSPs, siglas en inglés de *Digital Signal Processors*) y microprocesadores de propósito general (GPPs, por sus siglas en inglés, *General Purpose Processors*.) [29]

Las diferencias entre ambas arquitecturas se muestran en la Figura 10.[30]



**Figura 10.** Diagrama de sistemas definidos por software ideal y práctico.[30]

Para aumentar la efectividad y mejorar el proceso de envejecimiento de una plataforma SDR, la mayoría de los desarrolladores buscan utilizar códigos portátiles para su software, componentes reutilizables que pueden funcionar bajo diferentes configuraciones de formas de onda y hardware genérico que puede ser fácilmente actualizado [30].

#### 4.2.6. Ventajas y Desventajas de SDR

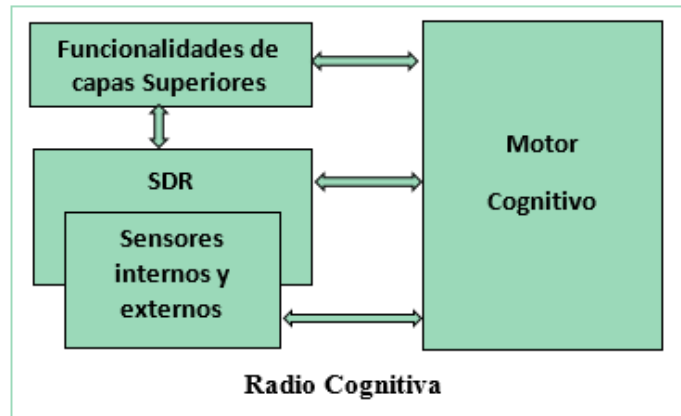
A pesar de presentar enormes ventajas en relación a la metodología tradicional de desarrollo de placas de radiofrecuencia, el SDR también tiene desventajas. A continuación se citan algunas ventajas y desventajas del uso de SDR.

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Reduce el costo de desarrollo porque el software puede ser reutilizado, la misma plataforma de hardware se puede utilizar para varias radios diferentes.	Dificultades de interoperabilidad en las redes convergentes con la proliferación de diferentes implementaciones.
Dispositivos evolutivos, permite el equipo recibir nuevas funciones o correcciones de errores y que puede ser actualizado cada vez que salen nuevas normas.	Uso superior de energía y mayor área de circuito, una implementación programable puede requerir más puertos lógicos que una implementación de hardware completa.
Actualización de software realizada automáticamente y nuevas características insertadas. La capacidad se mejora mediante descargas de software remotas	Menor rendimiento, pueden suceder retrasos en la unidad de procesamiento de un dispositivo programable, debido a su participación en el poder ser dividido en muchas tareas de la comunicación.
Uso de niveles más altos de abstracción, esto aumenta la independencia del hardware con respecto al software.	Seguridad, ya que una parte significativa de la funcionalidad de los transceptores se implementa en hardware, es imposible su modificación sin el acceso físico al mismo.

**Tabla 4.** Ventajas y Desventajas de los Dispositivos SDR[31].

#### **4.2.7. Relación SDR para el desempeño de CR**

Los SDR proporcionan una funcionalidad de radio bastante versátil evitando el uso de aplicaciones determinadas en circuitos analógicos fijos y componentes para dar soporte; esto es de vital importancia para poder crear y diseñar la CR teniendo en cuenta su principal característica la cual es la capacidad de adaptación donde los parámetros de operación (incluida frecuencia, potencia, modulación y ancho de banda) se pueden cambiar dependiendo del entorno de la radio, la situación del usuario, etc. Por lo tanto la CR tiene que ser diseñada alrededor de un SDR, el mismo que es el núcleo de las definiciones más difundidas de CR. Una red cognitiva es una red inteligente que puede detectar, tomar decisiones y aprender como los humanos. Implementar dicha red inalámbrica requiere una arquitectura funcional como el cerebro para controlar todo el proceso cognitivo, es decir, un motor cognitivo. A pesar de que puedan existir diferentes modelos posibles, uno de lo más simples y conceptuales se presenta en la figura 11.



**Figura 11.** Relación entre SDR y CR [30].

En este modelo, la radio cognitiva se envuelve alrededor del SDR. El denominado *motor cognitivo* es el responsable de optimizar o controlar el SDR en base a algunos parámetros de entrada, necesidades del usuario y condiciones de la red, así como también es consciente de los recursos de hardware de la radio y sus capacidades. La implementación de tantas funciones requiere una variedad de tecnologías de soporte relacionadas. Además, las diferentes tecnologías deben fusionarse para construir una arquitectura funcional del motor cognitivo flexible y escalable.

El motor cognitivo es consciente de los recursos y capacidades de hardware de la radio, así como de los otros parámetros de entrada que se mencionan anteriormente, este envía los parámetros de configuración hacia la sección reconfigurable de SDR para que pueda volver a configurar la radio de acuerdo a ciertos parámetros como por ejemplo el tipo de forma de onda, plan de frecuencias y las especificaciones de potencia. Un SDR se configura así misma junto con los componentes de software y el sistema de antena, y con el fin de optimizar el rendimiento de estas unidades, esta radio digital reconfigurable utiliza información de retroalimentación por parte del “motor” mediante software para ajustar los parámetros y realizar la configuración especificada[31].

Un motor cognitivo es esencialmente una integración de métodos y tecnologías para implementar funciones de un bucle cognitivo, la tecnología SDR es una prometedora opción que introduce capacidades de reconfiguración a CR, referido a un sistema dinámico de gestión de frecuencias de radio, que puede incluir la detección o censo del espectro, entre otros. Los sensores o dispositivos que hacen posible la detección del espectro pueden estar embebidos internamente en un SDR o externamente incorporados[31].

### **4.3. SITUACIÓN ACTUAL DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN ECUADOR**

#### **4.3.1. Introducción**

El sector de las Telecomunicaciones se ha adecuado a los continuos cambios que ha sufrido el mundo en los últimos años, incorporando así a la sociedad a la era de la información. En Ecuador, la institución encargada de administrar y gestionar con orden las frecuencias o canales que pueden utilizar los diferentes usuarios, es la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), en base al Registro Oficial No. 439 del 18 de febrero de 2015, se publicó la Ley Orgánica de Telecomunicaciones la cual, en su Artículo 95, señala que: *“La ARCOTEL es competente para elaborar, aprobar, modificar y actualizar el Plan Nacional de Frecuencias, instrumento dinámico que contiene la atribución de las frecuencias del espectro radioeléctrico”*, siempre siguiendo los lineamientos de la UIT<sup>10</sup>.

El Plan Nacional de Frecuencias es un documento netamente técnico y dinámico, sujeto a revisiones periódicas acorde con las necesidades nacionales, introducción de nuevas tecnologías y cambios en la regulación internacional. La última versión vigente y disponible es la del año 2017.

Entre las diversas modificaciones realizadas al PNF tenemos actualización del cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias, la cual partió de las atribuciones de la Región 2 del Reglamento en su versión 2016, para luego incluirlas en la columna correspondiente a Ecuador.

El Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL) fue constituido el 13 de agosto de 2009, su propósito es ser órgano rector del desarrollo de las Tecnologías de la Información y Comunicación, definiendo y coordinando la política de Telecomunicaciones que promueva la masificación de las Tecnologías de la Información y Comunicación en el territorio ecuatoriano, el espectro radio eléctrico entra dentro de su jurisdicción para poder emitir planes generales, seguimientos y evaluación de su implementación.

---

<sup>10</sup> UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones): Organismo especializado en telecomunicaciones de la Organización de las Naciones Unidas, encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras

### 4.3.2. Espectro Radioeléctrico

El espectro radioeléctrico u ondas radioeléctricas, cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3.000 GHz, se propagan por el espacio sin guía artificial, y se encuentra atribuido a diferentes servicios de radiocomunicaciones.

El espectro radioeléctrico, concebido inicialmente como una idea matemática, hoy convertido en un medio, con elementos que configuran varias dimensiones, pues, en un sentido, es un recurso natural, limitado, y medible, que permite transportar energía, enviar y recibir mensajes de distinta naturaleza, a distancia, a través de un mecanismo de propagación por el espacio[32].

El rango del espectro radioeléctrico, atendiendo las características de propagación, ha sido dividido en bandas y sub-bandas de frecuencias, tal como se indica en la tabla 1.

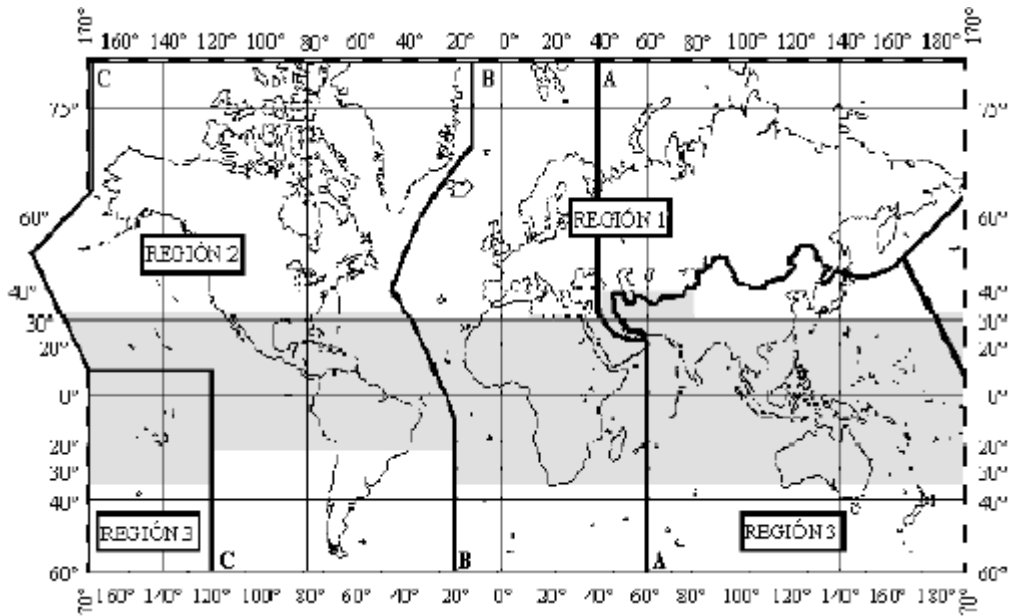
N. de Banda	Nomenclatura	Gama de Frecuencias	Subdivisión Métrica
4	VLF	3 a 30 KHz	Ondas milimétricas
5	LF	30 a 300 KHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3000 KHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas centimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas milimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas decimilimétricas
12		300 a 3000 kHz	

**Tabla 5.** Bandas de Frecuencias [32].

El espectro radioeléctrico está dividido en bandas de frecuencias, cada una de ellas presenta características propias, relativas a la propagación y respuesta frente al ruido e interferencia, además de las consideraciones tecnológicas y costos involucrados para su aprovechamiento[32].

### 4.3.3. División del Espectro Radioeléctrico

Para la atribución de frecuencias a nivel mundial, se ha dividido el mismo en tres regiones, situándose el Ecuador en la Región 2, dicha región comprende la zona limitada al este por la línea B y al oeste por la línea C tal como lo indica la Figura 12.



**Figura 12.** Regiones a nivel mundial para la atribución de frecuencias según la UIT

Los rangos de frecuencia que forman parte de las diferentes bandas I, II, III, IV, V correspondientes a las bandas VHF/UHF, las mismas que varían de región a región tal y como se puede observar en la Tabla 6.

	<b>REGION 1</b>	<b>REGION 2</b>	<b>REGION 3</b>
<b>BANDA</b>	<b>RANGO DE FRECUENCIAS (MHz)</b>		
<b>I</b>	47 – 68	54 – 68	47 – 68
<b>II</b>	87,5 – 108	88 – 108	87 – 108
<b>III</b>	174 – 230	174 – 216	174 – 230
<b>IV</b>	470 – 582	470 – 582	470 – 582
<b>V</b>	582 – 960	582 – 890	582 – 960

**Tabla 6.** Rango de Frecuencias conforme a cada región [33].

#### 4.3.4. Asignación de Frecuencias en el Ecuador

En el sistema de asignación de frecuencias se contempla el 33% son para medios públicos, el 33% para medios privados y el 34% para medios comunitarios, en base a esta normativa se realiza un concurso donde cualquier persona, ya sea natural o jurídica, puede acceder a una frecuencia electromagnética.

La concesión de la frecuencia será de 15 años y una vez culminado este periodo las personas dueñas de los medios de comunicación deberán proceder a renovar su contrato participando nuevamente en el concurso. En este proceso de distribución de frecuencias se ofertarán:

- 478 canales de televisión,
- 846 para radio FM y
- 148 para la señal AM.

#### **4.3.5. Selección del Espectro considerado**

Para el desarrollo del presente trabajo de Titulación se ha seleccionado el rango de operación comprendido entre 370-415MHz asignado a Servicios Fijo - Móvil de la banda UHF del espectro electromagnético, esto teniendo en cuenta los equipos seleccionados y el estudio realizado con anterioridad de las diferentes sub-bandas de frecuencias, de tal manera el intervalo de frecuencia selecto es el más apto y adecuado para desarrollar y trabajar de manera óptima el enlace a implementar.

La banda espectral seleccionada es una gran candidata para la implantación de nuevas tecnologías como la Radio Cognitiva, esto significará que la mayor parte del espectro que estaba ocupado quedará en desuso, pudiendo ser habilitado por usuarios secundarios.



## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Materiales

Para la realización y posterior ejecución del presente trabajo de Titulación, en base a la información detallada en la sección anterior, se procedió a realizar el monitoreo y sensado de las frecuencias en el lugar de implementación para posteriormente seleccionar el hardware y software idóneos, compatibles y con alto rendimiento necesarios para un desempeño óptimo del enlace.

#### 5.1.1. Equipo de Medida Espectral

Como primer equipo se utilizó el analizador de espectro para poder determinar los White Spaces que existen en la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, este equipo permitió evaluar y realizar un sensado de espectro previo con la finalidad de detectar la actividad en las diferentes bandas que lo conforman y contar con un registro de las frecuencias utilizadas en la Facultad. El equipo utilizado fue el analizador de espectro *HF-6065* de la marca Aaronia junto con la antena *Hyperlog 7060*, el respectivo esquema de medida junto con las características del equipo se presentan en la figura 13 y tabla 7.



**Figura 13.** Esquema de medida  
**Fuente:** Elaboración propia

Características	HF-6065 V4
Rango de Frecuencia	10 MHz – 6 GHz
Nivel de Ruido mostrado (DANL)	-135 dBm (1Hz)
Nivel de Ruido mostrado con Pre-Amplificador	-150 dBm (1Hz)
Máxima potencia en la entrada de RF	+10dBm
Tiempo de muestra más bajo	10 ms

Demodulador	AM,FM
Interfaz	USB 2.0
Tipo de detección	RMS
Factor de Atenuación	Auto
Dimensiones	250 x 86 x 27 mm
Peso	430 g

**Tabla 7.** Características del Equipo HF-6065 [40]

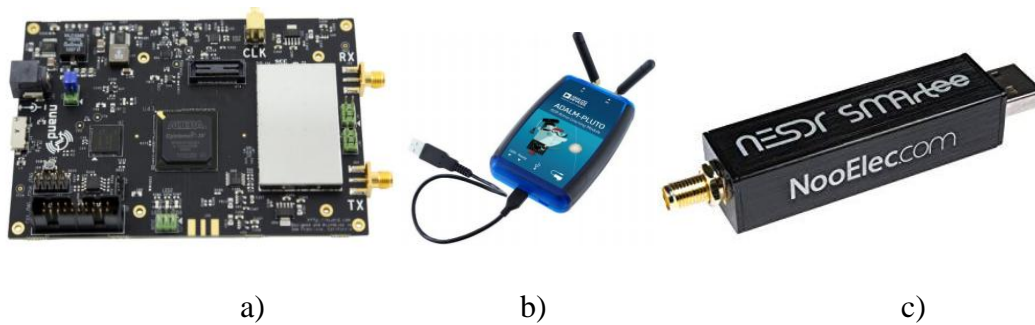
### 5.1.2. Hardware Seleccionado

Hoy en día existen diferentes dispositivos que se puede adquirir para el estudio de CR a través de SDR, la diferencia radica en ancho de banda, rango de operación, proveedor y FPGA; lo que podría englobarse en características técnicas junto con el precio en el mercado con el que podemos adquirirlas. Así pues, se presenta en la tabla 8 la recopilación y comparación entre los distintos dispositivos disponibles.

