



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTOS DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIO CONGNITIVA  
PARA LA DETECCIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIAS TVWS**

**AUTORA: ARAUJO TORRES, MICHELLE ESTEFANÍA**

**DIRECTOR: DR. OLMEDO CIFUENTES, GONZALO FERNANDO**

**SANGOLQUÍ**

**2018**

## CERTIFICACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIO COGNITIVA PARA LA DETECCIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIAS TVWS” fue realizado por la señorita *ARAUJO TORRES, MICHELLE ESTEFANÍA*, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Agosto del 2018

Ph.D. Gonzalo Olmedo Cifuentes

C.C: 1711696342

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



### DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

### CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *ARAUJO TORRES, MICHELLE ESTEFANÍA*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIO COGNITIVA PARA LA DETECCIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIAS TVWS** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 29 de agosto 2018

---

**Michelle Estefanía Araujo Torres**

C.C.: 171881410-4

## AUTORIZACIÓN



### DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

### CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

#### AUTORIZACIÓN

Yo, **ARAUJO TORRES, MICHELLE ESTEFANÍA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIO COGNITIVA PARA LA DETECCIÓN DE BANDAS DE FRECUENCIAS TVWS** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 29 de agosto 2018

---

**Michelle Estefanía Araujo Torres**

C.C: 171881410-4

## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación simboliza el final de una etapa muy importante en mi vida, llena de grandes esfuerzos, sacrificios y logros, por tal motivo quiero dedicarlo con mucho cariño a mis padres a quienes amo infinitamente y que siempre estuvieron brindándome su apoyo incondicional desde el primer momento hasta alcanzar esta meta; a mi papi Víctor Hugo Araujo de quien siempre recibí una palabra de aliento en los momentos difíciles y que es el más grande ejemplo de rectitud, constancia y humildad; a mi mami Juanita Torres que es el pilar fundamental de mi vida y quien con sus sabios consejos siempre supo guiarme y llenarme de fortaleza para no decaer y seguir adelante.

A mis hermanitas Karol y Daniela a quienes de igual manera amo mucho y que siempre estuvieron junto a mí para brindarme un abrazo y un consejo, les dedico este trabajo como demostración que el esfuerzo, la perseverancia y la disciplina nos permiten alcanzar todos nuestros objetivos y por supuesto el cariño y apoyo de la familia.

De manera especial, a mi novio Vlady a quien amo con el corazón y que a la vez ha sido mi mejor amigo y mi compañero, lo conocí en medio de esta etapa universitaria y desde entonces siempre ha estado junto a mí en los buenos y malos momentos brindándome su compañía, su apoyo constante, sus conocimientos y su comprensión; sus palabras de ánimo, su confianza en mí, su alegría y su amor me han ayudado a culminar esta etapa por lo que con mucho amor le dedico este trabajo.

*Michelle Estefanía Araujo Torres*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por su infinita misericordia y bondad, por regalarme la vida, por darme fortaleza e iluminarme en cada uno de mis pasos, le agradezco también por la hermosa familia que me regaló y por las personas especiales que puso en mi camino a lo largo de esta etapa universitaria.

Agradezco a mis padres a quienes valoró mucho por su esfuerzo y el trabajo diario que han realizado para apoyarme en este camino, gracias por su infinito cariño, por nunca soltar mi mano y confiar en mí, gracias por ser mi soporte en los momentos más difíciles, por sus consejos y amor incondicional.

De manera especial, agradezco a mi jefe Adrián Bonilla, por la confianza depositada en mí y por brindarme la oportunidad de continuar trabajado mientras culminaba mis estudios, sin su apoyo tampoco hubiera alcanzado esta meta y por su puesto a mis amigos y compañeros de trabajo de quienes también recibí palabras de ánimo para seguir adelante.

A mi director de Tesis, PhD. Gonzalo Olmedo, a quien admiro mucho por su calidad de persona y como el profesional que es, ha sido uno de los mejores profesores que eh tenido durante este ciclo universitario, gracias por sus conocimientos, por su paciencia y por su apoyo para lograr el desarrollo del presente proyecto de investigación.

*Michelle Estefanía Araujo Torres*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Justificación e Importancia.....	3
1.3 Alcance del Proyecto.....	5
1.4 Objetivos .....	6
1.4.1 Objetivo General .....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Metodología .....	7
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>9</b>
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>9</b>
2.1 Introducción .....	9
2.2. Radio Cognitiva.....	9

2.2.1 Definición.....	9
2.2.2 Funciones Principales de la Radio Cognitiva.....	11
2.2.3 Ciclo de la Radio Cognitiva .....	12
2.2.5 Acceso Dinámico al Espectro.....	13
2.2.3 Conocimiento Multidimensional del Espectro .....	17
2.3. Modelado del Sensado del Espectro.....	18
2.4. Métodos de Acceso al Espectro.....	19
2.4.1 Detección Local del Espectro.....	20
2.4.2 Método Basado en el Detector de Energía .....	21
2.4.2.1 Cálculo del Umbral para el Detector de Energía.....	23
2.4.2.2 Incertidumbre en Potencia del Piso de Ruido .....	25
2.4.3 Método de Detección Cicloestacionario .....	26
2.5 Estándar ISDB-Tb .....	29
2.5.2 Definición y Esquema de Funcionamiento .....	30
2.5.3 Características de ISDB-Tb.....	31
2.5.4 Tecnología de Transmisión OFDM.....	31
2.5.5 Prefijo Cíclico .....	32
2.6 Radio Definida por Software.....	36
2.6.1 Definición.....	37
2.6.2 USRP 2920 .....	37
2.6.2.1. Panel Frontal y Conectores .....	38
2.6.2.2 Arquitectura.....	39
2.6.2.3 Tarjeta Madre FPGA .....	40
2.6.2.4 Tarjeta Hija.....	41

2.6.2.5 Conexiones con el USRP-2920 .....	43
2.6.3 Software .....	45
2.6.3.1 Matlab ®.....	45
2.6.3.2 LabVIEW ® .....	47
2.6.3.3 GNU Radio.....	49
2.6.4 Determinación del Lenguaje de Desarrollo a Implementar.....	50
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>53</b>
<b>3. DISEÑO E IMPLMENCIÓN DEL SISTEMA DE RADIO COGNITIVA .....</b>	<b>53</b>
3.1 Introducción .....	53
3.2 Consideraciones para el Diseño .....	53
3.2.1 Métodos de Detección Seleccionados .....	53
3.1.2 Consideraciones Generales para el Diseño del Detector de Energía.....	55
3.1.3 Porción del Espectro Considerado para el Sensado .....	56
3.1.4 Consideraciones para el Diseño del Detector Cicloestacionario.....	58
3.2. Arquitectura del Sistema .....	59
3.3. Algoritmo del Sistema de Radio Cognitiva.....	60
3.4 Algoritmo del Detector de Energía .....	66
3.5 Algoritmo del Detector Cicloestacionario.....	69
3.5.1 Led Detector de Señal ISDB-Tb .....	74
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>76</b>
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
4.1 Introducción .....	76
4.2 Ejecución del Sistema de Radio Cognitiva en ESPE – Latacunga.....	76
4.3 Ejecución del Sistema de Radio Cognitivo en ESPE – Sangolquí.....	80

4.4 Ejecución del Sistema de Radio Cognitivo en Quito .....88

4.5 Análisis General del Desempeño del Sistema de Radio Cognitiva.....97

**CAPÍTULO V .....100**

**5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....100**

5.1. Conclusiones ..... 100

5.2. Recomendaciones..... 102

5.3. Trabajos Futuros de Investigación ..... 103

**BIBLIOGRAFÍA .....104**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Conocimiento multidimensional del espectro y oportunidades de sensado</i> .....	17
<b>Tabla 2.</b> <i>Número de portadoras por modo de operación</i> .....	33
<b>Tabla 3.</b> <i>Parámetros de ISDB-Tb</i> .....	36
<b>Tabla 4.</b> <i>Receptor USRP</i> .....	43
<b>Tabla 5.</b> <i>Parámetros de entrada del sistema</i> .....	55
<b>Tabla 6.</b> <i>Canalización de las bandas UHF</i> .....	57
<b>Tabla 7.</b> <i>Canal más limpio en Latacunga</i> .....	79
<b>Tabla 8.</b> <i>Nivel de energía del canal 25</i> .....	80
<b>Tabla 9.</b> <i>Estaciones RTV para Quito y Sangolquí</i> .....	81
<b>Tabla 10.</b> <i>Detección de canales con señal ISDB-Tb al variar la ganancia</i> .....	83
<b>Tabla 11.</b> <i>Resultados manteniendo la misma ganancia y número de símbolos</i> .....	84
<b>Tabla 12.</b> <i>Resultados del canal con menor interferencia</i> .....	88
<b>Tabla 13.</b> <i>Canales ocupados obtenidos con 4 símbolos, 0dB y 30dB</i> .....	90
<b>Tabla 14.</b> <i>Canales ocupados obtenidos con 2 símbolos, 0dB y 30dB</i> .....	93
<b>Tabla 15.</b> <i>Resultados del canal más limpio por cada ejecución</i> .....	97
<b>Tabla 16.</b> <i>Parámetros de la detección ISDB-Tb</i> .....	98
<b>Tabla 17.</b> <i>Frecuencias más limpias en los distintos escenarios</i> .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama funcional de un CR .....	10
<b>Figura 2.</b> Funcionalidades de un radio cognitivo .....	11
<b>Figura 3.</b> Radio cognitivo en función de receptor.....	11
<b>Figura 4.</b> Ciclo cognitivo básico .....	12
<b>Figura 5.</b> Representación del DSA en los espacios en blanco .....	14
<b>Figura 6.</b> Ciclo cognitivo simplificado.....	14
<b>Figura 7.</b> Mecanismo de decisión espectral .....	16
<b>Figura 8.</b> Métodos de identificación de las oportunidades de acceso al espectro .....	20
<b>Figura 9.</b> Diagrama de bloques del detector de energía.....	22
<b>Figura 10.</b> Representación gráfica de las probabilidades.....	24
<b>Figura 11.</b> Estructura de la señal OFDM con CP.....	27
<b>Figura 12.</b> Picos de inicio de símbolo OFDM.....	29
<b>Figura 13.</b> Sistema ISDB-Tb.....	30
<b>Figura 14.</b> Características del estándar ISDB-Tb.....	31
<b>Figura 15.</b> Símbolo OFDM y copia del CP .....	32
<b>Figura 16.</b> Segmentación del canal y ancho de banda.....	34
<b>Figura 17.</b> USRP 2920 y conexiones .....	38
<b>Figura 18.</b> Panel frontal del USRP-2920.....	39
<b>Figura 19.</b> Diagrama de bloques del USRP-2920 .....	40
<b>Figura 20.</b> Antena VERT400 .....	40
<b>Figura 21.</b> Funcionamiento de la tarjeta madre.....	41

<b>Figura 22.</b> Función realizada por la placa hija .....	42
<b>Figura 23.</b> Formas de establecer la comunicación con el USRP-2920 .....	44
<b>Figura 24.</b> Comparaciones de los firmwares del USRP .....	51
<b>Figura 25.</b> Arreglo de portadoras de la señal OFDM para señales TDT.....	56
<b>Figura 26.</b> Escenario del sistema implementado.....	59
<b>Figura 27.</b> Diagrama de flujo del sistema de radio cognitiva.....	60
<b>Figura 28.</b> Cluster USRP y OFDM .....	61
<b>Figura 29.</b> Cluster de salida USRP1 y OFDM1 .....	63
<b>Figura 30.</b> Función <i>Data acquisition.vi</i> .....	64
<b>Figura 31.</b> Etapa de detección .....	64
<b>Figura 32.</b> Función Array (SUBVI).vi.....	65
<b>Figura 33.</b> Interfaz frontal .....	66
<b>Figura 34.</b> Diagrama de flujo del Detector de Energía .....	68
<b>Figura 35.</b> Diagrama de flujo del detector cicloestacionario .....	70
<b>Figura 36.</b> Gráfica de Autocorrelación.....	71
<b>Figura 37.</b> Diagrama de flujo del detector de señal ISDB-Tb.....	73
<b>Figura 38.</b> Parámetros del detector IDDB-Tb y gráfica de la señal .....	74
<b>Figura 39.</b> Validación del led detector ISDB-Tb .....	74
<b>Figura 40.</b> Escenario de ejecución - Latacunga .....	76
<b>Figura 41.</b> Ejecución del sistema en Latacunga .....	78
<b>Figura 42.</b> Escenario de ejecución –ESPE Sangolquí .....	80
<b>Figura 43.</b> Ejecución del sistema en Sangolqui.....	82
<b>Figura 44.</b> Resultados obtenidos en la primera ejecución.....	85

<b>Figura 45.</b> Resultados obtenidos en la segunda ejecución .....	86
<b>Figura 46.</b> Escenario de ejecución Quito .....	88
<b>Figura 47.</b> Ejecución del Sistema en Quito .....	89
<b>Figura 48.</b> Picos de la señal del canal 35 con intervalo de guarda de 1/8 .....	91
<b>Figura 49.</b> Picos de la señal del canal 37 con intervalo de guarda de 1/16 .....	92
<b>Figura 50.</b> Picos de la señal del canal 38 con intervalo de guarda de 1/16 .....	92
<b>Figura 51.</b> Picos de la señal de los canales 27 y 29.....	94
<b>Figura 52.</b> Picos de la señal del canal 22 .....	96

## RESUMEN

En el presente trabajo se ha propuesto la implementación de un sistema de radio cognitiva implementado en el dispositivo USRP (en inglés, *Universal Software Radio Peripheral*), el sistema de detección desarrollado se centra en identificar la presencia o ausencia de Usuarios Primarios con la finalidad de establecer cuál es el canal más limpio que puede ser utilizado oportunamente por un Usuario Secundario sin ocasionar interferencias, para ello se tomó como fundamento teórico dos mecanismos de detección: Método Detector de Energía y Método Cicloestacionario, el primer método se enfoca en calcular la energía de cada canal y compararla con un umbral, mientras que el segundo método establece un umbral basado en la autocorrelación de la señal, que permite discriminar un usuario primario de otro tipo de señal e incluso del ruido, proporcionándole de esta forma mayor robustez al sistema. El algoritmo fue desarrollado bajo el software de programación de *LabVIEW*, el panel frontal del programa muestra una matriz con los valores de las frecuencias de cada canal ordenados en función de la energía, se muestra con color rojo los canales que están siendo ocupados por un usuario primario y que por ende no pueden ser utilizados, de igual forma se presenta el canal más limpio. Es importante destacar que las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo en los siguientes escenarios: ESPE matriz Sangolquí, ESPE extensión Latacunga y ESPE de idiomas campus Quito, en donde se obtuvieron distintos resultados los mismos que permitieron corroborar el correcto funcionamiento del sistema.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **CICLOESTACIONARIO**
- **USRP**
- **LABVIEW**

## **ABSTRACT**

In the present work the implementation of a cognitive radio system implemented in the USRP device (in English, Universal Software Radio Peripheral) has been proposed, the developed detection system is focused on identifying the presence or absence of Primary Users in order to establish what is the cleanest channel that can be used by a Secondary User opportunely without causing interference, for which two detection mechanisms were taken as a theoretical basis: Energy Detector Method and Cyclo-Stationary Method, the first method focuses on calculating the energy of each channel and compare it with a threshold, while the second method establishes a threshold based on the autocorrelation of the signal, which allows discriminating a primary user of another type of signal and even the noise, thus providing greater robustness to the system. The algorithm was developed under the programming software LabVIEW, the front panel of the program shows a matrix with the values of the frequencies of each channel ordered according to the energy, it is shown with red color the channels that are being occupied by a user primary and therefore can not be used, the same way the cleanest channel is presented. It is important to highlight that the operation tests were carried out in the following scenarios: ESPE parent Sangolquí, ESPE extension Latacunga and language ESPE campus Quito, where different results were obtained that allowed to corroborate the correct functioning of the system.

### **KEYWORDS:**

- **CYCLESTATIONARY**
- **USRP**
- **LABVIEW**

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El desarrollo de la tecnología en los últimos años ha ocasionado un aumento en el uso de las telecomunicaciones por parte de la sociedad lo cual conlleva directamente a una mayor explotación del espectro radioeléctrico, este hecho sumado a la problemática actual del ineficiente uso del espectro ocasiona que este recurso natural limitado se vuelva más escaso y costoso por lo que la optimización del mismo se torna algo prioritario.

La literatura actual presenta ejemplos de otros países en los que se ha podido comprobar la ineficiente utilización del espectro radioeléctrico, un ejemplo de ello, es el estudio realizado por la Spectrum Policy Task Force de EEUU, donde se muestra que el tiempo de utilización del espectro varía entre 15% y 85% (Federal Communications Commission, 2002). Con este resultado se concluye que el mismo se encuentra altamente desaprovechado a pesar de que la gran mayoría de las bandas de frecuencias ya se encuentran asignadas (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014).

Otro ejemplo es el estudio realizado en Doha (QATAR) el cual permitió determinar el porcentaje de disponibilidad espectral, durante un lapso de tiempo de tres días en la banda comprendida desde los 700 hasta 3000 MHz, en donde se determinó que el porcentaje de utilización del espectro se encuentra alrededor del 14.6 % a 15.7% (Cruz, 2017).

En Ecuador y en América Latina no se tiene estudios similares que muestren el porcentaje de ocupación del espectro, sin embargo, se debe considerar que en nuestro país la transición a la televisión digital liberará grandes áreas del espectro, en el rango comprendido entre 50 MHz y 700 MHz, lo cual lleva a la necesidad de aplicar métodos de sensado para identificar los posibles

espacios en blanco del espectro radioeléctrico en la banda de TV, que puedan ser ocupados sin causar interferencia con un usuario licenciado (Television, 2015).

Los reportes obtenidos de los ejemplos internacionales, muestran que existe una amplia disponibilidad espectral para la implementación de nuevas tecnologías que ayuden a administrar y hacer un mejor uso del espectro disponible.

Es así que surge el concepto de redes cognitivas como solución al problema de la congestión espectral, ya que estas redes se caracterizan por permitir un uso eficiente de las bandas de frecuencia que no están siendo usadas por los usuarios licenciados (conocidos como usuarios primarios). En el año 2003, la FCC (en inglés, *Federal Communications Commission*) lanzó un *Notice of Proposed Rule Making* (NPRM) apoyando el uso de las redes cognitivas como posible tecnología que permita el uso compartido del espectro (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014).

De igual forma, mediante una conferencia desarrollada por la ITU (en inglés, *International Telecommunication Union*) en el año 2013, se motivó la utilización de radio definida por software y radio cognitiva para optimizar el uso del espectro.

Un sistema cognitivo básicamente permite definir a un usuario primario como aquel con mayor prioridad o derechos reservados sobre un determinado ancho de banda, en tanto que el usuario secundario tiene una baja prioridad de uso del espectro y no debe interferir en ningún momento con el usuario primario, en tal sentido un usuario secundario debe poseer capacidades de radio cognitivo, en especial la función de sensado del espectro con la finalidad de ser capaz de detectar cuando un canal se encuentre libre.

Con todo lo expuesto anteriormente, disponer de un sistema que permita detectar espacios en blanco es de gran utilidad para lograr administrar y aprovechar de forma oportuna el espectro radioeléctrico, para ello se profundizó en dos métodos de detección: Energía y Cicloestacionario,

ambos centrados de forma tal que sea posible medir los niveles de energía de un canal y determinar si existe la presencia de un usuario primario.

La implementación de dichos métodos fue realizada mediante la programación utilizando el software *LabVIEW* y las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo con el dispositivo de radiofrecuencia USRP en dos escenarios distintos, ESPE Sangolquí y Latacunga de tal manera que se pueda analizar el comportamiento del sistema en cada entorno.

## **1.2 Justificación e Importancia**

En los últimos años, la introducción y evolución de las nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas han ocasionado que las porciones útiles del espectro radioeléctrico se vuelvan más escasas y a la vez costosas, a partir de ello surge la necesidad de mejorar la eficiencia espectral de forma tal que sea posible optimizar al máximo este recurso, implementar un sistema que permita encontrar e identificar espacios en blanco en la banda de TV sería la herramienta clave para la solución a la actual congestión en el espectro.

El sistema de radio cognitiva implementado trabaja en la banda de frecuencias UHF desde los 473,143MHz hasta los 695,143MHz y su aporte básicamente se enfoca en identificar el canal más limpio, que, por ende, será el más óptimo para una transmisión sin interferencias.

Se conoce que tras el apagón analógico se liberarán grandes áreas del espectro en el Ecuador, lo que permitirá hacer una redistribución del mismo en cada región del país, agrupando de manera más eficiente los nuevos canales digitales en una porción del espectro y liberando las viejas frecuencias de canales analógicos para un uso diferente en otra porción del espectro que aún está en proceso de definición. Esta nueva porción del espectro que será liberada en cada región del país se considerará una ganancia de espectro para otros usos, dado que puede apoyar nuevos servicios

digitales y generar una fuerte suma de ingresos extra para toda administración pública, es así que el presente proyecto será de gran utilidad para la detección y reutilización de los canales liberados, ya que permitirá que usuarios secundarios accedan oportunamente el espectro radioeléctrico sin interferir a los usuarios primarios (Robles, 2015).

Por otro lado, en las zonas rurales los enlaces microondas han permitido proporcionar la comunicación, pero las características geográficas propias del terreno son la principal limitante para la implementación de esta tecnología ya que para establecer una conexión exitosa se requiere que exista línea de vista (LOS), en este caso es necesario disponer de torres altas para proporcionar esta conexión de línea de vista y es allí donde la implementación se vuelve costosa y poco viable.

Otras tecnologías tales como WiMAX y Wi-Fi que también han sido implementadas en estas zonas no ofrecen mayor capacidad de ancho de banda, debido a la existencia de obstáculos tales como árboles y terrenos difíciles lo cual minimiza el alcance y cobertura de la conexión.

Referente a lo expuesto, este proyecto de investigación ofrece la posibilidad de utilizar la tecnología TVWS (en inglés, *TV White Space*), pues gracias a la radio cognitiva se puede hacer un barrido de frecuencias y detectar el canal más libre a través del cual se pueda establecer la transmisión, de esa forma es posible hacer un mejor uso del espectro radioeléctrico; así como reutilizar los espacios de frecuencias liberados con la transición a la televisión digital terrestre, esto último permitirá mejorar la comunicación en las zonas rurales aprovechando las características favorables de propagación que poseen las bandas de TV VHF y UHF, ya que estas señales tienen la capacidad de penetrar follajes y funcionan adecuadamente en ese tipo de terrenos con lo que se lograría proporcionar un mayor acceso inalámbrico de banda ancha en estas zonas.

### 1.3 Alcance del Proyecto

Con el presente trabajo de investigación se obtuvo un sistema detector de frecuencias TVWS que permitirá realizar un barrido de frecuencias en la banda de TV UHF (en inglés, *Ultra High Frequency*) e identificar el canal más libre que puede ser ocupada por un usuario secundario, adicional a ello, el sistema mostrará una matriz con todos los valores de potencias calculados por canal y una matriz con los canales ordenados de menor a mayor en función a la potencia de cada uno, con la finalidad de tener más opciones en caso que el canal que inicialmente se determinó el más libre sea ocupado de un momento a otro por un usuario primario. Adicional a ello, se muestra una matriz con todos los valores de frecuencias ordenados de forma ascendente, de igual forma en función de la potencia donde se identifican con color rojo los canales que están transmitiendo señal ISDB-Tb y que por ende no podrán ser ocupados.

Finalmente, el sistema proporciona una base de datos en Excel donde se almacena la fecha y hora de la ejecución, los canales con su respectiva potencia media y se especifica la banda de frecuencia que está libre y es apropiada para la transmisión, de tal manera que se podrán realizar pruebas de análisis a diferentes horas del día y comprobar que ciertos canales no son ocupados de forma permanente sino durante ciertos intervalos de tiempo, por ende, pueden ser subutilizados.

El sistema está diseñado bajo una interfaz interactiva, de fácil manejo y entendimiento para el usuario final. En el campo de la investigación será una base para el desarrollo de nuevas investigaciones encaminadas a la implementación de redes inalámbricas bajo el estándar IEEE 802.11af pues el sistema proporcionará una base de datos con los canales disponibles y la frecuencia más clara que puede ser utilizada para establecer la transmisión bajo dicho estándar.

Para corroborar el funcionamiento y la eficiencia del proyecto implementado se realizaron pruebas experimentales en dos escenarios, ESPE Sangolquí y ESPE Latacunga obteniendo resultados favorables, los cuales se muestran a detalle en el Capítulo 4.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

- Implementar un sistema de Radio Cognitiva a través de una plataforma de radio definido por software USRP para detectar de forma automática canales libres en la banda de frecuencias de TV UHF.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar las características técnicas del USRP 2920 para determinar las ventajas del equipo frente a las necesidades de programación del sistema a implementar en las funcionalidades de *LaVIEW* y *GNU Radio*.
- Investigar y comprender todo el fundamento teórico referente a la radio cognitiva, sus características técnicas, arquitectura, así como el esquema y funcionamiento del ciclo cognitivo que se debe considerar para su implementación.
- Analizar y escoger cuál es el método de detección espectral más óptimo para la implementación de tal manera que el sistema de radio cognitiva ofrezca una mayor eficiencia, robustez y precisión al momento de determinar los canales libres que pueden ser ocupados para la transmisión.

- Realizar pruebas de funcionamiento que permitan analizar la eficiencia del sistema implementado en los escenarios de ESPE Sangolquí, ESPE Latacunga y ESPE de Idiomas de forma que se puedan determinar que parámetros influyeron en la detección de la mejor frecuencia.

## **1.5 Metodología**

El presente proyecto de investigación se fundamentó en dos metodologías, la primera tiene un enfoque experimental pues se centra en la implementación de un sistema basado en la radio cognitiva como herramienta para el censado del espectro radioeléctrico, todo ello con la finalidad de lograr la detección oportuna de huecos espectrales en la banda de televisión digital UHF y cuyo desarrollo y funcionamiento se determinan a través de pruebas de laboratorio.

La segunda metodología se ha desarrollado con un enfoque deductivo, pues se realizó una investigación previa del fundamento teórico, algoritmos matemáticos y demás procesos que comprenden la radio cognitiva para el desarrollo del sistema detector de frecuencias TVWS en el equipo USRP 2920. Para el cumplimiento de los objetivos del trabajo de investigación se establecen cuatro etapas que se seguirán a lo largo de todo el proceso.

La primera etapa consistió en la investigación y estudio del estado del arte referente a trabajos similares desarrollados en los últimos años tanto en nuestro país como en otros países todo ello con el objetivo de comprender la base teórica, análisis de procesos matemáticos, algoritmos desarrollados y demás temas que contribuyan a la implementación del sistema de radio cognitiva.

La segunda etapa se enfocó en las herramientas a utilizar para el diseño e implementación del proyecto de investigación, en lo referente al hardware se cuenta con el dispositivo basado en radio definida por software USRP-2920, respecto al software se efectuará un análisis previo sobre las

funcionalidades de *LabVIEW*, *Matlab* y *GNU Radio* para determinar cuál software de programación ofrecen mayor adaptabilidad para la implementación del sistema de radio cognitiva.

Adicional a ello, se tomó en consideración proyectos de investigación que hacen referencia al tema y a los lenguajes de programación indicados.

Una vez elegido el firmware de programación bajo el que se desarrollará el algoritmo, la tercera etapa consiste en la implementación del sistema de detección utilizando el dispositivo USRP-2920 y un computador considerando las características técnicas y recursos del sistema.

En la última etapa se realizó pruebas de laboratorio para verificar el funcionamiento del sistema implementado y observar la variación de frecuencias libres en los escenarios de ESPE matriz Sangolquí y ESPE extensión Latacunga.