	<b>USRP</b>	<b>Blade RF x40</b>	<b>Pluto SDR</b>	<b>RTL-SDR</b>
<b>Proveedor</b>	Ettus Research, Inc	Nuand, Inc	Analog-Device, Inc	RTLSDR.com
<b>Ancho de Banda (MHz)</b>	56	28	20	2,8
<b>Dúplex</b>	Full	Full	Full	Solo Rx
<b>Interface</b>	USB 3.0	USB 3.0	USB 2.0	USB 2.0
<b>Tamaño de muestra ADC (Bit)</b>	12	12	12	8
<b>Tamaño de muestra DAC (Bit)</b>	20	16	12	~
<b>Espectro de Radio (GHz)</b>	0.7 – 6	0.3-3.8	0.325 – 3.8	0.028 – 1.7
<b>FPGA</b>	Spartan-3A DSP	Altera Cyclone IV	Xilin Zynq 7010	8051+demod

**Tabla 8.** Comparación de dispositivos SDR representativos[34].

Tal y como se observa en la tabla 8, existe una gran gama con respecto a SDR; para el presente Trabajo de Titulación se seleccionó los dispositivos Blade RF, Pluto-SDR y RTL-SDR para la realización del mismo; esta selección se la determinó conforme a su funcionalidad y requerimientos de hardware necesarias para llevar a cabo la implementación del enlace, también por los precios que presentan para su adquisición, los cuales son accesibles ya que son considerados SDR de bajo costo. La Figura 14 proporciona una vista general de los softwares seleccionados.



**Figura 14.** Hardwares seleccionados a) Blade RF b) PlutoSDR c) RTL-SDR [35][36][37]

### 5.1.3. Software Seleccionado

Con la selección de los componentes con los que se llevó efecto el enlace de comunicación se procedió a determinar el software adecuado para la realización de todas las funciones de banda base y reconfiguración de los SDR utilizados. Entre los softwares más destacados y que han sido ampliamente utilizados en el estudio de la CR tenemos: GNU Radio, Matlab y Labview. La tabla 9 muestra las características de dichos softwares.

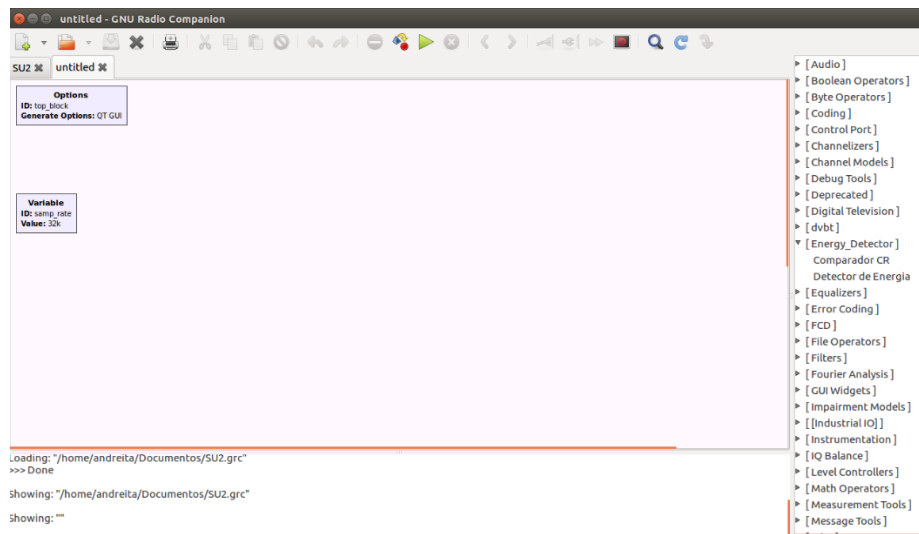
CARÁCTERÍSTICAS	SOFTWARES		
	GNU Radio	Matlab	Labview
<b>Uso investigativo</b>	Alto	Alto	Alto
<b>Tipo de Licencia</b>	Libre	Comercial	Comercial
<b>Código Abierto</b>	Si	No	No
<b>Plataforma de Soporte</b>	Linux (completa) Windows (Limitado)	Linux (completa) Windows (completa)	Linux (completa) Windows (completa)
<b>Interfaz</b>	Gráfica con bloques	Gráfica (Simulink)	Gráfica
<b>Admite programación</b>	Si (C++ y Python)	Si	Si (excepto lenguaje Python)
<b>Complejidad Computacional</b>	Baja	Alta	Alta
<b>Documentación Disponible</b>	Alta	Media	Media

**Tabla 9.** Características de los firmwares disponibles para SDRs

**Fuente:** Elaboración propia

Como se puede evidenciar en la tabla 9, si bien existen semejanzas entre las plataformas presentadas su mayor diferencia radica en su complejidad computacional, junto con el tipo de licencia y si permite implementar nuevas optimizaciones y funcionalidades, por tales razones el hardware seleccionado para el presente trabajo es GNU Radio en su

versión 3.7.11, el mismo que provee una interfaz amigable al usuario ya sea por medio de bloques o por programación (Lenguajes C++ y Python) ofreciendo versatilidad y una alta gama de posibilidades con la creación de bloques personalizados. La Figura 15 muestra la interfaz del programa seleccionado.



**Figura 15.** Interfaz del programa GNU Radio  
**Fuente:** Elaboración Propia

Para el desarrollo del presente trabajo de Titulación se utilizó el sistema operativo Ubuntu, ya que es la opción más óptima para la instalación de paquetes de GNU Radio y de los dispositivos SDRs: Blade RF, PlutoSDR y RTL-SDR; debido a que los procedimientos de compilación e instalación se basan en scripts y herramientas de Linux. Se utilizó Ubuntu 16.04 (Xenial Xerus), se recomienda usar este sistema operativo ya que cuenta con distribuciones con soporte prolongado de dependencias.

Si bien es cierto que GNU Radio está disponible en Windows, el mayor problema que presenta es la cantidad limitada de dependencias disponibles; la complejidad del proyecto a realizar podría traducirse en mayor procesamiento para lo cual GNU Radio en Windows aún no está listo, así también la instalación de librerías se la debe realizar con cierto cuidado al contrario de Ubuntu que su instalación se realiza de manera mucho más rápida y eficaz. La correspondiente instalación tanto del programa seleccionado como las dependencias necesarias se las indica con detalle en el Anexo A y B.

#### 5.1.4. Sistema Radiante

Las antenas serán las encargadas de transmitir o recibir las ondas de radiofrecuencia, para el presente trabajo de Titulación se utilizó las antenas *Quad-band Cellular Duck*. La Figura 16 muestra la vista general de dichas antenas.



**Figura 16.** Vista general de Quad-band Cellular Duck Antennas

Las frecuencias en las que trabajan las antenas seleccionadas junto con los parámetros principales son presentadas en las tablas 10 y 11.

Frecuencia	$T_x$ (MHz)	$R_x$ (MHz)
GSM/850E	824-849	870-894
GSM	880-915	925-960
DCS	1710-1785	1805-1880
PCS	1850-1909	1930 – 1990

**Tabla 10.** Frecuencias de Operación de Quad-band Cellular Duck Antennas

Parámetro	Valor	Unidades
Patrón de antena	Antena Omni	
Impedancia	50	Ohmios
Frecuencia mínima	0.824 / 824	GHz / MHz
Frecuencia máxima	1.99 / 1,990	GHz / MHz
VSWR máximo	<2: 1	Proporción
Ganancia máxima	2	dBi
Polarización	Vertical	
Ancho de haz horizontal (AZ)	360	Grados
Ancho de haz vertical (EL)	79	Grados
Plano de tierra requerido	No	
Material radomo	Caucho termoplástico	
Color	Negro	
Tipo de conector RF	SMA (m)	
Características del conector RF	Oro	
Altura del producto	2.110 / 53.594	pulgadas / mm
Diámetro del producto	0.290 / 7.366	pulgadas / mm

Peso del Producto	1.00 / 28.35	oz / gramos
-------------------	--------------	-------------

**Tabla 11.** Parámetros de Operación de Quad-band Cellular Duck Antennas  
Adicionalmente, se utilizó 2 diferentes antenas que utilizan un cable de alimentación RG58 de 2 metros de baja pérdida que se adaptan al conector SMA macho termo retráctil para conexión directa con las diferentes tarjetas SDR, dichas antenas tienen los siguientes rangos:

- ✓ Mástil de antena de 433MHz (ISM) (10.5 “, frecuencia fija)
- ✓ Mástil de antena UHF (4.5 “, frecuencia fija)

Una vista general de las antenas se muestra en la figura 17.



**Figura 17.** Vista general de antenas 433 MHz y UHF

Las antenas cuentan con una base ancha con imán súper fuerte dentro del mismo para facilitar el montaje.

## 5.2. Métodos

Con respecto a la metodología utilizada, en el proyecto se utiliza una variedad de métodos entre los cuales se encuentran:

### ❖ Método Investigativo

Este método se utilizó en la búsqueda y recolección de información bibliográfica necesaria para determinar y establecer el punto de partida de la investigación.

### ❖ Método de observación

Este método concierne al trabajo de campo, realizado para obtener las mediciones espectrales en el lugar de ejecución del enlace, dichos datos son requeridos para la presente investigación.

### ❖ El método deductivo

La aplicación de este método se lo realizó al momento de conocer los aspectos generales de la problemática investigada, con la finalidad de determinar y obtener los parámetros correctos para la creación de un diseño funcional y posteriormente una implementación fiable.

### ❖ El método inductivo

Este método se empleó al establecer la lógica de los bloques a construir, permitiendo posteriormente diseñar y programar los mismos junto con el lenguaje necesario para un correcto funcionamiento y así establecer la comunicación en el enlace.

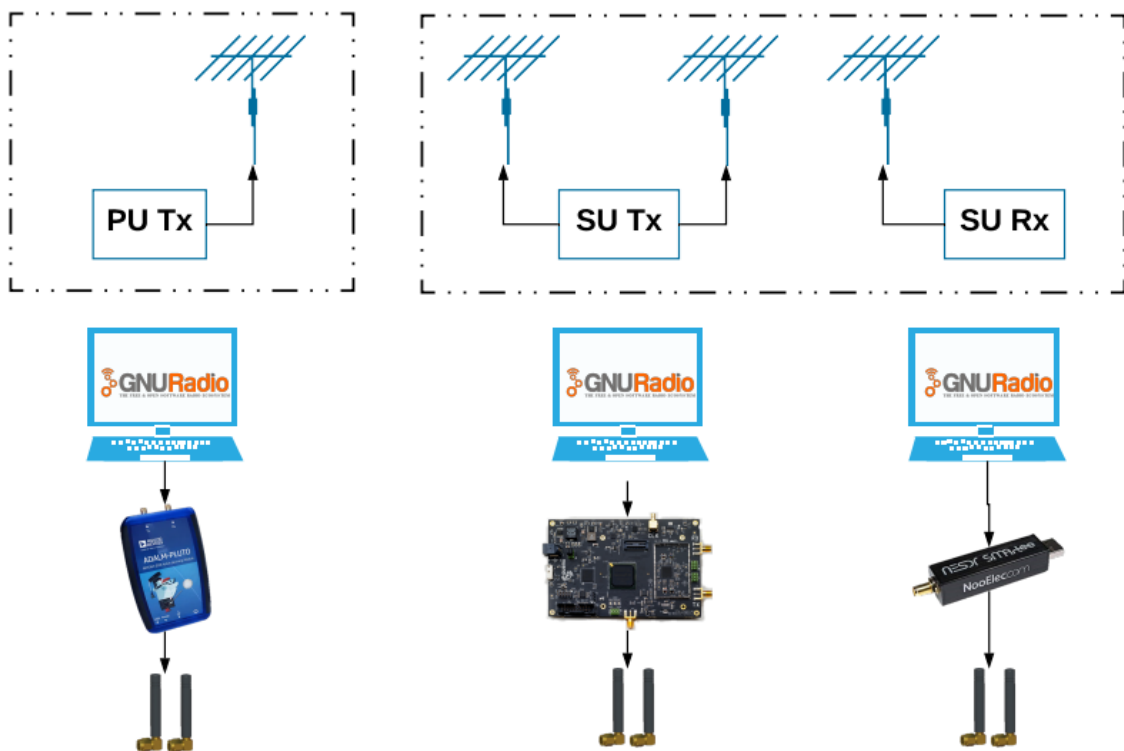
### ❖ El método científico.

Este método se utilizó al realizar las diversas pruebas y ejecutar las diferentes correcciones tanto en los códigos creados como en la estructura del diagrama de bloques, el mismo fue evolucionando acorde a los requerimientos solicitados logrando como resultado el diseño más óptimo.

A continuación se describe el esquema planteado empleando la información recopilada previamente.

### 5.3. Esquema del Enlace a Implementar

El enlace a implementar está constituido por el PU el cual transmite en una frecuencia arbitraria y tiene prioridad en el uso de la banda, también del respectivo Transmisor y Receptor Cognitivo perteneciente al SU lo cuales pondrán en manifiesto la definición de CR, trasladándose a la banda de frecuencia libre más próxima en caso de que el PU ocupe la banda en que el SU está transmitiendo, esto sin afectar ni interrumpir la comunicación entre Transmisor y Receptor del SU, la figura 18 muestra la arquitectura del sistema.

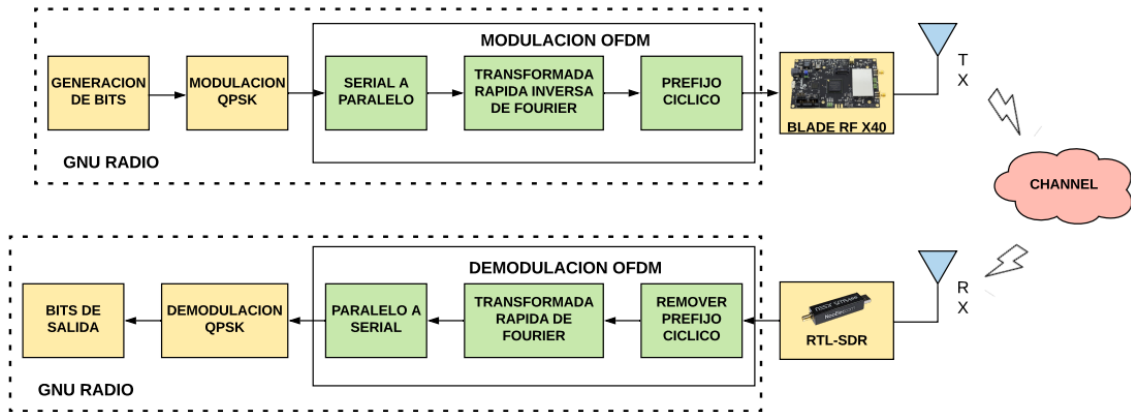


**Figura 18.** Arquitectura del Sistema a Implementar

**Fuente:** Elaboración propia

Los SDR Blade RF, PlutoSDR y RTL-SDR cumplen las funciones de RF e IF de un SDR, mientras que GNU Radio realiza todas las funciones de banda base y reconfigura los SDR utilizados. GNU Radio controla las tarjetas Blade RF, RTL-SDR y PlutoSDR a través de OSMOCOM (gr-osmosdr) y IIO (gr-iio) respectivamente, estos controladores de hardware han sido creados específicamente para entablar la comunicación entre las tarjetas y el programa. La figura 19 muestra las funciones llevadas a cabo por GNU Radio en la cadena de Transmisión y Recepción por parte del SU.





**Figura 19.** Cadena de Tx y Rx del Enlace  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 20.** Ubicación geográfica del lugar para la Implementación  
**Fuente:** Elaboración propia

El enlace se lo implementó en la Universidad Nacional de Loja en el edificio de Laboratorios de Antena y Telecomunicaciones de la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales y no Renovables, la figura 20 y la tabla 12 ilustra la ubicación tanto en forma visual como las coordenadas del lugar antes mencionado.

Latitud	Longitud
$4^{\circ} 1'48.08''S$	$79^{\circ}11'58.40''O$

**Tabla 12.** Coordenadas del Lugar de Implementación del Enlace  
**Fuente:** Elaboración propia

#### 5.4. Consideraciones Generales para implementación del Detector Energía

Como se ha mencionado anteriormente se debe tener en consideración ciertos parámetros para poder implementar el método de detección de espectro seleccionado el cual es el Detector de Energía, estos parámetros son la probabilidad de detección, falsa alarma e incertidumbre de ruido, por tal razón estos requerimientos serán preestablecidos en base a la norma IEEE 802.22 la cual se abordó en secciones anteriores, esto por lo que el estándar es el único en vigor referente a la tecnología CR. En la Tabla 13 se presenta el valor de estos datos, los cuales se utilizarán para la configuración del detector.

Parámetros de configuración	Valores
Probabilidad de Falsa Alarma ( $P_{FA}$ )	$\leq 0.1$ (10%)
Probabilidad de Detección ( $P_D$ )	$\leq 0.9$ (90%)
Incertidumbre de Ruido ( $\tau$ )	0.1
Potencia de Ruido	$5 \times 10^{-9}$ W
Modulación	OFDM

**Tabla 13.** Parámetros para configuración de Detector de Energía  
**Fuente:** Elaboración propia

#### 5.5. Creación de Bloques Personalizados

A pesar de que la herramienta GNU Radio proporciona una multitud de bloques predefinidos, para la realización del presente Trabajo de Titulación se debe crear nuevos bloques que realicen las diferentes tareas que permitan implementar el Detector de Energía y crear así un enlace cognitivo, GNU Radio nos permite realizar esta tarea por medio del módulo *Out-Of-Tree*.

##### 5.5.1. Módulo Out-Of-Tree

Un módulo Out-of-Tree es un componente de GNU Radio que no se presenta de manera predeterminada en las librerías y bloques del programa. Por lo general si se desea extender las funcionalidades de GNU Radio o personalizar las ya existentes, se realiza por medio de programación en los dos diferentes lenguajes de programación que conforma el programa (C++ y Python). Los bloques generalmente se implementan en

C++ para la eficiencia computacional, posteriormente GNU Radio utiliza SWIG<sup>11</sup>, para generar los componentes necesarios para hacer que los bloques de C ++ sean accesibles desde Python, para posteriormente integrar el nuevo bloque a la biblioteca del programa y poder hacer uso del mismo.

La creación de un bloque junto con los comandos básicos para realizar el mismo, se presenta a detalle en el Anexo C.

## 5.6. Análisis y Evaluación Espectral

La configuración de medición utilizada consiste en un analizador de espectro Aaronia Spectran HF-6065 V4 calibrado con un rango de 10MHz-6GHz, una antena Aaronia AG Hyperlog 70600 con un rango de 700MHz a 6.0GHz, una computadora portátil que se conecta al analizador de espectro a través de un Cable USB y un software MCS especialmente diseñado para ejecutarse en analizadores de espectro marca Aaronia. El software MCS se configura fácilmente para adaptarse a una medición dada.

Para el respectivo análisis espectral se determinó un rango de frecuencias (54 – 960MHz), en el cual, se realizó el barrido en determinados intervalos de tiempo con 1500 muestras, se utilizó las sub-bandas proporcionadas por la UIT que consideran cada Región y el Plan Nacional de Frecuencias 2017, dentro del rango seleccionado los servicios que se brindan son Radiodifusión de Televisión Analógica y Digital, Radio FM y Comunicación Móvil. En la tabla 14 se muestran las sub-bandas mencionadas sobre las que se han realizado medidas en este estudio, se especifica el SPAN así como las aplicaciones que se hallan en cada una de ellas.

<b>BANDAS DE MEDICION</b>		
<b>Rango (MHz)</b>	<b>Ancho de Banda (SPAN)</b>	<b>Aplicaciones</b>
54-88	34	Televisión Analógica
88-108	20	Radio FM
174-216	42	Televisión Analógica
470-698	228	Televisión Digital
825-960	65	Telefonía Móvil

**Tabla 14.** Sub-bandas de medida  
**Fuente:** Elaboración propia

<sup>11</sup> SWIG: Simplified Wrapper and Interface Generator o Envoltura Simplificada y Generador de Interfaz

La tabla 15 muestra los datos seleccionados para la operación del analizador de espectro y obtención de óptimos resultados.

<b>PARAMETROS DE CONFIGURACIÓN</b>	
<b>Filtro de Resolución (RBW)</b>	100 KHz
<b>Filtro de Video (VBW)</b>	10 KHz
<b>Nivel de Referencia</b>	-90 a -110 dB
<b>Tipo de Medida</b>	Espectrograma
<b>N. de muestras</b>	1000

**Tabla 15.** Parámetros de configuración del analizador de espectros  
**Fuente:** Elaboración propia

Para llevar a cabo las mediciones en la Facultad se determinó como métrica de análisis el método de detección de energía, con dicho método se podrá comparar la potencia de las señales medidas dentro del rango comprendido entre los 54 MHz a 960MHz, con un cierto umbral de decisión y establecer que la señal está presente si el nivel de energía sobrepasa el umbral de decisión. Conforme a lo establecido en los sistemas cognitivos, las BS's<sup>12</sup> abandonan un canal si detectan señales sobre los siguientes umbrales:

- Televisión Digital (TDT): -116 dBm.
- Televisión Analógica: -94 dBm.

En la actualidad en la región sur del País por el momento no existen emisiones de televisión digital terrestre, por tal razón se establece como único umbral de comparación el valor de -94 dBm[38].

### **5.6.1. Espectrogramas de la Facultad de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables**

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en una figura específica, en ellos se puede observar la ocupación espectral durante el tiempo que se tardó en efectuar las medidas en cada una de las sub-bandas. El tiempo por barrido espectral tendrá una

---

<sup>12</sup> BS (Estación Base o Base Station): es una instalación fija o moderada de radio para la comunicación, se usan para conectar radios de baja potencia.

duración de medio minuto (30 segundos), por consiguiente cada sub banda de estudio será monitoreada por aproximadamente 30 minutos y horarios vespertinos comprendidos desde 14h00 hasta 18h30 durante un periodo de 30 días laborables.

Posteriormente para obtener el porcentaje que existe en cada una de las sub-bandas analizadas se debe tener en consideración el total del ancho de banda que se encuentra ocupado por cada sub banda designada, para poder determinarlo realizamos la sumatoria de todos los rangos de frecuencia que están siendo utilizados por las aplicaciones mencionadas y que se las puede visualizar en la tabla 14. La siguiente ecuación proporcionará el espectro utilizado.

### Espectro Utilizado por Sub Banda

$$= \frac{\text{Ancho de Banda Utilizado}}{\text{Ancho de Banda Total Sub Banda (SPAN)}} \times 100$$

#### 5.6.1.1. Análisis Espectral Sub-banda 1 (54-88 MHz)



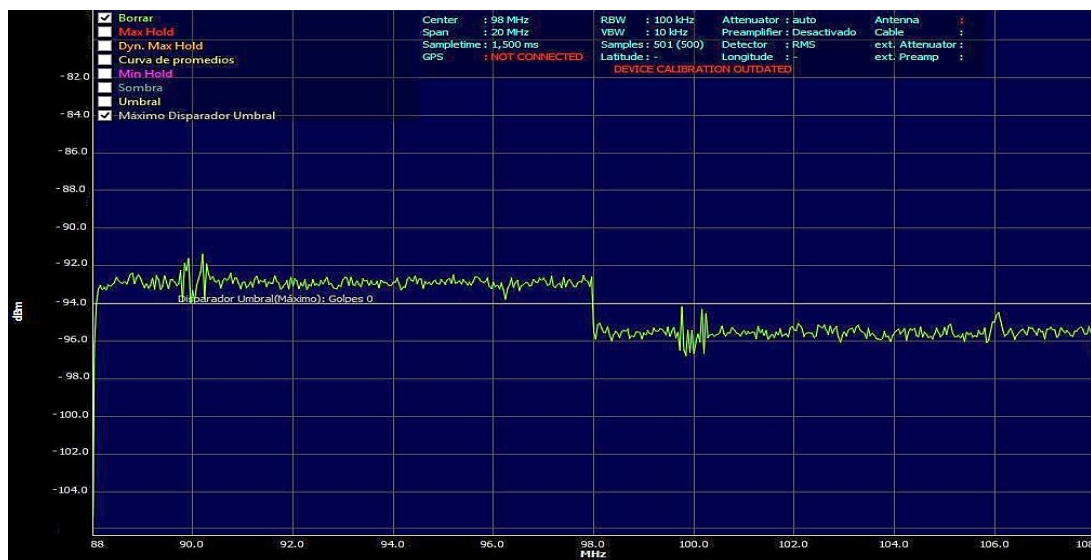
**Figura 21.** Espectrograma: Rango de frecuencias (54MHz a 88MHz)

**Fuente:** Elaboración propia

<b>Frecuencia Central</b>	71 MHz
<b>Frecuencia SPAN</b>	34 MHz
<b>Nivel de Referencia</b>	-50
<b>Detector</b>	RMS
<b>RBW</b>	100 KHz
<b>VBW</b>	10 KHz

La presente sub-banda de espectro analizada se observa en la figura 21 en la misma se encuentran concesionados 3 canales de televisión abierta para la ciudad de Loja de los cuales únicamente se reciben correctamente 2. Ya que el ancho de banda designado para canales de televisión es igual de 6 MHz, se puede determinar el total de ancho de banda concesionado que se encuentra utilizado en la sub banda presente, el cual es igual a 12 MHz equivalente a 35.29 % de espectro que se encuentra en uso, dejando 64.71% de espectro disponible para esta sub-banda

### 5.6.1.2. Análisis Espectral Sub-banda 2 (88-108 MHz)



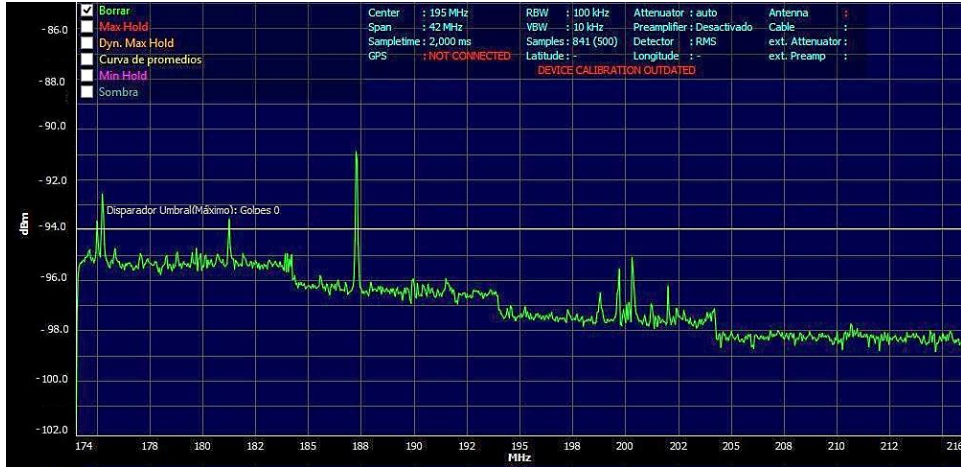
**Figura 22.** Espectrograma: Rango de frecuencias (88 a 108 MHz)

**Fuente:** Elaboración propia

<b>Frecuencia Central</b>	98 MHz
<b>Frecuencia SPAN</b>	20 MHz
<b>Nivel de Referencia</b>	-50
<b>Detector</b>	RMS
<b>RBW</b>	100 KHz
<b>VBW</b>	10KHz

En la ciudad de Loja se encuentran concesionadas un total de 36 estaciones de radiodifusión sonora en frecuencia modulada registradas en el listado de Radio difusión Sonora y Televisión Abierta emitida por la entidad ARCOTEL; ya que el ancho de banda establecido para emisoras de radios es de 200KHz se determina que dentro de la banda seleccionada se utiliza 5.2 MHz equivalente a 29% del espectro, dejando una disponibilidad del 71%, en la figura 22 se observa el espectro analizado.

### 5.6.1.3. Análisis Espectral Sub-banda 3 (174-216MHz)



**Figura 23.** Espectrograma: Rango de frecuencias (174 a 216 MHz)  
**Fuente:** Elaboración propia

<b>Frecuencia Central</b>	195 MHz
<b>Frecuencia SPAN</b>	42 MHz
<b>Nivel de Referencia</b>	-50
<b>Detector</b>	RMS
<b>RBW</b>	100 KHz
<b>VBW</b>	10 KHz

La sub-banda analizada se observa en la figura 23 en la cual existen 4 canales de Televisión Abierta que han sido concesionados en la ciudad de Loja, de los cuales son receptados en su totalidad manifestando una precisa recepción de la señal radioeléctrica en la porción del espectro analizado.

La disponibilidad existente dentro de la banda de frecuencia seleccionada es de 42.85 % del ancho de banda total, por tanto la posibilidad de una implementación de redes de radio cognitivas está presente.

#### 5.6.1.4. Análisis Espectral Sub-banda 4 (470-698 MHz)



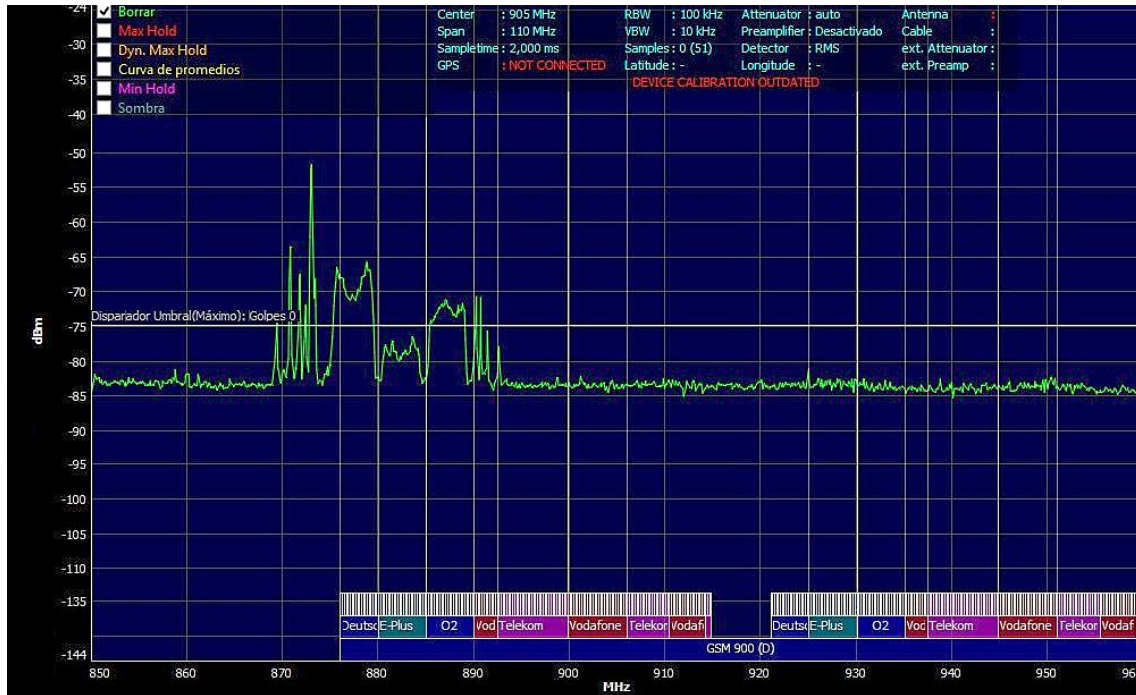
**Figura 24.** Espectrograma: Rango de frecuencias (470 a 698 MHz)  
**Fuente:** Elaboración propia

<b>Frecuencia Central</b>	584 MHz
<b>Frecuencia SPAN</b>	228 MHz
<b>Nivel de Referencia</b>	-50
<b>Detector</b>	RMS
<b>RBW</b>	100 KHz
<b>VBW</b>	10 KHz

Para emisiones de televisión abierta UHF se ha designado el presente rango de frecuencias para su uso exclusivo, la misma se la puede visualizar en la figura 24. Dentro de este rango se encuentran 9 canales presentes y absolutamente todos son receptados exitosamente. El espectro utilizado en esta sub-banda corresponde a 54 MHz correspondiente al 23.68% de porcentaje espectral utilizado, dejando una disponibilidad de 76.32% del espectro para diferentes usos.



### 5.6.1.5. Análisis Espectral Sub-banda 5 (825-960 MHz)



**Figura 25.** Espectrograma: Rango de frecuencias (850a 960 MHz)  
**Fuente:** Elaboración propia

<b>Frecuencia Central</b>	905 MHz
<b>Frecuencia SPAN</b>	110 MHz
<b>Nivel de Referencia</b>	-50
<b>Detector</b>	RMS
<b>RBW</b>	100 KHz
<b>VBW</b>	10 KHz

Las comunicaciones móviles son las que predominan el uso de esta sub-banda seleccionada y se puede visualizar en la figura 25, éste sistema de comunicación es quizás el que mayor penetración presente en los últimos años en la era tecnológica.