## CAPÍTULO II

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 Introducción

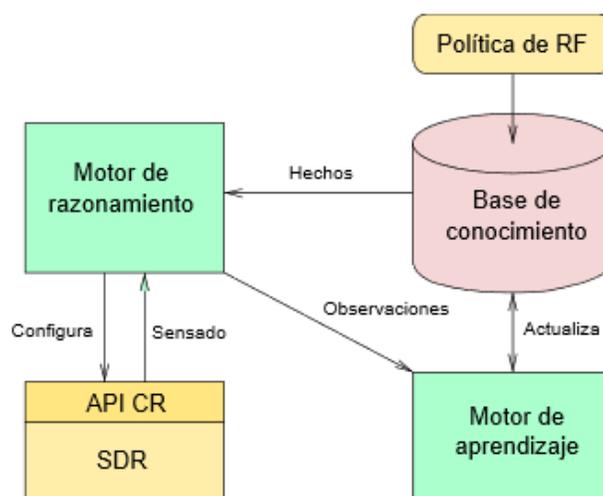
En el presente capítulo se describe todo lo referente a los conceptos teóricos y matemáticos que fueron considerados para la implementación del sistema de radio cognitiva, tales como técnicas de acceso dinámico al espectro, métodos de detección, conceptos relacionados con el estándar ISDB-Tb y un vistazo a la tecnología SDR. Un punto importante en este capítulo es el análisis para la determinación del software de programación que será utilizado en el desarrollo del proyecto.

#### 2.2. Radio Cognitiva

##### 2.2.1 Definición

El término de radio cognitiva, en inglés, *Cognitive Radio* (CR) fue presentado oficialmente por Joseph Mitola en un seminario en el KTH Royal Institute of Technology, en 1998. Más tarde, es publicado en el artículo “Cognitive radio: making software radios more personal” (Mitola & Gerald, 1999). La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) define un sistema de radio cognitivo en inglés *Cognitive Radio Systems* (CRS) como “un sistema radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite al sistema extraer información de su entorno operativo y geográfico, las políticas establecidas y su situación interna; y adaptar de manera dinámica y autónoma sus parámetros y protocolos operacionales en función de la información obtenida a fin de cumplir unos objetivos predeterminados, así como extraer enseñanzas de los resultados obtenidos” (ITU Report, 2009), en otras palabras, los CRS son conformados por equipos de radiocomunicaciones capaces de sensar el espectro radioeléctrico y determinar en qué momento y en qué bandas el mismo se encuentra disponible y en qué momentos está siendo utilizado. Estos sistemas pueden tomar

decisiones basados en políticas establecidas o programas pre-cargados que buscan optimizar los parámetros de funcionamiento con la finalidad de aprovechar de la mejor manera posible el espectro disponible, al tiempo que pueden aprender de los resultados obtenidos (Hernández & Carro, 2016). En la Figura 1 se presenta el diagrama funcional que muestra de forma gráfica las capacidades de razonamiento y aprendizaje de un CR.

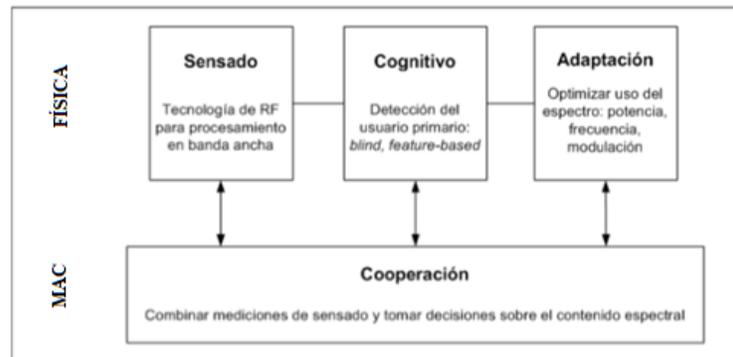


**Figura 1.** Diagrama funcional de un CR  
Fuente: (Hernández & Carro, 2016)

La idea fundamental de las redes cognitivas se centra en que los usuarios secundarios puedan utilizar de manera oportuna parte del espectro radioeléctrico no ocupado (en distintas dimensiones ya sea ubicación geográfica, intervalo de tiempo, frecuencia, etc.) por los usuarios primarios quienes tienen mayor privilegio de uso, por lo tanto, una de las características fundamentales de la radio cognitiva es la habilidad de detectar automáticamente huecos espectrales y modificar sus parámetros de operación ya sea en transmisión como en recepción con la finalidad que exista de forma concurrente un mayor número de comunicaciones.

### 2.2.2 Funciones Principales de la Radio Cognitiva

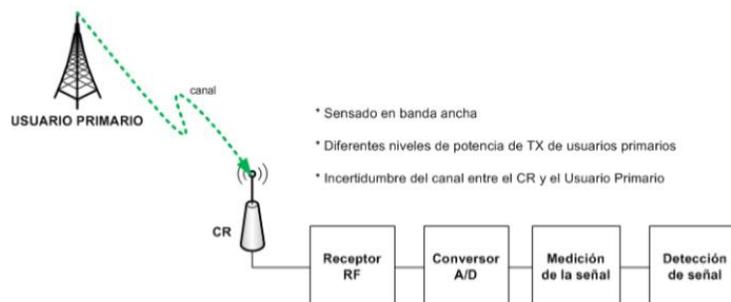
En la Figura 2 se muestran las funciones que debe cumplir la radio cognitiva las cuales están agrupadas en base a un modelo de capas:



**Figura 2.** Funcionalidades de un radio cognitivo  
Fuente: (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014)

La capa física se encarga básicamente del procesamiento de señales RF, detección de usuarios primarios y la adaptación de los parámetros de comunicación tales como potencia, frecuencia, modulación, etc., en tanto que la capa de acceso al medio se encarga de recopilar las medidas de sensado y toma decisiones en base a esta información.

En el diagrama de bloques de la Figura 3 se muestra las funciones que debe cumplir la radio cognitiva para el caso de un receptor:

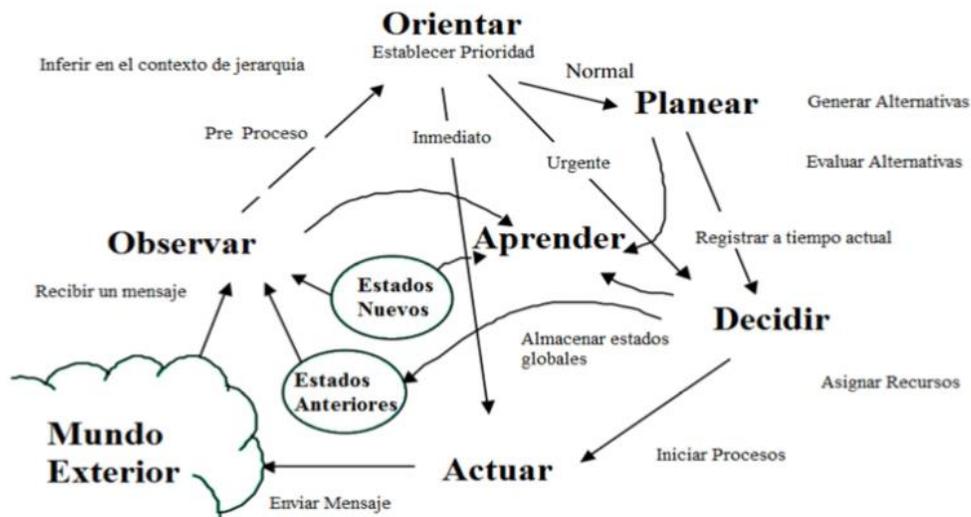


**Figura 3.** Radio cognitivo en función de receptor  
Fuente: (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014)

El sensado del espectro se puede realizar mediante dos arquitecturas las cuales se detallan a continuación:

- **Radio simple:** Esta arquitectura utiliza un *timeslot* para el sensado del espectro, la desventaja es que el *timeslot* se usa solo para el sensado mas no para la transmisión de datos por lo que no existe eficiencia en la comunicación, las ventajas son el bajo costo de los equipos y la simplicidad en la implementación.
- **Radio dual:** Utiliza un canal para la transmisión y recepción de datos y otro canal de uso exclusivo para el monitoreo del espectro, pero la mayor desventaja es el que existe un mayor consumo de energía y los equipos tienen un mayor costo.

### 2.2.3 Ciclo de la Radio Cognitiva



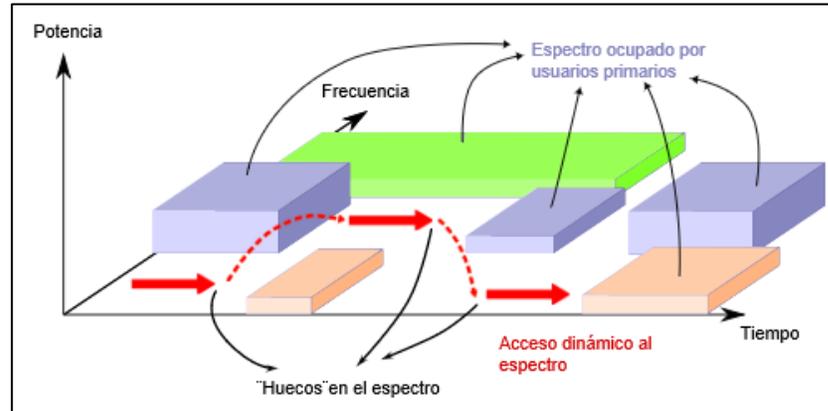
**Figura 4.** Ciclo cognitivo básico  
Fuente: (Cáceres, 2017)

El diagrama de estados de la Figura 4 permite explicar las diferentes etapas del ciclo cognitivo, en primer lugar, a través de la observación (*Observar*), el sistema va a recibir información de su entorno (*Mundo Exterior*), posterior a ello, la información recibida es analizada y pre-procesada (*Orientar*) con el fin de establecer prioridades sean estas normal, urgente o inmediata, según la prioridad definida, el sistema procede a generar y evaluar alternativas (*Planear*), se elige la que se considere más adecuada (*Decidir*) y una vez que se asigne los recursos necesarios, inicia el proceso (*Actuar*). En vista que se producen cambios en el entorno (*Mundo Exterior*) el sistema aprovecha las experiencias de las observaciones y decisiones que fueron tomadas en el pasado (*Estados Anteriores*) para aprender, en esta etapa el sistema es capaz de mejorar y lograr crear nuevos estados (*Estados Nuevos*) lo que le permite generar mejores alternativas y criterios de evaluación.

### **2.2.5 Acceso Dinámico al Espectro**

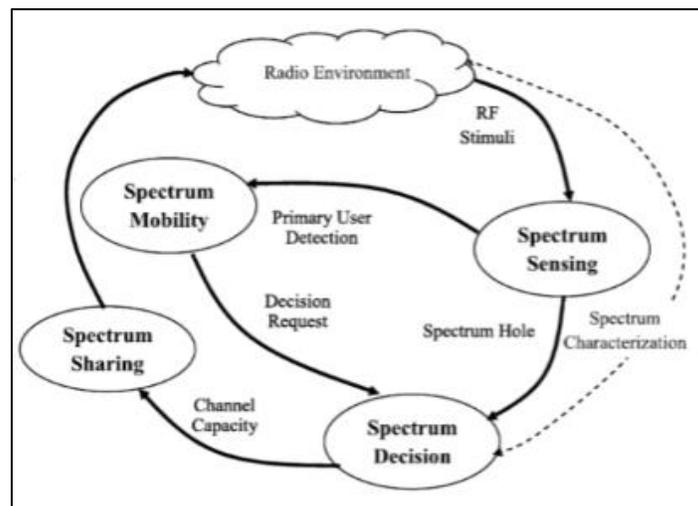
El término acceso dinámico al espectro, en inglés *Dynamic Spectrum Access* (DSA), es utilizado para describir un conjunto de tecnologías y técnicas que permiten a los dispositivos de radiocomunicaciones utilizar de forma oportunista el espectro radioeléctrico disponible. Este paradigma de compartición de espectro permite que usuarios secundarios accedan a los abundantes espacios en blanco, en inglés *White Spaces* (WS) que existen en las bandas licenciadas y pretende aliviar la escasez de espectro incrementando la capacidad de utilización del mismo (Hernández & Carro, 2016).

Cabe recalcar que los WS se pueden definir como los segmentos de tiempo-frecuencia en los que un usuario primario no está utilizando el espectro radioeléctrico y por ende este se encuentra disponible durante ese tiempo. En el gráfico de la Figura 5 se visualiza los segmentos del espectro que están siendo utilizados por usuarios primarios, así como los WS.



**Figura 5.** Representación del DSA en los espacios en blanco  
Fuente: (Hernández & Carro, 2016)

Es así que la propuesta inicial que se tuvo para el ciclo cognitivo ha sido modificada con el fin de adaptarla al concepto de Radio Cognitiva como tecnología para el acceso dinámico al espectro e incluye las fases que se muestran a continuación en el diagrama de estados de la Figura 6:



**Figura 6.** Ciclo cognitivo simplificado  
Fuente: (Cáceres, 2017)

A continuación, se detalla las cuatro fases del ciclo cognitivo para el acceso dinámico al espectro:

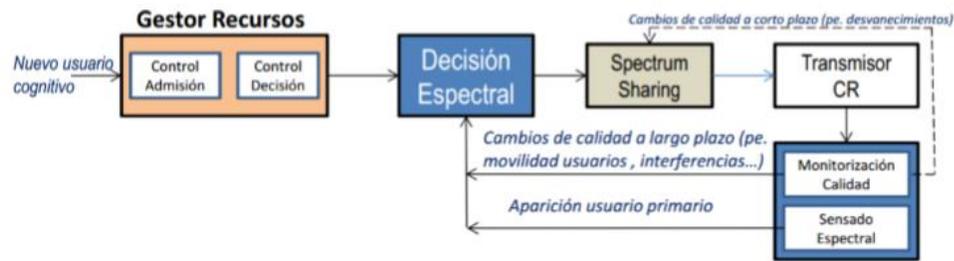
- **Spectrum Awareness**

Esta primera fase permite al sistema tener un conocimiento del espectro para lograr extraer la información principal sobre el entorno radio de tal manera que sea posible rastrear de forma inteligente las porciones del espectro radioeléctrico que están disponibles y detectar la aparición de usuarios primarios cuando el usuario secundario opera en una banda licenciada con la finalidad de evitar interferencias negativas con otros usuarios.

- **Spectrum Selection**

Es la función encargada de seleccionar el mejor canal disponible para ser usado por parte los usuarios cognitivos (secundarios), es así que la selección del espectro comprende dos pasos:

- **Análisis del Espectro:** Este proceso permite identificar las características de cada una de las bandas o huecos espectrales disponibles, a través de determinadas métricas tales como el retardo, capacidad, ancho de banda, nivel de interferencia y patrones de uso del canal, con la finalidad de evaluar las ventajas o inconvenientes de usar dichas bandas.
- **Decisión sobre el uso del Espectro:** Esta etapa se encarga de comparar las características de cada hueco espectral disponible con las requeridas por el usuario secundario para decidir cuál es la mejor opción. Esta decisión no solo se realiza a la partir de las características métricas de los canales libres sino también considerando requisitos de QoS y políticas tales como, costo económico que puede implicar el acceso a la banda, prohibición de ocupación debido a que las bandas son destinadas a usos militares, etc. En la Figura 7 se muestra el diagrama que ilustra el mecanismo de decisión espectral.



**Figura 7.** Mecanismo de decisión espectral

Fuente: (Perejil, 2016)

- **Spectrum Sharing**

Este mecanismo es responsable de proporcionar el acceso equitativo y justo para todos los usuarios secundarios sin interferir en las transmisiones de los usuarios con licencia, así pues, cuando múltiples usuarios secundarios comparten una misma banda de frecuencia, el acceso al espectro debe coordinarse entre ellos de modo que se minimicen las colisiones y la interferencia mutua. Es importante mencionar que para la compartición del espectro se debe tomando en consideración cuatro aspectos tales como la infraestructura, el algoritmo de compartición espectral, la técnica de acceso al espectro y el alcance (Perejil, 2016).

- **Spectrum Mobility**

La movilidad espectral es la función encargada de evitar la interferencia con los usuarios primarios, es así que cuando en un sistema de radio cognitivo se detecta la presencia de un usuario con licencia en un canal ocupado, dicho canal debe ser liberado de manera inmediata por parte de los usuarios secundarios quienes desocupan el radio canal y se desplazan a un canal alternativo, todo este proceso debe ser realizado de manera imperceptible.

### 2.2.3 Conocimiento Multidimensional del Espectro

Tras lo expuesto en la sección anterior, se puede decir que una de las características fundamentales de la radio cognitiva es la habilidad de detectar automáticamente huecos espectrales en distintas dimensiones, tales como frecuencia, tiempo, ubicación geográfica o código y modificar sus parámetros de operación ya sea en transmisión como en recepción para lograr que exista un mayor número de comunicaciones. Es así que el uso de dichas dimensiones es primordial ya que aumenta significativamente la probabilidad de encontrar canales libres, aunque ocasiona que incremente la complejidad del sistema. En la Tabla 1, se muestra un resumen de las distintas dimensiones y oportunidades de sensado:

**Tabla 1.**

*Conocimiento multidimensional del espectro y oportunidades de sensado*

<b>Dimensión</b>	<b>¿Que es necesario sensar?</b>	<b>Comentarios</b>
<b>Frecuencia</b>	Oportunidad espectral en el dominio de la frecuencia	Una oportunidad espectral en esta dimensión requiere que no todas las bandas estén usadas al mismo tiempo.
<b>Tiempo</b>	Oportunidad espectral en el tiempo	Se refiere a la habilidad de utilizar una banda del espectro en el tiempo, es decir, la banda no está en uso constante.
<b>Espacio geográfico</b>	Ubicación y distancia de los usuarios primarios	El espectro se encuentra disponible en ciertas zonas geográficas mientras que está ocupado en otras. Un subconjunto del espacio geográfico puede ser el ángulo de transmisión: si un usuario primario se encuentra transmitiendo en cierta dirección, los usuarios secundarios pueden transmitir en otras direcciones sin introducir interferencia.
<b>Código</b>	<i>Scrambling codes</i> utilizados por el usuario primario	Utilizando códigos ortogonales es posibles transmisiones simultáneas sin interferir con usuarios primarios.

Fuente: (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014)

### 2.3. Modelado del Sensado del Espectro

Para modelar el sensado del espectro se debe considerar las dos hipótesis que se muestran en las ecuaciones (2.1) y (2.2):

$$H_0: y(t) = n(t) , \quad (2.1)$$

$$H_1: y(t) = s(t) + n(t) , \quad (2.2)$$

donde:

$y(t)$ : Señal recibida

$s(t)$ : Señal transmitida por un usuario primario

$n(t)$ : Ruido

$H_0$ : Representa ausencia de usuario primario

$H_1$ : Representa la presencia de un usuario primario

Para realizar la detección, en primer lugar se establece un umbral ( $\lambda$ ), luego se compara el valor de un estadístico que se asocia al método de sensado utilizado contra el umbral definido. Para evaluar el comportamiento de un determinado método de detección se define la probabilidad de detección ( $P_d$ ) y probabilidad de falsa alarma ( $P_{fa}$ ) las cuales se muestran en las ecuaciones (2.3) y (2.4) respectivamente:

$$P_d = P(T_y > \lambda) |_{H_1} \quad (2.3)$$

$$P_{fa} = P(T_y > \lambda) |_{H_0} \quad (2.4)$$

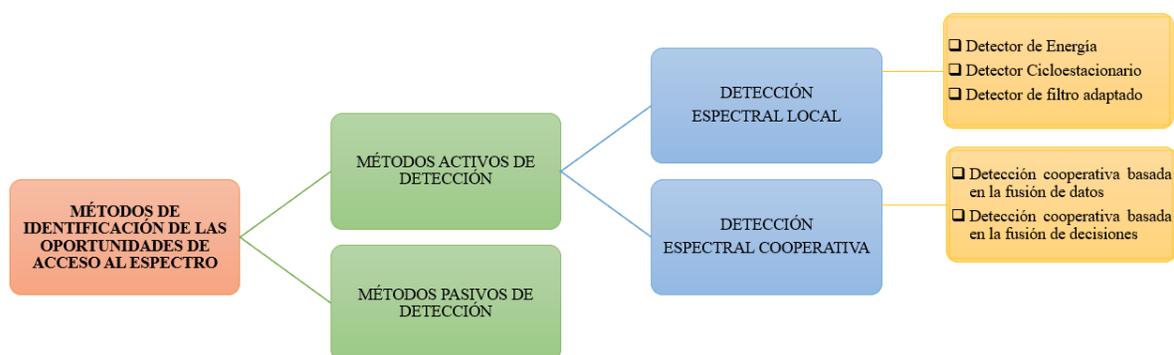
El estadístico mencionado anteriormente está representado en (2.3) y (2.4) por el valor de  $T_y$ , a manera de ejemplo, se podría definir como un estadístico el nivel de potencia de la señal recibida. Como se muestra en (2.3), la probabilidad de detección se da cuando el valor  $T_y$  es mayor al umbral prestablecido y efectivamente se tiene la presencia de un usuario primario. Por otro lado, la probabilidad de falsa alarma que se define en (2.4) se da al detectar la presencia de un usuario primario cuando en realidad este no está presente, lo cual ocasiona que un usuario secundario pierda la oportunidad de transmitir.

El objetivo de la detección a través de este análisis es maximizar la probabilidad de la detección manteniendo una probabilidad de falsa alarma dada. Es importante señalar que resulta primordial limitar la interferencia a un usuario primario que desaprovechar oportunidades de espectro, por ende, la maximización en la probabilidad de detección. En la práctica generalmente se establece el nivel del umbral en base al requerimiento en la probabilidad de falsa alarma (siendo ésta independiente de los eventuales niveles de SNR medidos de un usuario primario), pero luego también se impone una condición sobre la probabilidad de detección (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014).

#### **2.4. Métodos de Acceso al Espectro**

En el esquema de la Figura 8, se muestra de forma resumida la clasificación de los métodos que permiten identificar las oportunidades de acceso al espectro, básicamente se tiene los métodos pasivos y métodos activos, en el primer caso, la información acerca de la disponibilidad espectral se obtiene desde fuentes externas al sistema que pueden ser bases de datos mantenidas por las autoridades regulatorias, mientras que en el segundo caso los usuarios secundarios utilizan la detección espectral ya sea local o cooperativa para identificar una oportunidad de acceso al canal.

En el caso de la detección local las técnicas más comunes son el detector de energía, detector cicloestacionario y el detector de filtro adaptado en tanto que la detección cooperativa se clasifica en la detección basada en la fusión de datos y fusión de decisiones. Se hará un enfoque en el método de detección espectral local y su clasificación pues es el fundamento teórico que se ha considerado para la implementación del sistema de radio cognitiva.



**Figura 8.** Métodos de identificación de las oportunidades de acceso al espectro

### 2.4.1 Detección Local del Espectro

La detección espectral se comprende como la medida de la energía de las frecuencias a lo largo del espectro, para permitirle a la red de radio cognitiva analizar tiempo, espacio y frecuencia, con el fin de hacer uso del mismo sin causar interferencia alguna, es decir tener la capacidad de hallar la presencia o ausencia de usuarios licenciados en las diferentes bandas del espectro (Cáceres, 2017).

La detección del espectro, más que una decisión binaria sobre el estado libre u ocupado de una banda de frecuencias, implica obtener las características del espectro radioeléctrico en múltiples dimensiones tales como tiempo, espacio, frecuencia, ángulo de arribo y código. También involucra

la determinación de los tipos de señal que ocupan el espectro incluyendo características como modulación, forma de onda, ancho de banda y frecuencia portadora (Borbón & Montejo, 2015).

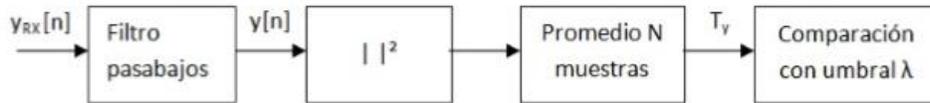
Para el diseño del proyecto se consideró los métodos de detección local: Detector de Energía y Cicloestacionario por lo que más adelante se profundizará en el fundamento teórico de los mismos.

#### **2.4.2 Método Basado en el Detector de Energía**

El detector de energía se enfoca básicamente en medir la potencia de la señal recibida dentro de un determinado ancho banda y posterior a ello compararla con un umbral. Este método de sensado permite detectar aquellas señales cuya energía sobrepasa el umbral de detección, en consecuencia, establecer un valor apropiado para dicho umbral es primordial y se vuelve crucial debido a la variabilidad que existe en el nivel del ruido e interferencia de la señal a detectar, todo esto conlleva a que sea necesario tener un preciso conocimiento del piso de ruido de manera tal que se pueda ajustar correctamente el umbral. Este es el método de detección más simple debido a su generalidad y facilidad de implementación, la ventaja que ofrece radica en que no se requiere tener un conocimiento previo de la señal primaria; sin embargo, el mismo no es capaz de hacer una discriminación entre la señal proveniente de un usuario primario y otro tipo de señal en otras palabras, al estar basado en medir potencia, ésta puede provenir tanto de un usuario primario como de cualquier otra señal, que puede ser ruido u otros usuarios secundarios, lo que puede ocasionar que la detección de un usuario primario sea errónea.

En la Figura 9 se muestra el funcionamiento del detector de energía a través de un diagrama de bloques que en su entrada recibe una señal compleja en banda base la cual pasa por un filtro pasabajos cuya función es la de eliminar componentes indeseables que se encuentran fuera de la banda de interés, posterior a ello, la señal pasa a un bloque que calcula el módulo de las muestras

al cuadrado, luego de ello pasa por un bloque integrador donde se obtiene el promedio de muestras y finalmente el último bloque es un comparador donde se realiza la comparación con el valor de umbral definido previamente.



**Figura 9.** Diagrama de bloques del detector de energía  
Fuente: (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014)

Considerando las dos hipótesis planteadas en la sección 2.3, al adaptarlas a un tiempo discreto y para el índice  $i = 1, \dots, N$ , se obtiene las nuevas ecuaciones mostradas a continuación:

$$H_0: y[i] = n[i], \quad (2.5)$$

$$H_1: y[i] = s[i] + n[i], \quad (2.6)$$

El estadístico  $T_y$  que se ha establecido en este caso para el detector de energía se presenta en la ecuación (2.7):

$$T_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} y[i]^2 \geq \lambda \quad (2.7)$$

Para el caso en que se tenga  $T_y > \lambda$  el detector determinará que existe presencia de una señal primaria, por el contrario, en el caso que resulte  $T_y < \lambda$  el detector automáticamente concluirá la hipótesis  $H_0$  (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014).

Considerando los elementos de la ecuación (2.6), para el caso del ruido  $n[i]$  se va a suponer que es Ruido Aditivo Gaussiano Blanco, en inglés, *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), cuyas muestras se consideraran variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, con distribución de probabilidad Normal de media nula y varianza  $\sigma_n^2$ , de manera similar, se considera  $s[i]$  por tanto se puede denotar como  $\sigma_s^2$ . Es así que  $H_1$  se puede establecer de la siguiente forma:  $\sigma_y^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2$ .