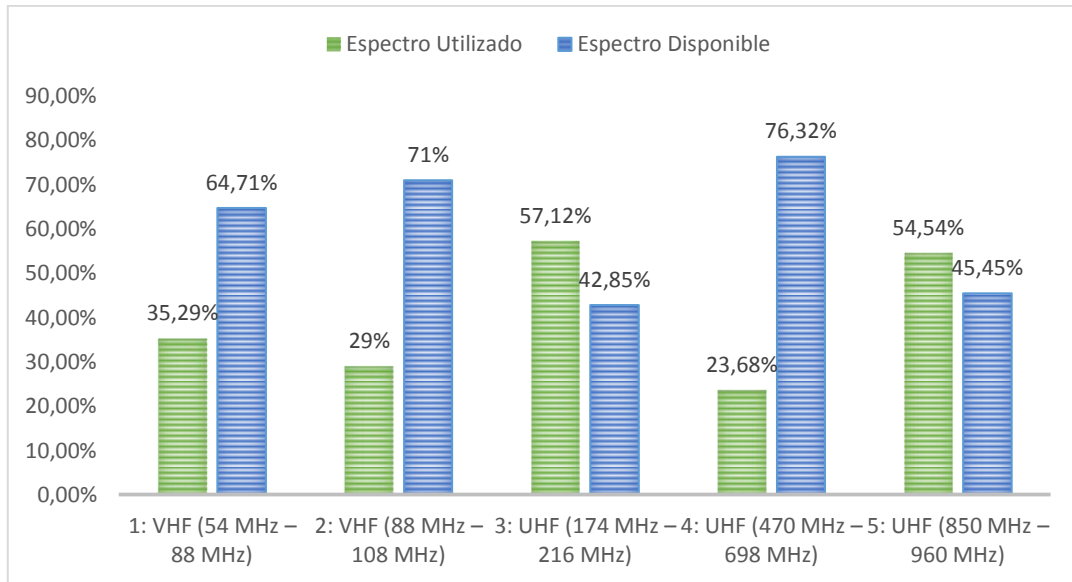
En Ecuador los siguientes rangos de frecuencias 824-849 MHz y 869-894 MHz son completamente atribuidos y asignados para la exclusiva operación de sistemas IMT para los servicios FIJO y MOVIL, razón por la cual en esta sub-banda seleccionada se designan 50 MHz de ancho de banda utilizado lo cual equivale a 45.45% de porcentaje espectral en uso dejando una disponibilidad de 54.55%.

La tabla 16 y figura 26 muestran de manera más representativa la disponibilidad de espectro radioeléctrico de la ciudad de Loja analizado desde la Facultad de la Energía,

las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja, tal como se puede observar los datos obtenidos muestran la gran sub-utilización del recurso y la disponibilidad evidente que presenta para diversas y nuevas tecnologías entre ellas la Radio Cognitiva que es tema de estudio en el presente trabajo.

<b>SUB-BANDA</b> <b>PARAMETROS</b>	<b>1: VHF</b> <b>(54 MHz</b> <b>- 88</b> <b>MHz)</b>	<b>2: VHF</b> <b>(88 MHz</b> <b>- 108</b> <b>MHz)</b>	<b>3: UHF</b> <b>(174 MHz</b> <b>- 216</b> <b>MHz)</b>	<b>4: UHF</b> <b>(470 MHz</b> <b>- 698</b> <b>MHz)</b>	<b>5: UHF</b> <b>(850 MHz</b> <b>- 960</b> <b>MHz)</b>
<b>N. de Canales</b> <b>Ocupados /</b> <b>Concesionados</b>	2/3	29/36	4/4	9/9	--
<b>BW Utilizado</b> <b>(MHz)</b>	12	5.8	24	54	50
<b>SPAN (MHz)</b>	34	20	42	228	110
<b>BW Disponible</b> <b>(MHz)</b>	22	14.2	18	174	60
<b>Espectro Utilizado</b>	<b>35.29%</b>	<b>29%</b>	<b>57.12%</b>	<b>23.68%</b>	<b>45.45%</b>
<b>Espectro Disponible</b>	<b>64.71%</b>	<b>71%</b>	<b>42.85%</b>	<b>76.32%</b>	<b>54.55%</b>

**Tabla 16.** Resultados de la ocupación espectral de la Ciudad de Loja  
**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 26.** Porcentaje de espectro disponible en cada sub banda de estudio  
**Fuente:** Elaboración propia

### 5.7. Ancho de Banda de Transmisión

Se determina un ancho de banda de transmisión de 1 MHz. El régimen binario para la modulación OFDM se puede calcular conforme a la siguiente expresión:

$$R_b = \frac{1}{T_{sc}} N_{port} \log_2 (M) \quad Ec. 13$$

Donde:

- $T_{sc}$  es el tiempo de símbolo incluido el prefijo cíclico
- $N_{port}$  es el número de portadoras
- $M$  es el número de símbolos de la modulación escogida

Para determinar el Tiempo de símbolo incluido el prefijo cíclico se aplica la siguiente ecuación

$$T_{sc} = (1 + CP) \frac{FFT\_length}{BW} \quad Ec. 14$$

$$T_{sc} = (1 + 16) \frac{64}{1 \text{ MHz}} = \mathbf{1.088 \text{ ms}}$$

Dependiendo de la modulación seleccionada se obtiene el valor de M, es de esta manera que:

BPSK<sup>13</sup>: M=2

QPSK<sup>14</sup>: M=4

Ya que la modulación utilizada es QPSK (M=4), el ancho de banda total es 1 MHz, la longitud de la FFT<sup>15</sup> es 64 y el prefijo cíclico es 16 para salvaguardar la señal frente al multitrayecto, el número de portadoras a utilizar es de 48 portadoras, con dichos datos se determina el régimen binario.

$$R_b = \frac{1}{T_{sc}} N_{port} \log_2 (M)$$

$$R_b = \frac{1}{1.088 \times 10^{-3}} (64) \log_2 (4) = \mathbf{117.64 Kbps}$$

Sin embargo, se debe determinar el ancho de banda “efectivo” de la transmisión el cual es la mayor cifra de velocidad de transmisión fiable, el cual está establecido con la siguiente igualdad, dicha ecuación tiene en consideración la relación entre el número de portadoras y la longitud de la FFT:

$$BW_{ef} = BW \frac{N_{port}}{FFT_{length}} \quad Ec. 15$$

$$BW_{ef} = 1MHz \frac{48}{64} = 750 KHz$$

Es decir, en realidad no se va a transmitir en el ancho de banda igual a 1 MHz ya que este es el valor teórico, si no 750 KHz.

Para conocer el espacio de sub-portadoras utilizado por el Usuario Primario ejecutamos la siguiente ecuación:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad Ec. 16$$

Donde:

---

<sup>13</sup> BPSK (Binary Phase Shift Keying o Modulación por desplazamiento de fase): es una técnica de modulación angular que se basa en hacer variar la fase de la portadora entre un número determinado de valores discretos, permite que la señal lleve el doble de información que la PSK ordinaria utilizando el mismo ancho de banda

<sup>14</sup> QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying o Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura): es una variante de la modulación PSK, la variante radica la onda portadora se somete a cuatro cambios de fase.

<sup>15</sup> FFT: Fast Fourier Transform o Transformada Rápida de Fourier, es un algoritmo que calcula la transformada discreta de Fourier (DFT).

$\Delta f$  : es el espacio de las sub-portadoras

$f_s$  : es la frecuencia de muestreo utilizada en la entrada del modulador

$N$  : es el tamaño de FFT.

$$\Delta f = \frac{1MHz}{64} = 15.63 KHz$$

Esto indica que existe un espacio entre sub-portadoras igual a 15.63 KHz

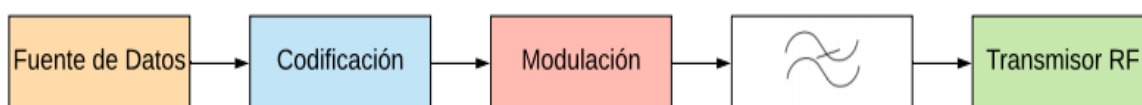
## 6. RESULTADOS

En este apartado se muestran cada uno de los resultados que se han obtenido una vez culminado el presente trabajo.

El sistema de comunicación consiste en el Transmisor de Usuario Primario (PU) y Transmisor y Receptor de Usuario Secundario (SU), todos ubicados en el Laboratorio de la Facultad.

### 6.1. Transmisión Usuario Primario

El flujo de datos desde su origen hasta el frente de RF<sup>16</sup> se esquematiza en la figura 27.



**Figura 27.** Diagrama de bloques de TX de PU  
**Fuente:** Elaboración propia

Para implementar la transmisión del PU se emplearon los bloques de procesamiento provistos por GNU Radio.

Se convierte el flujo de datos digitales en paquetes y se añade 'encabezados/etiquetas' (header/tag) a dichos paquetes para su identificación. Posteriormente se realiza la conversión de los datos en un esquema de constelación.

Un grupo de bits codificados por canal se congregan de acuerdo a lo siguiente:

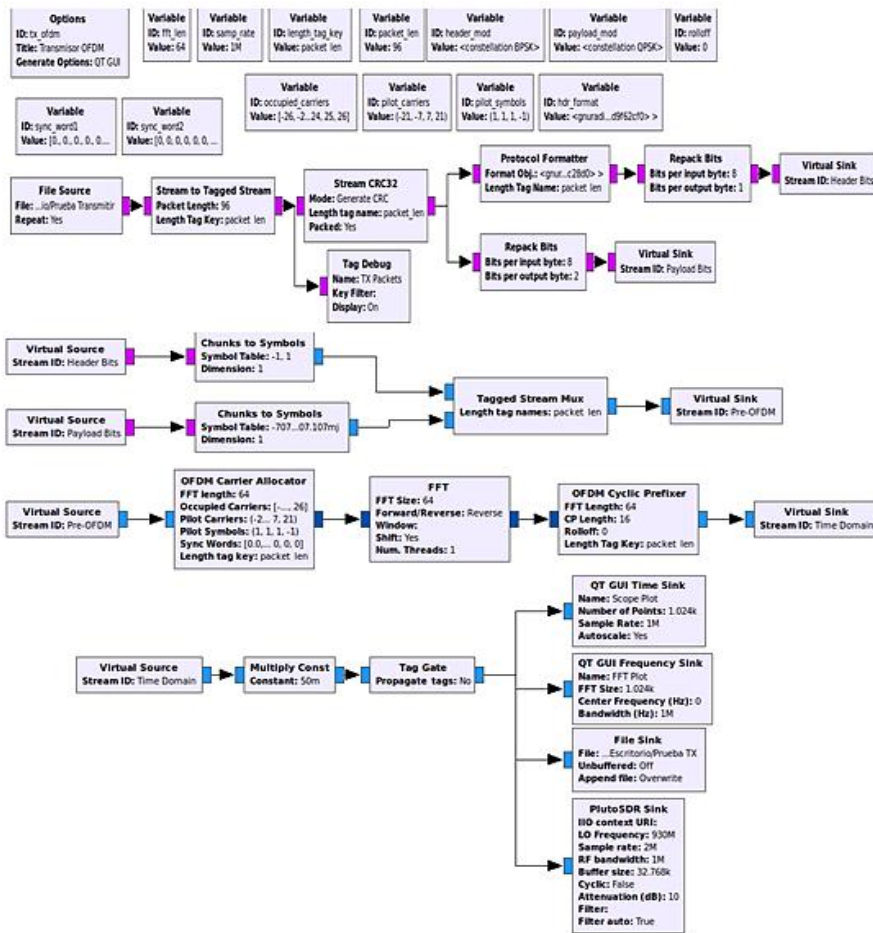
- 1 para BPSK
- 2 para QPSK
- 4 para 16-QAM<sup>17</sup>, etc.)

---

<sup>16</sup> RF (Radio Frecuencia o Radio Frequency): es una medida que representa la tasa de oscilación de ondas de radio electromagnéticas, desde frecuencias que van desde 9 KHz hasta 300 GHz.

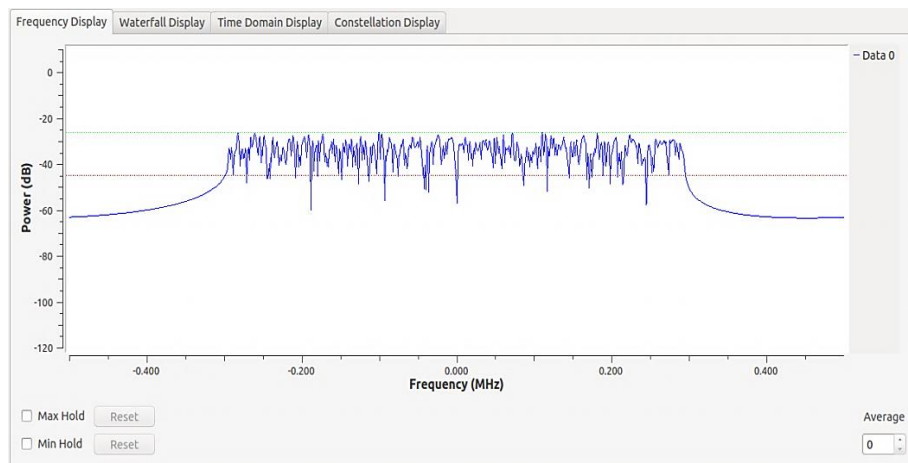
<sup>17</sup> 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation o Modulación por Amplitud en Cuadratura): modulación que utiliza componentes de amplitud y fase para proporcionar una forma de modulación capaz de proporcionar altos niveles de eficiencia de uso del espectro, la misma puede ser usada en sus diferentes formados en la que se encuentra 16-QAM, la cual equivale a modulación de amplitud en cuadratura de 16 estados.

Posteriormente se asignan a los puntos de constelación correspondientes. En esta etapa, los datos se representan como números complejos y están en serie, en este momento se pueden insertar símbolos piloto conocidos, asignados con esquemas de mapeo conocidos. Luego se aplica una conversión de serie a paralelo y se realiza la operación IFFT en los datos complejos paralelos. Los datos de salida de esta operación se agrupan nuevamente, según el número de sub-portadoras de transmisión requeridas. El prefijo cíclico se inserta en cada bloque de datos de acuerdo con la especificación del sistema y los datos se multiplexan de manera serial. En esta etapa, los datos están modulados por OFDM y listos para ser transmitidos. La tarjeta Pluto-SDR se utiliza para transformar los datos digitales en el dominio del tiempo, convertirlos a frecuencia de transmisión y enviarlos a través de un canal inalámbrico. La figura 28 proporciona una vista del diagrama de bloques resultante por parte del Usuario Primario.



**Figura 28.** Implementación de OFDM y posterior Transmisión de PU  
**Fuente:** Elaboración propia

La frecuencia en la que el transmisor trabaja es 370MHz, esta banda de frecuencia ha sido elegida intencionalmente, puesto que está dentro del rango seleccionado en secciones anteriores y no está ocupada en la ubicación física donde se realizó el experimento el Laboratorio de la Facultad, la señal transmitida resultante se puede visualizar en la figura 29.



**Figura 29.** Señal de Transmisión de PU generada en GNU Radio  
**Fuente:** Elaboración propia

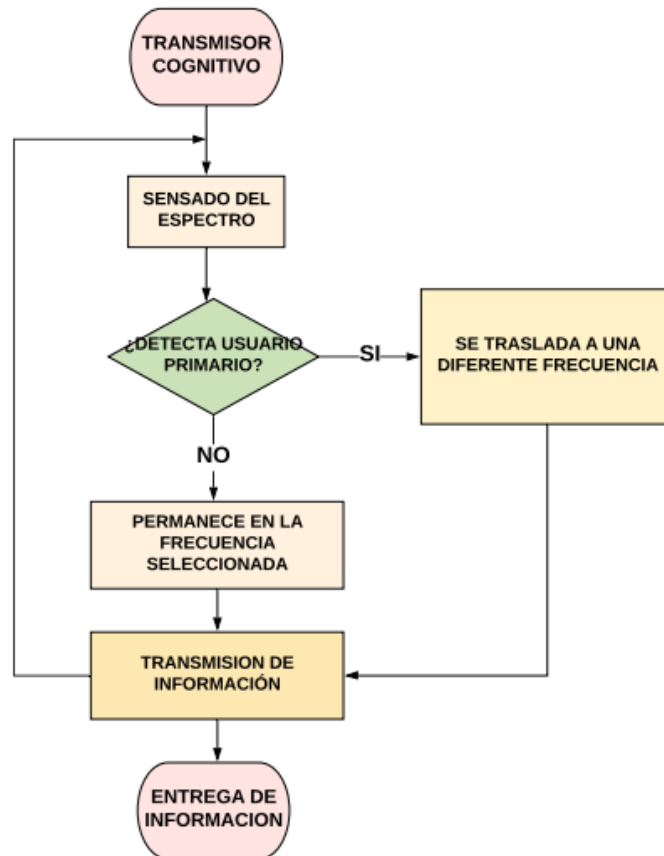
## 6.2. Detección y Transmisión del Transmisor Cognitivo

La detección y la transmisión se implementan en paralelo en el transmisor cognitivo, éste realiza primero el sensado y en base a los resultados obtenidos toma las diferentes decisiones. La figura 30 ilustra de mejor manera lo anteriormente expuesto, cabe destacar que mientras se realiza el sensado no realiza la transmisión de datos, en caso de estar ejecutándose la transmisión se detiene hasta obtener el resultado del detector para proceder en la toma de decisiones.

Una vez realizado el sensado existen dos posibles escenarios:

- Permanecer en la misma frecuencia, ya que esta se encuentra libre y no existe presencia de Usuario Primario o
- Trasladarse a la próxima frecuencia disponible puesto que ha detectado presencia de Usuario Primario y debe abandonarla inmediatamente sin interrumpir el enlace de comunicación





**Figura 30.** Detección y Transmisión ejecutadas por el Transmisor Cognitivo  
**Fuente:** Elaboración propia

### 6.3. Sincronización entre Transmisor Cognitivo y Receptor

El transmisor y el receptor deben estar sincronizados en todo momento para que el enlace de comunicación no se interrumpa. Existen diversas maneras para poder realizarlo pero el principal inconveniente es la sobrecarga que se crea en el transmisor.

Para el presente trabajo, se eligió utilizar una técnica simple para la sincronización entre el transmisor cognitivo y el receptor que no requiere la detección precisa de la frecuencia de transmisión. El receptor conoce el conjunto de frecuencias utilizadas por el transmisor y se detendrá en cada canal para encontrar el transmisor cognitivo.

### 6.4. Creación de nuevos bloques en el entorno GNU Radio

Para realizar las tareas antes mencionadas se han creado nuevos bloques en el programa GNU Radio que permiten y faciliten las tareas anteriormente expuestas. Si bien es cierto que GNU Radio posee una extensa librería que engloba una variedad de bloques para la

implementación de diferentes sistemas de comunicación nos brinda la oportunidad de crear nuevos bloques según las necesidades y requerimientos del usuario; es de esta manera que gracias al módulo *Out-Of-Tree* se han creados tres nuevos bloques cuyo funcionamiento se explicará a continuación. Los bloques creados se han implementado tanto para el transmisor como para el receptor cognitivo según las necesidades requeridas.

#### 6.4.1. Transmisor Cognitivo

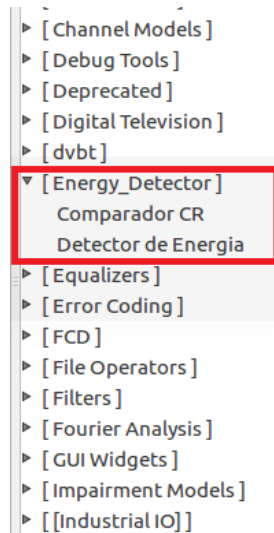
Las actividades requeridas por parte del transmisor cognitivo han sido presentadas en la figura 30, es de ésta manera que realizando diferentes pruebas para la realización del mismo se ha creído conveniente crear dos nuevos bloques que se entrará en detalle a continuación:

##### 6.4.1.1. Bloque Detector de Energía

El primer bloque en que se entrará en detalle es el algoritmo de Detección de Energía que se seleccionó en secciones anteriores como método de detección de señales. Dicho bloque se creó en lenguaje de programación C++ por la versatilidad que presenta el mismo y luego concatenado a un flowgraph de pruebas sobre Lenguaje Python, el bloque en concreto implementa la ecuación 12, la cual con las variables establecidas en el programa queda determinado por la ecuación 17.

$$Umbral = Pot_{ruido}x (1 + incertidumbre)x \left( 1 + \frac{Q^{-1}(P_{fa})}{\sqrt{\frac{coef_{dem}}{2}}} \right) \quad Ec. 17$$

Al finalizar la creación del bloque y actualizar el entorno de trabajo aparecerá dentro de la Librería del programa GNU Radio los nuevos bloques creados tal como se visualiza en la figura 31.

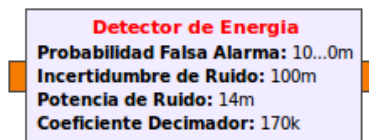


**Figura 31.** Librería actualizada en el entorno GNU Radio  
**Fuente:** Elaboración propia

El nuevo bloque creado cuenta con una entrada y una salida de tipo const; en la entrada recibirá la señal captada para posteriormente ejecutar la ecuación 17, al final del mismo se puede obtener dos resultados:

- 1 = Usuario Primario Presente
- 0 = Usuario Primario Ausente

La figura 32 presenta una visión general del bloque detector de energía:



**Figura 32.** Visión general del bloque Detector de Energía  
**Fuente:** Elaboración propia

#### 6.4.1.1.1. Curva ROC Detector de Energía

Tras la finalización de la elaboración del bloque, se procede a realizar la gráfica ROC<sup>18</sup>, es decir, la curva de probabilidad de detección frente a la probabilidad de falsa alarma, esta gráfica se usa a menudo para ilustrar y cuantificar la capacidad de detección del detector de energía, se ha creído conveniente realizarla para verificar el detector de

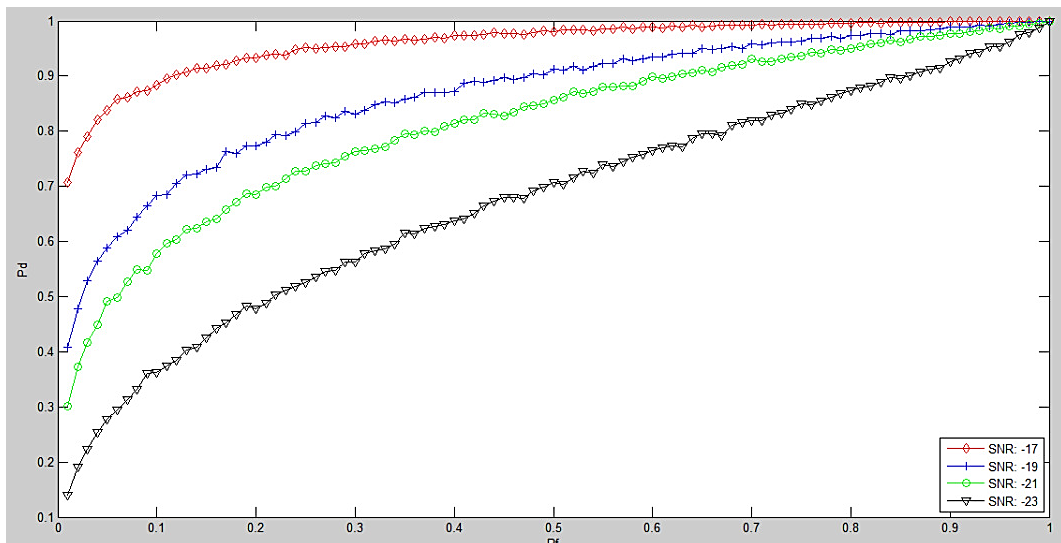
<sup>18</sup> ROC: Receiver Operating Characteristic o Curva de Características Operativas del Receptor

energía implementado. La Tabla 17 muestra el conjunto de parámetros utilizados en este documento para la evaluación del desempeño.

NOMBRE	VALOR
N. de Usuarios Primarios	1
Modulación de Usuario Primario	OFDM
N. de Usuarios Secundarios	1
Rango de SNR	-21dB
N. de muestras	170 000

**Tabla 17.** Parámetros de evaluación de desempeño para detector de energía

La Figura 33 muestra las curvas ROC experimentales obtenidas para el detector de energía descrito en secciones anteriores.



**Figura 33.** Característica de funcionamiento del receptor para el detector de energía  
**Fuente:** Elaboración propia

Para obtener dicho gráfico, un SDR (Blade RF) sirvió como detector y el otro (PlutoSDR) envió señales OFDM a diferentes amplitudes, es decir, se varió el parámetro amplitud del transmisor. Las condiciones que se tomaron en consideración son las siguientes:

- La detección de energía calculada es la de un canal con un ancho de banda de 1 MHz con una frecuencia central igual a 400 MHz.

- Los SDRs se colocan en un ambiente interior (laboratorio), separados por un metro de distancia.

Como era de esperar, cuantas más altas sean las muestras (N), mejor será la calidad de la detección. El rendimiento del detector de energía no solo depende de la SNR, sino también del número de muestras utilizadas para la detección, tal y como se observa en la figura 33.

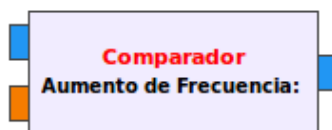
Una elevada probabilidad de falsas alarmas puede conducir a una oportunidad potencial de desaprovechar que los usuarios Secundarios transmitan oportunamente. Por otro lado, una detección perdida puede resultar en una interferencia catastrófica y perjudicial para los usuarios con licencia.

#### 6.4.1.2. Bloque Comparador

La salida del bloque Detector de Energía está interconectado con el siguiente bloque creado denominado Comparador, dicho bloque realiza la toma de decisiones en base a la respuesta obtenida del bloque Detector de Energía, es de esta manera que:

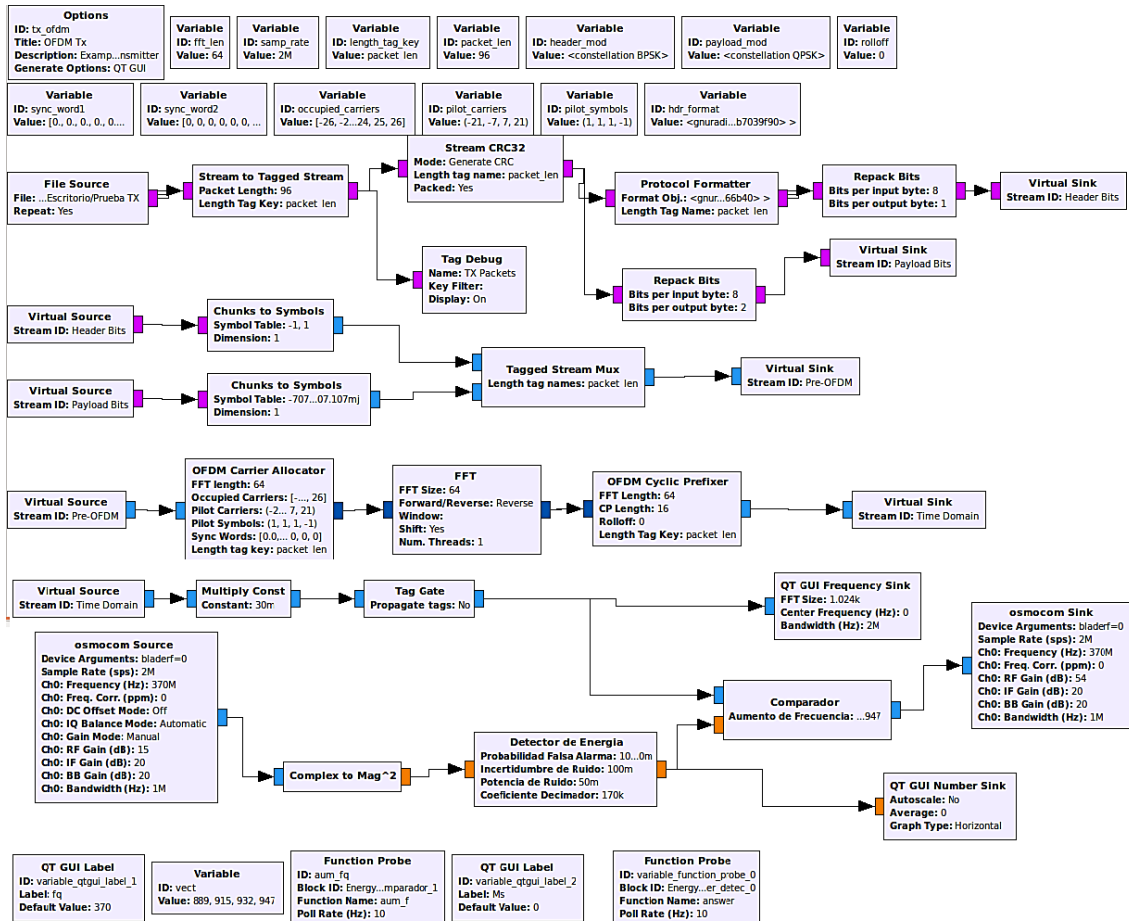
- Al recibir 1, detecta la presencia de un PU, pausa la transmisión y procede a trasladarse a la siguiente banda de frecuencia para efectuar y/o continuar la transmisión
- Si por el contrario recibe un 0, es decir detecta la ausencia del PU se mantiene en la frecuencia sintonizada y empieza el proceso de envío de datos.

El bloque está constituido de dos entradas y una salida, las entradas corresponden a: la primera es el resultado del bloque Detector de Energía y la segunda la información a enviar, adicional en el bloque se puede seleccionar el tipo de datos a la entrada y salida, dando versatilidad a la hora de envío de datos. La figura 34 muestra una visión general del bloque en mención.



**Figura 34.** Vista general de bloque Comparador  
**Fuente:** Elaboración propia

Tras la culminación de la creación de los bloques necesarios, se procede a crear el diagrama de bloques de las tareas que realizará el Transmisor Cognitivo, para dicho transmisor se utilizó la tarjeta Blade RF x40 para que por medio de los bloques Osmocom Source y Osmocom Sink respectivamente se realice el sensado de las frecuencias y el respectivo envío de datos, la figura 35 muestra el diagrama de bloques resultante.



**Figura 35.** Diagrama de bloques de Transmisor Cognitivo  
**Fuente:** Elaboración propia

### 6.4.2. Receptor Cognitivo

Tal y como se analizó en secciones anteriores es importante la sincronización entre Transmisor y Receptor Cognitivo, por tal razón para la recepción de enlace se utilizó dos nuevos bloques uno de ellos Detector de Energía que ya se ha analizó en la subsección anterior, el cuál trabajará conjuntamente con el segundo bloque comparador RX SU que si bien su estructura es parecido a su igual en el transmisor difiere en las

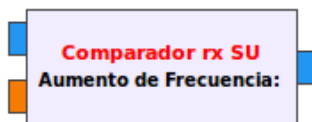
acciones que realiza puesto que el objetivo del receptor cognitivo es encontrar la frecuencia de la señal que el Transmisor envía y recibirla satisfactoriamente.

#### 6.4.2.1. Comparador RX SU

Tal y como sucede con el detector de energía el cual participa activamente en el Transmisor cognitivo a la salida tenemos dos posibles resultados que hemos analizado con anterioridad, con dicha información el bloque debe tomar la decisión si permanecer o trasladarse a la siguiente frecuencia buscando la señal del usuario Secundario para hacer efectiva la recepción de datos, el comparador detectará al Usuario Primario pero ya que su estructura es diferente tanto en frecuencia de muestreo como en ancho de banda no lo reconoce como su igual y continua la búsqueda de la señal que tiene las mismas características y que puede demodularlo, de esta manera la toma de decisiones quedará expresada de la siguiente manera.

- Al recibir 1, detecta la presencia de un Usuario, este puede ser Primario o Secundario, pero únicamente puede decodificar al Secundario si es el caso permanece y empieza la recepción de datos.
- Si por el contrario recibe un 0, es decir detecta la ausencia de Usuario, procede a trasladarse a la banda de frecuencia más cercana y detectar nuevamente hasta que encuentre el Usuario Secundario para la recepción de información.