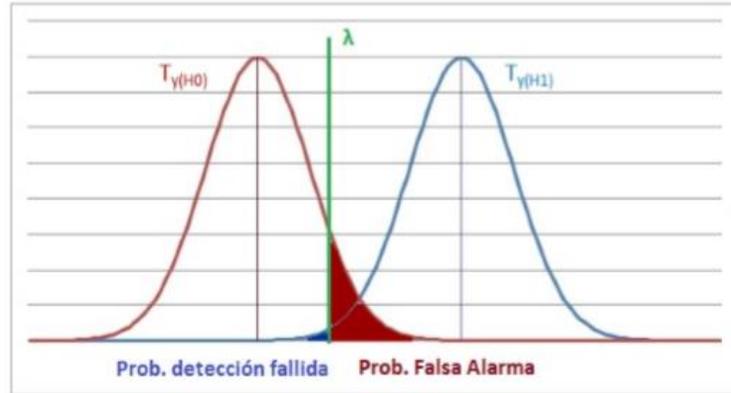
#### 2.4.2.1 Cálculo del Umbral para el Detector de Energía

Pará obtener la fórmula del umbral  $\lambda$  se parte de las ecuaciones (2.3) y (2.4) correspondientes a la probabilidad de detección ( $P_d$ ) y probabilidad de falsa alarma ( $P_{fa}$ ) respectivamente, haciendo uso de la simplificación de considerar el estadístico de distribución Normal se tiene:

$$P_{fa} = P(T_y > \lambda)|_{H_0} = Q\left(\frac{\lambda - \sigma_n^2}{\sigma_n^2 \sqrt{\frac{2}{N}}}\right) \quad (2.8)$$

$$P_d = P(T_y > \lambda)|_{H_1} = Q\left(\frac{\lambda - (\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}{(\sigma_s^2 + \sigma_n^2) \sqrt{\frac{2}{N}}}\right) \quad (2.9)$$

En la Figura 10 se muestra de forma gráfica las probabilidades definidas en (2.8) y (2.9) así como la probabilidad de detección fallida representada por la ecuación:  $P_{df} = 1 - P_d$ .



**Figura 10.** Representación gráfica de las probabilidades  
Fuente: (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014)

Como se puede observar, el umbral puede ser despejado tanto de la ecuación de  $P_{fa}$  (2.8) como de  $P_d$  (2.9), obteniendo dos ecuaciones distintas que a la vez van a depender de la potencia del ruido  $\sigma_n^2$ . Para determinar de qué ecuación se despejará el umbral, se toma en cuenta el hecho que el detector de energía busca maximizar la probabilidad de detección bajo una restricción en  $P_{fa}$ , en base a esta premisa, se define el umbral en función de  $P_{fa}$  tal como se presenta a continuación:

$$\lambda_{fa} = \sigma_n^2 \left[ \frac{Q^{-1}(P_{fa})}{\sqrt{\frac{N}{2}}} + 1 \right] \quad (2.10)$$

En lo que se refiere a la función  $Q(x)$  se define de la siguiente manera:

$$Q(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{x/\sqrt{2}}^{\infty} \exp(-t^2) dt \right) \quad (2.11)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.12)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.13)$$

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

$$Q^{-1}(y) = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(1 - 2y) = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2y) \quad (2.14)$$

#### 2.4.2.2 Incertidumbre en Potencia del Piso de Ruido

Como ya se había mencionado anteriormente, es muy importante tener un conocimiento perfecto del piso de ruido existente de manera tal que sea posible fijar correctamente el umbral y poder garantizar para cualquier nivel de SNR cierta probabilidad de detección.

En la práctica esto resulta imposible ya que entre otros factores existe incertidumbre sobre el valor del piso de ruido lo cual conlleva a que exista un nivel límite de SNR hasta el cual el detector resulta robusto (Tandra & Sahai, 2008).

Considerando que la potencia del 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  $SNR_{wall}$ :

$$SNR_{wall} = \frac{\tau^2 - 1}{\tau} \quad (2.11)$$

Es así que la incertidumbre del 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:

$$\lambda_{fa} = \tau \sigma_n^2 \left[ \frac{Q^{-1}(P_{fa})}{\sqrt{\frac{N}{2}}} + 1 \right] \quad (2.12)$$

Cabe recalcar que la ecuación (2.12) será utilizada para el diseño del detector de energía del sistema implementado.

### **2.4.3 Método de Detección Cicloestacionario**

Este método de detección espectral se fundamenta en el estudio de la periodicidad que presentan la gran cantidad de señales digitales usadas en telecomunicaciones y busca precisamente explotar las periodicidades implícitas de las señales moduladas tales como portadoras sinusoidales, trenes de pulsos o prefijos cíclicos. Una señal es cicloestacionaria cuando alguno de sus parámetros estadísticos como el valor medio o la autocorrelación es una función periódica del tiempo (Borbón & Montejo, 2015). El método permite detectar señales de baja potencia y a su vez determinar características particulares de la señal sensada, que pueden ser: tipo de modulación, frecuencia de portadora, tiempo de símbolo, etc. (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014).

Las características cicloestacionarias pueden ser utilizadas para clasificar e identificar entre distintos tipos de señales, en vista que el ruido es un proceso estacionario, una de las principales ventajas del método es que permite discriminar entre una señal proveniente de un usuario primario y el ruido, como contraparte a ello, para su funcionamiento se requiere tener un alto conocimiento de la señal que se desea detectar y su implementación trae consigo un mayor grado de complejidad pues requiere una elevada razón de muestreo de la señal lo que conlleva a la necesidad de un alto nivel de procesamiento computacional en comparación al resto de métodos.

La implementación del método cicloestacionario le permite al sistema de radio cognitivo identificar correctamente la presencia o ausencia de una señal de ISDB-Tb y por ende discriminarla de otro tipo de señal, para ello se utiliza la técnica de sincronización que está basada en la inclusión de la máxima verosimilitud y el prefijo cíclico de la señal OFDM. Para esta técnica se emplea el

algoritmo propuesto por Van de Beek, el cual establece los valores de  $\theta$  y  $\epsilon$  los mismos que hacen referencia a la magnitud del error de sincronismo temporal y a la portadora a nivel de frecuencia, respectivamente. Para lograrlo se propone tomar una ventana de muestreo cuyo mínimo valor es de  $2N + L$  muestras, donde  $N$  representa la cantidad de muestras de un símbolo y  $L$  la cantidad de muestras del prefijo cíclico, las mismas que se dividen en dos grupos que son representados a continuación por las ecuaciones (2.13) y (2.14):

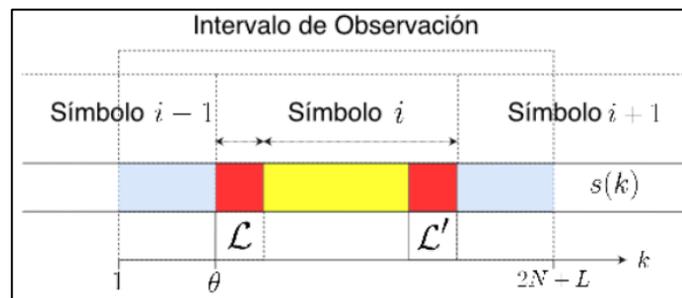
$$\mathcal{L} = \{\theta, \dots, \theta + L - 1\}, \quad (2.13)$$

$$\mathcal{L}' = \{\theta + N, \dots, \theta + N + L - 1\}, \quad (2.14)$$

donde:

$\mathcal{L}$ : Muestras del prefijo cíclico

$\mathcal{L}'$ : Muestras del símbolo con su copia en el intervalo de guarda



**Figura 11.** Estructura de la señal OFDM con CP

Fuente: (Contreras & Ferrer, 2016)

En la Figura 11 se puede visualizar como se definen los conjuntos en un determinado intervalo de observación, el objetivo entonces es encontrar la máxima verosimilitud entre los conjuntos, es así que tomando en consideración los grupos de muestras mencionados, se puede identificar que

entre ellos existe una fuerte correlación donde la ecuación (2.15) permite encontrar la máxima verosimilitud de  $\theta$ , como se muestra a continuación:

$$\theta_{MV} = \arg_{\theta}^{\max} |\gamma(\theta)| - \rho\varphi(\theta), \quad (2.15)$$

donde:

$$\gamma(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} r[k]r^*[k+N], \quad (2.16)$$

$$\varphi(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} \frac{|r[k]|^2 + |r[k+N]|^2}{2}, \quad (2.17)$$

donde:

$\theta_{MV}$  = inicio del símbolo OFDM

$\gamma$  = magnitud

$\varphi$  = energía

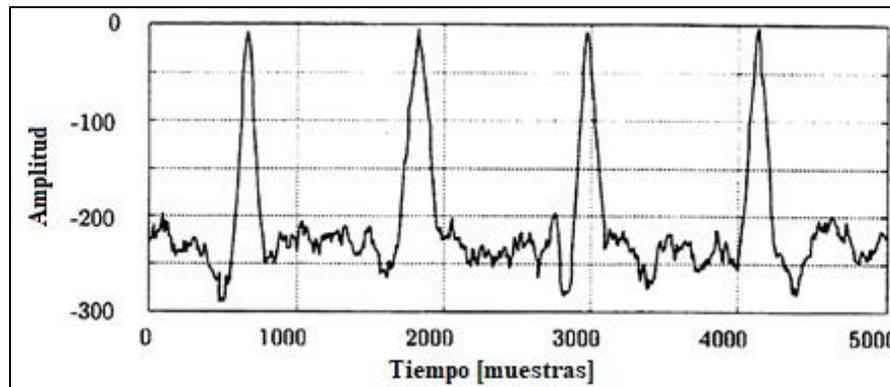
$\rho$  = ruido

$m$  = número de muestras

$r[k]$  = señal discreta recibida

Para comprender cómo funciona el algoritmo de máxima verosimilitud se ha considerado un sistema de transmisión en el que se tiene un valor  $N = 1024$  muestras del símbolo OFDM y la longitud del prefijo cíclico corresponde a  $L = 128$ , si el receptor toma las muestras de la señal con los mismos valores descritos para  $N$  y  $L$  se obtendrá los picos que se muestra en la Figura 12, cada uno de ellos representa el inicio de un símbolo OFDM receptado, entonces dentro de las 5000 muestras totales se receptaron 5 símbolos (Van de Beek, Sandell, & Borjesson, 1997), puede darse

el caso que el receptor no tome las muestras adecuadamente, es decir, si  $N$  y  $L$  son incorrecto lo cual producirá una gráfica como ruido, ocasionando que no se pueda detectar el inicio del símbolo.



**Figura 12.** Picos de inicio de símbolo OFDM  
Fuente: (Van de Beek, Sandell, & Borjesson, 1997)

Al encontrar  $\theta_{MV}$  se determina el inicio de un símbolo OFDM en la ventana de observación  $2N + L$ , es decir, el rango de muestras que corresponden al símbolo detectado mediante el algoritmo es  $[\theta_{MV}, \theta_{MV} + N + L]$  (Van de Beek, Sandell, & Borjesson, 1997).

## 2.5 Estándar ISDB-Tb

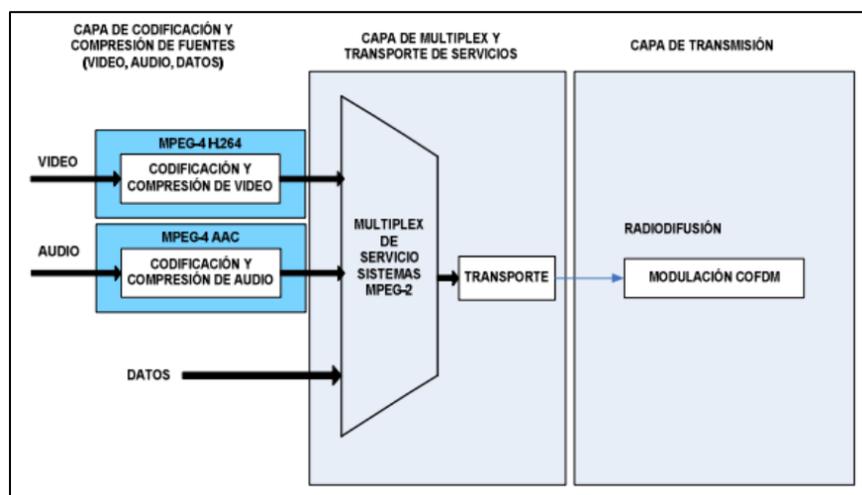
La implementación de los métodos de sensado definidos en la sección anterior se basan en la detección de una señal de TV digital por lo que es importante mencionar el estándar de Televisión Digital Terrestre (TDT) que nuestro país decidió aplicar y las características de mayor relevancia.

A nivel mundial existen diferentes estándares adoptados para la TDT, sin embargo, en Ecuador, luego de varios estudios técnicos, se decidió adoptar el ISDB-Tb (en inglés, *Integrated Services of Digital Broadcastig – Terrestrial Built-in*) japonés con mejoras brasileñas, gracias a este estándar Ecuador tiene parámetros claros respecto a propagación, multiprogramación, optimización del

ancho de banda, interactividad, entre otros; todo ello para impulsar la transmisión en señal digital (Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, s.f.).

### 2.5.2 Definición y Esquema de Funcionamiento

Fue desarrollado en Brasil tomando como base el sistema ISDB-T japonés, no es exactamente igual a este último, pues ha adoptado nuevas tecnologías con el objetivo de mejorar la calidad de la señal, tales como la tecnología H.264 para codificación SDTV y HDTV, así como otras tecnologías para *middele-ware*. Sin embargo, la estructura del sistema DTTB es la misma, y el sistema de transmisión es igual al sistema japonés. Por lo tanto, el ISDB-Tb es un sistema de la familia ISDB-T, y tiene las mismas características del ISDB-T Japonés (DiBEG, 2007).



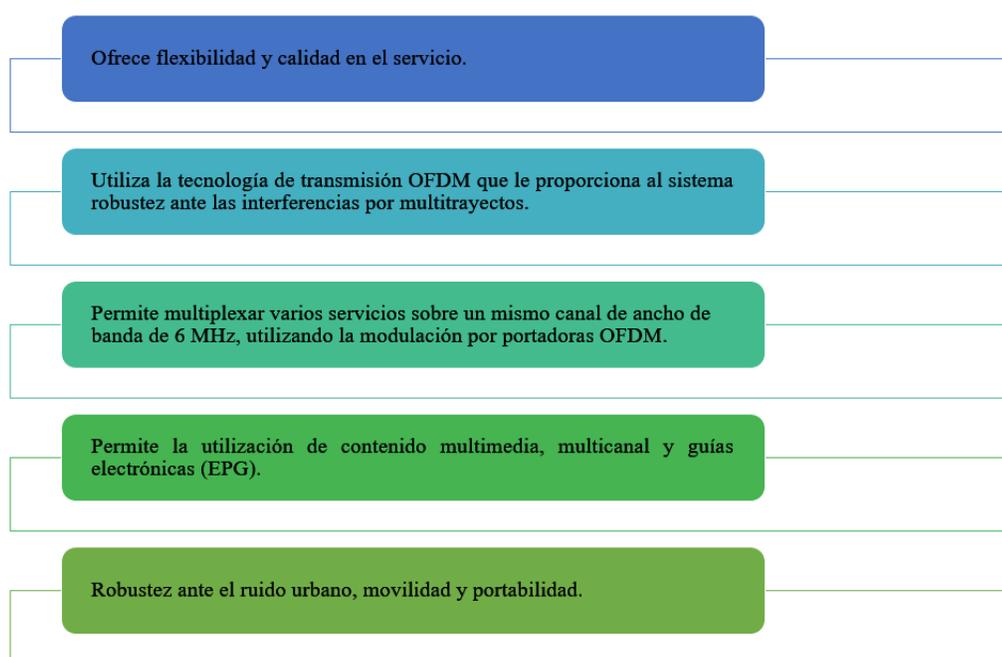
**Figura 13.** Sistema ISDB-Tb  
Fuente: (Miranda, Fuentes, & Urbina, 2015)

En la Figura 13 se muestra un esquema del sistema básico de ISDB-Tb, donde se realiza la compresión del video digital en formato MPEG-4 AAC junto con la compresión y codificación del audio con la norma MPEG-4H.264 más los datos complementarios del canal, luego que se

comprimen las señales de audio y video se realiza un primer nivel de Multiplexación que combina el audio, el video y datos en un solo flujo de paquete de longitud constante y finalmente el contenido multiplexado ingresa al bloque modulador COFDM.

### 2.5.3 Características de ISDB-Tb

En el esquema de la figura 14 se detalla las características más relevantes del estándar ISDB-Tb, entre ellas el uso de la tecnología OFDM cuyas características serán profundizadas más adelante.



**Figura 14.** Características del estándar ISDB-Tb

### 2.5.4 Tecnología de Transmisión OFDM

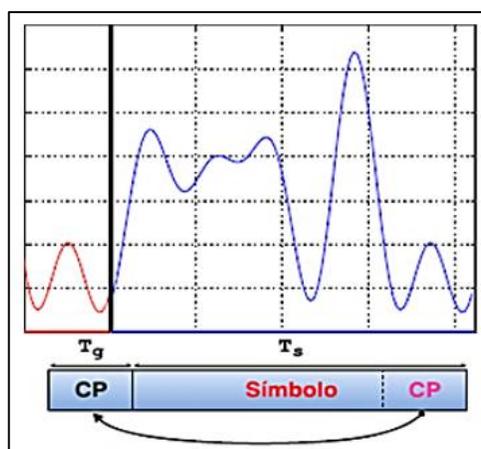
La tecnología OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) es un sistema de transmisión de multi portadoras donde los datos digitales son divididos y enviados en multi portadoras resultando de ello que el símbolo tenga mayor longitud que el de un sistema de una sola portadora,

este hecho permite que haya menos degradación a causa de la interferencia Inter Símbolo (ISI), debido a la interferencia multitrayecto.

La robustez ante el multitrayecto es de gran importancia para la transmisión terrestre, específicamente cuando se transmite en las bandas VHF/UHF en donde el multitrayecto siempre existe debido a la geografía del terreno, montañas, edificios, etc., con la tecnología OFDM el sistema ISDB-Tb muestra un excelente funcionamiento en la recepción a pesar de las condiciones ya mencionadas.

### 2.5.5 Prefijo Cíclico

El intervalo de guarda denominado Prefijo Cíclico (CP) corresponde a una copia de la primera parte del símbolo OFDM (1/4, 1/8, 1/16 o 1/32 del total) la cual se ubica a continuación del mismo. Esto permite realizar en recepción la alineación con el símbolo OFDM y una parte de la corrección en frecuencia, además de eliminar la interferencia intersimbólica (ISI) y vuelve a la señal óptima ante el multitrayecto. En la Figura 15 se visualiza un esquema de un símbolo y la copia del CP. En la misma la duración del símbolo es  $T_s$  y la del CP vendría a estar representada por  $T_g = T_s/4$  (Contreras & Ferrer, 2016).



**Figura 15.** Símbolo OFDM y CP  
Fuente: (Contreras & Ferrer, 2016)

Para el proceso de modulación se requiere la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) una vez que las muestras de cada símbolo hayan sido capturadas, la FFT maneja potencias en base 2 para obtener una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, en otras palabras, para pasar de las muestras a portadoras, los valores que establece el estándar se detallan a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Número de portadoras por modo de operación*

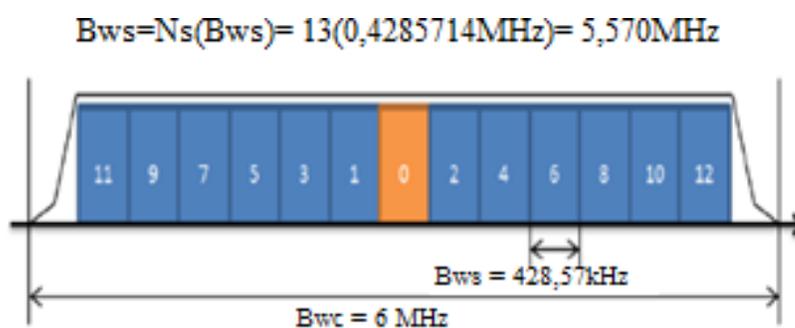
<b>Numero de Portadoras</b>	<b>Modo de operación</b>
2048 ( $2^{11}$ )	modo 1
4096 ( $2^{12}$ )	modo 2
8192 ( $2^{13}$ )	modo 3

El modo de operación le permite al sistema establecer una determinada cantidad de portadoras de datos, por ejemplo, si se considera un sistema con modo 3 de operación, se va a tener mayor número de portadoras (8192), esto conlleva a que el símbolo OFDM al tener más portadoras sea más lento, lo que lo vuelve más robusto frente al multitrayecto, pero a la vez más vulnerable al ruido blanco. Por ello, al momento de establecer un modo de operación en transmisión y recepción es indispensable considerar parámetros tales como calidad, tipo de servicio, ruido del canal entre otros.

Independiente al modo de operación que maneje el sistema, la frecuencia de muestreo del estándar ( $F_s$ ) o frecuencia teórica de la FFT está definida como se muestra a continuación en la ecuación (2.18).

$$F_s = \frac{\text{Número de portadoras } (N)}{\text{Tiempo de Símbolo } (T_s)} = \frac{8192}{1008 \text{ us}} = \mathbf{8,127MHz} \quad (2.18)$$

De las portadoras obtenidas de la FFT, el estándar define que una cantidad son consideradas información o portadoras activas mientras el resto se consideran portadoras nulas, toda la información que se transmite en las portadoras activas representa una cantidad de datos por segmento OFDM, es así que en modo 3 de operación 5617 portadoras son consideradas activas en tanto los 2575 restantes son portadoras nulas.



**Figura 16.** Segmentación del canal y ancho de banda  
Fuente: (Muñoz, 2015)

Es importante definir como el estándar ISDB-Tb establece la división del espectro radioeléctrico, por tanto, como se observa en la figura 16, el canal está compuesto por 13 segmentos de datos disponibles para el servicio y uno de guarda, cada segmento tiene un ancho de banda de 428,5714kHz, al multiplicar este ancho de banda de cada segmento por el número de segmentos de datos se obtiene 5,570MHz que es el ancho de banda de los 13 segmentos que van a ser ocupados para brindar servicios. Cabe recalcar que el segmento restante para completar los 6MHz se lo utiliza en los adyacentes como bandas de guarda para evitar interferencia con otros canales.

Analizando nuevamente el modo 3 de operación, de las 5617 portadoras activas que se había mencionado, 432 corresponden a un segmento de los 13 por tanto, un segmento OFDM equivale a

432 portadoras que van a representar un símbolo OFDM de ese segmento. Mediante la ecuación (2.19) se puede determinar el número de portadoras por segmento:

$$\frac{\text{portadoras}}{\text{segmento}} = \frac{\text{Número de portadoras activas}}{\text{Número de segmentos}} = \frac{5617}{13} = 432 \quad (2.19)$$

Considerando la duración de un símbolo activo por modo de operación, se obtiene el ancho de banda de un segmento, como se indica en la ecuación (2.20).

$$AB_{seg}(MHz) = \frac{N_{1seg}}{T_s} = \frac{432 \text{ segmentos}}{1008us} = 428,57kHz \quad (2.20)$$

donde:

$AB_{seg}$  = Ancho de banda de un segmento.

$N_{1seg}$  = Número de muestras de un segmento por modo de operación.

$T_s$  = Periodo del símbolo activo por modo de operación.

En la Tabla 3 se observa algunos parámetros del estándar ISDB-Tb, para obtener mayor información referirse a (ABNT 15601, 2007).

**Tabla 3.***Parámetros de ISDB-Tb*

PARÁMETROS	VALORES
Ancho de Banda total	6MHz
Número de segmentos	13
Ancho de banda de un segmento	$6/14 = 428,57$ kHz
Numero de portadoras	2048 (modo 1) 4096 (modo 2) 8192 (modo 3)
Numero de portadoras activas de todo el espectro	1405 (modo 1) 2809 (modo 2) 5617 (modo 3)
Esquema de modulación	DQPSK, QPSK, 16-QAM, 64QAM
Tiempo del símbolo activo	252useg (modo 1) 504useg (modo 2) 1008useg(modos 3)
Portadoras activas por segmento	108 (modo 1) 216 (modo 2) 432 (modo 3)
Duración de intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 del tiempos del símbolo activo

Fuente: (ABNT 15601, 2007)

## 2.6 Radio Definida por Software

Como ya se había mencionado en los apartados anteriores, la idea del sistema de radio cognitivo propuesto es implementarlo en un dispositivo inalámbrico que posea la inteligencia suficiente para permitirle al sistema analizar las porciones de espectro radioeléctrico, tomar decisiones de manera automática en lo que respecta a la elección de la mejor banda espectral considerando la prioridad que tienen los usuarios primarios sobre el canal y siempre intentando que los niveles de energía consumidos para estas acciones sean lo más bajos posibles, la tecnología que soporta dicho paradigma permitiendo que la mayor parte de las funciones que definen el comportamiento del sistema sean implementadas mediante software es la denominada SDR (en inglés, *Software Defined Radio*) cuyas principales características serán definidas a lo largo de esta sección.

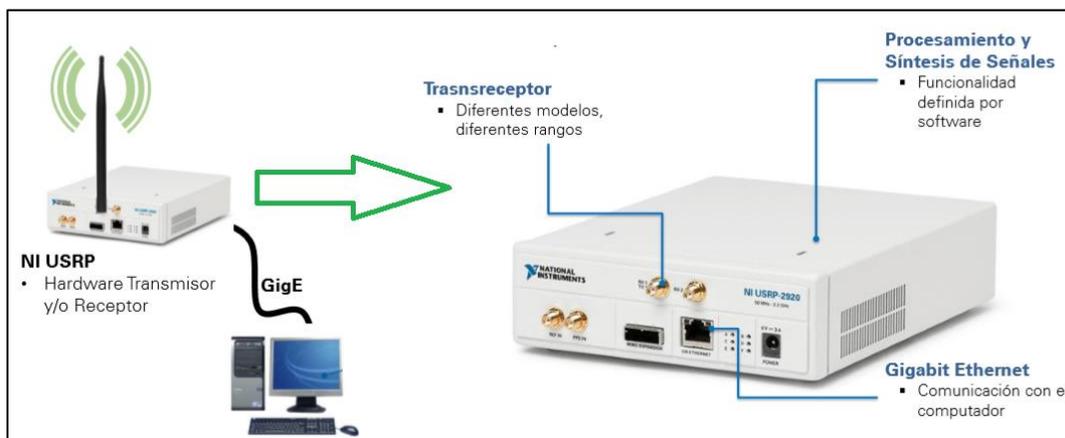
### 2.6.1 Definición

La IEEE (en inglés, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) en colaboración con el Wireless Innovation Forum, ha definido a los equipos SDR como “Radio en la que algunas o todas las funciones de la capa física están definidas por Software” (Wireless Innovation Forum, 2007). Por tanto, se puede ver al concepto de Radio Definida por Software como una tecnología en la cual la mayor parte de las funciones que la definen son realizadas a través de software lo que implica una reducción considerable en la parte de hardware ya que permite reemplazar a los sistemas analógicos de procesamiento en banda base con elementos de procesamiento digitales, presentando así varias ventajas en cuanto a costos, reutilización de frecuencias, interoperabilidad, flexibilidad y las múltiples opciones en software para hacer posible la implementación de un sistema real de telecomunicaciones (Perejil, 2016).

### 2.6.2 USRP 2920

El USRP (en inglés, *Universal Software Radio Peripheral*) fue desarrollado por el fabricante de plataformas de hardware Ettus Research, y básicamente es un transceptor de radiofrecuencia diseñado para trabajar conjuntamente con un procesador externo (PC, Workstation, etc.), a través de una FPGA a la que se conecta mediante un bus Ethernet de alta velocidad, la interfaz USB se utiliza para comunicar la tarjeta USRP con el computador y realizar el procesamiento de software, de esta forma le permite al usuario realizar la implementación de sistemas SDR (ver Figura 17).

Los sistemas digitales transceptores de la familia NI USRP – 292x están diseñados para la investigación y el desarrollo de aplicaciones de telecomunicaciones tales como emisiones FM, GPS, GSM, televisión digital y ZigBee.



**Figura 17.** USRP 2920 y conexiones  
Fuente: (Orellana, 2013)

### 2.6.2.1. Panel Frontal y Conectores

En la Figura 18 se puede visualizar el panel frontal del equipo y sus conectores, entre los principales se tiene, los terminales de entrada y salida para la señal de RF que son conectores SMA con una impedancia de  $50\ \Omega$ , el terminal *RX1 / TX1* es para transmisión y recepción mientras el terminal *RX2* es únicamente para recepción. El puerto de interfaz *MIMO EXPANSION* es utilizado para conectar dos dispositivos USRP usando un cable MIMO compatible, el puerto Gigabit Ethernet es el que se conecta al computador mediante un conector RJ-45 y un cable compatible con Gigabit Ethernet, la alimentación del equipo es de 6V a 3A.