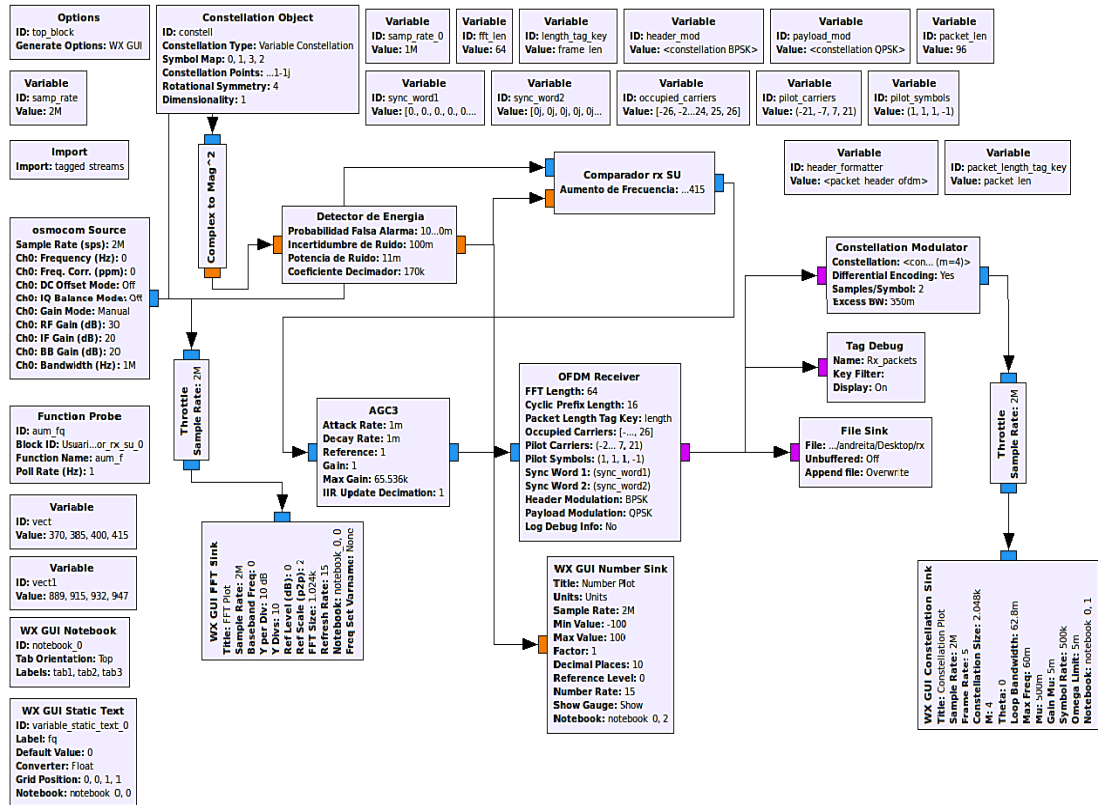
La figura 36 muestra una vista general del bloque detallado.



**Figura 36.** Vista general de bloque Comparador RX SU

**Fuente:** Elaboración propia

Para la tarea de recepción se ha creído oportuno utilizar el SDR RTL-SDR, el cual es un terminal basado en un dongle expresamente para recepción de datos, por su costo módico presenta limitantes tanto en su ancho de banda como en su estructura pero para el presente trabajo sus funcionalidades son adecuadas. La figura 37 indica el diagrama de bloques resultante del Receptor Cognitivo para el Usuario Secundario.



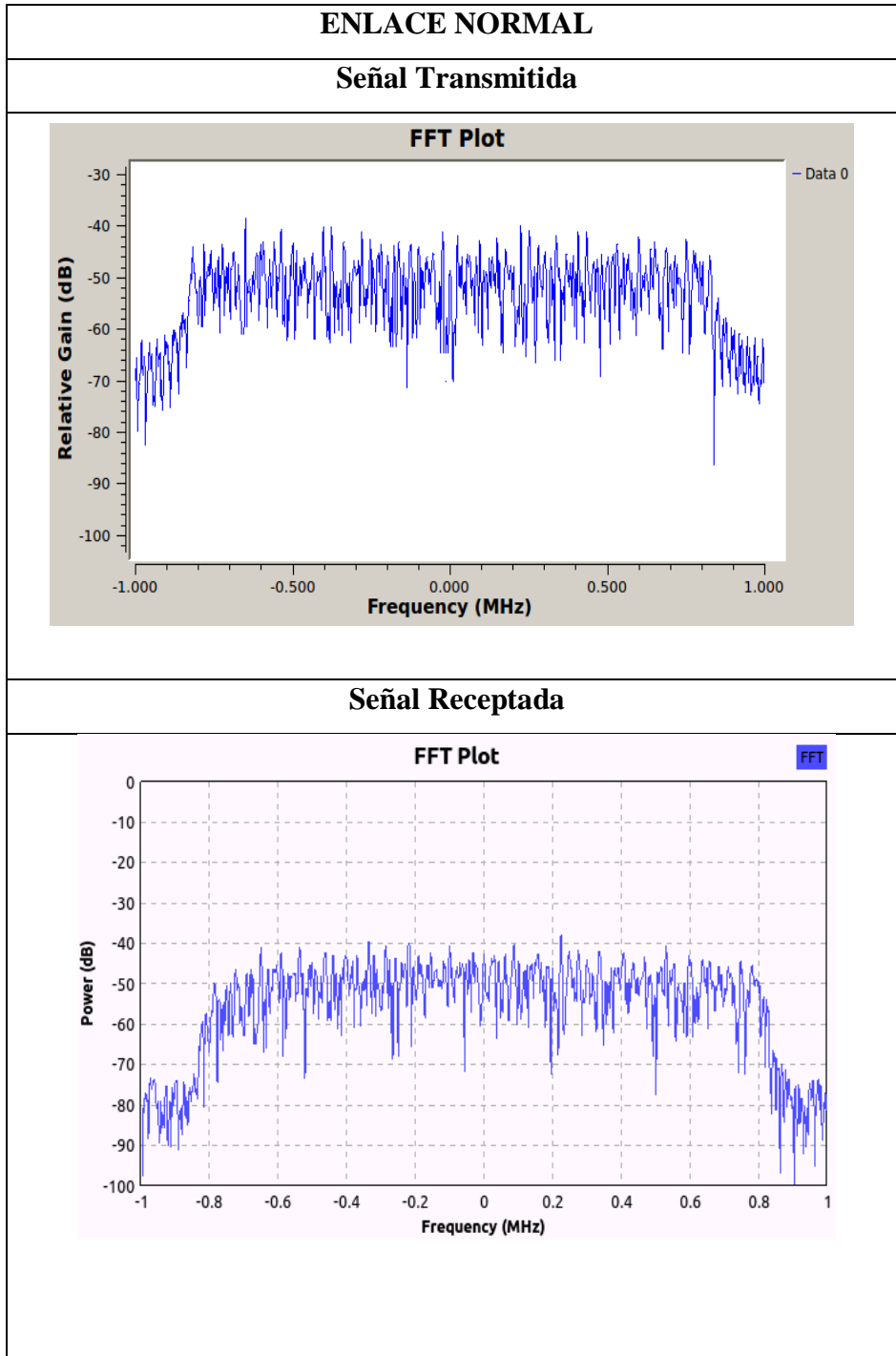
**Figura 37.** Diagrama de bloques de Receptor Cognitivo  
**Fuente:** Elaboración propia

La forma de onda en el dominio del tiempo que se recibe por medio del RTL-SDR es detectada y posteriormente evaluada por los bloques creados anteriormente, a la salida del bloque Comparador RX SU la señal se dirige al bloque AGC para la corrección del nivel de potencia y luego al bloque de sincronización de tiempo que ejecuta la estimación del desplazamiento del tiempo del símbolo y la corrección del desplazamiento de la frecuencia de la portadora. El bloque Schmidl & Cox OFDM synch realiza la estimación utilizando la auto correlación del preámbulo. Posteriormente, la señal pasa por el encabezado y el flujo de carga útil que va al bloque FFT, luego el bloque FFT realiza la conversión de frecuencia y demodula las sub-partes individuales. La señal de dominio de frecuencia del encabezado y la carga útil pasa por la estimación de canal y el ecualizador de trama que iguala el canal y corrige la frecuencia y la fase. Subsiguientemente los bloques del serializador OFDM eliminan los símbolos piloto, y pasan por el bloque Constellation Decoder el que se encarga de decodificar la carga útil para extraerla y re-empaquetarla, finalmente guarda la información receptada en un archivo para verificar la correcta llegada de los datos.

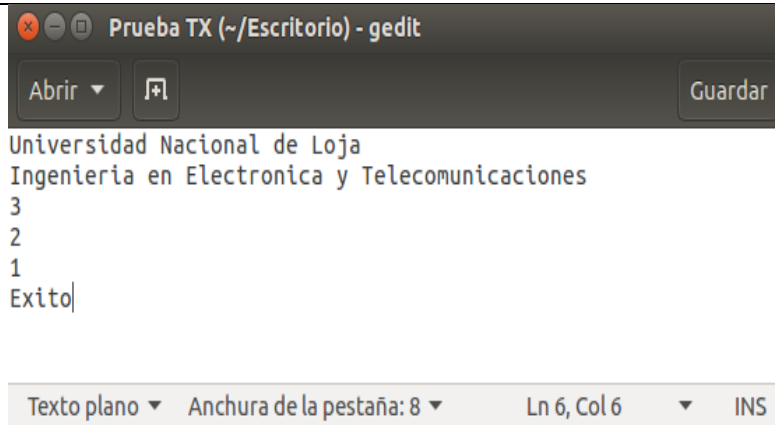


### 6.5. Comparativa entre Enlace normal de Comunicación y un Enlace basado en sistemas de Radio Cognitiva.

Con la puesta en práctica del enlace de comunicación se procede a realizar la comparativa entre la tecnología Radio Cognitiva y un enlace normal, por lo cual se ha creído conveniente construir la tabla 18.



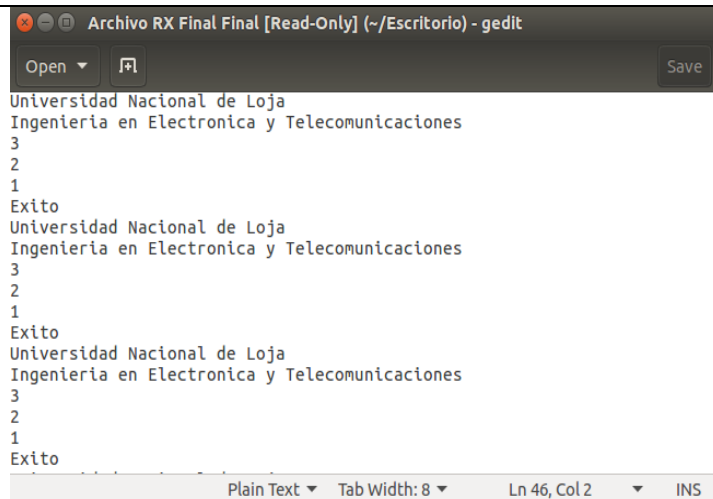
## Archivo Transmitido



```
Universidad Nacional de Loja  
Ingenieria en Electronica y Telecomunicaciones  
3  
2  
1  
Exito
```

Texto plano ▾ Anchura de la pestaña: 8 ▾ Ln 6, Col 6 ▾ INS

## Archivo Receptado

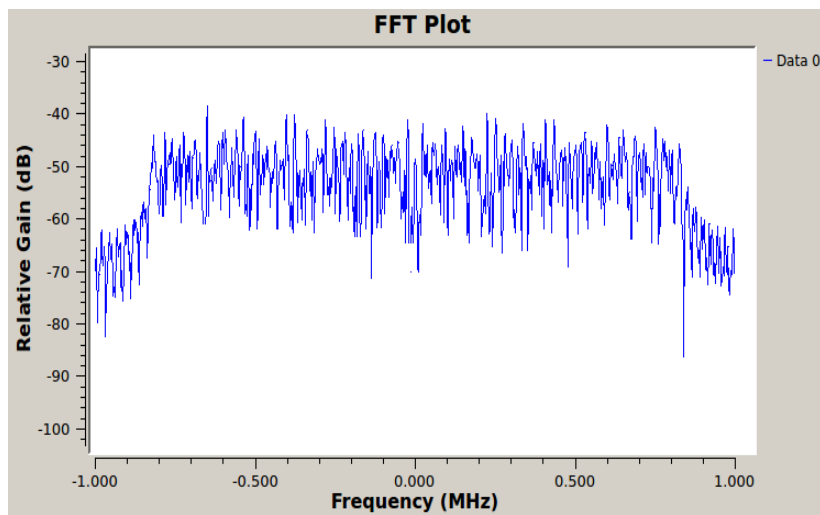


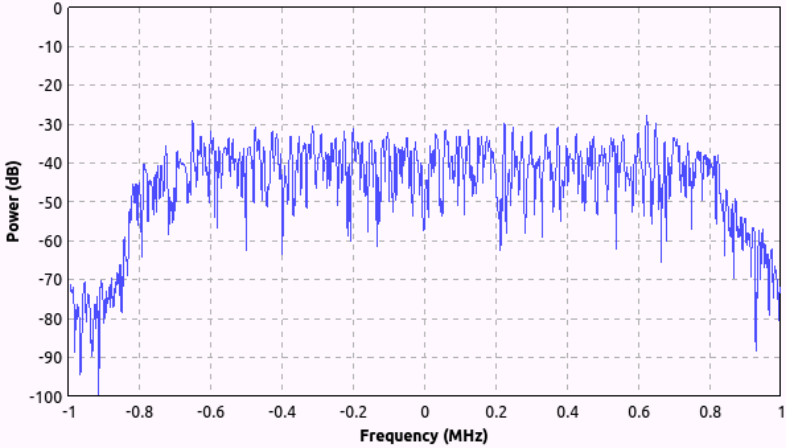
```
Universidad Nacional de Loja  
Ingenieria en Electronica y Telecomunicaciones  
3  
2  
1  
Exito  
Universidad Nacional de Loja  
Ingenieria en Electronica y Telecomunicaciones  
3  
2  
1  
Exito  
Universidad Nacional de Loja  
Ingenieria en Electronica y Telecomunicaciones  
3  
2  
1  
Exito
```

Plain Text ▾ Tab Width: 8 ▾ Ln 46, Col 2 ▾ INS

## ENLACE BASADO EN RADIO COGNITIVA

### Señal Transmitida



Señal Receptada
<p data-bbox="395 286 459 309">Fq: 385</p> <div data-bbox="395 309 1193 801"> <p data-bbox="751 320 842 342">FFT Plot</p>  </div>
Archivo Transmitido
<div data-bbox="438 878 1152 1276"> <p data-bbox="448 884 884 913">*Prueba TX (~/Escritorio) - gedit</p> <p data-bbox="459 949 544 978">Open</p> <p data-bbox="587 949 619 978">+</p> <p data-bbox="1082 949 1134 978">Save</p> <p data-bbox="443 1003 1043 1218">           Universidad Nacional de Loja            Ingeniería en Electronica y Telecomunicaciones            Lunes 27 de Mayo            1            2            3            Exito          </p> <p data-bbox="501 1240 1134 1270">Plain Text Tab Width: 8 Ln 7, Col 6 INS</p> </div>
Archivo Receptado
<div data-bbox="438 1357 1152 1854"> <p data-bbox="448 1364 922 1393">Archivo RX Final (~/Escritorio) - gedit</p> <p data-bbox="459 1415 544 1444">Open</p> <p data-bbox="587 1415 619 1444">+</p> <p data-bbox="1082 1415 1134 1444">Save</p> <p data-bbox="443 1460 1024 1818">           Universidad Nacional de Loja            Ingeniería en Ee Loja            Ingeniería en Electronica y Telecomunicaciones            Lunes 27 de Mayo 2019            3            2            1            Exito            Universidad de Loja             Ingeniería en Electronica y Telecomunicaciones            Lunes 27 de Mayo 2019            3            2            1         </p> <p data-bbox="520 1827 1134 1856">Plain Text Tab Width: 8 Ln 9, Col 20 INS</p> </div>

**Tabla 18.** Comparativa entre Enlace normal de Comunicaciones y un Enlace basado en sistemas de Radio Cognitiva.

## 7. DISCUSIÓN

Tras realizar exitosamente el enlace de comunicación en un ambiente real, queda en evidencia que la tecnología Radio Cognitiva es una alternativa razonable para el problema inminente, que es la infrautilización del espectro radioeléctrico, presentando una sólida respuesta a la problemática planteada, exhibiendo una designación de frecuencias dinámica a la ya acostumbrada y poco efectiva designación estática.

El estudio previo acerca de la tecnología de Radio Cognitiva y bibliografía referente a su implementación, permitió contrastar cabalmente los requerimientos necesarios y proporcionó el principio básico para la selección de los elementos principales y fundamentales que conforman el enlace de comunicación.

Simultáneamente se realizó el debido sensado de las diferentes bandas de frecuencias en la Facultad, como resultado de la misma se construyó la tabla 16 la cual muestra el estado actual del espectro radio eléctrico en la frecuencia de 54-960 MHz y el desaprovechamiento del mismo y la gran oportunidad para implementar nuevas tecnologías como Radio Cognitiva, la cual es tema de estudio en el presente trabajo.

El detector de Energía, seleccionado como método de detección para realizar el sensado de espectro, mostró un alto índice de respuestas positivas a la hora de detectar la presencia o no de Usuarios Primarios, es importante resaltar que existieron algunos falsos positivos, se deduce que dichos resultados se obtuvieron debido a la simplicidad de su arquitectura, se elaboró la curva ROC para ilustrar y cuantificar la capacidad de detección del detector de energía, la figura 33 ilustra los resultados obtenidos, para investigaciones futuras se recomienda implementar mejoras al detector seleccionado con la finalidad de optimizar resultados.

Así también, la modulación utilizada OFDM mostró resultados satisfactorios, dicha modulación ha sido ampliamente utilizada por un sin número de ventajas que presenta y la versatilidad de la misma, sin embargo es necesario destacar que se requirió de un nivel específico de ganancia igual a 57 dB por parte de la Blade RF, para realizar de manera correcta la transmisión de datos y que sea oportunamente receptado. Con respecto a las herramientas de software utilizadas las mismas mostraron excelentes

resultados, aunque existieron ciertas diferencias con los modelos, puesto que se utilizaron una diversidad de tarjetas SDR y ciertamente influye en la recepción de datos.

El sistema radiante seleccionado presentó múltiples pérdidas y una baja ganancia, lo cual hace vulnerable al enlace implementado frente al ruido y su distancia de propagación no es extensa, se recomienda para investigaciones futuras la adquisición de antenas más apropiadas para resultados más eficaces. La herramienta de software GNU Radio seleccionada, presenta versatilidad y facilidad para la creación de los bloques requeridos más es necesario un estudio previo de la funcionalidad del mismo para establecer un punto de partida para la creación y/o modificación de los bloques; el lenguaje de programación seleccionado fue C++, el cual presentó resultados favorables y facilidad a la hora de adaptar las especificaciones necesarias. La utilización de una maquina física con sistema operativo Ubuntu fue necesario para un correcto funcionamiento e instalación de los controladores necesarios.

Los resultados preliminares del trabajo experimental muestran que SDR proporciona flexibilidad en el diseño y comprobación de un sistema de comunicación de manera práctica, considerando las condiciones reales del canal. La eficiencia del enlace implementado es exitosa, al realizar la comparativa entre un enlace normal de comunicaciones y uno basado en sistemas de Radio Cognitiva se pudo constatar las ventajas de la tecnología estudiada y la puesta en marcha de la misma, poniendo en manifiesto la definición y objetivo principal del tema de estudio de la presente investigación. Pese a encontrar diferentes factores que puedan generar errores en la transmisión, la mayoría de pruebas ejecutadas resultó en recepción de documento de texto que visiblemente es idéntico al archivo original.

## 8. CONCLUSIONES

- En la presente tesis se implementó 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).
- Mediante la revisión literaria se analizó y contrastó los distintos detectores de espectro, definiendo sus características, ventajas y desventajas en la tabla 3. El algoritmo seleccionado para el presente trabajo fue el detector de energía, este detector presenta como mayor ventaja, que requiere la menor cantidad de potencia computacional y no requerir a priori la información de la señal a detectar, esto lo convirtió en la opción más apta y menos compleja de implementar. La principal desventaja radica en la precisión, ya que esta depende en gran medida de las variaciones de nivel de ruido, lo que podría traducirse en detección de falsos positivos. Adicional a esto, se seleccionó el estándar IEEE 802.22 como referencia de algunos parámetros necesarios para la implementación del enlace requerido.
- Con el analizador de Espectro Aaronia HF-6065 se realizó el estudio previo del sensado de las diferentes bandas de frecuencias en la Facultad, como resultado de la misma se construyó la tabla 16, la cual muestra el estado actual del espectro radioeléctrico en las frecuencias de 54-960 MHz. De esta manera se observa una disponibilidad de 61% aproximadamente en las diferentes sub-bandas analizadas, quedando en evidencia la sub-utilización del espectro y la oportunidad de aplicación de nuevas tecnologías.
- Se realizó una comparativa entre las diversas herramientas de software y hardware a utilizar, seleccionando dentro de los equipos SDR: BladeRF x40, PlutoSDR y RTL-SDR; esto en cuanto a hardware ya que los mismos son considerados SDR de bajo costo, presentan favorables características técnicas y cumplen con los requerimientos necesarios para la implementación del enlace.

En cuando a software se eligió GNU Radio, el cual es de código abierto, no necesita licencia alguna, trabaja tanto en los sistemas operativos Windows como Linux (Ubuntu), presenta una interfaz amigable e interactiva al usuario permitiendo la construcción de diversos sistemas de comunicación por medio de diagramas de bloques o programación en sus dos lenguajes de programación permitidos (C++ y Python), además permite crear nuevos bloques o personalizar los ya existentes; para el presente Trabajo de Titulación se crearon 3 bloques adicionales.

- Mediante las simulaciones y pruebas realizadas se logró construir y ejecutar un enlace basado en principios de Radio Cognitiva en un ambiente real, el trabajo experimental mostró que SDR proporcionan versatilidad y flexibilidad en el diseño y demostración de sistemas de comunicación de forma práctica, al mismo tiempo se demostró la viabilidad de la tecnología utilizada CR, permitiendo construir un enlace de alto rendimiento, el cual es consciente de su entorno y puede modificar sus parámetros según la detección oportuna del espectro.
- Al finalizar la presente investigación, se efectuó la comparativa entre un enlace normal de comunicaciones y uno basado en sistemas de Radio Cognitiva, se pudo constatar la indudable diferencia entre los mismos, ya que se evidenció la designación de frecuencias de manera estática (Enlace normal) y dinámica (Enlace basado en CR), el diseño y posterior implementación contribuye al establecimiento de acciones que evidencian el potencial uso de los sistemas de RC dentro de porciones del espectro radioeléctrico que pueden ser optimizadas.
- Las aplicaciones de esta nueva tecnología sobre la cual centra su estudio la presente investigación, es decir Radio Cognitiva son innumerables, pero destaca proporcionar servicios de Telecomunicaciones a sectores marginales permitiendo accesibilidad de servicio integral de comunicación como lo es el Internet. Debido al poder adquisitivo de los pobladores el cual es insuficiente, así como a una distribución poblacional no elevada y una compleja ubicación geográfica de la población, hace que no resulte productivo a las empresas

proveedoras construir la infraestructura para establecer y proporcionar el servicio, de esta manera la tecnología Radio Cognitiva, entra en escena como una opción viable para solventar la problemática y así garantizar el acceso universal a las Tecnologías de la Información y Comunicación como lo establece el Estado en el Art. 35 de la Ley Orgánica de Comunicación.



## 9. RECOMENDACIONES

En base a los planteamientos y observaciones que permiten la culminación de este proyecto, se recomienda:

- Efectuar una amplia revisión bibliográfica y estudiar previamente la respectiva información disponible acerca de Radio Cognitiva y de las tarjetas SDR utilizadas. Diversos trabajos realizados con anterioridad brindan un punto de partida y/o una sólida base para realizar nuevos diseños, facilitando los procesos y acortando el tiempo de trabajo.
- Para contrastar la presencia de falsos positivos producidos por el detector de espectro seleccionado, se recomienda realizar correctamente la calibración del algoritmo y la correcta selección del umbral con el fin de evitar la ineffectividad del detector de energía.
- Manipular con precaución los equipos utilizados, esto con el fin de evitar inconvenientes o una posterior avería que pueda arruinar o afectar el funcionamiento de los mismos modificando de alguna manera el resultado.
- Es necesario utilizar una máquina física de Linux con el sistema operativo Ubuntu para el correcto funcionamiento del Sistema de Comunicación, ya que al requerir un gran procesamiento y complejidad computacional no puede implementarse en máquina virtual.
- Para la creación de los bloques requeridos para la implementación se requiere un nivel medio en programación en lenguaje C++, por lo que se recomienda el estudio previo del mismo para una mejor comprensión de la estructura y futura mejora.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] D. A. Segura Briones, “Análisis De Factibilidad Para La Utilización De Cognitive Radio (Radio Cognoscitiva) En Las Radiocomunicaciones Necesarias Para Casos De Emergencia En El Ecuador,” Dec. 2010.
- [2] J. P. A. PEÑA, L. M. M., & SANCHEZ, “REDES AD HOC UTILIZANDO TECNICAS DE RADIO COGNITIVO,” 2011.
- [3] P. J. Paul J Kolodzy Kolodzy, “Spectrum Policy Task Force Findings and Recommendations Findings and Recommendations.”
- [4] J. I. Mitola, “Cognitive radio. An integrated agent architecture for software defined radio.,” Kungliga Tekniska Hogskolan (Suecia), 2002.
- [5] E. FCC, “Docket No. 03-108. Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies,” 2005.
- [6] I. U. Position, “Improving Spectrum Usage through Cognitive Radio Technology.”
- [7] ITU Wp8A, “Working document towards a preliminary draft new report - Cognitive radio systems in the land mobile service,” 2007. [Online]. Available: <http://www.itu.int/md/R03-WP8A-C-0555/en>.
- [8] R. W. Broderson, A. Wolisz, D. Cabric, S. M. Mishra, and D. Willkomm, “A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum.” 2004.
- [9] FCC, “Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies.”
- [10] M. D. Cereceda Tobal, “Diseño y evaluación de un detector de energía para señales FM wirelss microphone en Radio Cognitiva,” 2011.
- [11] J. M. Vanerio and J. Martín, “Predicción en línea basada en expertos para mercados secundarios de radio cognitiva,” 2019.
- [12] A. Raschellà, L. Militano, G. Araniti, A. Orsino, and A. Iera, “Cognitive Management Strategies for Dynamic Spectrum Access,” in *Handbook of Cognitive Radio*, Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 1–35.

- [13] IEEE 802.22-05/0007r46, “Functional Requirements for the 802.22 WRAN Standard.”
- [14] J. J. del Portillo, J. A. C., Gutiérrez, L. P., Hernández, I. L., & Morales, “IEEE 802.22, SUPER WI-FI,” vol. 16, pp. 1–12, 2017.
- [15] A. : M<sup>a</sup>, Á. De La, and C. Barquero, “DETECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES PARA RADIO COGNITIVA.”
- [16] F. Khan and K. Nakagawa, “Comparative study of spectrum sensing techniques in cognitive radio networks,” in *2013 World Congress on Computer and Information Technology (WCCIT)*, 2013, pp. 1–8.
- [17] S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing*. Prentice-Hall PTR, 1993.
- [18] D. Cabric, A. Tkachenko, and R. W. Brodersen, “Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation,” in *Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum - TAPAS '06*, 2006, pp. 12-es.
- [19] D. M. M. Plata and Á. G. A. Reátiga, “Evaluation of energy detection for spectrum sensing based on the dynamic selection of detection-threshold,” *Procedia Eng.*, vol. 35, pp. 135–143, Jan. 2012.
- [20] Yixian Liu, Chunyan Zeng, Hongjiang Wang, and Gang Wei, “Energy detection threshold optimization for cooperative spectrum sensing,” in *2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*, 2010, pp. 566–570.
- [21] E. E. Apaza Medina, “Sensoriamento espectral baseado na detecção de energia para rádios cognitivos.” Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [22] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, and Y. T. Hou, *Cognitive radio communications and networks : principles and practice*. Academic Press, 2010.
- [23] “Wireless Innovation Forum - working toward SDR, CR and DSA innovation.” [Online]. Available: <https://www.wirelessinnovation.org/>. [Accessed: 18-Marzo-2019].

- [24] FCC, “Authorization and Use of Software Defined Radios.”
- [25] B. FETTE, *COGNITIVE RADIO TECHNOLOGY*, Septima Ed. Burlington, MA. USA., 2006.
- [26] A. Abadie and D. Wijesekera, “Cognitive radio technologies: Envisioning the realization of network-centric warfare,” in *2012 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)*, 2012, pp. 1–7.
- [27] A. N. J. H. Aguilar, “Radio cognitiva – Estado del arte. Sistemas y Telemática,” *vol. 9*, pp. 31–50, Mar-2011.
- [28] J. Mitola, “Software radio architecture: a mathematical perspective,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 514–538, Apr. 1999.
- [29] J. Mitola III, “Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications,” *Mob. Networks Appl.*, vol. 6, no. 5, pp. 435–441, 2001.
- [30] J. M. Chapin and V. G. Bose, “The Vanu Software Radio System.”
- [31] H. Arslan, *Cognitive radio, software defined radio, and adaptive wireless systems*. Springer, 2007.
- [32] P. Jennifer and I. A. Chacón, “El papel del Estado frente el espectro radioeléctrico como bien demanial,” 2017.
- [33] “Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones – Promovemos el desarrollo armónico del sector de las telecomunicaciones, radio, televisión y las TIC , mediante la administración y regulación eficiente del espectro radioeléctrico y los servicios.” [Online]. Available: <http://www.arcotel.gob.ec/>. [Accessed: 19-Enero-2019].
- [34] Fuji, “Tendencias recientes y perspectivas futuras de la tecnología de Radio definida por Software (SDR).,” *ITU News Magazine*, pp. 17–19, Nov-2017.
- [35] I. Nuand, “Nuand.” [Online]. Available: <https://www.nuand.com/>. [Accessed: 11-Febrero-2019].
- [36] R. Analog, “RTL-SDR.” [Online]. Available: <https://www.rtl-sdr.com/>. [Accessed: 11-Febrero-2019].
- [37] Analog Devices, “Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog

Devices.” [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/index.html>. [Accessed: 11-Febrero-2019].

- [38] A. Vega León, “Evaluación del espectro radioeléctrico VHF/UHF en parroquias urbanas y rurales del cantón Loja para el despliegue de sistemas de radio cognitiva,” 2013.

## 11. ANEXOS

### 11.1. ANEXO I: INSTALACION DE GNU RADIO

El presente anexo muestra una guía de la instalación del software GNU RADIO

- a) Abrir una ventana de terminal como root y se crea un directorio donde se descargarán todos las dependencias y el programa a instalar de forma manual:

```
$ sudo su  
$ mkdir software  
$ cd software
```

- b) Realizar la actualización “*update*” del repositorio de Ubuntu y luego un “*upgrade*” general de las dependencias del sistema:

```
$ sudo apt-get update  
$ sudo apt-get upgrade
```

- c) Instalar las dependencias necesarias para GNU Radio:

```
$ sudo apt-get -y install vim ssh libfontconfig1-dev libxrender-dev libpulse-dev swig g++ automake autoconf libtool python-dev libfftw3-dev libcppunit-dev libboost-all-dev libusb-dev fort77 sdcc sdcc-libraries libsdl1.2-dev python-wxgtk2.8 git-core guile-1.8-dev libqt4-dev python-numpy ccache python-opengl libgsl0-dev python-cheetah python-lxml doxygen qt4-dev-tools libqwt5-qt4-dev libqwtplot3d-qt4-dev pyqt4-dev-tools python-qwt5-qt4 libortp-dev latex git-core cmake libxml2-dev libortp-dev libusrp-dev libusrp0 gawk
```

- d) Para la instalación de GNU Radio se lo realizará con la herramienta PyBombs la cual se procede a instalar

```
$ git clone https://github.com/gnuradio/pybombs.git  
$ cd pybombs  
$ sudo python setup.py install
```

e) Añadir medios necesarios para PyBOMBS:

```
$ pybombs recipes add gr-recipes  
git+https://github.com/gnuradio/gr-recipes.git  
$ pybombs recipes add gr-etcetera  
git+https://github.com/gnuradio/gr-etcetera.git
```

f) Se configura un prefijo de instalación:

```
$ pybombs prefix init ~/prefix/default/
```

g) Finalmente se instala GNU Radio:

```
$ pybombs install gnuradio
```

h) Ejecute GNU Radio Companion desde su nuevo prefijo:

```
$ source ~/prefix/default/setup_env.sh  
$ gnuradio-companion
```

## 11.2. ANEXO II: INSTALACION DE BLOQUES OSMOSDR E HIO

Para la presente instalación de las dependencias mencionadas necesita una versión de GNU Radio  $\geq v3.7$ , en caso de contar con una versión anterior se recomienda desinstalarla para que no exista conflicto alguno con la instalación.

### 11.2.1. INSTALACION GR-OSMOSDR

Se construye con *cmake*:

```
$ git clone git://git.osmocom.org/gr-osmosdr
$ cd gr-osmosdr/
```

Luego se continúa con:

```
$ mkdir build
$ cd build/
$ cmake ../
```

Ahora *cmake* deberá imprimir un resumen de los componentes habilitados/deshabilitados. Puedes deshabilitar ciertos componentes siguiendo las pautas mostradas por *cmake*. Asegúrese de que el dispositivo de su interés esté listado aquí. Compruebe sus dependencias y vuelva a intentarlo.

```
- #####
-- # gr-osmosdr enabled components
-- #####
-- * Python support
-- * Osmocom IQ Imbalance Correction
-- * sysmocom OsmoSDR
-- * FUNcube Dongle
-- * FUNcube Dongle Pro+
-- * IQ File Source
-- * Osmocom RTLSDR
-- * RTLSDR TCP Client
-- * Ettus USRP Devices
-- * Osmocom MiriSDR
-- * HackRF Jawbreaker
-- * nuand bladeRF
-- * RFSPACE Receivers
```



```
-- #####  
-- # gr-osmosdr disabled components  
-- #####  
--  
-- Building for version: v0.1.0-4-g37aba331 / 0.1.1git  
-- Using install prefix: /usr/local
```

Posteriormente se construye y se instala

```
$ make  
$ sudo make install  
$ sudo ldconfig
```

### 11.2.2. INSTALACION GR-IIO

Para la instalación de este paquete, en primera instancia es necesario instalar las siguientes dependencias adicionales a las de la instalación del programa.

```
$ sudo apt-get -y install libxml2 libxml2-dev bison flex cmake git  
libaio-dev libboost-all-dev swig
```

Descargar y compilar libiio

```
$ git clone https://github.com/analogdevicesinc/libiio.git  
$ cd libiio  
$ cmake .  
$ make  
$ sudo make install  
$ cd ..
```

Descargar y compilar libad9361-iio

```
$ git clone https://github.com/analogdevicesinc/libad9361-iio.git  
$ cd libad9361-iio  
$ cmake .  
$ make  
$ sudo make install  
$ cd ..
```

## Descargar y compilar gr-iio

```
$ git clone https://github.com/analogdevicesinc/gr-iio.git  
$ cd gr-iio  
$ cmake .  
$ make  
$ sudo make install  
$ cd ..  
sudo ldconfig
```

## GNU Radio te recomendará incluir

```
$ /usr/local/lib${type}/python${PYVER}/site-packages/gnuradio
```

Para ciertas instalaciones binarias de GNU Radio, el enlace de Python se coloca en una carpeta de la competencia en los bloques integrados de GNU Radio. Esto puede requerir que copie manualmente los bloques en `/usr/lib` y `/usr/local/` lib. Adicional se recomienda digitar el siguiente comando:

```
$ cp -r /usr/local/lib/python2.7/dist-packages/gnuradio/iio  
/usr/lib/python2.7/dist-packages/gnuradio/
```

Esto se debe a que los bloques de IIO Python se colocan en la subcarpeta `gnuradio`. Esto es necesario ya que el enlace del lenguaje iio para Python sobrescribiría estos bloques.

### 11.3. ANEXO III. CREACIÓN DE UN NUEVO BLOQUE (MODULO OUT-OF-TREE)

El proceso presentado a continuación es con fines demostrativos y prácticos, el mismo mostrará la creación de un bloque sencillo en lenguaje C++ el mismo que cuente con dos entradas y una salida que realice la operación matemática sumar.

Las etapas de creación de bloques en GNU Radio son las siguientes:

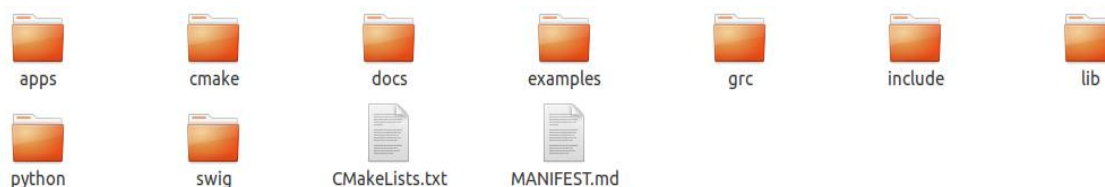
1. Implementación de bloques (C ++), los archivos (.h, .cc)
2. Creación de interfaces SWIG entre C ++ / Python, el archivo (.i)
3. Instalación de bloques en una biblioteca compartida.
4. Uso de bloques en una aplicación (Python), el archivo (.py)

El bloque realiza la operación básica e imprime en la consola el valor resultante, adicional se puede presentar de manera gráfica el resultado, tal y como se lo menciono en secciones anteriores para la creación del bloque se utiliza el módulo `gr_modtool`, el cual viene incorporado de manera predeterminada con el software GNU Radio.

Para la creación del bloque al que se denominará Operador dentro de la categoría Tutorial, digitaremos el siguiente comando.

```
root@andre-Satellite-S855: /home/andre
root@andre-Satellite-S855:/home/andre# gr_modtool create
Name of the new module: Tutorial
Creating out-of-tree module in ./gr-Tutorial... Done.
Use 'gr_modtool add' to add a new block to this currently empty module.
root@andre-Satellite-S855:/home/andre#
```

Al ejecutar el comando se creará automáticamente la carpeta con el nombre de la categoría Tutorial *gr-Tutorial*, dentro de dicha carpeta se encuentran las carpetas estructuras del módulo, tal y como se muestra en la siguiente imagen

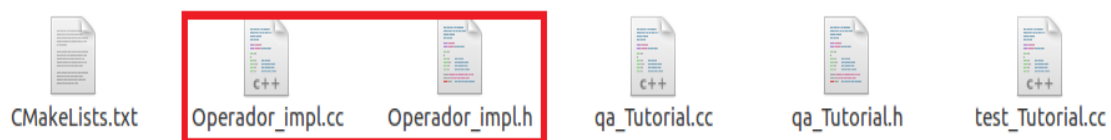


Debemos entrar en la nueva carpeta y ejecutar el comando especificado en la primera línea de la secuencia de abajo, y entrar con las respuestas a las solicitudes abajo

descritas, la estructura del comando puede cambiar dependiendo del lenguaje de comunicación seleccionada y del tipo de bloque que se requiera construir.

```
root@andre-Satellite-S855:/home/andre/gr-Tutorial# gr_modtool add
GNU Radio module name identified: Tutorial
('sink', 'source', 'sync', 'decimator', 'interpolator', 'general', 'tagged_stream', 'hier', 'noblock')
Enter block type: general
Language (python/cpp): cpp
Language: C++
Enter name of block/code (without module name prefix): Operator
Block/code identifier: Operator
Enter valid argument list, including default arguments: float a, float b
Add Python QA code? [Y/n] n
Add C++ QA code? [Y/n] n
Adding file 'lib/Operator_impl.h'...
Adding file 'lib/Operator_impl.cc'...
Adding file 'include/Tutorial/Operator.h'...
Editing swig/Tutorial_swig.i...
Adding file 'grc/TutorialOperator.xml'...
Editing grc/CMakeLists.txt...
root@andre-Satellite-S855:/home/andre/gr-Tutorial#
```

Al finalizar la secuencia anterior, se ha creado los archivos necesarios para la implementación del bloque requerido. En primer instancia se debe acceder a la carpeta `/lib`, en donde se encuentra los dos archivos que se debe editar `.cc` y `.h`



Donde:

- **Archivos h:** Son las bibliotecas de los bloques que se implementan.
- **Archivos cc:** Donde se escribe el código de programación del proceso que realizará el bloque, el lenguaje de programación es C++

El siguiente paso es implementar la lógica para el bloque. Esto se hace dentro de la función de trabajo que se define en el archivo fuente `Operator_impl.cc` dentro de la carpeta `lib/`. El esqueleto de `Operator_impl.cc` tiene la siguiente estructura:

```
/* -*- c++ -*- */
/*
 * Copyright 2019 <+YOU OR YOUR COMPANY+>.
 *
 * This is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation; either version 3, or (at your option)
 * any later version.
```

```

*
* This software is distributed in the hope that it will be useful,
* but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
* MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
* GNU General Public License for more details.
*
* You should have received a copy of the GNU General Public License
* along with this software; see the file COPYING. If not, write to
* the Free Software Foundation, Inc., 51 Franklin Street,
* Boston, MA 02110-1301, USA.
*/
#ifdef HAVE_CONFIG_H
#include "config.h"
#endif

#include <gnuradio/io_signature.h>
#include <gnuradio/block.h>
#include "Operador_impl.h"

namespace gr {
  namespace Tutorial {

    Operador::sptr
    Operador::make(float a, float b)
    {
      return gnuradio::get_initial_sptr
        (new Operador_impl(a,b));
    }
    /*
    * The private constructor
    */
    Operador_impl::Operador_impl(float a, float b)
      : gr::general_block("Operador",
        gr::io_signature::make2(2, 2, sizeof(float)),
        gr::io_signature::make(1, 1, sizeof(float)))
    {
    }
    /*
    * Our virtual destructor.
    */
    Operador_impl::~Operador_impl()
    {}
  }
}

```

```

int Operador_impl::general_work(int noutput_items,
    gr_vector_const_void_star &input_items,
    gr_vector_void_star &output_items)
{
    const float *in = (const float *) input_items[0];
    float *out = (float *) output_items[0];

    // Do <+signal processing+>
    R= float a + float b;
    // Tell runtime system how many output items we produced.
    return noutput_items;
}
} /* namespace Tutorial */
} /* namespace gr */

```

El esqueleto del archivo .h tiene la siguiente estructura:

```

/* -*- c++ -*- */
/*
 * Copyright 2019 <+YOU OR YOUR COMPANY+>.
 *
 * This is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation; either version 3, or (at your option)
 * any later version.
 *
 * This software is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this software; see the file COPYING. If not, write to
 * the Free Software Foundation, Inc., 51 Franklin Street,
 * Boston, MA 02110-1301, USA.
 */

#ifndef INCLUDED_USUARIO_SECUNDARIO_ENER_DETEC_IMPL_H
#define INCLUDED_USUARIO_SECUNDARIO_ENER_DETEC_IMPL_H

#include <Usuario_Secundario/ener_detec.h>
#include <stddef.h>
#include <string>

namespace gr {
    namespace Tutorial {

```

```

class Operador : public Operator
{
private:
    // Nothing to declare in this block.
    float a;
    float b;

public:
    Operator_impl(float a, float b);
    ~Operator_impl();

    // Where all the action really happens
    int general_work(int noutput_items,
        gr_vector_const_void_star &input_items,
        gr_vector_void_star &output_items);
};
} // namespace Tutorial
} // namespace gr
#endif /* INCLUDED_TUTORIAL_OPERATOR_IMPL_H */

```

El .xml proporciona la interfaz de usuario entre el módulo OOT que se muestra en el GRC y el código fuente. Además, el archivo XML define una interfaz para pasar los parámetros específicos del módulo. Por lo tanto, para acceder al módulo dentro de GRC, es importante modificar los archivos .xml manualmente. El archivo XML para nuestro bloque se denomina *Tutorial\_Operador.xml*

```

<?xml version="1.0"?>
<block>
  <name>Bloque Operador</name>
  <key>Tutorial_Operador</key>
  <category>Tutorial</category>
  <import>import Tutorial</import>
  <make>Tutorial.Operador($a, b)</make>
  <param>
    <name>A</name>
    <key>a</key>
    <value>True</value>
    <type>float</type>
    <option>
      <name>Yes</name>
      <key>True</key>
    </option>
    <option>
      <name>No</name>
      <key>False</key>

```

```
</option>
</param>
<sink>
  <name>in0</name>
  <type>complex</type>
</sink>
<sink>
  <name>in1</name>
  <type>complex</type>
</sink>
<source>
  <name>out</name>
  <type>byte</type>
</source>
</block>
```

Finalmente ejecutamos los siguientes comandos para implementar el bloque creado a la Librería del entorno GNU Radio.

```
$ mkdir build
$ cd build/
$ cmake ../
$ make
$ sudo make install
$ sudo ldconfig
```



## 11.4. ANEXO IV: CODIGO FUENTE: DETECTOR DE ENERGIA

```
/* -*- c++ -*- */
/*
 * Copyright 2019 <+YOU OR YOUR COMPANY+>.
 *
 * This is free software; you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation; either version 3, or (at your option)
 * any later version.
 *
 * This software is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this software; see the file COPYING. If not, write to
 * the Free Software Foundation, Inc., 51 Franklin Street,
 * Boston, MA 02110-1301, USA.
 */

#ifdef HAVE_CONFIG_H
#include "config.h"
#endif

#include <gnuradio/io_signature.h>
#include <gnuradio/block.h>
#include "ener_detec_impl.h"
#include <pmt/pmt_sugar.h>
#include <iomanip>

namespace gr {
  namespace Energy_Detect {

    ener_detec::sptr
    ener_detec::make(float pfa, float incerti_noise, float pot_noise, float coef_decim)
    {
      return gnuradio::get_initial_sptr
        (new ener_detec_impl(pfa, incerti_noise, pot_noise, coef_decim));
    }
  }
}
/*
 * The private constructor
```

```

*/
ener_detec_impl::ener_detec_impl(float pfa, float incerti_noise, float pot_noise, float
coef_decim)
: gr::sync_block("ener_detec",
    gr::io_signature::make(1, 1, sizeof(float)),
    gr::io_signature::make(1, 1, sizeof(float)))
{
    set_pfa(pfa);
    set_incerti_noise(incerti_noise);
    set_pot_noise(pot_noise);
    set_coef_decim(coef_decim);
}
/*
* Our virtual destructor.
*/
ener_detec_impl::~ener_detec_impl()
{
}

float ener_detec_impl::pfa(){return d_pfa;}
float ener_detec_impl::incerti_noise(){return d_incerti_noise;}
float ener_detec_impl::pot_noise(){return d_pot_noise;}
float ener_detec_impl::coef_decim(){return d_coef_decim;}

void ener_detec_impl::set_pfa(float pfa){d_pfa = pfa;}
void ener_detec_impl::set_incerti_noise(float incerti_noise){d_incerti_noise =
incerti_noise;}
void ener_detec_impl::set_pot_noise(float pot_noise){d_pot_noise = pot_noise;}
void ener_detec_impl::set_coef_decim(float coef_decim){d_coef_decim =
coef_decim;}

int ener_detec_impl::work(int noutput_items,
    gr_vector_const_void_star &input_items,
    gr_vector_void_star &output_items)
{
    const float *in = (const float *) input_items[0];
    float *out = (float *) output_items[0];

    // Do <+signal processing+>
    float pii=3.14159265359; float Q; float umbral; float count=199;
    Q=(1/(2*pii))*sqrt(pii/2)*erfc(pfa()/sqrt(2));
    umbral=pot_noise()*(1+incerti_noise())*(1+((pow(Q,-
1))/(sqrt((coef_decim()/2))))));

```

```

std::string d_answer1="Buscando Usuario Primario";
std::string d_answer2="Usuario Primario Encontrado";
d_answer.clear();
for (int i = 0; i < noutput_items; i++){
    if(in[i]<umbral){
        if(count>=200){
            out[i]=0;
            d_answer.assign(d_answer1);
            count = count-1;
        }
        count = count + 1;
        if (count < 200){
            goto y;
        }
    }
    if(in[i]>umbral){
        y:
        out[i]=1;
        d_answer.assign(d_answer2);
        if(count>=200){
            count = 0;
        }
    }
}
// Tell runtime system how many output items we produced.
return noutput_items;
}

} /* namespace Energy_Detect */
} /* namespace gr */

```

## 11.5. ANEXO V: ANALISIS ESPECTRAL



## 11.6. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN BASADO EN PRINCIPIOS DE RADIO COGNITIVA