Los conectores REF y PPS son terminales de entrada para una señal de referencia externa del el oscilador local (LO) y para la referencia del temporizador de pulsos por segundo, respectivamente, de igual forma son conectores SMA con una impedancia de  $50\ \Omega$ . Por último, los leds indicadores (A - F) determinan las distintas operaciones que realiza el equipo.

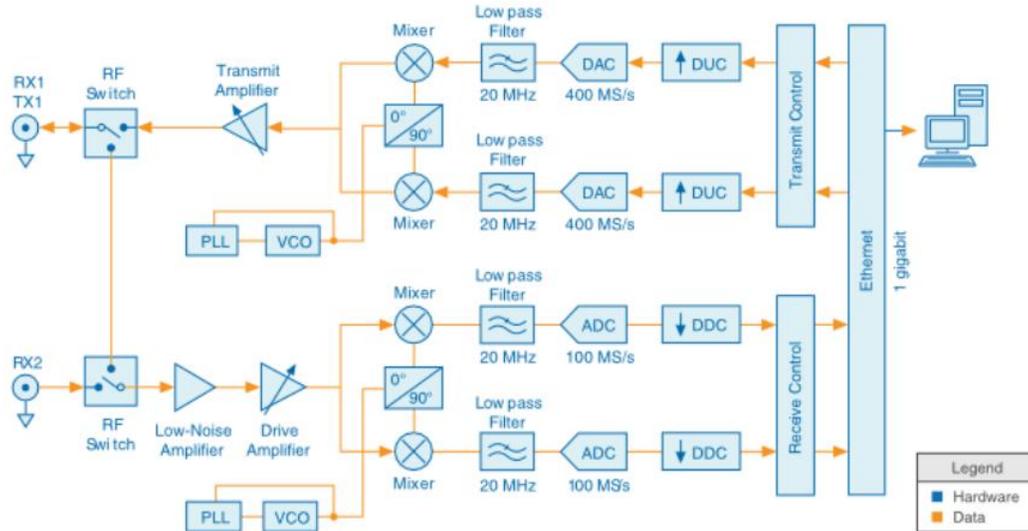


**Figura 18.** Panel frontal del USRP-2920  
Fuente: (Balseca & Jurado, 2014)

### 2.6.2.2 Arquitectura

El hardware del USRP-2920 está formado por dos niveles de tarjetas, el primero es la tarjeta madre (en inglés, *motherboard*), donde se encuentra el módulo FPGA que se encarga del procesamiento en banda base, allí encontramos los convertidores análogos a digitales, en inglés, *Analog-to-Digital Converter* (ADC) y digitales a análogos, en inglés, *digital-to-analog converter* (DAC) encargados de la adquisición de muestras, así como de la comunicación con el procesador externo. El segundo nivel lo conforman las tarjetas secundarias y la tarjeta hija (en inglés, *daughterboard*) que se utilizan para la transmisión y recepción.

En la Figura 19 se muestra el diagrama de bloques donde se puede observar detalladamente la constitución de la capa física del equipo, se debe considerar que el diagrama de bloques mostrado es único para la familia USRP-2920 pues difiere de otros modelos en el rango de frecuencia de operación que puede ser más amplio o más angosto según el modelo de la tarjeta hija.



**Figura 19.** Diagrama de bloques del USRP-2920

Fuente: (National Instruments, 2017)

El equipo también está conformado por una antena transceptora VERT400 que opera en tres distintas bandas de frecuencia (144MHz, 400MHz, 1200MHz) con un valor de potencia máxima de 10Watts (Contreras & Ferrer, 2016).



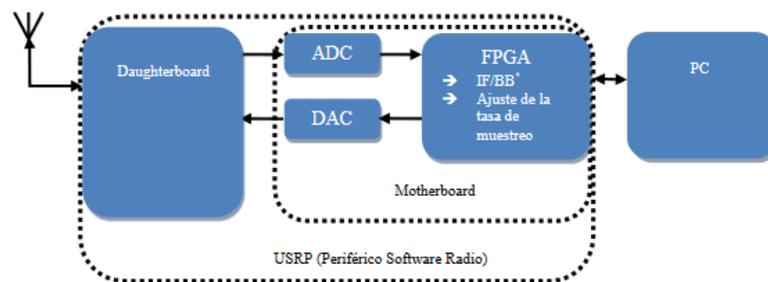
**Figura 20.** Antena VERT400

Fuente: (Perejil, 2016)

### 2.6.2.3 Tarjeta Madre FPGA

USRP-2920 se basa en la estructura de FPGA Xilinx Spartan 3A-DSP 3400 la cual se encarga de implementar la sección de banda base del receptor SDR, su función comienza a la salida del PC y acaba cuando la señal atraviesa el DAC para el caso del transmisor, mientras que cuando se

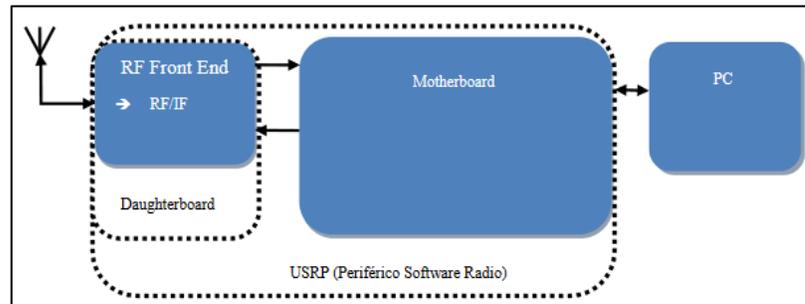
emplea como receptor su función empieza cuando la señal sale de la *daughterboard* y termina cuando la señal es conducida hacia la PC a través del puerto USB para luego ser manejada por algún programa de procesamiento de señal; aquí se realiza la conversión de la señal desde el dominio digital al analógico o del analógico al digital dependiendo de cuál sea el caso y se adecua la tasa de muestreo de la señal para su transmisión. A esta tarjeta se conectan todos los periféricos, la alimentación, puertos Gigabit Ethernet y MIMO. En la Figura 21 se muestra esquemáticamente las funciones a realizar por la tarjeta madre.



**Figura 21.** Funcionamiento de la tarjeta madre  
Fuente: (Montero, 2014)

#### 2.6.2.4 Tarjeta Hija

La tarjeta hija es la encargada de cumplir gran parte de las funciones del transmisor y/o del receptor de radiofrecuencia clásico, en esquema de la Figura 22 se muestra las funciones que realizar dicha placa.



**Figura 22.** Función realizada por la placa hija  
Fuente: (Montero, 2014)

Su función principal empieza a la salida del DAC y termina cuando es conducida la señal a transmitir hasta el conector SMA en el caso del transmisor, por el contrario, en el caso del receptor empieza cuando la señal llega al conector SMA y finaliza cuando ésta es conducida hacia el ADC, por lo tanto, este tipo de placas se conecta físicamente a la *motherboard*. En la placa madre existen dos ranuras etiquetadas como TX y RX, cada ranura tiene acceso a un DAC (para el transmisor) y a un ADC (para el receptor), éstos son de doble canal, permitiendo así la conversión de manera independiente para la componente en fase y en cuadratura de la señal para las placas que lo permitan o para dos canales independientes (Montero, 2014).

### Modelo SBX

Es un transceptor de banda ancha con osciladores independientes para el transmisor y el receptor permitiendo así operar en modo full-dúplex con señales complejas. Por defecto esta placa opera convirtiendo la señal de RF directamente a onda base. El transmisor presenta una potencia típica de salida de 100 mW y un ancho de banda de 40MHz tanto para el transmisor como para el receptor, dicha placa está diseñada también para soportar MIMO. El rango de operación de la placa es de 400MHz-4400MHz presentando ganancias variables tanto en la cadena del transmisor como en la del receptor. Tanto como para el transmisor como para el receptor, la ganancia variable que

presenta va desde 0dB hasta los 31,5dB. Su figura de ruido va desde 5dB hasta 10dB (Montero, 2014). A continuación, en la Tabla 4 se muestra las especificaciones generales para el receptor USRP 2920.

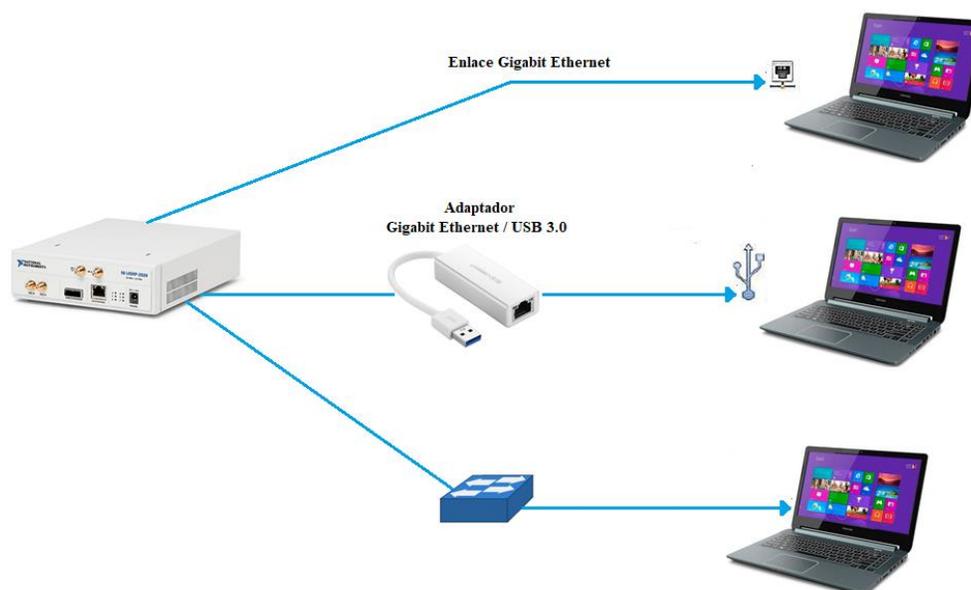
**Tabla 4.**  
*Receptor USRP*

Rango de frecuencias	50 MHz a 2,2 GHz
Paso de frecuencia	< 1 kHz
Rango de ganancia	0 dB a 31,5 dB
Paso de ganancia	0,5 dB
Potencia máxima a la entrada ( $P_{in}$ )	0 dBm
Figura de ruido	5 dB a 7dB
Precisión de frecuencia	2,5 ppm
Ancho de banda máximo instantáneo	
• 16-bit ancho de muestra	20 MHz
• 8-bit ancho de muestra	40 MHz
Velocidad máxima de muestreo I/Q	
• 16-bit ancho de muestra	25 MS/s
• 8-bit ancho de muestra	50 MS/s
ADC	2 canales, 100 MS/s, 14 bit
ADC SFDR	88 dB

Fuente: (Esteve, 2014)

### 2.6.2.5 Conexiones con el USRP-2920

La comunicación del USRP con el procesador externo se logra únicamente a través un enlace Gigabit Ethernet (1000Mbps), con cualquier otro enlace de capacidad menor no será posible establecer dicha comunicación, sin embargo, la mayoría de dispositivos personales como PC o laptops no poseen un puerto Gigabit Ethernet que proporcione la velocidad requerida ya que la mayor prioridad de estos dispositivos suelen ser las comunicaciones inalámbricas como Wi-Fi, en tal sentido, en la Figura 23 se presentan varias opciones que permitirán establecer la comunicación con el USRP-2920.



**Figura 23.** Formas de establecer la comunicación con el USRP-2920

La manera de establecer una conexión ideal entre el equipo USRP y la PC es utilizar un cable Ethernet de categoría 5e o superior que se conecte directamente al puerto RJ45 de la PC, la siguiente opción en caso que la PC no tenga una interfaz Gigabit Ethernet es utilizar un adaptador de Gigabit Ethernet a USB 3.0 esta alternativa proporciona una conexión de alta fidelidad, pero a la vez existe un pequeño retardo causado por la conversión de paquetes además de requerir la instalación del software controlador en la PC. La última opción sería, utilizar un switch que permita establecer el enlace punto a punto, así como la negociación de las interfaces con la desventaja de ser la alternativa más costosa.

Una vez que ha sido establecida la conexión entre la PC y el equipo, el siguiente paso es configurar la conexión punto a punto del sistema, por lo general, la tarjeta de red, en inglés, *Network Interface Card* (NIC) del USRP-2920 viene configurada con la dirección IP: 192.168.10.2/24 lo

que implica que la interfaz del computador debe estar configurada en la misma red para logra la comunicación exitosa entre ambos. Finalmente, para el reconocimiento de paquetes se debe instalar en la PC el driver del hardware del USRP (UHD) el cual es compatible con tres lenguajes de programación *GNU Radio*, *Matlab* y *LabVIEW*, para los dos primeros la instalación se la realiza desde servidores externos mientras que *LabVIEW* tiene ya incorporado el controlador en sus paquetes de comunicación del equipo NI-USRP.

### **2.6.3 Software**

El USRP 2920 está comercialmente proyectado al usuario bajo el lenguaje de desarrollo *LabVIEW* el mismo que permite la comunicación bidireccional entre el USRP y el ordenador, sin embargo, las características del equipo permiten que pueda soportar otras plataformas de programación tales como *Matlab* y *GNU Radio*, a lo largo de esta sección se detallará las principales características de los distintos entornos de programación que permitirán determinar el lenguaje de desarrollo más apropiado para implementar el sistema de radio cognitiva.

#### **2.6.3.1 Matlab ®**

Matlab es un lenguaje matemático de alto nivel que permite de forma sencilla simular sistemas de todo tipo ya sea mediante su programación en un script o utilizando las funciones de *Simulink* las cuales permiten programar sobre equipos de radio definido por software. Las herramientas que ofrece *Simulink* son similares a las de *GNU Radio*, pues son bloques de procesamiento de señales que a través de un diagrama gráfico permiten realizar el análisis y procesamiento en banda base de las señales que son captadas por el equipo.

El fabricante de USRP proporciona un driver que puede utilizarse en los sistemas operativos más importantes y permite enlazar programas con el USRP, así se pueden encontrar herramientas como el *SR4all* que está incluido en el *Toolbox* y permite desarrollar un script de procesamiento en *Matlab* para generar una secuencia de datos que mediante una función sencilla son enviados al USRP para su transmisión, de igual forma, se puede recibir desde el USRP y procesar luego las muestras recibidas por el USB a través de una función de *Matlab*. Sin embargo, una de las desventajas que existe es el precio de las licencias de *Matlab*, *Simulink* y de los *toolboxes* que limitan la implementación de algoritmos de uso libre para la investigación (Pinar & Murillo, 2011).

Un punto muy importante que se debe considerar al momento de elegir el lenguaje de programación es el costo computacional, el trabajar con *Matlab* implica tiempos elevados en la ejecución de un programa y si se requiere incluir herramientas de control del USRP ya sea en script o *Simulink* el costo computacional aumentaría de manera significativa.

Para ISDBT-Tb, asumiendo las condiciones en que la señal sea receptada en modo tres de operación, se manejaría 8192 muestras por símbolo OFDM, si se considera un prefijo cíclico de 1/16 y una ventana de observación de  $2N+L$  según lo establecido para el funcionamiento del algoritmo de *Van de Beek*, se podría llegar a tener un total de 16896 muestras que requieren ser procesadas en un corto intervalo de tiempo, considerando este hecho, *Matlab* no sería un entorno de programación viable para implementar debido a los altos tiempos de ejecución ya mencionados.

Por otro lado, comparado con *GNU Radio*, *Matlab* lleva utilizándose casi tres décadas en simulación de sistemas de comunicaciones, de forma que los *toolboxes* o librerías de funciones especializados en comunicaciones digitales están muy depurados (Pinar & Murillo, 2011).

Cabe destacar que una ventaja que ofrece *Matlab*, sin duda alguna es su facilidad al momento de desarrollar algoritmos matemáticos complejos como es el caso del algoritmo de *Van de Beek*, esto gracias a su entorno y orientación matemática.

### 2.6.3.2 LabVIEW ®

*LabVIEW* es un lenguaje de programación de entorno gráfico desarrollado por *National Instruments* que permite crear códigos con el uso de diagramas de bloques lo que le hace muy adecuado para el diseño y la implementación de algoritmos de comunicación. El software *LabVIEW* utiliza el controlador NI USRP para enviar y recibir en banda base con el formato adecuado de datos I/Q. Además, con los módulos adicionales del kit NI USRP (*MathScript RT Module* y *Modulation Toolkit*) se proporcionan funciones específicas de las comunicaciones y se otorga fidelidad al algoritmo desarrollado, así como la opción de integrarse con otro software como los scripts de Matlab (Esteve, 2014).

La finalidad de *LabVIEW* es resolver problemas, acelerar la productividad y proporcionar seguridad para innovar, crear y desplegar continuamente sistemas de medidas y control tanto para el sector productivo como educativo (Bolaños & Ruiz, 2015).

Los programas creados en *LabVIEW* se almacenan en ficheros conocidos como Instrumentos Virtuales, en inglés, *Virtual Instrument* (VI), estos VI contienen dos interfaces, el Panel Frontal y el Diagrama de Bloques, el primero corresponde a la interfaz gráfica con el usuario y muestra las salidas que son determinadas por las entradas que el usuario previamente introduce al ejecutar el programa, mientras que el diagrama de bloques es donde se realiza la programación y contiene el código fuente que controla el programa para realizar el proceso de las entradas y salidas creadas en el Panel Frontal además de aceptar parámetros de otros VI.

El Panel Frontal y el Diagrama de Bloques se conectan mediante terminales, es decir, los controladores (entradas) e indicadores (salidas) que se colocan en el Panel Frontal. En *LabVIEW* existe una serie de paletas que proporcionan las herramientas requeridas para crear y modificar tanto el Diagrama de Bloques como el Panel Frontal.

*LabVIEW* ofrece diversas ventajas con respecto a otros lenguajes de programación, una de ellas es que le permite al usuario generar entornos o paneles de control gráficos lo que implica que el desarrollo del algoritmo sea mucho más fácil de manejar y disminuye su nivel de complejidad a diferencia del *GUIDE* de *Matlab*, esto es un punto a favor cuando se requiere hacer el análisis de las señales de un segmento, sin embargo, a medida que aumenta el procesamiento de la señal el código de bloques adquiere mayor complejidad lo que trae consigo la necesidad de manejar una programación más ordenada y correctamente estructurada con la finalidad de evitar que el desarrollo del algoritmo se vuelva complicado y se dé el fenómeno conocido como código espagueti, para solucionar este hecho, *LabVIEW* propone la creación de *subVis* que son similares a las funciones en *Matlab* y le permiten manejar una programación jerárquica y continua de izquierda hacia derecha siendo un tanto tedioso para la detección de errores.

Junto con el USRP y desde un punto de vista empírico, *LabVIEW* es el mejor sistema de adquisición de señales ya que permite configurar distintas características y tener un mayor control del equipo para la recepción de los datos, además de permitir a los usuarios crear soluciones completas y complejas con una mayor velocidad de ejecución debido al compilador gráfico del que está dotado el sistema.

### 2.6.3.3 GNU Radio

*GNU Radio* es una plataforma de desarrollo de código abierto, libre y gratuito creada por Eric Blossom en 2001 y que tiene como principales objetivos proporcionar funciones de procesamiento de señal para implementar SDR y apoyar la investigación de las comunicaciones inalámbricas y de los sistemas de radio basados en tecnología SDR. Además posee una amplia librería de bloques con diversas funciones que van desde el filtrado, detectores de pico, operadores matemáticos hasta moduladores OFDM, decodificadores y otras funciones genéricas de procesamiento. *GNU Radio* corre sobre los sistemas operativos Linux, Mac OS y Windows y puede ser usado conjuntamente con hardware externo como, por ejemplo, los dispositivos USRP, para implementar físicamente el sistema SDR, o bien, sin incluir hardware, para trabajar en un entorno de simulación (Perejil, 2016).

La creación de una aplicación es posible mediante la programación en alto nivel, utilizando lenguaje de programación Python o el lenguaje C++, típicamente *Python* se utiliza para la interconexión de bloques y C++ para el procesamiento, sin embargo, existe la posibilidad de utilizar una interfaz gráfica denominada, en inglés, *GNU Radio Companion* (GRC) que permite al usuario instalar los bloques interconectándolos entre sí para crear distintos SDR y realizar diseños completos sin escribir líneas de código, simplificando así el nivel de complejidad y eliminando la necesidad de conocimientos de lenguajes de programación por parte del usuario (Sanchez, 2015).

Otra gran ventaja de *GNU Radio* es que los sistemas SDR se pueden simular utilizando como fuente de datos señales guardadas en la PC. También permite guardar información en la PC, pudiendo salvar la misma o enviarla hacia el exterior como por ejemplo audio a través de la tarjeta de sonido o datos hacia puertos TCP/UDP (Contreras & Ferrer, 2016).

Una de las desventajas de este entorno de programación son las herramientas gráficas y la creación del panel de control que difieren del *GUI de Matlab* y del panel de control de *LabVIEW* pues maneja diversos modos de presentación, uno de ellos es *QT GUI*, el cual consume menos recursos pero refleja la presentación de los datos de una manera muy simple, por otro lado el *WX GUI* permite mostrar los datos con mayor detalle, control y calidad pero a la vez consume más recursos lo que implica que para la implementación de un algoritmo extenso y que conste de diversos procesos ocasione que colapse la máquina.

Sin embargo, *GNU Radio* también se ha convertido en uno de los lenguajes favoritos por los desarrolladores al momento de implementar sistemas junto con el USRP, debido a que cuenta con una amplia gama de bloques de procesamiento de señales como moduladoras digitales, decodificadores, osciladores que están orientados a diversas tecnologías como lo son LTE, 802.11, ISDB-Tb, etc.

#### **2.6.4 Determinación del Lenguaje de Desarrollo a Implementar**

Es primordial determinar la mejor plataforma de programación sobre la que será viable la implementación del proyecto de investigación, como se ha descrito en la sección anterior, tanto *LabVIEW*, *Matlab* y *GNU Radio* son softwares de grandes capacidades y prestaciones que indistintamente de la aplicación a desarrollar permiten crear sistemas de telecomunicaciones robustos y de alta fidelidad, de igual forma presentan ventajas y desventajas que se deben analizadas el momento de su elección.

En el esquema de la Figura 24 se muestra una comparación de los lenguajes de programación que ofrece el equipo, destacando la ventaja más relevante con respecto a los otros entornos de programación.



**Figura 24.** Comparaciones de los firmwares del USRP

En base a las características, ventajas y desventajas definidas anteriormente, se determinó utilizar el firmware de *LabVIEW*, la elección de este software se debe principalmente a la alta capacidad que brinda en el procesamiento de las señales en banda base y la adquisición de datos siendo esta última más óptima y versátil. Por otro lado, las prestaciones que ofrece en lo que respecta a la programación en modo gráfico basado en bloques y *subVIs* facilita en gran manera el desarrollo del algoritmo pues lo hace más comprensivo y disminuye su complejidad frente a los otros lenguajes de programación.

Otro punto que define a *LabVIEW* como el software apropiado, es la paleta de herramientas que posee, ya que facilita la creación de menús, diálogos y una extensa variedad de funciones de bloques que permiten desarrollar una interfaz gráfica lo suficientemente robusta, amigable al usuario y por supuesto, que muestre todos los datos y resultados que requiere el sistema como lo

son en este caso, el sensado y barrido de frecuencias UHF, el cálculo de la potencia media de cada canal, gráficas en la que se muestra el proceso de detección de energía y de una señal ISDB-Tb en los distintos canales así como el almacenamiento de la información obtenida en tiempo real por cada ciclo de ejecución en una base de datos.

Finalmente, se consideró la experiencia con el lenguaje de programación en lo que se refiere a la práctica y el desarrollo previo de ejercicios para familiarizarse con el entorno y las funcionalidades del equipo. Considerando todo lo expuesto, el cumplimiento de todos los objetivos que demanda el sistema de radio cognitiva propuesto se consigue utilizando *LabVIEW* como lenguaje de programación.

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RADIO COGNITIVA

#### 3.1 Introducción

En este capítulo se describe las consideraciones que se tomaron para el diseño e implementación del sistema de radio cognitiva en el dispositivo USRP-2920 bajo la plataforma de programación *LabVIEW*. Se representa mediante un diagrama de flujo el código general de todo el programa haciendo un enfoque en el diseño del algoritmo para los métodos de energía y cicloestacionario que permitirán el censado, medición de los niveles de potencia de cada canal, identificación de un usuario primario y por ende la detección del canal más libre en tiempo real.

#### 3.2 Consideraciones para el Diseño

##### 3.2.1 Métodos de Detección Seleccionados

Para identificar la presencia de transmisiones primarias se ha escogido utilizar los siguientes métodos de sensado: Detector de Energía y Detector Cicloestacionario. Por un lado, el detector de energía es considerado uno de los mecanismos más comunes y sencillos de implementar a diferencia de las otras técnicas de detección como es el caso puntual del Método de *Wavelets* para el cual la implementación en el firmware *LabVIEW* se complica debido a que sus librerías no ofrecen mayores prestaciones, además que el nivel de procesamiento y complejidad que exige es mayor. En tal sentido, se consideró utilizar el mecanismo detector de energía ya que ofrece una baja complejidad en su implementación y los requerimientos computacionales son mínimos, estas características permitirán optimizar el tiempo de sensado de los canales, así como el tiempo de ejecución de todo el sistema, adicional a ello, al implementarlo en el software de *LabVIEW* se tiene mayores disposiciones a nivel de librerías lo cual garantizará el adecuado funcionamiento del

algoritmo en tiempo real. Sin embargo, la desventaja de este método radica en que la detección de señales primarias depende exclusivamente del umbral establecido, esto implica un problema debido su degradación ante valores bajos de SNR lo cual ocasiona que el método sea ineficiente ante la discriminación de un usuario primario, usuario secundario o simplemente ruido lo que aumenta la probabilidad de falsa alarma en la detección, analizando este hecho, se decidió complementar el método detector de energía con el método cicloestacionario ya que este último ofrece la principal ventaja de poder discriminar claramente entre el ruido y la señal que se desea detectar, de esta forma se podrá minimizar al máximo la probabilidad de falsa alarma. Con el método cicloestacionario en realidad se implementa una función del algoritmo de sincronización de *Van de Beek* o algoritmo de máxima verosimilitud, cuyo fundamento teórico y matemático se definió en la sección anterior y que utiliza las características de la señal OFDM, en este caso, el intervalo de guarda para identificar con precisión cuando la señal presente en un canal corresponde a una señal ISDB-Tb.

Para el caso particular que la señal detectada corresponda a ruido AWGN, el método cicloestacionario sabrá identificarlo pues el ruido no está correlacionado como lo está una señal modulada referente a un usuario primario que presenta correlación entre ciertas componentes espectrales.

Es así que el detector de energía se encarga de medir los niveles de potencia presentes en cada canal y en función de ello define el canal libre más apropiado para la transmisión, mientras que el método cicloestacionario establece un umbral de decisión ISDB-Tb que permitirá identificar cuando una señal ISDB-Tb esté presente en el canal y por ende conocer los canales libres en las bandas UHF del espectro de TV con alta precisión.

### 3.1.2 Consideraciones Generales para el Diseño del Detector de Energía

A la hora de elegir algunos parámetros de diseño del detector como lo son la probabilidad de falsa alarma e incertidumbre del ruido, se decidió considerar los requerimientos de sensado que están preestablecidos en la norma IEEE 802.22 y que se muestran en el trabajo de investigación desarrollado en Montevideo por la Universidad de la República con el tema “*Radios Cognitivos y Sensado del Espectro Radioeléctrico*” (Gómez, Mera, & Schneeberger, 2014). Por otro lado, la potencia de ruido simulado que se calcula en el diagrama de bloques del algoritmo es la base para calibrar y establecer correctamente el valor de la potencia de ruido o piso de ruido del detector, este último es necesario para calcular el umbral de energía y además de ello, para hacer una estimación del SNR. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de diseño que se utilizaron para la configuración del detector.

**Tabla 5.**

*Parámetros de entrada del sistema*

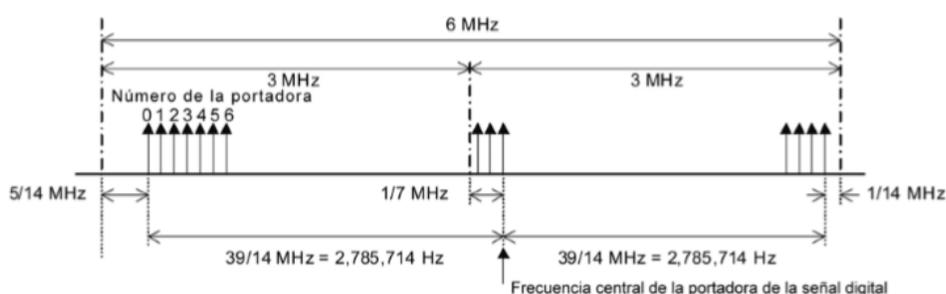
Probabilidad de falsa alarma ( $P_{fa}$ )	0.1
Incertidumbre de ruido ( $\tau$ )	0.1
Potencia de ruido	$5 \times 10^{-9}$

La unidad de medida que se ha escogido para expresar la ganancia del sistema y la relación señal a ruido es el decibelio (dB), pues su naturaleza logarítmica permite representar con gran facilidad valores de potencias de señales muy pequeñas, además de ofrecer la posibilidad de efectuar y manejar de mejor manera los cálculos de relaciones de potencias sean estas muy grandes o muy pequeñas lo que le convierte en la escala perfecta para el cálculo de la relación señal a ruido presente en los canales. Por otro lado, para representar la potencia media o energía de la señal presente en cada canal, así como la potencia de ruido, se ha considerado utilizar el watt (W) como

unidad de medida, ya que al ser muy bajos los niveles de energía presentes en cada uno de los canales, se puede representar de mejor manera estos valores, si bien es cierto, el decibelio como escala de medida permite simplificar los cálculos en sistemas de radio para representar valores de potencia, al expresar la energía en esta unidad no se va a poder diferenciar adecuadamente su valor entre un canal y otro, de igual forma, al compararla con el umbral establecido, no se va a poder definir adecuadamente si se supera o no dicho umbral.

### 3.1.3 Porción del Espectro Considerado para el Sensado

Para el barrido automático de frecuencias, se consideró que el sistema de radio cognitivo realice el sensado de todos los canales que correspondan a las bandas de frecuencias UHF del espectro de TV, es importante recalcar que de acuerdo a lo establecido por el estándar ISDB-Tb, la frecuencia de la señal de transmisión terrestre debe ser desplazada positivamente  $1/7$  MHz en relación a su frecuencia central, tal como se muestra en la Figura 25.



**Figura 25.** Arreglo de portadoras de la señal OFDM para señales TDT  
Fuente: (ABNT 15601, 2007)

Considerando ese hecho, la Tabla 5 muestra todos los canales UHF y la respectiva frecuencia de la portadora central tal como lo establece el estándar, adicional, también se muestra los valores de frecuencia inicial y final de cada canal.

**Tabla 6.**  
*Canalización de las bandas UHF*

CANALES UHF			
CANAL FÍSICO	FRECUENCIA INICIAL DEL CANAL (MHz)	FRECUENCIA FINAL DEL CANAL (MHz)	FRECUENCIA DE LA PORTADORA CENTRAL DE LA SEÑAL (MHz)
14	470	476	473 + 1/7
15	476	482	479 + 1/7
21	512	518	515 + 1/7
22	518	524	521 + 1/7
23	524	530	527 + 1/7
24	530	536	533 + 1/7
25	536	542	539 + 1/7
26	542	548	545 + 1/7
27	548	554	551 + 1/7
28	554	560	557 + 1/7
29	560	566	563 + 1/7
30	566	572	569 + 1/7
31	572	578	575 + 1/7
32	578	584	581 + 1/7
33	584	590	587 + 1/7
34	590	596	593 + 1/7
35	596	602	599 + 1/7
36	602	608	605 + 1/7
38	614	620	617 + 1/7
39	620	626	623 + 1/7
40	626	632	629 + 1/7
41	632	638	635 + 1/7
42	638	644	641 + 1/7
43	644	650	647 + 1/7
44	650	656	653 + 1/7
45	656	662	659 + 1/7
46	662	668	665 + 1/7
47	668	674	671 + 1/7
48	674	680	677 + 1/7
49	680	686	683 + 1/7
50	686	692	689 + 1/7
51	692	698	695 + 1/7

Fuente: (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2018)

### 3.1.4 Consideraciones para el Diseño del Detector Cicloestacionario

Para el diseño del detector se consideró automatizar la elección del intervalo de guarda de forma que el sistema de radio cognitiva pueda realizar el barrido de todos los canales para cada prefijo cíclico con el objetivo de identificar todos los picos de las señales OFDM que están presentes en los distintos intervalos de guarda y así determinar con mayor precisión la existencia de una señal ISDBT. En la Tabla 3 de los fundamentos teóricos se muestran los valores que define el estándar para los cuatro intervalos de guarda.

En lo que respecta al modo de operación, se establece como parámetro de entrada el modo 3 pues se ha validado que los canales de TV transmiten en este modo debido a que las señales ISDB-Tb requieren mayor calidad para brindar sus servicios, sin embargo, el programa también permite seleccionar los modos 1 y 2.

Para configurar el valor de la frecuencia de muestreo IQ se considera el hecho que la señal OFDM viaja con un ancho de banda de 6MHz lo que implica que no se puede exceder demasiado este ancho de banda pues se podría tener un problema de exceso de muestras y por ende el solapamiento entre canales. De la misma forma, tampoco es conveniente establecer una tasa de muestreo IQ muy baja ya que se tendría problemas con el filtro pasabajos implementado en el bloque detector de energía lo que ocasionaría errores el momento de la ejecución del algoritmo. Considerando todo lo expuesto y luego de realizar varias pruebas de ejecución, se determinó que el valor ideal para configurar la frecuencia de muestreo IQ del sistema es 8,33MHz.

### 3.2. Arquitectura del Sistema



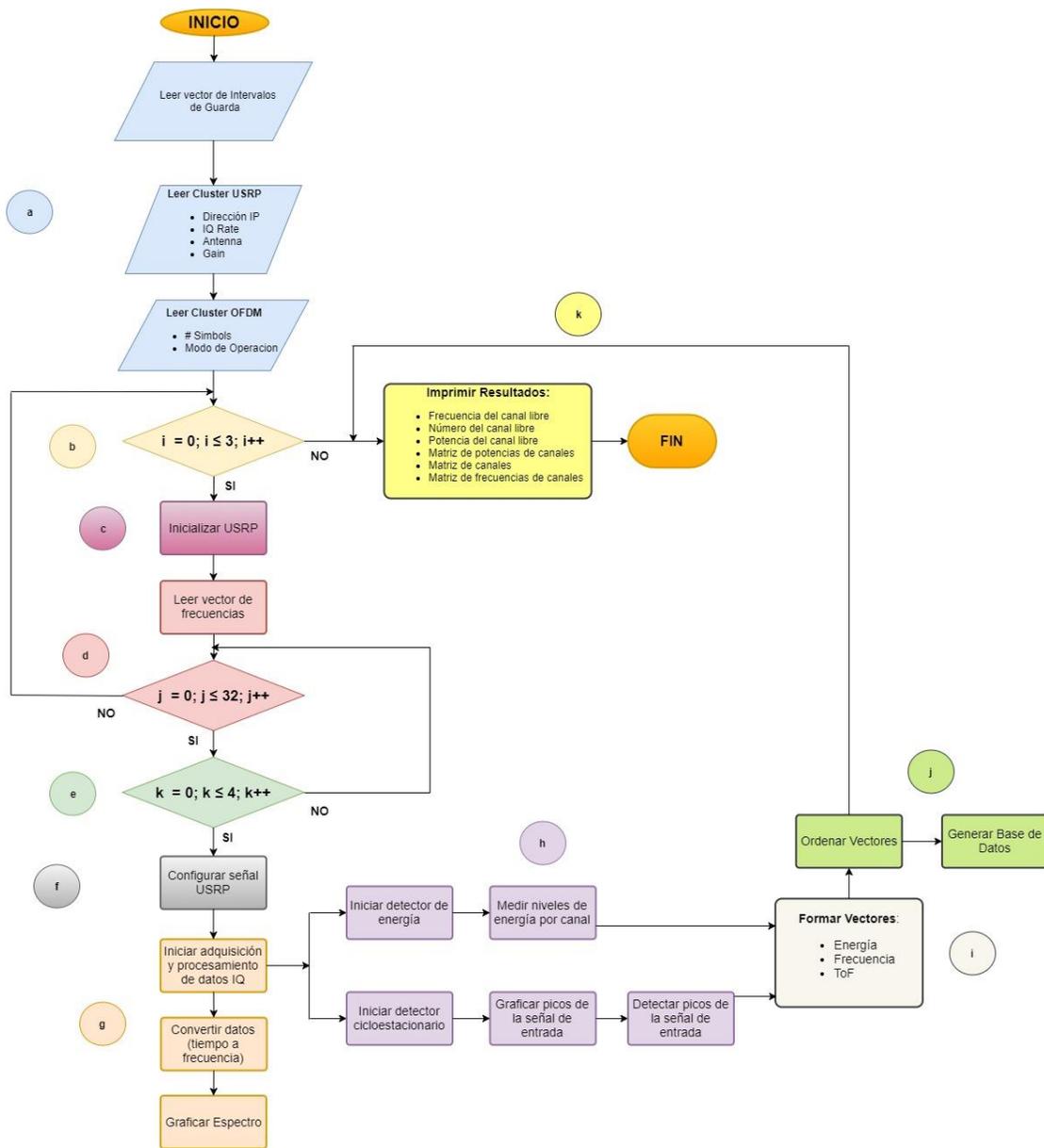
**Figura 26.** Escenario del sistema implementado

El escenario de la implementación del sistema de radio cognitivo para la detección de bandas de frecuencias TVWS se muestra en la Figura 26, cada uno de los componentes realizan una función específica y sus características se describen a continuación:

- Computadora Toshiba *Satellite* P55W-C5204, procesador Intel Core i7 5500U de 64 bits y velocidad de procesamiento de 2,4GHz, memoria RAM de 8GB, y un puerto USB 3.0.
- Dispositivo NI USRP-2920, con rango de frecuencias RF ajustable que va de 50MHz a 2,2GHz y ancho de banda 20MHz, contiene una tarjeta SBX, dos antenas VERT400 e interfaz Gigabit Ethernet.
- Adaptador TP-LINK de USB 3.0 a Gigabit Ethernet, garantiza alta velocidad de transferencia (5000Mbps), el controlador e información para la instalación se puede obtener en (tp-link, 2015).
- Cable utp categoría 6e, reduce al máximo la interferencia provocada por el ruido y ofrece una velocidad de transmisión de 10 Gigabit Ethernet.

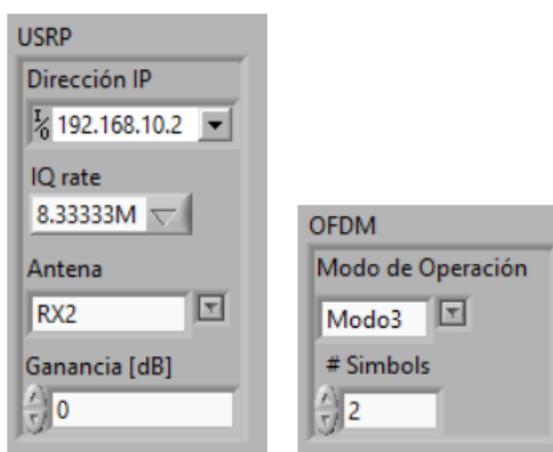
### 3.3. Algoritmo del Sistema de Radio Cognitiva

La explicación del algoritmo desarrollado y su funcionamiento se realizará mediante el diagrama de flujo de la Figura 27 donde se presenta el código general de todo el programa para la implementación del sistema de radio cognitivo. El diagrama de bloques completo del código implementado en *LabVIEW* se lo puede visualizar en el anexo 1.



**Figura 27.** Diagrama de flujo del sistema de radio cognitiva

En la sección a, se establecen los parámetros de entrada con los que se inicializará el dispositivo USRP y que serán configurados en los *Cluster* USRP y OFDM, dichos parámetros se muestran a continuación en la Figura 28.



**Figura 28.** Cluster USRP y OFDM

Dentro del *cluster* USRP se configura el parámetro *IQ rate* el cual corresponde a la frecuencia de muestreo IQ y que a su vez permitirá que el USRP defina el ancho de banda de la señal, otro parámetro importante es el intervalo de guarda el cual se configura fuera del *Cluster* OFDM mediante un vector que almacena los cuatro valores ya establecidos por el estándar. Como ya se mencionó en la sección anterior, la idea de configurar este vector, es que el programa realice el sensado de todos los valores del prefijo cíclico para cada uno de los canales y así poder detectar todos los picos de la señal OFDM en cada intervalo de guarda, el bucle *for* que se visualiza en la sección b, permite realizar este proceso.

En la sección c, se inicializa el dispositivo USRP con todos los parámetros preestablecidos en la sección a, adicional a ello, a través de la función *Init\_RX.vi* se determina las muestras necesarias para el símbolo OFDM y que pueden ser procesadas por el USRP en base a la frecuencia de muestreo establecida.

A continuación, en la ecuación 3.1 se muestra el cálculo del número de muestras totales teóricas considerando los parámetros de la Figura 28 y un intervalo de guarda de 1/4:

$$\#muestras\ totales = \#s\acute{ı}mbolos(\#muestras\ IG + muestras\_s\acute{ı}mbolos) \quad (3.1)$$

$$\#muestras\ totales = 2(2048 + 8192)$$

$$\#muestras\ totales\ teoricas = \mathbf{20480\ muestras}$$

Debido a que la frecuencia de muestreo general que se tiene con el USRP suele ser distinta a la frecuencia de muestreo del estándar definida en la ecuación 2.18, se realiza el siguiente cálculo para obtener el número de muestras que puede procesar el USRP.

$$\#muestras_{USRP} = \frac{IQ\ rate\ MHz(\#muestras\ totales\ teóricas)}{frecuencia\ FFT\ MHz} \quad (3.2)$$

$$\#muestras_{USRP} = \frac{(8,33 \times 10^6\ MHz)(20480\ muestras)}{8,126984\ MHz}$$

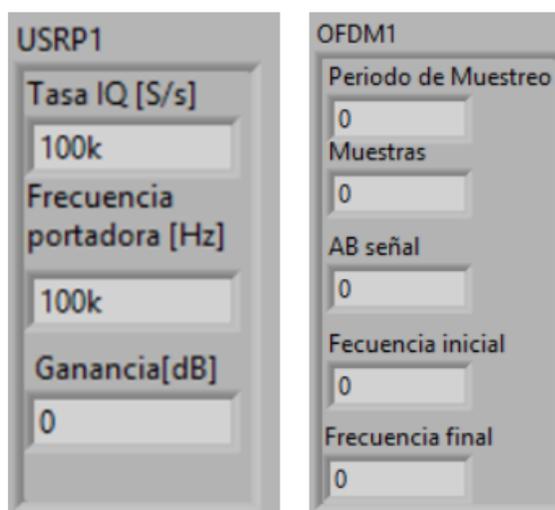
$$\#muestras_{USRP} = \mathbf{21000\ muestras}$$

En la sección d, se configura el vector con los treinta y tres canales y sus correspondientes valores de frecuencia central que pertenecen a la banda UHF, en la Tabla de la sección 3.1 se muestran dichos valores establecidos por el estándar. Con el fin de automatizar el sistema, cada frecuencia ingresa a un bucle *for*, el cual, por cada ciclo de ejecución, permite extraer uno por uno los valores de frecuencia que posterior a ello será utilizada para la configuración de la señal.

En la sección e se tiene un tercer ciclo *for* dentro del cual se encuentra todo el proceso de configuración de la señal, adquisición, procesamiento de datos, las etapas de detección, así como

la generación de la base de datos; este bucle realiza capturas de una misma configuración con el objetivo de dibujar correctamente la señal para que en la etapa de detección se pueda identificar los picos de la señal OFDM con precisión. Con cinco ciclos se logró mejores resultados.

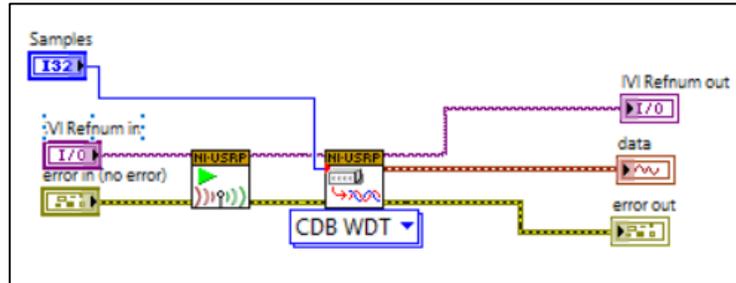
En la sección f, a través de la función *Configure\_signal.vi* se controla el equipo para que se configure la señal del USRP en base a todos los parámetros establecidos anteriormente. A continuación, en la Figura 29 se muestra los *cluster* de salida, USRP1 y OFDM1, donde cada uno de sus valores fueron obtenidos mediante esta función y varían según los parámetros de entrada.



*Figura 29. Cluster de salida*

Cabe recalcar que el valor de la frecuencia portadora será utilizado para controlar la parte gráfica en lo que respecta a la visualización, la posición del cursor, el barrido del *span* de la señal, etc.

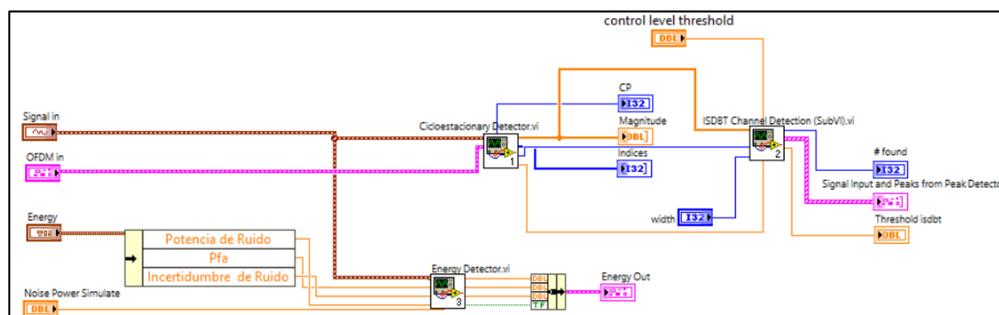
En la sección g, mediante la librería *niUSRP Initiate* se indica al USRP la información sobre las configuraciones de los parámetros previamente establecidos e informa cuando es posible recibir las muestras, mientras que la librería *niUSRP Fetch Rx Data* se encarga de iniciar la adquisición y el procesamiento de los datos IQ, todo ello se realiza en la función *Data\_acquisition.vi* cuyo diagrama de bloques se muestra en la Figura 30.



**Figura 30.** Función *Data acquisition.vi*

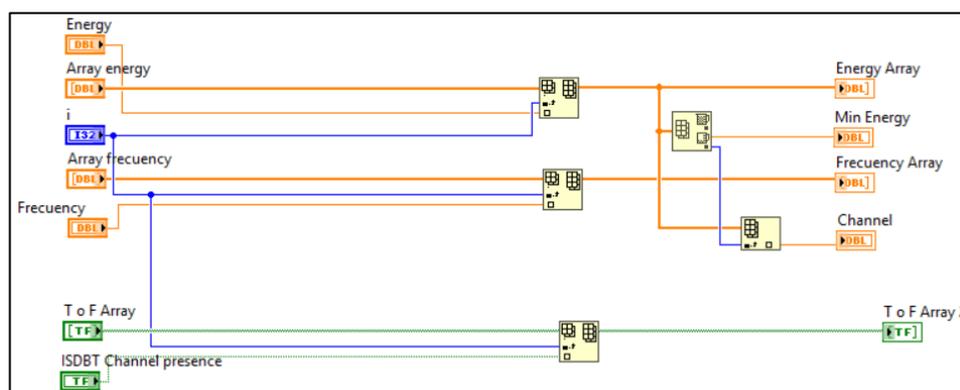
Debido a que la señal proporcionada por el USRP se encuentra en el dominio del tiempo, la función *spectrum.vi* permite pasar los datos de la señal al dominio de la frecuencia para que se puede hacer el cálculo y la gráfica del espectro de cada canal la cual es mostrada en el panel frontal.

En la sección h se inicia la etapa de detección conformada por el detector de energía y el detector cicloestacionario, previo a esta etapa, se generó una señal AWGN o señal de ruido simulado mediante la función *AWGN.vi*, dicha señal se suma a la señal recibida por el USRP para luego ingresar a la etapa de detección cuyo diagrama de bloque se visualiza en la Figura 31, en donde la suma de la señal AWGN con la señal del USRP están representadas por la entrada *Signal in*, cada una de las funciones que conforman este bloque serán explicadas a detalle más adelante.



**Figura 31.** Etapa de detección

En la sección i a través de la función *Array (SubVI).vi* se generan los vectores de energía, frecuencia y de verdaderos y falsos (ToF) por cada ciclo de iteración, dichos valores son obtenidos previamente de la etapa de detección. En esta función también se determina el mínimo valor de potencia, así como la frecuencia y el número de canal al que le corresponde dicha potencia.



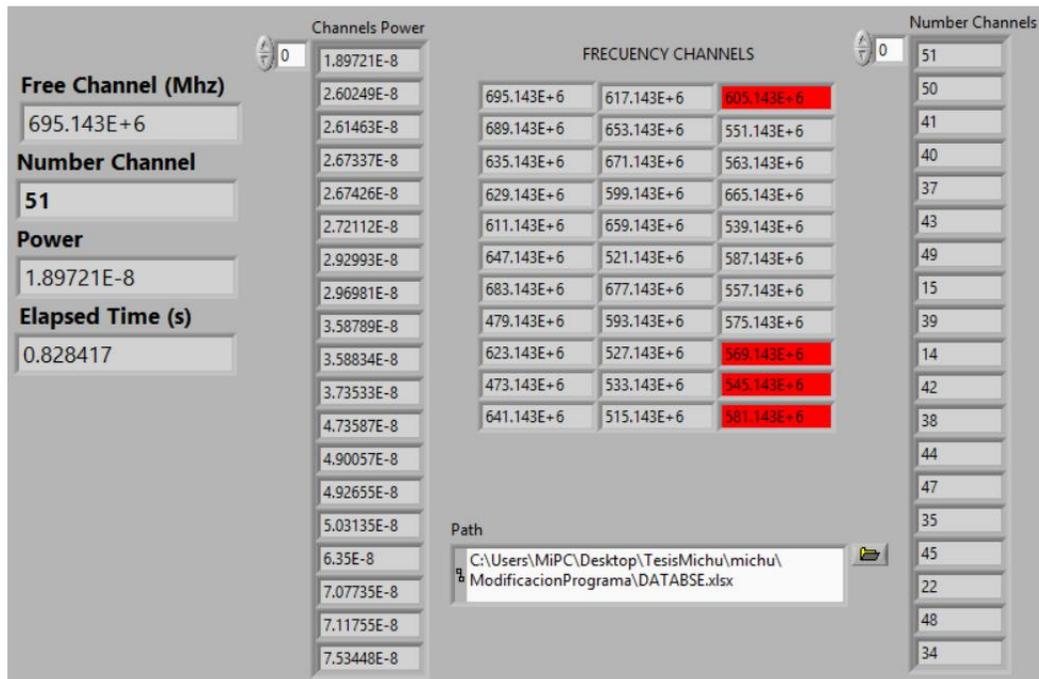
**Figura 32.** Función *Array (SubVI).vi*

En la sección j mediante la función *DataBase (SubVI).vi* se establece el orden en el que serán mostrados los vectores de energía, frecuencia y de verdaderos y falsos (ToF), este bloque también incluye una función que permite generar una base de datos en donde se va a almacenar la fecha y hora de ejecución, los vectores de energía y frecuencia, así como el valor de menor energía, la frecuencia y el número de canal al que pertenece dicha energía.

En la sección k, una vez finalizada la ejecución del programa para todos los intervalos de guarda, el panel frontal muestra los siguientes resultados: el menor valor de potencia con el número de canal y la frecuencia asociada a dicho valor, adicional a ello, se muestran las matrices de potencia y número de canal ordenadas de forma ascendente (menor a mayor) en función de la potencia, así como la matriz formada por los valores de frecuencias de cada canal de igual manera ordenada en

función de la potencia donde se pintan de color rojo los valores de frecuencia en las que se ha detectado la presencia de una señal de ISDB-Tb.

En el anexo A2 se muestra el diagrama de bloques donde se realiza la validación para el pintado de colores de la matriz *Frequency Channels* que se muestra en el panel frontal de la Figura 33.



**Figura 33.** Interfaz frontal

### 3.4 Algoritmo del Detector de Energía

En la Figura 34 se visualiza el diagrama de flujo del programa desarrollado para el método del detector de energía, el algoritmo realiza lo siguiente: en la sección a, la señal de entrada, compuesta por la señal AWGN mas la señal del USRP, ingresa a un filtro pasabajos con frecuencias de corte  $f_c = 3\text{MHz}$ , resultando un ancho de banda de 6MHz luego de la etapa de filtrado. Posterior a ellos, utilizando la ecuación (2.7) presentada previamente en el fundamento teórico para el detector de

energía, se calcula el promedio de energía sumando una cantidad  $N$  de energías puntuales  $e(i)$  y luego dividiendo entre  $N$ , obteniendo así, la potencia media o energía de la señal en base al total de muestras  $N$  para luego realizar la comparación con el umbral.

En la sección b, se determina el valor del umbral ( $\lambda$ ) utilizando la ecuación (2.10) presentada de igual forma en el fundamento teórico, reescribiendo dicha ecuación con la notación de variables utilizadas en algoritmo programado en *LabVIEW* y recordando que la incertidumbre del ruido se define como  $(\tau - 1)$  se obtiene la ecuación (3.3) con la que se realizó el cálculo del umbral:

$$Umbral = Pot\_ruido (1 + Incertidumbre\_Ruido) \left( 1 + \frac{Q^{-1}(P_{fa})}{\sqrt{\frac{N}{2}}} \right) \quad (3.3)$$

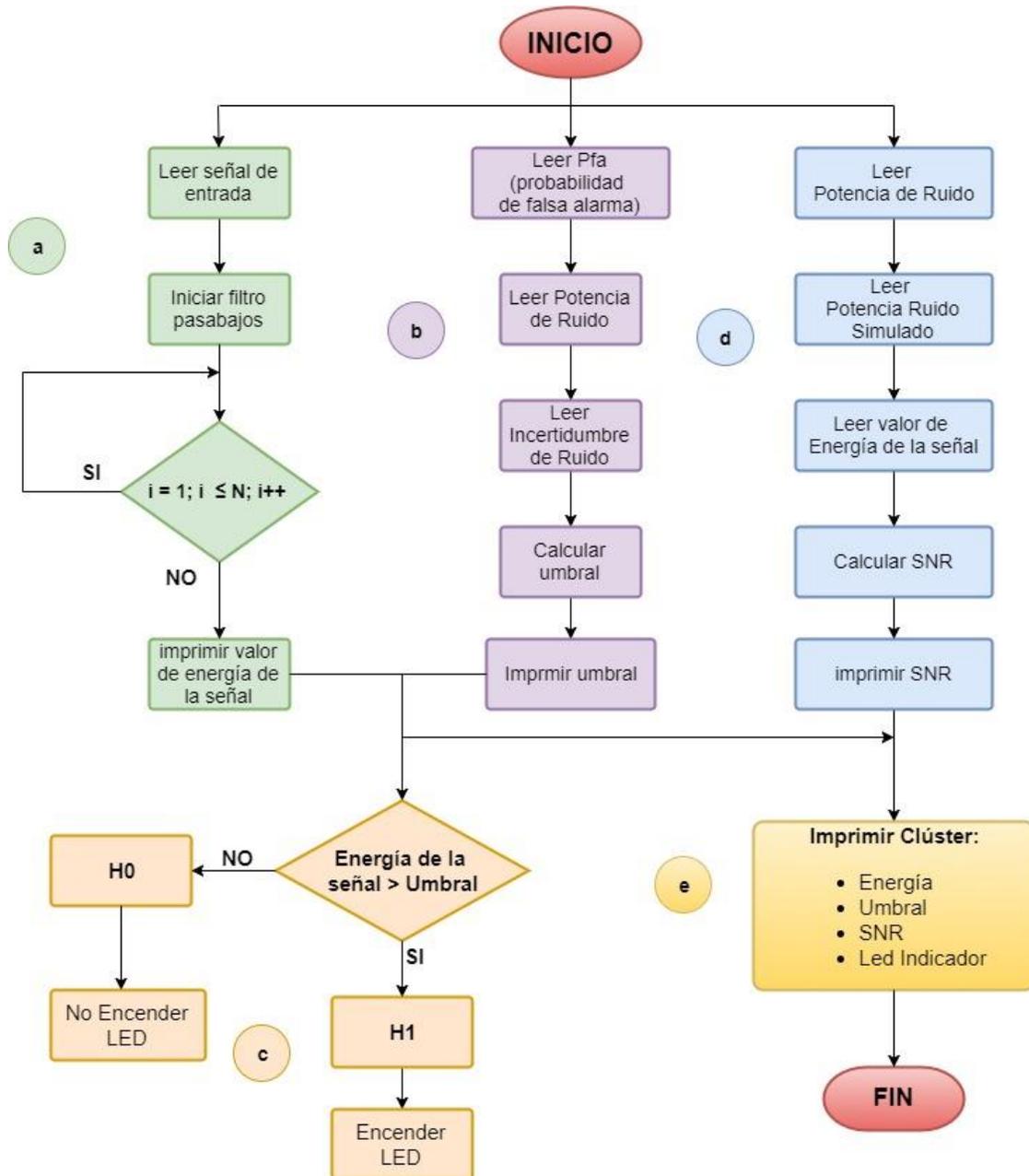
En la sección c, se realiza la comparación de la energía de la señal con el umbral calculado, en caso que la energía sea mayor al umbral se cumple la hipótesis H1 que indica la presencia de una señal primaria por lo que el led indicador se enciende, caso contrario se cumple la hipótesis H0 que indica ausencia de señal primaria.

En la sección d, se realiza el cálculo de la relación señal a ruido (SNR) mediante la ecuación (3.4) detallada a continuación:

$$SNR = 10 \log \left( \frac{P_y - P_{N_{LPF}}}{P_{N_{LPF}}} \right) \quad (3.4)$$

Cabe recalcar que  $P_y$  representa la potencia media de la señal del USRP a la que se resta previamente la potencia de ruido con la que ingreso al filtro, por otro lado,  $P_{N_{LPF}}$  es la potencia de

ruido total compuesta a su vez por la suma de la potencia del ruido simulado y la potencia de ruido que corresponde al piso de ruido existente. Finalmente, en la sección e, se muestra un clúster de salida con los resultados obtenidos para la potencia, el umbral, el SNR y el led indicador.



**Figura 34.** Diagrama de flujo del Detector de Energía

### 3.5 Algoritmo del Detector Cicloestacionario

En la Figura 35 se muestra el diagrama de flujo de la etapa cicloestacionaria en donde se utiliza una de las características de la señal OFDM, que es el intervalo de guarda para implementar la función de sincronización mediante el algoritmo de *Van de Beek*. En la sección a del diagrama, al igual que en el detector de energía, la señal de entrada está compuesta por la señal de ruido AWGN y la señal del USRP, se extrae las características de esta señal para determinar la frecuencia de muestreo con la está llegando al detector.

En la sección b, se implementa un ciclo *case* al que ingresa la frecuencia de muestreo que se determinó en la sección a, el modo de operación y el intervalo de guarda, internamente se calcula el número de muestras de un símbolo, el número de muestras del intervalo de guarda y el número de muestras del símbolo más el intervalo de guarda, el tiempo de símbolo activo de cada *case* varía según el modo de operación que se escoja para el sistema.

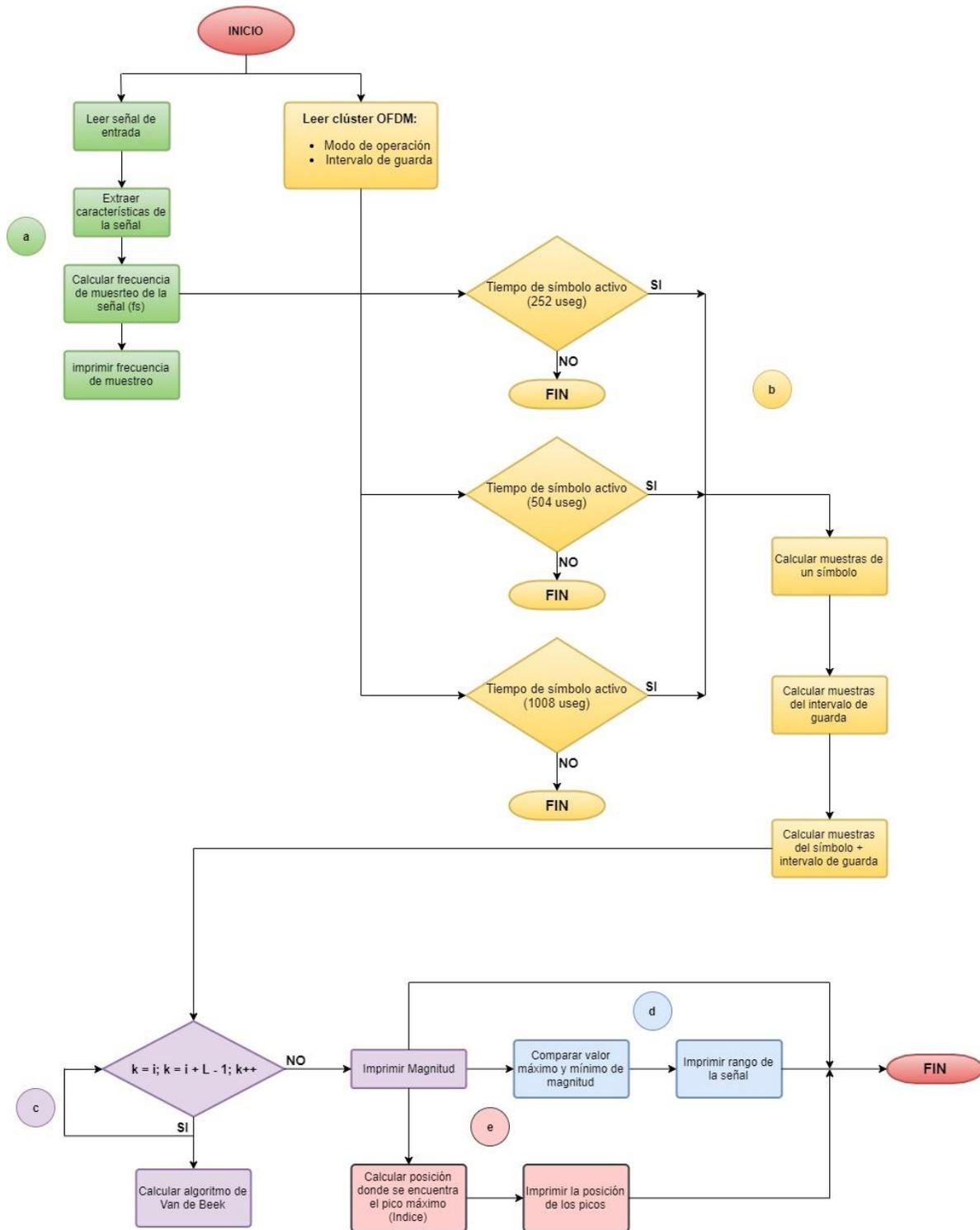
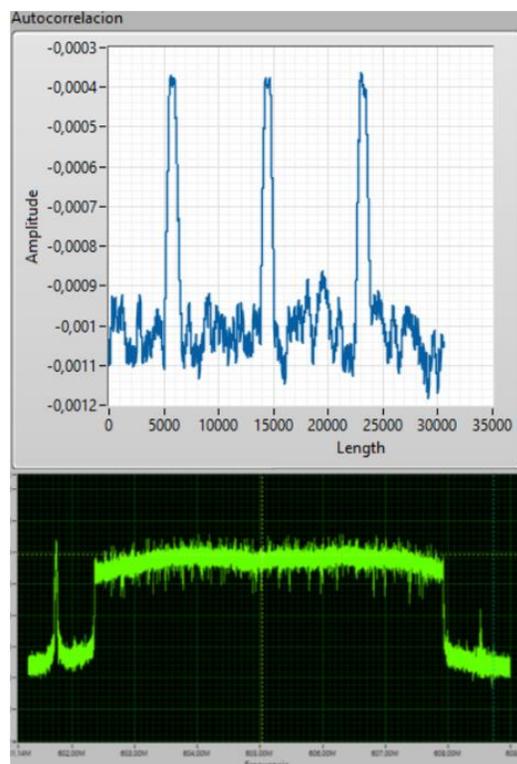


Figura 35. Diagrama de flujo del detector cicloestacionario

En la sección c, ingresan los valores de las muestras calculadas en la sección b, mediante el ciclo *for* que representa el desarrollo del algoritmo de *Van de Beek*, se realiza un barrido muestra a muestra y se va comparando, en el momento en que los elementos coincidan va a existir la máxima verosimilitud o la máxima diferencia, para comprender este hecho, en la Figura 36 se muestra la gráfica de autocorrelación donde se visualizar que la amplitud varía desde valores negativos y cuando estos llegan o tienden a cero se alcanza la máxima verosimilitud y se forman los picos de la señal que son el indicativo de la presencia de una señal ISDB-Tb en el canal, en este caso los picos que se forma corresponden a la señal ISDB-Tb presente en el canal 36 con la frecuencia de 605,143MHz. Cabe recalcar que para implementar el algoritmo de *Van de Beek* se utiliza las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17) presentadas en los fundamentos teóricos del Capítulo 2.

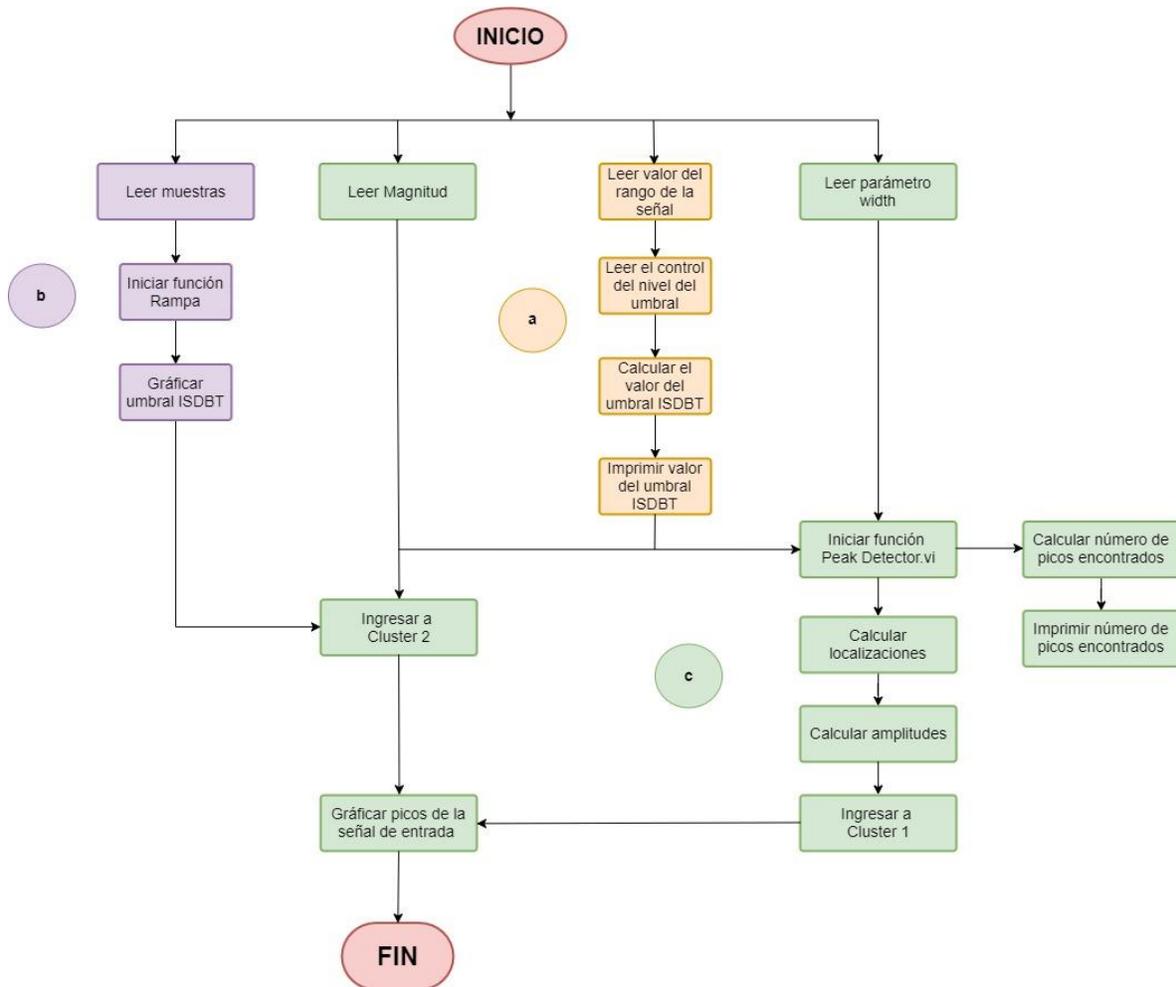


**Figura 36.** Gráfica de Autocorrelación

Una vez que finaliza el ciclo *for*, se obtiene la magnitud de la señal, posterior a ellos, en la parte d, se calcula el máximo y mínimo valor para determinar el rango de amplitud de la señal que como se muestra en la Figura 36 varía desde un valor negativo hasta cero. Finalmente, en la sección e, se realiza un proceso para poder encontrar la posición de los picos, es decir el número de la muestra donde se encuentra el pico máximo de la señal.

Luego que se ha determinado el valor de la magnitud de la señal, el rango y la posición de los picos, estos valores ingresan al bloque detector ISDBT en donde se implementa la función que permite validar si la señal presente en el canal corresponde a una señal de ISDB-Tb y adicional, este bloque permite mostrar la gráfica de la señal y los picos que se forman cuando la señal que se detecta tiene características correspondientes al estándar ISDB-Tb.

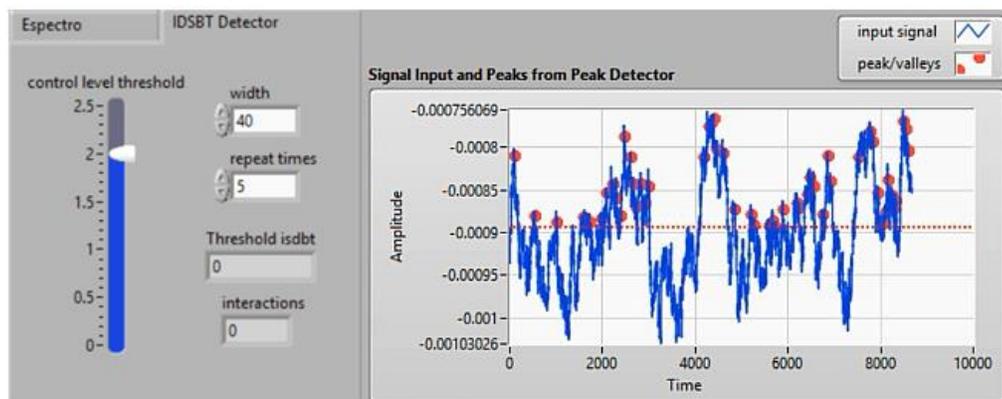
En la Figura 37 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo programado para la detección de la señal ISDB-Tb. En la sección a, se divide el rango de la señal para un control de nivel de umbral con el objetivo de establecer el valor al que se colocará el umbral ISDB-Tb dentro de la gráfica. En la sección b, mediante la función Rampa se grafica el nivel del umbral, como se muestra en la Figura 39, el *control level threshold* se ha configurado en 2 por lo que el umbral de la gráfica esta dibujado en la mitad del rango y se representa por la línea punteada de color rojo.



**Figura 37.** Diagrama de flujo del detector de señal ISDB-Tb

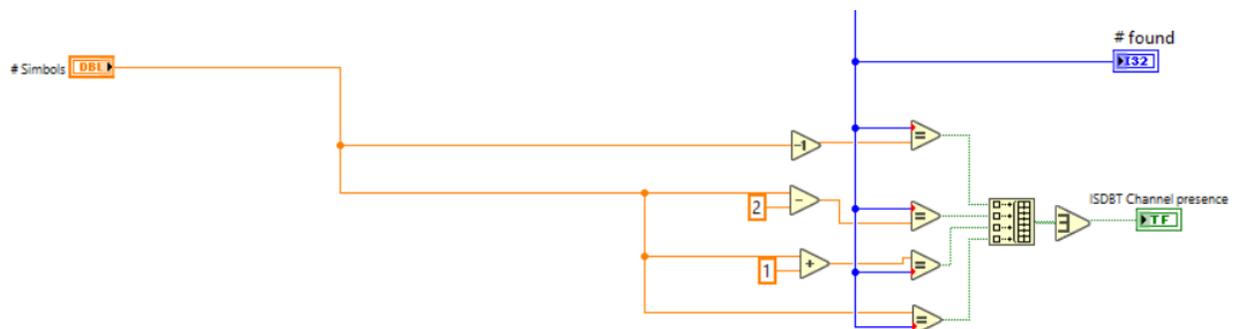
La detección de los picos de la señal se realiza a través de la función *Peak Detector.vi*, propia de *LabVIEW*, a esta función ingresan los siguientes parámetros: la magnitud de la señal, el valor del umbral y el parámetro *width* que se configura a un valor de 40 y como se muestra en la Figura 39, representa el ancho de banda de los círculos de color rojo que se grafican sobre los picos de la señal; a la salida de la función se obtienen los valores de la localización y las amplitudes que ingresan al *Cluster 1*, por otro lado, el valor de salida de la función Rampa y la magnitud de la señal forman un *Cluster 2*, posterior a ello, se extraen los valores de los dos *Cluster* de salida y se

forma la gráfica completa de la señal donde se visualizará en tiempo real como la función *Peak Detector.vi*, identifica los picos de la señal que sobrepasan el umbral establecido, descartando de esta forma las señales que no son ISDB-Tb, todo este proceso se realiza en la sección c del diagrama de flujo y la gráfica resultante se muestra en la Figura 38 donde también se visualiza todos los parámetros que se configuraron para el detector.



**Figura 38.** Parámetros del detector IDDB-Tb y gráfica de la señal

### 3.5.1 Led Detector de Señal ISDB-Tb



**Figura 39.** Validación del led detector ISDB-Tb

En la Figura 39 se muestra el diagrama de bloques para el encendido del led indicador de la presencia de una señal ISDBT, lo que realiza el algoritmo es una validación para lo cual establece cuatro condiciones que ingresan a una operación lógica OR, se hace una comparación entre el número de símbolos y el número de picos encontrados y si se cumple alguna de las condiciones definidas, el led *ISDBT Channel presence* se enciende, caso contrario el led permanece apagado.

Cabe recalcar que el número de picos encontrados es un parámetro que se obtuvo de la función *Peak Detector.vi*. En el anexo 2 se muestra el panel frontal completo de la detección de señal ISDBTb.

## CAPÍTULO IV

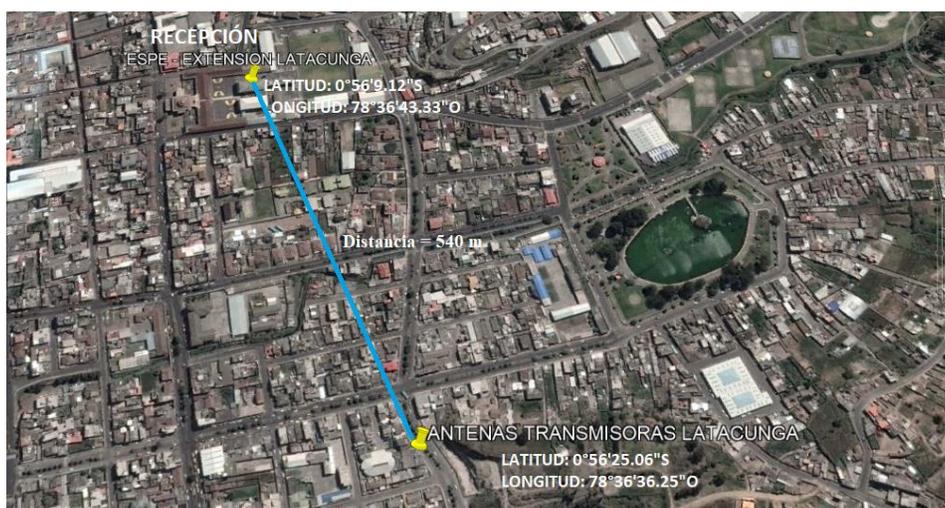
### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Introducción

En este capítulo se describe el funcionamiento del sistema de radio cognitivo desarrollado para la detección de frecuencias de TVWS, se presenta la ejecución del algoritmo implementado y el análisis de su comportamiento en los siguientes escenarios: Quito, ESPE matriz Sangolquí y ESPE extensión Latacunga. Se visualizará como el escenario de ejecución influye en los resultados obtenidos.

#### 4.2 Ejecución del Sistema de Radio Cognitiva en ESPE – Latacunga

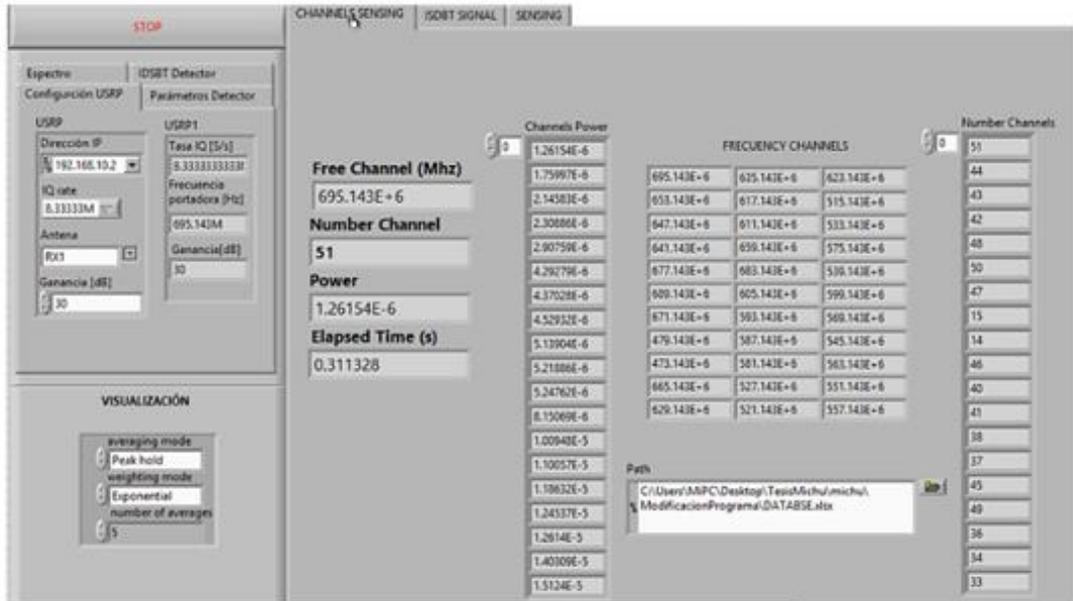
En la Figura 40 se muestra el escenario de ejecución, se puede visualizar las coordenadas de ubicación de la ESPE campus Latacunga desde donde se realizaron las pruebas y así como las coordenadas del lugar donde se encuentran las antenas transmisoras, adicional se muestra la distancia existente entre el transmisor y receptor.



**Figura 40.** Escenario de ejecución - Latacunga

En base a la concesión de frecuencias establecida por la Arcotel en el listado completo de estaciones de RTV obtenido de (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2018), se ha verificado que para la provincia de Cotopaxi la única estación de televisión abierta que tiene autorización para transmisión de señal de televisión digital en la banda de frecuencias UHF, es la estación privada COLOR TV que opera en el canal 25, frecuencia 539,143MHz y cuya área de cobertura es la ciudad de Latacunga, sin embargo, al realizar las pruebas de ejecución en este escenario, entre las 14h00 y 15h00, el sistema de radio cognitivo no detectó presencia de señal ISDB-Tb en esta frecuencia ni en ninguna de las demás frecuencias de prueba, la causa de este hecho pudo deberse a que en el momento de la ejecución no hubo transmisión de señal digital o la señal ISDB-Tb presente no fue lo suficientemente robusta como para que el sistema detecte con claridad los picos de la señal.

En la Figura 42 se puede observar la reproducción del video con los resultados de la ejecución realizada en Latacunga, se puede visualizar en la matriz de frecuencias de canales que ningún canal se pintó de color rojo lo que permite determinar que en ese momento en ningún canal hubo presencia de señal ISDB-Tb, así mismo se muestra el canal con menor interferencia asociado a su frecuencia y el nivel de energía presente.



*Figura 41.* Ejecución del sistema en Latacunga

En la Tabla 7 se ha recopilado los resultados obtenidos por cada ejecución realizada donde se observa el canal más limpio, su frecuencia y el valor de energía que ha sido medido por el sistema de radio cognitivo, se realizaron tres ejecuciones para determinar cómo varían los canales y el nivel de energía.

**Tabla 7.**  
*Canal más limpio en Latacunga*

Ejecución	Canal libre	Energía (W)	Energía (dB)	2do canal libre	Energía (W)	Energía (dB)
1era	51	1.26E-01	-58,991	44	1.76E-01	-575,449
2da	51	1.30E-01	-588,645	44	2.06E-01	-568,509
3era	42	1.19E-01	-592,464	51	1.35E-01	-587,069

Como se puede verificar, en la primera ejecución el canal 51 tuvo el menor nivel de energía, mientras que, en la tercera ejecución, el nivel de energía más bajo se midió en el canal 42 por lo que en esta ejecución el sistema escogió a la frecuencia 641,143MHz como la más limpia, estos resultados nos permiten evidenciar que el nivel de energía presente en cada canal varía constantemente, por lo tanto, la determinación del canal con menor interferencia también va a cambiar en función del nivel de energía que en ese momento exista en el canal.

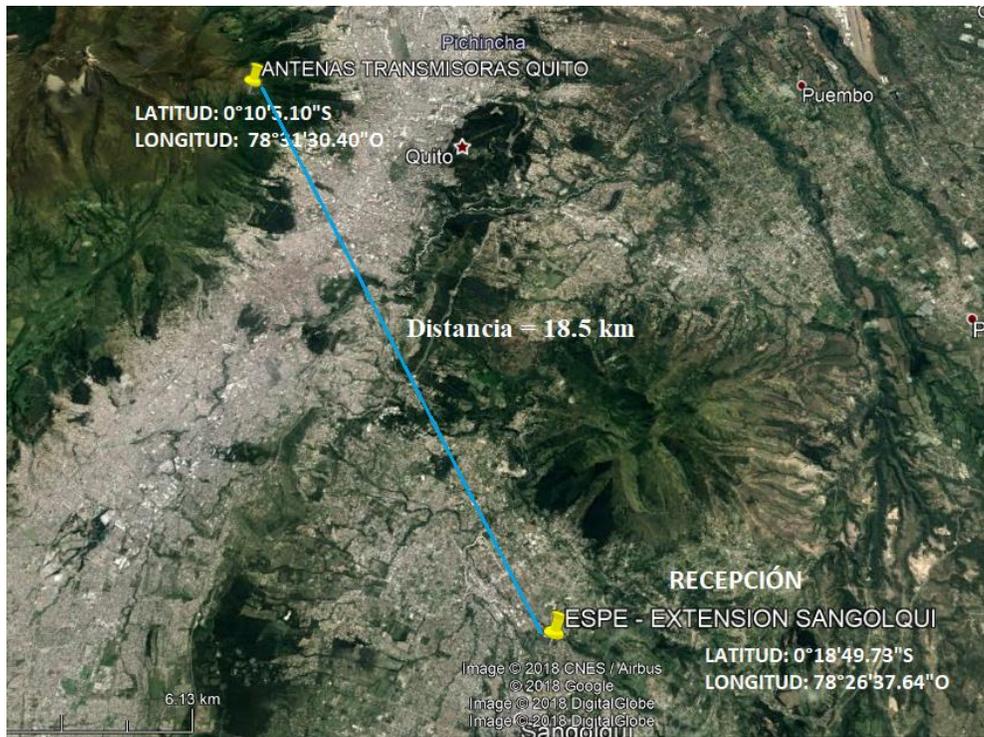
La ventaja que ofrece el sistema al mostrar en su panel frontal una matriz con todas las frecuencias de canal ordenadas en función de su energía, es que si en un determinado momento, el canal con menor interferencia es ocupado por un usuario primario, se puede verificar cual es el segundo canal más limpio y la energía de la señal presente en el mismo, de esa manera se puede saber que otro canal utilizar para continuar con la transmisión.

Respecto al canal 25, en la Tabla 8 se muestran los niveles de potencia media que determinó el sistema por cada ciclo de ejecución realizada, considerando estos resultados, el canal 25 no sería el más óptimo para realizar una transmisión, aun cuando no se haya detectado presencia de señal ISDB-T, ya que el nivel de energía presente se encuentra entre los valores más altos con respecto a los demás canales.

**Tabla 8.***Nivel de energía del canal 25*

CANAL 25			
Ejecución	Energía (W)	Energía (dB)	Posición
1era	3.72E+00	- 442,945	27
2da	7.00E+00	- 415,490	28
3era	3.82E+00	- 441,846	28

#### 4.3 Ejecución del Sistema de Radio Cognitivo en ESPE – Sangolquí

**Figura 42.** Escenario de ejecución –ESPE Sangolquí

En la Figura 42 se muestra las coordenadas de ubicación de la zona de recepción donde se realizaron las pruebas y las coordenadas donde se encuentra la antena transmisora, para este escenario, la concesión de frecuencias cambia completamente, ya que son varios los canales en que usuarios primarios transmiten señal de televisión digital, en la Tabla 9 se muestra el listado

completo de estaciones RTV establecido por la Arcotel y que rige tanto para la ciudad de Sangolquí como para Quito, la información completa se puede encontrar en (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2018).

**Tabla 9.**

*Estaciones RTV para Quito y Sangolquí*

CATEGORÍA	NOMBRE ESTACIÓN	FRECUENCIA	CANAL	ÁREA SERVIDA
TDT	TC TELEVISION	671	47	MEJIA-PEDRO MONCAYO- RUMIÑAHUI- QUITO
TDT	CANAL UNO	659	45	RUMIÑAHUI- QUITO
TDT	TELEAMAZONAS	581	32	PEDRO MONCAYO- RUMIÑAHUI- QUITO- CAYAMBE
TDT	TELEVISION DEL PACIFICO	569	30	PEDRO MONCAYO- RUMIÑAHUI- QUITO- CAYAMBE
TDT	TELESUCESOS	635	41	RUMIÑAHUI- QUITO
TDT	ECUADOR TV	545	26	MEJIA- RUMIÑAHUI- QUITO
TDT	TELESISTEMA	593	34	PEDRO MONCAYO- RUMIÑAHUI- QUITO- CAYAMBE
TDT	46 UHF ABC (RTU)	647	43	QUITO- RUMIÑAHUI
TDT	TELEVISION SATELITAL	623	39	QUITO
TDT	TELEVISORA NACIONAL	605	36	MEJIA-PEDRO MONCAYO- RUMIÑAHUI- QUITO- CAYAMBE

Fuente: (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2018)

Al ejecutar el sistema de radio cognitivo en el escenario de la ESPE, campus Sangolquí, el sistema determinó al canal 51 como el canal más libre, cuya frecuencia corresponde a 695,143MHz y el nivel de energía detectado fue de -60,1096dB. Adicional a ello, en varios canales se detectó la presencia de señal ISDB-Tb, por lo que el sistema los identificó con color rojo para distinguirlos del resto de canales libres. En la Figura 43 se muestra el panel frontal y la ejecución del video con los resultados ya descritos para este escenario.

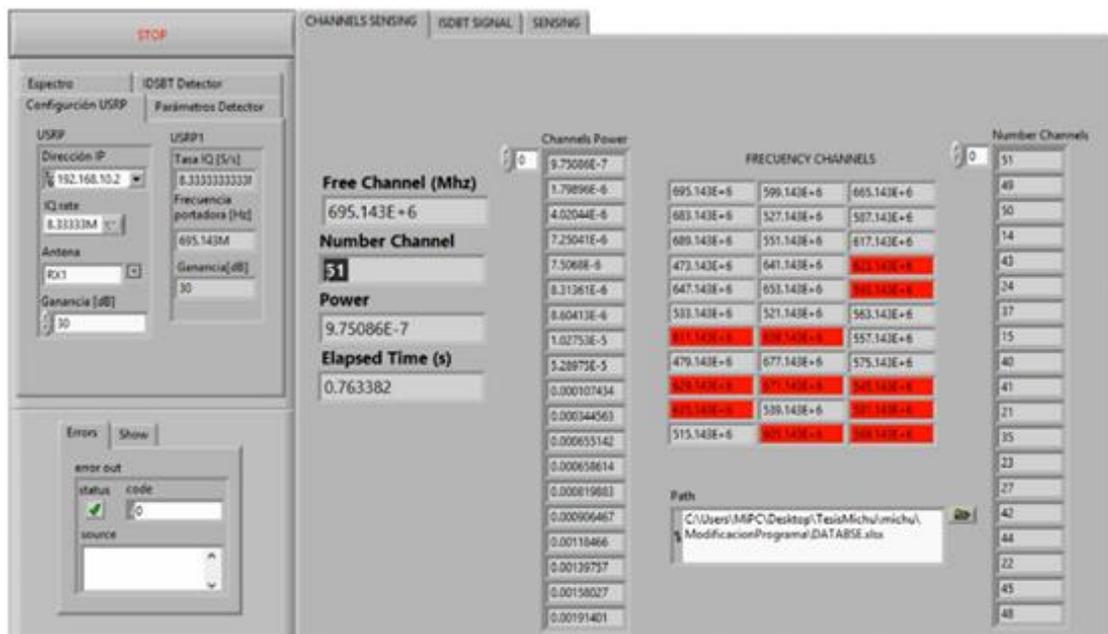


Figura 43. Ejecución del sistema en Sangolquí

## ANÁLISIS DE LA DETECCIÓN DE SEÑAL ISDB-T EN LOS CANALES

Con respecto a los canales que transmiten señal de televisión digital en las bandas UHF, se ha comprobado que el sistema detecta correctamente los picos de la señal cuando esta presenta características de una señal ISDB-Tb, sin embargo, al momento de variar ciertos parámetros como la ganancia, se puede verificar que esto influye de cierta manera en la precisión con que se determina la presencia de un usuario primario en un canal. En la Tabla 10 se muestra los resultados obtenidos al variar dicho parámetro.

**Tabla 10.**

*Detección de canales con señal ISDB-Tb al variar la ganancia*

Ganancia (dB)	Frecuencia de canales ISDB-T (MHz)	Canales ISDB-T
30	635,143	41
	623,143	39
	605,143	36
	593,143	34
	581,143	32
	569,143	30
30	635,143	41
	593,143	34
	623,143	39
	605,143	36
	545,143	26
	581,143	32
0	569,143	30
	605,143	36
	581,143	32
	569,143	30

Se verifica que al configurar el sistema con una ganancia de 30dB se tiene mejores resultados y mayor precisión en la detección de canales ocupados por señal ISDB-Tb, por el contrario, con una

ganancia de 0dB, el sistema determina únicamente tres canales ocupados por usuarios primarios lo que permite evidenciar que no se detecta de manera adecuada las señales ISDB-Tb que realmente se encuentran presente en los demás canal, esto se debe a que al ser la ganancia muy baja el pico de la señal no se puede identificar correctamente pues se ve afectado por el ruido.

Por otro lado, en la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos al realizar dos ejecuciones manteniendo el mismo valor de ganancia y número de símbolos, como se puede verificar, los canales se muestran en orden ascendente en función del nivel de energía presente, adicional a ello, se verifica que en la primera ejecución se detectó 6 canales ocupados por señal ISDB-Tb, mientras que en la segunda ejecución los resultados varían y el sistema determinó 9 canales ocupados.

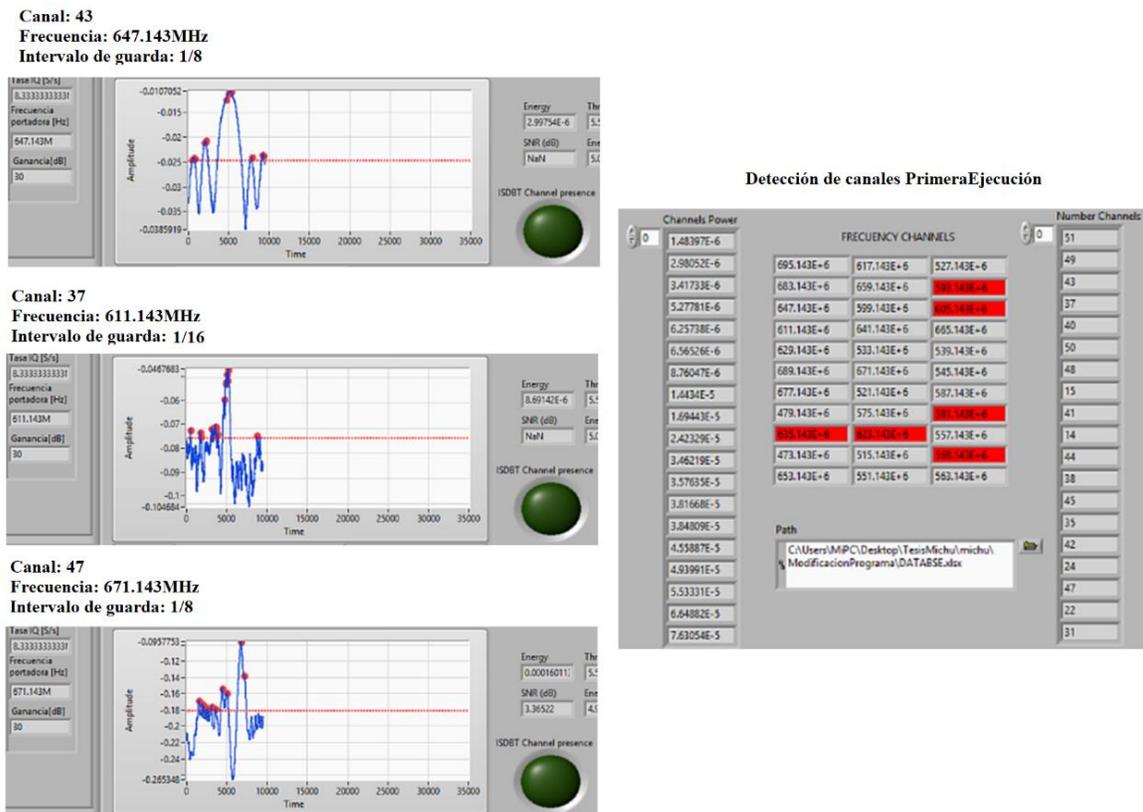
**Tabla 11.**

*Resultados manteniendo la misma ganancia y número de símbolos*

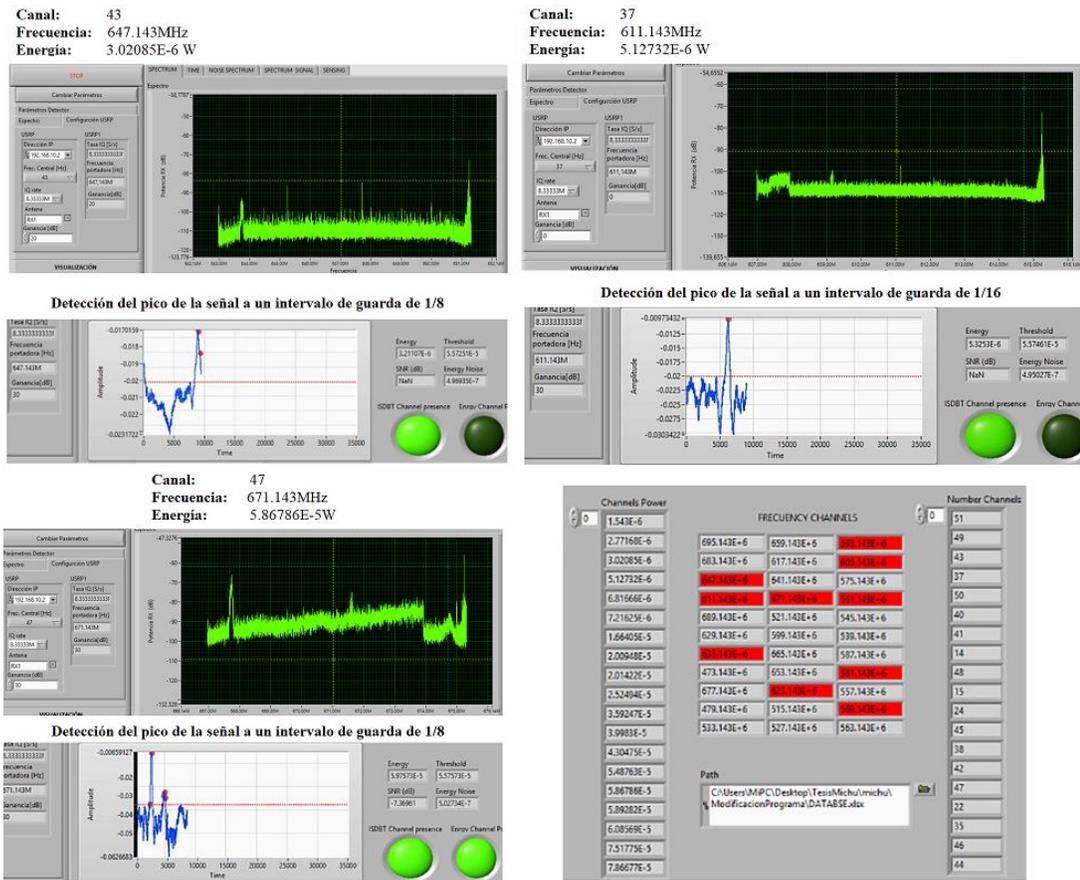
Ejecución	Ganancia (dB)	Símbolos	Frecuencia (MHz)	Canales ISDB-T
1era	30	2	635,143	41
			623,143	39
			593,143	34
			605,143	36
			581,143	32
			569,143	30
2da	30	2	647,143	43
			611,143	37
			635,143	41
			671.143	47
			623,143	39
			593,143	34
			605,143	36
			581,143	32
			569,143	45

Al realizar una comparación entre las dos ejecuciones, se verifica que la diferencia radica en la detección de los canales 43, 37 y 47 correspondientes a las frecuencias 647,143MHz, 611,143MHz

y 671,143MHz, mientras en la primera ejecución el sistema determina que estos canales se encuentran libres, en la segunda ejecución el sistema detecta la presencia de una señal ISDB-Tb, en las Figura 44 y 45 se puede observar cómo se comporta el detector ISDB-Tb ante los dos casos mencionados y de igual manera se muestra la matriz de frecuencias de canal ordenada en función de la energía e identificado con color rojo los canales con presencia de usuario primario.



**Figura 44.** Resultados obtenidos en la primera ejecución



**Figura 45.** Resultados obtenidos en la segunda ejecución

En la primera ejecución, con respecto a los canales 43 y 47, el sistema de radio cognitivo determinó que no se tiene presencia de señal ISDB-T, aun cuando la Arcotel establece que dichas frecuencias transmiten señal de televisión digital, este hecho se puede explicar al verificar las gráficas de los picos de la señal que se muestran en la Figura 44 en donde se observa, para los canales mencionados, que la señal ISDB-Tb no es muy robusta y por ende los picos que se forman no se encuentran bien definidos, de igual forma, al verificar el espectro de la señal se puede observar que el nivel de energía es muy bajo y su relación señal a ruido muy pequeña por lo que en ciertos momentos la señal ISDB-Tb que viaja por estos canales se ve afectada por el ruido ocasionando que no sea detectada. Sin embargo, en la segunda ejecución mostrada en la Figura 45,

los resultados cambian, pues se observa que la señal presente es más robusta y los picos que se forman son más limpios y mejor definidos por lo que el led detector en esta ejecución se enciende indicando la presencia de la señal ISDB-Tb en dichos canales y por ende en la matriz de resultados del sistema se pinta de color rojo las frecuencias 647,143MHz y 671,143MHz.

Para el canal 37, de igual manera la energía sensada es muy baja y en las Figuras 44 y 45 se puede evidenciar que existe la presencia de señal ISDB-Tb pero esta no es constante, si bien es cierto, este canal no se encuentra identificado como una de las estaciones con transmisión de señal ISDB-Tb, sin embargo, la Norma Técnica para el servicio de Televisión analógica y Plan de Distribución de canales establece que la banda 608-614 MHz (canal 37) está atribuida a título primario al servicio de Radioastronomía (Comisión Nacional de Telecomunicaciones, 2011), esto explica que la presencia de usuario primario en esta banda de frecuencia sea muy variante.

## **ANÁLISIS DEL CANAL CON MENOR INTERFERENCIA DETERMINADO POR EL SISTEMA**

En lo que respecta a la determinación del canal con menor interferencia, al realizar varias pruebas de ejecución se pudo verificar que la potencia sensada en cada canal varía constantemente y por ende su posición en la matriz de resultados de frecuencias de canal. En la Tabla 12, se puede verificar que, para las cuatro primeras ejecuciones, el sistema determina que el canal más limpio corresponde al 51, para la quinta ejecución hay una variación ya que el canal con menor nivel de energía es el 49, sin embargo, la diferencia con el valor de energía que se verificó en el canal 51 es muy baja, aproximadamente de  $3,449E-09$  W por lo que se podría afirmar que el canal que tiende a estar más libre la mayor parte del tiempo es el canal 51.

**Tabla 12.***Resultados del canal con menor interferencia*

Ejecución	Canal Libre	Frecuencia de canal (MHz)	Energía (W)	Energía (dB)
1	51	695,143	9,75086E-07	-60.1096
2	51	695,143	1,36065E-06	-58.6625
3	51	695,143	1,15581E-06	-59.3711
4	51	695,143	1,543E-06	-58.1163
5	49	683,143	3,30932E-07	-64.8026

#### 4.4 Ejecución del Sistema de Radio Cognitivo en Quito



**Figura 46.** Escenario de ejecución Quito

En la Figura 46 se muestra las coordenadas de ubicación de la zona de recepción en donde se realizaron las pruebas, en este caso la ESPE de idiomas, campus El Inca y las coordenadas donde se encuentra la antena transmisora. De igual forma se muestra la distancia existente entre el transmisor y receptor.

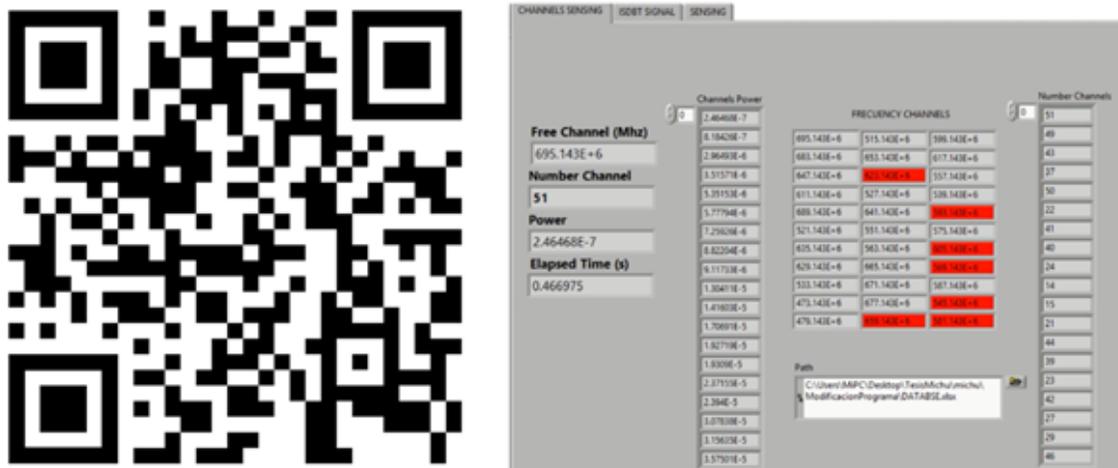


Figura 47. Ejecución del Sistema en Quito

En la Figura 47 se muestra el panel frontal y el video de la ejecución del sistema de radio cognitivo en el escenario de Quito, se puede verificar que para esta ejecución el sistema determinó al canal 51 con frecuencia 695,143MHz como el canal más limpio para transmitir. En la matriz central se encuentran todas las frecuencias ordenadas de menor a mayor en función del nivel de energía presente en cada canal, se observa identificados de color rojo aquellos canales que el sistema los determino como ocupados por un usuario primario, cabe recalcar que estos canales corresponden a aquellos que se definieron en la Tabla 9 como estaciones que transmiten señal de televisión digital.

## ANÁLISIS DE LA DETECCIÓN DE SEÑAL ISDB-T EN LOS CANALES

Para analizar el comportamiento del sistema, se realizaron varias pruebas de ejecución modificando los parámetros de la ganancia y el número de símbolos, con ello se pudo verificar que se presenta una variación en la detección de canales libres y ocupados. En la Tabla 13 se muestra

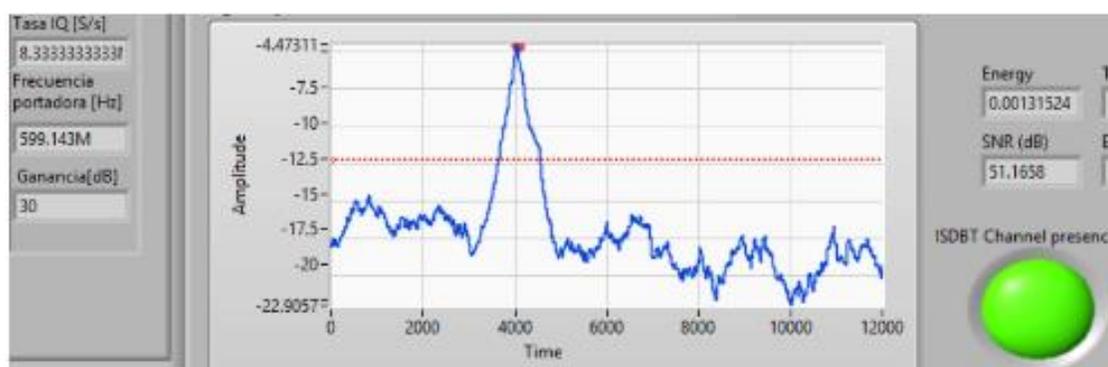
los resultados de los canales que se detectaron ocupados en las tres ejecuciones realizadas con 4 símbolos y ganancias de 0 dB y 30 dB.

**Tabla 13.**

*Canales ocupados obtenidos con 4 símbolos, 0dB y 30dB*

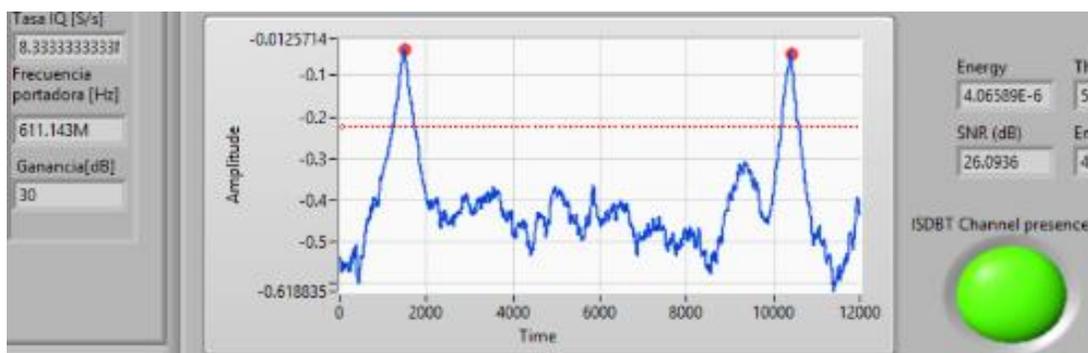
Ejecución	Ganancia (dB)	Símbolos	Frecuencia (MHz)	Canales
1	30	4	611,143	37
			599,143	35
			617,143	38
			623,143	39
			605,143	36
			671,143	47
			659,143	45
			569,143	30
			581,143	32
			545,143	26
			593,143	34
2	30	4	611,143	37
			599,143	35
			605,143	36
			623,143	39
			569,143	30
			659,143	45
			671,143	47
			581,143	32
			545,143	26
			593,143	34
			3	0
635,143	41			
671,143	47			
599,143	35			
623,143	39			
581,143	32			
545,143	26			
605,143	36			
569,143	30			
593,143	34			

Como se puede observar, la mayoría de canales que el sistema detecta como ocupados corresponden a los canales establecidos por la Arcotel para la transmisión de señal de televisión digital, lo cuales se detallan en la Tabla 8, sin embargo, el sistema también detecta señal ISDB-Tb en el canal 35 con frecuencia central de 599,143MHz, en la Figura 48, se muestra los picos de la señal que viaja en este canal y como el led detector se enciende validando que efectivamente se tiene la presencia de un usuario primario.



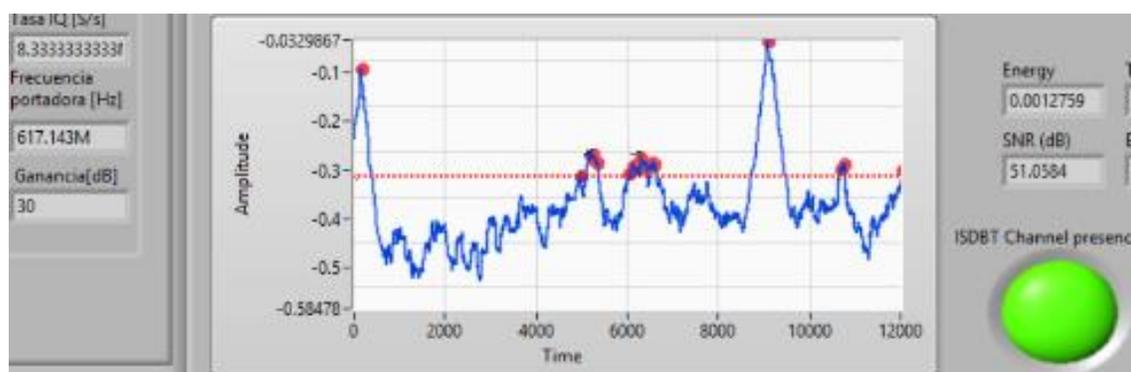
**Figura 48.** Picos de la señal del canal 35 con intervalo de guarda de 1/8

En el canal 37 correspondiente a la frecuencia 611,143MHz también se detectó la presencia de un usuario primario, como ya se había mencionado anteriormente, esto se debe a que es un canal reservado para títulos primarios al servicio de Radioastronomía. En la Figura 49 se muestra los picos que se forma en la señal que se encuentra en este canal.



**Figura 49.** Picos de la señal del canal 37 con intervalo de guarda de 1/16

Otro canal que también se detectó con presencia de señal ISDB-Tb corresponde a la frecuencia de 617,143MHz, canal 38 el cual se identificó únicamente en la primera ejecución, los picos que se forman para la señal de este canal se muestran en la Figura 50 donde se puede comprobar que efectivamente hubo la presencia de un usuario primario.



**Figura 50.** Picos de la señal del canal 38 con intervalo de guarda de 1/16

En la Tabla 14 se muestra los resultados de los canales que se detectaron ocupados en las cuatro ejecuciones realizadas con 2 símbolos y ganancias de 0 dB y 30 dB.

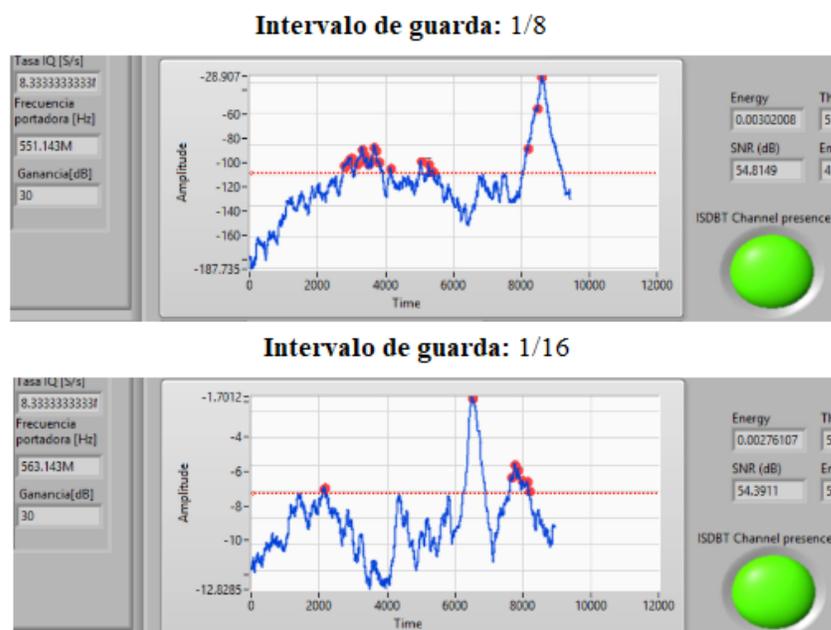
**Tabla 14.***Canales ocupados obtenidos con 2 símbolos, 0dB y 30dB*

<b>Ejecución</b>	<b>Ganancia (dB)</b>	<b>Símbolos</b>	<b>Frecuencia (MHz)</b>	<b>Canales</b>
<b>1</b>	30	2	635,143	41
			671,143	47
			599,143	35
			593,143	34
			605,143	36
			581,143	32
			623,143	39
			569,143	30
			<b>2</b>	30
521,143	22			
551,143	27			
623,143	39			
563,143	29			
617,143	38			
599,143	35			
605,143	36			
545,143	26			
581,143	32			
569,143	30			
593,143	34			
<b>3</b>	0	2	623,143	39
			659,143	45
			593,143	34
			605,143	36
			569,143	30
			545,143	26
			581,143	32
<b>4</b>	0	2	611,143	37
			599,143	35
			623,143	39
			605,143	36
			671,143	47
			545,143	26
			569,143	30
			581,143	32
			593,143	34

Para este caso, al igual que en los resultados obtenidos en la Tabla 13, se verifica que la mayoría de canales que se han detectado como ocupados por usuarios primarios corresponden a los detallados en la Tabla 9.

Respecto a los canales 35, 37 y 38 correspondientes a las frecuencias 599,143MHz, 611,143MHz y 617,143MHz, se observa que la señal presente corresponde a una señal ISDB-Tb, en las Figuras 48, 49 y 50 se muestran los picos que se formaron para cada una de estas señales.

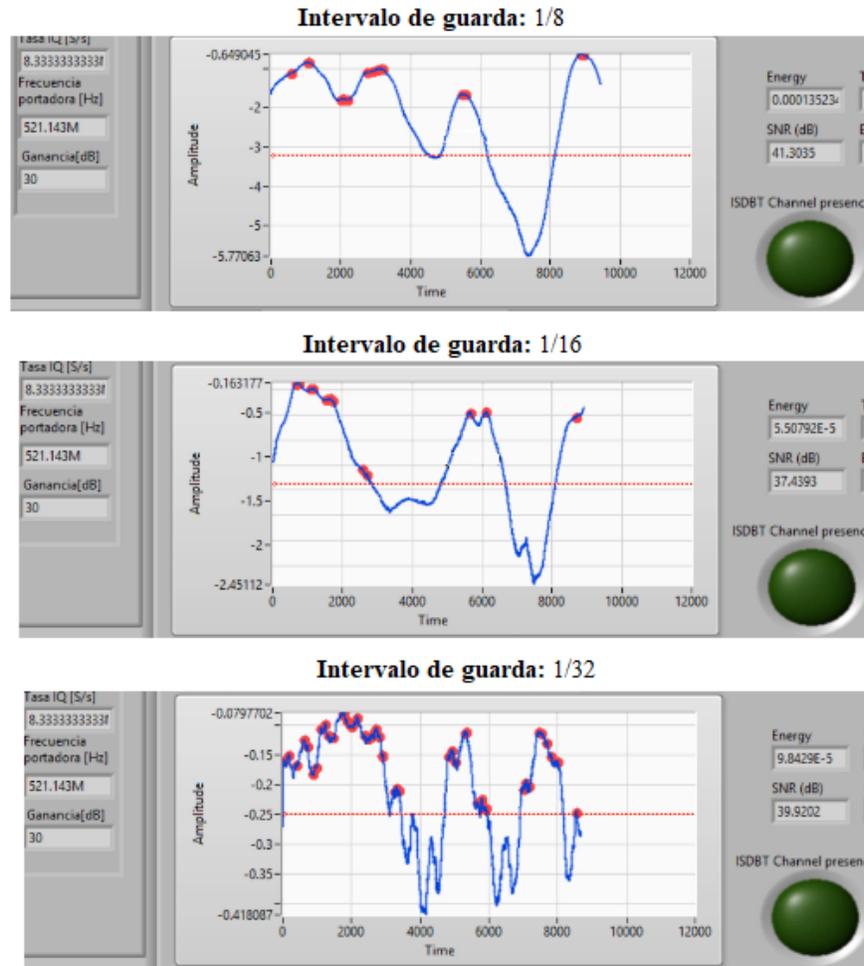
En la segunda ejecución se observa que se determina la presencia de una señal ISDB-Tb en los canales 27 y el 29 con frecuencias correspondientes a 551,143MHz y 563,143MHz, en la Figura 51 se muestra los picos que se forman para estas señales y como el led detector se enciende corroborando la presencia de un usuario primario.



**Figura 51.** Picos de la señal de los canales 27 y 29

Con respecto al número de símbolos, se verifica que para los dos casos mostrados en las Tablas 12 y 13, los resultados fueron satisfactorios y no hubo mayor diferencia a excepción de la frecuencia 671,143MHz, ya que en las ejecuciones realizadas con 2 símbolos se muestra este canal como libre, mientras que para todas las pruebas realizadas con 4 símbolos se detecta este canal como ocupado lo que indica que efectivamente existe la presencia de una señal ISDB-Tb, por tanto, para este escenario se puede determinar que al trabajar con un mayor número de símbolos existe cierta mejora en la detección ya que al tener más muestras la señal y por ende los picos son más definidos lo que permite discriminar de mejor manera si las características de la señal sensada corresponden o no a un usuario primario.

Por otro lado, al aumentar el valor de la ganancia, en este caso a 30dB la detección es más óptima y se reduce la probabilidad de detectar falsos positivos, es decir, que se detecte erróneamente canales ocupados, como sucedió en la segunda ejecución que se muestra en la Tabla 13, en donde, al configurar el sistema con una ganancia de 0dB se detectó como ocupado al canal 22 con frecuencia de 521,143MHz, pero al realizar la verificación de los picos de la señal presente en dicho canal se pudo comprobar que sus características no corresponden a una señal ISDB-Tb, en la Figura 52 se muestra las gráficas correspondientes a la señal del canal en mención.



**Figura 52.** Picos de la señal del canal 22

## ANÁLISIS DEL CANAL CON MENOR INTERFERENCIA DETERMINADO POR EL SISTEMA

En lo que respecta al nivel de energía medido en cada canal, se pudo verificar que este valor cambia constantemente en cada una de las ejecuciones lo que permite evidenciar que la energía presente en los canales es muy variante. Para la determinación del canal con menor interferencia en este escenario, se presenta la Tabla 15 donde se muestra los resultados obtenidos por cada ejecución.

**Tabla 15.**  
*Resultados del canal más limpio por cada ejecución*

Ejecución	Canal Libre	Frecuencia de canal (MHz)	Energía (W)	Energía (dB)
1	49	683,143	2,11769E-06	-56,7414
2	49	683,143	2,16792E-06	-56,6396
3	49	683,143	1,80353E-06	-57,4388
4	49	683,143	1,91743E-06	-57,1728
5	49	683,143	3,30932E-07	-64,8026
6	51	695,143	1,65238E-06	-57,8189
7	51	695,143	2,46468E-06	-56,0824
8	37	611,143	5,43E-06	-52,6520

Se verifica que en una de las ejecuciones el sistema detecta al canal 37 como con menor interferencia, sin embargo, no se debe utilizar este canal para la transmisión a pesar de tener el nivel más bajo de energía, ya que como se mencionó anteriormente, este canal es atribuido para servicios de Radioastronomía y se ha observado que la frecuencia con que se presenta un usuario primario es muy variante (Comisión Nacional de Telecomunicaciones, 2011).

Finalmente, en la mayoría de las ejecuciones realizadas se observa que los resultados varían entre el canal 49 y 51, sin embargo, el canal 49 es el que la mayor parte del tiempo tiende a presentar menor interferencia.

#### **4.5 Análisis General del Desempeño del Sistema de Radio Cognitiva**

Al comparar el comportamiento del sistema en los diferentes escenarios de prueba se pudo verificar que el valor que se configura para la ganancia influye significativamente en la precisión con que se detecta si un canal se encuentra libre o no, pues se ha observado para cada uno de los escenarios que si la señal aumentar en ganancia los picos que se forman son más limpios, por el contrario, si este valor disminuye, el pico presenta más ruido, en tal sentido, se ha establecido que el valor más apropiado para que la detección sea eficiente y disminuya al máximo la probabilidad

de falsos positivos es de 30dB. Por otro lado, como ya se había mencionado, al tener un mayor número de símbolos, los picos de la señal se forme de mejor manera, sin embargo, en las pruebas realizadas para los distintos escenarios, al modifica este parámetro se observó que la influencia en la detección de una señal ISDB-Tb no es muy significativa, por lo tanto, se ha determinado que el valor más apropiado para que el sistema funcione correctamente y sobre todo para que se optimice al máximo los tiempos de ejecución, es de 2 símbolos. En la Tabla 16 se muestra los parámetros configurados para el detector ISDB-Tb con los que se consigue que el funcionamiento del sistema de radio cognitivo sea eficiente.

**Tabla 16.**

*Parámetros de la detección ISDB-Tb*

Parámetros del Detector ISDB-Tb	
Control level threshold	2
Width	40
repeat times	5
Ganancia (dB)	30
Número de símbolos	2

Es importante recalcar que la variación que se realice sobre los parámetros del detector ISDB-Tb es independiente por lo que esto no interfiere en el funcionamiento del detector de energía y por ende en el cálculo de la energía presente en cada canal y la determinación de la frecuencia más limpia.

Para todos los escenarios de prueba se pudo verificar que los niveles de energía calculados varían constantemente por lo que el orden en el que se presentan los canales en la matriz de frecuencias mostrada en el panel frontal del sistema también varía según la energía medida en cada ejecución lo que ocasiona que también exista una variación en la determinación del canal con menor interferencia.

En la Tabla 17, se muestran los canales que se determinaron con menor interferencia por cada ciclo de ejecución, como se puede observar, en los tres escenarios de prueba el sistema de radio cognitivo coincidió en detectar al canal 51 como uno de los canales más limpios.

**Tabla 17.**  
*Frecuencias más limpias en los distintos escenarios*

Escenario	Canal Libre	Frecuencia de canal (MHz)
ESPE - Sangolquí	51	695,143
ESPE - Latacunga	51	695,143
	42	641,143
Quito	49	683,143
	51	695,143

Como ya se había mencionado inicialmente, para el escenario de Latacunga, el sistema detectó que todos los canales de prueba se encontraban libres, a pesar de que en este escenario el canal 25 transmite señal de televisión digital, sin embargo, a la hora de la ejecución, el sistema no detectó señal ISDB-Tb en dicho canal, esto pudo deberse a que la señal ISDB-Tb presente no era muy robusta o simplemente el canal estaba libre, este hecho permite evidenciar que los canales asignados a usuarios primarios no están todo el tiempo ocupados y por ende pueden ser subutilizados por usuarios secundarios.

Con respecto a los escenarios de Quito y Sangolquí se pudo verificar que el espectro de la señal presente en el canal 43 con frecuencias 647,143MHz, tiene un nivel de energía muy bajo y por ende la señal ISDB-Tb no es muy robusta, lo que ocasiona que en ciertas ejecuciones no se detecte su presencia en el canal, por tanto, este canal también puede ser subutilizado por un usuario secundario el momento en que el sistema lo detecte como libre, sin embargo, siempre se debe tener en cuenta la concesión de canales establecida por la Arcotel para estos escenarios.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 5.1. Conclusiones

Se concluyó a través del análisis de las características físicas del USRP-2920, que este equipo de última tecnología ofrece múltiples prestaciones en el campo de las Telecomunicaciones, las cuales facilitan el diseño de sistemas de transmisión, recepción y aplicaciones que manejen de manera eficiente altas tasas de datos como es el caso del sistema de radio cognitivo implementado.

Analizando las funcionalidades de los lenguajes de programación que soporta el equipo NI-USRP 2920, se determinó que la mejor opción es el software de programación *LabVIEW*, principalmente por la alta capacidad que brinda en el procesamiento de señales en banda base y la versatilidad que ofrece para la adquisición de los datos, además de las prestaciones de programación en modo gráfico que facilitan el desarrollo del algoritmo y disminuye su complejidad frente a otros lenguajes de programación.

Se observó que los métodos de detección de energía y cicloestacionario implementados funcionan correctamente y proporcionan una mayor eficiencia, robustez y precisión al momento de determinar los canales libres.

Se verificó para los canales 41 y 43 que el nivel de energía presente es muy bajo lo que implica que el ruido en el canal sea mayor y por ende que no se pueda detectar la presencia de una señal ISDB-T por lo que en ciertas ocasiones el sistema detecta a estos canales como libres, bajo estas condiciones, un usuario secundario podría subutilizar dichos canales, sin embargo, es importante considerar siempre la distribución de frecuencia que se tiene para cada región.

Se comprobó para los escenarios de Quito y Sangolquí que en el canal 37 correspondiente a la frecuencia 611.143MHz existe la presencia de un usuario primario, a pesar de que su nivel de energía es muy bajo, el sistema detectó los picos de la señal ISDB-Tb que viajan en este canal a un intervalo de guarda correspondiente a 1/16 y según lo establecido en el plan de distribución de canales, esta frecuencia esta atribuida a títulos primarios al servicio de radioastronomía con lo que se comprueba que el sistema está funcionando adecuadamente.

Se determinó que el barrido automático implementado en el algoritmo para los cuatro intervalos de guarda que establece el estándar ISDB-Tb fue muy importante, ya que de esta forma se logró que el sistema de radio cognitivo adquiriera mayor robustez para que se detecte con alta precisión los picos de todas las señales ISDB-Tb que viajan en cada canal.

Se verificó que la mayoría de señales de las bandas UHF viajan únicamente en los intervalos de guarda de 1/8, 1/16 y 1/32 por lo que podría eliminarse el análisis establecido para el intervalo de guarda de 1/4.

Se observó que independientemente de los parámetros con los que se configure el detector ISDB-T, los picos de las señales que son captados por el USRP se grafican correctamente y el led detector puede identificarlos con precisión cuando estos corresponden a señales ISDB-Tb.

Se verificó que para definir el canal más libre influye en gran manera el escenario donde se ejecutan las pruebas, ya que varía la distribución de frecuencias establecidas en cada región y el nivel de potencia presente en cada canal, de igual forma interviene la hora a la que se ejecute el sistema, pues como en el caso de Latacunga en donde el canal 25 trasmite señal ISDB-Tb, se validó que en horas de la tarde el canal se encontraba libre por lo que podía ser utilizado por un usuario secundario.

Con respecto a los tres escenarios el sistema determinó para el canal más libre corresponde al canal 51 con frecuencia de 695.143MHz, adicional se validó que en Latacunga existe mayor cantidad de canales libres y por ende se puede aprovechar de mejor manera el espectro radioeléctrico a diferencia de los escenarios de Quito y Sangolquí.

Finalmente, se concluyó que el sistema de radio cognitivo es fiable y eficiente bajo los parámetros de ganancia de 30 dB y configurando el mínimo número de símbolos requerido que corresponde a 2, esto último con la idea de alcanzar tiempo óptimos de ejecución, adicional se pudo validar la gran ventaja y utilidad que proporciona el sistema implementado en lo que se refiere a la utilización eficiente del espectro radioeléctrico, ya que efectivamente se evidenció que ciertos canales licenciados al estar en modo de prueba, no permanecen ocupados todo el tiempo por lo que podrían ser subutilizados por usuarios secundarios.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda que al trabajar con los equipos USRP se realice un estudio previo del hardware como tal para posterior a ellos poder escoger el algoritmo que se va a implementar, considerando de igual forma los requerimientos que demanda la aplicación a desarrollar, por ello es importante que se realice una investigación profunda del funcionamiento del equipo y su estructura para así tener clara las características que podrían influenciar en el desarrollo de una aplicación de radio definida por software.

Con la finalidad de reducir la interferencia al máximo, es fundamental que el equipo USRP-2920 y el computador se conecten a través de un cable Ethernet de mejor categoría, como, por ejemplo, de categoría 6e; en la medida de lo, posible se recomienda trabajar con un computador que posea un puerto Gigabit Ethernet con la finalidad de minimizar las pérdidas de paquetes.

En caso de utilizar un adaptador de Gigabit Ethernet a USB 3.0, se recomienda validar que el puerto USB se encuentre en buen estado caso contrario se presentarán errores en la ejecución de programa y por ende los resultados obtenidos serán erróneos.

Se recomienda que la frecuencia de muestreo que se configure en el sistema no sobrepase los 8,33MHz, esto con la finalidad de evitar que se genere un exceso de muestras, de igual forma se debe procurar que el valor establecido no sea muy bajo para evitar que se presenten problemas con el filtro pasabajos de la señal por lo que se requiere que el valor sea mayor a la 6MHz para capturar todas las señales sin inconvenientes.

### **5.3. Trabajos Futuros de Investigación**

El sistema de radio cognitivo desarrollado será la base para la transmisión bajo la tecnología TVWS pues muestra a los usuarios una interfaz gráfica con todas las frecuencias UHF ordenadas de menor a mayor en función de la energía, donde se identifican los canales libres de los ocupados y se muestra el canal con menor interferencia, toda esta información pueda ser utilizada para la implementación de un transmisor de radio cognitiva bajo el estándar 802.22, lo cual ofrecería ventajas muy atractivas como lo es el alcance, cobertura de varios kilómetros y principalmente la capacidad de mejorar la conectividad en zonas rurales donde las características geográficas hacen que el uso de redes WiFi sea ineficiente y su implementación costosa.

Como punto de partida para trabajos relacionados con televisión digital, se podría implementar un sensor de frecuencias TVWS utilizando otro tipo de detector como el Filtro de *Wavelet*, o el método cicloestacionario completo con los cuales se lograría una detección de canales mucho más robusta.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABNT 15601. (2007). *Televisión digital terrestre — Sistema de transmisión*. Recuperado el 17 de Julio de 2018, de <https://docplayer.es/2497852-Abnt-nbr-15601-norma-brasilena-television-digital-terrestre-sistema-de-transmision-isdb-tb.html>
- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2018). *Canalización 2018*. Recuperado el 12 de Agosto de 2018, de <http://www.arcotel.gob.ec/canalizaciones-2018/>
- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2018). *Radiodifusión sonora y televisión abierta*. Recuperado el 18 de 08 de 2018, de <http://www.arcotel.gob.ec/radiodifusion-sonora-y-television-abierta-2/>
- Balseca, M., & Jurado, L. (2014). *Diseño e implementación de un sistema prototipo en vehículos de emergencia ciudadana para la transmisión de mensajes de alerta de voz hacia radio receptoras FM en vehículos públicos y privados mediante el uso de USRP y software de control programable*. Universidad Politecnica Salesiana Sede Guayaquil, Guayaquil. Recuperado el 22 de Julio de 2018, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6851/1/UPS-GT000660.pdf>
- Bolaños, L., & Ruiz, A. (2015). *Diseño de un algoritmo para el análisis y monitoreo de parámetros de señales LTE 4G utilizando la plataforma de Radio Definido por Software (USRP)*. Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, Guayaquil. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10419/1/UPS-GT001480.pdf>
- Borbón, R., & Montejó, S. (Abril de 2015). *La radio cognitiva y su Impacto en el uso eficiente del espectro de radio*. La Habana. Recuperado el 4 de Julio de 2018, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59282015000100004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282015000100004)
- Cáceres, R. (2017). *Técnicas de detección y análisis de la ocupación espectral en radio cognitiva de la zona noroccidente de la ciudad de Bogotá*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Recuperado el 26 de Junio de 2018, de <http://hdl.handle.net/11349/5875>
- Comisión Nacional de Telecomunicaciones. (2011). *Norma técnica para el servicio de televisión analógica y plan de distribución de canales*. Recuperado el 20 de Agosto de 2018, de <http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/06/Norma-Tecnica-de-Television-Analogica.pdf>

- Contreras, D., & Ferrer, F. (2016). *Implementación en un FPGA de la etapa del sincronismo de un receptor OFDM para recepción de señales de DTV del estándar ISDB-T*. Montevideo. Recuperado el 17 de Julio de 2018, de <https://iie.fing.edu.uy/publicaciones/2016/CF16/CF16.pdf>
- Cruz, A. (2017). *Estudio espectral para la aplicación del estándar 802.22 (WRAN) mediante el uso de USRP para zonas rurales del cantón Ambato*. Quito.
- DiBEG. (2007). *Características del sistema ISDB-T*. Recuperado el 16 de Julio de 2018, de [https://www.dibeg.org/techp/feature/isdb-t\\_Spanish.pdf](https://www.dibeg.org/techp/feature/isdb-t_Spanish.pdf)
- Digital, T. (Febrero de 2015). *Televisión Digital*. Obtenido de <http://tvdigitalepn.blogspot.com/p/blog-page.html>
- Esteve, L. (2014). *Diseño y montaje de una estación de seguimiento de satélite en órbita baja*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. Recuperado el 26 de Julio de 2018, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/46577/TFG%20-%20Esteve%20Moreno%2C%20Laura.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Federal Communications Commission. (2002). *Spectrum policy task force report, ET Docket No. 02-135*.
- Gómez, S., Mera, F., & Schneeberger, M. (2014). *Radios cognitivos y sesado del espectro radioeléctrico*. Montevideo.
- Hernández, P., & Carro, G. (Noviembre de 2016). *Principios, normas y soluciones de radio cognitiva*. Universidad de la República. Recuperado el 25 de Junio de 2018, de [https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/wp-content/uploads/sites/3/2017/01/Doc4\\_20170118\\_CognitiveRadio.pdf](https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/wp-content/uploads/sites/3/2017/01/Doc4_20170118_CognitiveRadio.pdf)
- ITU Report. (2009). *Definiciones de sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) y sistema radioeléctrico cognitivo (SDR)*. ITU Report UIT-R SM.2152.
- Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información. (s.f.). *Ecuatorianos deben adquirir televisores con estándar ISDBT-TB*. Obtenido de <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/ecuatorianos-deben-adquirir-televisores-con-estandar-isdbt-tb/#>

- Miranda, D., Fuentes, O., & Urbina, S. (2015). *Análisis del estándar ISDB-T para ser utilizado en una posible implementación de la televisión digital terrestre en Nicaragua*. Managua. Recuperado el 16 de Julio de 2018, de <http://ribuni.uni.edu.ni/1245/1/80670.pdf>
- Mitola, J., & Gerald, M. (1999). *Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal*. Recuperado el 23 de Julio de 2018, de <https://pdfs.semanticscholar.org/fb5d/1bb23724d9a5a5eae036a2e3cf291cac2c1b.pdf>
- Montero, J. (2014). *Implementación de un sistema de comunicaciones basado en Software Radio*. Madrid. Recuperado el 23 de Julio de 2018, de <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20140130JuanPabloMonteroHidalgo.pdf>
- Muñoz, J. (2015). “*Estudio de factibilidad para la Implementación de un laboratorio de Televisión Digital Terrestre (TDT) para el laboratorio de Networking en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Guayaquil*”. Guayaquil. Recuperado el 16 de Julio de 2018, de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/20233>
- National Instruments. (17 de Mayo de 2017). *USRP-2920 from panel and leds*. Recuperado el 21 de Julio de 2018, de <http://www.ni.com/documentation/en/software-defined-radio-device/latest/usrp-2920/pinout/>
- National Instruments. (17 de Mayo de 2017). *USRP-2920 Specifications*. Recuperado el 22 de Julio de 2018, de <http://www.ni.com/documentation/en/software-defined-radio-device/latest/specs-usrp-2920/specs/>
- Orellana, S. (2013). *Universal Software Radio Peripheral*. Recuperado el 21 de Julio de 2018, de National Instruments
- Perejil, I. (2016). *Implementación de terminales de radio cognitiva en la banda de TV*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Recuperado el 1 de Julio de 2018, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/84101/Implementacion%20de%20terminales%20de%20Radio%20Cognitiva%20en%20la%20banda%20de%20TV.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pinar, I., & Murillo, J. (2011). USRP y Matlab. En *Laboratorio de comunicaciones digitales radio definida por software*. Sevilla. Recuperado el 25 de Julio de 2018, de [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11984/fichero/Volumen+7\\_USRP+y+Matlab%252FUSRP+y+Matlab.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11984/fichero/Volumen+7_USRP+y+Matlab%252FUSRP+y+Matlab.pdf)

- Robles, T. (15 de 12 de 2015). *Conacyt*. Obtenido de <http://conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/tic/4437-el-apagon-analogico>
- Sanchez, A. (2015). *La Radio Definida por Software: Diseño de un receptor de banda aeronáutica VHF*. Recuperado el 22 de Julio de 2018, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/83161/Resum.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Schweber, B. (24 de 10 de 2013). *Comprender los principios básicos de los amplificadores de potencia y de bajo ruido en diseños inalámbricos*. Recuperado el 10 de 09 de 2017, de Digikey electronics: <https://www.digikey.com/es/articles/techzone/2013/oct/understanding-the-basics-of-low-noise-and-power-amplifiers-in-wireless-designs>
- Tandra, R., & Sahai, A. (2008). SNR walls for signal detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. Recuperado el 09 de Julio de 2018, de [https://people.eecs.berkeley.edu/~sahai/Papers/jstsp\\_final\\_sub.pdf](https://people.eecs.berkeley.edu/~sahai/Papers/jstsp_final_sub.pdf)
- Television, D. (2015). *Blogspot*. Obtenido de Blogspot: <http://tvdigitalepn.blogspot.com/p/blog-page.html>
- tp-link. (2015). *UE300*. Obtenido de [https://www.tp-link.com/es/products/details/cat-688\\_UE300.html](https://www.tp-link.com/es/products/details/cat-688_UE300.html)
- Van de Beek, J.-J., Sandell, M., & Borjesson, P. (Julio de 1997). *ML Estimation of Time and Frequency*. Recuperado el 16 de Julio de 2018, de <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:989074/FULLTEXT01.pdf>
- Wireless Innovation Forum. (2007). *What is Software Defined Radio*. Obtenido de [http://www.wirelessinnovation.org/Introduction\\_to\\_SDR](http://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR)