



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

DETECCIÓN DE ESPECTRO PARA RADIO COGNITIVA EN FRECUENCIAS DE  
TELEVISIÓN MEDIANTE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. MÓNICA ALCARAZ VADILLO

TUTORA  
DRA. FATIMA MOUMTADI  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd.Mx., noviembre 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente: Dr. Salvador Landeros Ayala**

**Secretario: Dr. José María Matías Maruri**

**Vocal: Dra. Fatima Moumtadi**

**1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Oleksandr Martynyuk**

**2<sup>do.</sup> Suplente: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón**

**Lugar o lugares donde se realizó la tesis:**

**México, Ciudad de México, Facultad de Ingeniería, UNAM**

**TUTORA DE TESIS:**

**Dra. Fatima Moumtadi**

---

Firma

## **Agradecimientos**

Dios, tu amor y bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros, aprender de mis errores y mejorar como ser humano.

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México, que abrió sus puertas del conocimiento para mí, a la Facultad de Ingeniería y al programa de Posgrado en Ingeniería por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mi formación académica, gracias a mis profesores de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, quienes me han brindado una excelente formación y fueron partícipes de este proceso educativo.

Agradezco a mi directora de tesis, Dra. Fatima Moumtadi. Gracias por su apoyo y motivación en la realización de esta tesis, por sus consejos y enseñanzas, los cuales han influido para bien en mis decisiones académicas y personales, pero sobretodo agradezco la confianza que me ha brindado.

Gracias a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, además de ser los principales promotores de mis sueños, por cada día creer y confiar en mí.

A mis amigos y compañeros, quienes hicieron más fácil esta etapa, al compartir sus conocimientos y buenos deseos.

Finalmente, agradezco a CONACYT por el financiamiento económico durante mis estudios de maestría y la Dirección General del Personal Académico el apoyo recibido para el proyecto PAPIME PE101416, al brindarnos los recursos materiales para la realización de esta tesis.

# TABLA DE CONTENIDO

---

ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS .....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	VII
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
RESUMEN .....	1
OBJETIVO.....	2
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
METODOLOGÍA.....	3
ESTADO DEL ARTE .....	5
<b>CAPÍTULO 1. SISTEMA DE RADIO COGNITIVA EN FRECUENCIAS DE TELEVISIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1 RADIO COGNITIVA.....	10
1.1.1 <i>Funciones y Aplicaciones</i> .....	11
1.1.2 <i>Arquitectura de Radio Cognitiva</i> .....	12
1.1.3 <i>Estándar 802.22 Wireless Regional Area Network (WRAN)</i> .....	15
1.2 FRECUENCIAS DE TELEVISIÓN EN MÉXICO .....	18
1.2.1 <i>El espectro radioeléctrico y su escasez</i> .....	18
1.2.2 <i>Distribución de frecuencias para la Televisión</i> .....	20
1.2.3 <i>Los huecos espectrales en Televisión</i> .....	22
<b>CAPÍTULO 2. RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE (RDS).....</b>	<b>23</b>
2.1 ORÍGENES DEL RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE .....	23
2.2 PLATAFORMA RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE .....	24
2.2.1 <i>GNU Radio</i> .....	25
2.2.2 <i>GNU Radio Companion (GRC)</i> .....	27
1.3 UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL.....	31
1.3.1 <i>Placa Madre (USRP E100)</i> .....	32
1.3.2 <i>Placa Hija (WBX-40)</i> .....	33
1.3.3 <i>Antenas</i> .....	34
<b>CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN DE ESPECTRO .....</b>	<b>35</b>
3.1 MODELO PARA SENSAR EL ESPECTRO .....	35
3.2 MÉTODOS DE SENSADO .....	36
3.2.1 <i>Detector de Energía</i> .....	37
3.2.2 <i>Detector Cicloestacionario</i> .....	43
3.2.3 <i>Detector de Filtro Acoplado</i> .....	45

3.3	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE SENSADO ÓPTIMO.....	48
<b>CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL DETECTOR DE ENERGÍA .....</b>		<b>50</b>
4.1	IMPLEMENTACIÓN.....	50
4.2	PRUEBAS DE IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE SIMULACIONES.....	54
<b>CAPÍTULO 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DETECTOR DE ESPECTROS.....</b>		<b>58</b>
5.1	DISEÑO DE PROGRAMA PARA IMPLEMENTACIÓN EN UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL (USRP) .....	58
5.2	MONITOREO DE FRECUENCIAS DE LA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE (TDT).....	60
5.2.1	<i>Infraestructura .....</i>	<i>61</i>
5.2.2	<i>Área de Pruebas.....</i>	<i>65</i>
5.2.3	<i>Pruebas de Nivel de Energía detectado para el canal 20 de televisión.....</i>	<i>67</i>
5.2.4	<i>Niveles de Energía detectados para la banda de televisión.....</i>	<i>72</i>
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>80</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>82</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>85</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

FIGURA 0.1 Diagrama de bloques para la metodología.....	4
FIGURA 0.2 Técnicas de detección espectral [3].....	6
FIGURA 0.3 Aspectos de la detección para radio cognitiva [5].....	7
FIGURA 0.4 Canales de 6 [MHz] disponibles para uso secundario en México [8].....	9
FIGURA 1.1 Funcionalidades de la radio cognitiva [9].....	13
FIGURA 1.2 Esquema de Agujero Espectral [15].....	14
FIGURA 1.3 Aplicación red WRAN IEEE 802.22 con BS y CPE [18].....	15
FIGURA 1.4 Función de Detección de Espectro [19].....	17
FIGURA 1.5 Mediciones del uso del espectro [9].....	18
FIGURA 1.6 Tráfico Global Móvil [20].....	19
FIGURA 1.7 Estructura de bandas involucradas en la transición a la TV Digital [21].....	20
FIGURA 2.1 Sistema de Radio Definido por Software [24].....	25
FIGURA 2.2 Flowgraph en Python [26].....	26
FIGURA 2.3 Espacio de trabajo en GNU Radio.....	27
FIGURA 2.4 Bloques de procesamiento de señal.....	29
FIGURA 2.5 Esquema de modulación QAM.....	29
FIGURA 2.6 Oscilograma de la señal 4QAM.....	30
FIGURA 2.7 Espectro de la señal 4QAM.....	30
FIGURA 2.8 Arquitectura de la tarjeta madre USRP E100 [29].....	32
Figura 2.9 Antena LP0410 [31].....	34
FIGURA 3.1 Diagrama de bloques del detector de energía [32].....	37
FIGURA 3.2 Curvas de la característica operativa del receptor (ROC) para el detector de energía bajo diferentes valores de SNR [5].....	39
FIGURA 3.3 Diagrama de bloques de un detector Cicloestacionario [34].....	44
FIGURA 3.4 Diagrama de bloques de un detector de Filtro Acoplado [35].....	46
FIGURA 4.1 Diagrama de Bloque de Energía.....	52
FIGURA 4.2 Bloques en GRC.....	54
FIGURA 4.3 Representación en el dominio del tiempo.....	55
FIGURA 4.4 Representación en el dominio de la frecuencia.....	55
FIGURA 4.5 Señal Sin ruido AWGN.....	56
FIGURA 4.6 Señal con ruido AWGN.....	57
FIGURA 5.1 Esquema de Implementación en USRP.....	58

<i>FIGURA 5.2 Analizador de espectro Spectran HF-4060</i> .....	61
<i>FIGURA 5.3 Esquema de configuración del analizador de espectro</i> .....	62
<i>FIGURA 5.4 Equipo USRP E100</i> .....	63
<i>FIGURA 5.5 Esquema de configuración del equipo RDS</i> .....	65
<i>FIGURA 5.6 Prueba de medición en Milpa Alta (Pueblo San Lorenzo Tlacoyucan)</i> .....	66
<i>FIGURA 5.7 Área de cobertura XHOPMA - TDT [40]</i> .....	68
<i>FIGURA 5.8 Espectro obtenido del Detector de Energía en el canal 30</i> .....	69
<i>Figura 5.9 Desempeño del Detector de Energía</i> .....	77
<i>Figura 5.10 Curvas Receiver Operating Characteristic (ROC)</i> .....	78
<i>FIGURA 5.11 Curvas ROC PARA usrp n200 [23]</i> .....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1-1 Dimensiones de Sensado [5]</i> .....	14
<i>Tabla 1-2 Umbrales para diferentes señales [14]</i> .....	16
<i>Tabla 1-3 Requerimientos de sensado – Norma IEEE 802.22 [17]</i> .....	16
<i>Tabla 1-4 Frecuencias de TV en la CDMX [22]</i> .....	21
<i>Tabla 2-1 Bloques en GRC</i> .....	28
<i>Tabla 3-1 Técnicas de Sensado de Espectro [24]</i> .....	36
<i>Tabla 3-2 Tabla comparativa de metodos de detección</i> .....	48
<i>Tabla 5-1 Especificaciones de los equipos para mediciones con el analizador de espectro [37]</i> .....	62
<i>Tabla 5-2 Umbral de detección para el analizador de espectro</i> .....	73
<i>Tabla 5-3 Umbral de detección para el USRP E100</i> .....	74
<i>Tabla 0-1 Características Finales del Detector de Energía</i> .....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

**ADC:** *Analog-to-Digital Converter*

**ASIC:** *Application Specific Integrated Circuit*

**ATSC:** *Advanced Television System Committee*

**AWGN:** *Additive White Gaussian Noise*

**BB:** *Baseband*

**BS:** *Base Station*

**CDMX:** *Ciudad de México*

**CONAPO:** *Consejo Nacional de Población*

**CPE:** *Customer Premises Equipment*

**DAC:** *Digital-to-Analog Converter*

**DEC:** *Densidad Espectral Cíclica*

**DSP:** *Digital Signal Processor*

**FAC:** *Función de Autocorrelación Cíclica*

**FCC:** *Federal Communications Commission*

**FFT:** *Fast Fourier Transform*

**FPGA:** *Field Programmable Gate Array*

**GSMA:** *GSM Association*

**IEEE:** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

**IF:** *Intermediate Frequency*

**IFT:** *Instituto Federal de Telecomunicaciones*

**INE:** *Instituto Nacional Electoral*

**INEGI:** *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*

**LFRTV:** *Ley Federal de Radio y Televisión*

**MAC:** *Media Access Control*

**NTIA:** *National Telecommunications and Information Administration*

**NTSC:** *National Television System Committee*

**RDS:** *Radio Definido por Software*

**RF:** *Radiofrecuencia*

**ROC:** *Receiver Operating Characteristic*

**RX:** *Receptor*

**SNR:** *Signal Noise Ratio*

**SSF:** *Spectrum Sensing Function*

**TDT:** *Televisión Digital Terrestre*

**TX:** *Transmisor*

**TV:** *Televisión*

**UHF:** *Ultra High Frequency*

**UIT:** *Unión Internacional de Telecomunicaciones*

**UNCTAD:** *United Nations Conference on Trade and Development*

**USRP:** *Universal Software Radio Peripheral*

**VHF:** *Very High Frequency*

**WRAN:** *Wireless Radio Area Network*

# INTRODUCCIÓN

---

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se aborda la investigación de las radios cognitivas, específicamente la implementación de la etapa: *Sensado de Espectro*, para la detección de usuarios primarios, analizando los algoritmos que actualmente se han implementado en la literatura, ya que ésta etapa afronta las mayores dificultades técnicas.

Primeramente, se lleva a cabo el monitoreo del espectro radioeléctrico para buscar bandas de frecuencias no utilizadas por los usuarios primarios, las cuales pueden cambiar dinámicamente en tiempo y espacio, el estudio es realizado en la banda de televisión (TV) utilizando la técnica de Detección de Energía, la cual consiste en medir la potencia de la señal de TV recibida dentro de un ancho de banda y compararla con una señal definida que actuará como umbral para detectar la existencia de un usuario primario y su tiempo de transmisión, o de lo contrario determinar si el canal de comunicación está desocupado [1].

La propuesta del proyecto está basada en las tecnologías de Radio Definido por Software (RDS), inicialmente se presenta la implementación para el método de detección de usuarios primarios usando programación en Python mediante el software GNU Radio y posteriormente las pruebas experimentales serán complementadas con la recepción de señales de TV mediante los dispositivos Universal Software Radio Peripheral (USRP) que son transceptores alojados en la computadora y pueden transmitir y recibir señales de radiofrecuencia en varias bandas, pueden usarse para aplicaciones en educación e investigación de comunicaciones.

## OBJETIVO

---

Implementar la etapa de detección espectral seleccionando el método detector de energía para una radio cognitiva que permita monitorear a los usuarios primarios en las frecuencias asignadas a la televisión (TV) y comprobar posible existencia de huecos espectrales en Televisión empleando la tecnología de Radio Definido por Software (RDS).

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

---

El concepto de radio cognitiva permite maximizar la utilización del espectro radioeléctrico, habilitando el acceso dinámico de usuarios secundarios o cognitivos (usuarios sin licencia) a bandas de frecuencias asignadas a usuarios primarios (usuarios licenciados), existen frecuencias por debajo de los 3 GHz que prácticamente están congestionadas y otras que podrían estar parcialmente desocupadas por algunos lapsos de tiempo, por lo tanto es necesario comenzar a buscar tecnologías de comunicación innovadoras que permitan explotar el espectro inalámbrico de una manera más inteligente y flexible.

La función de análisis del espectro comprende la revisión de la información obtenida mediante el sensado de espectro, considerando aspectos como la interferencia, atenuaciones, retardos y variabilidad en la disponibilidad del recurso espectral para la posterior toma de decisiones [2].

Actualmente se han desarrollado algoritmos de procesamiento de señales para monitorear el espectro electromagnético, ubicar si existen huecos espectrales disponibles y verificar si se adaptan a las necesidades de comunicación de un usuario cognitivo. Sin embargo, la evaluación del desempeño de estos algoritmos se lleva a cabo mediante simulaciones en computadora, asumiendo que se conocen datos que en

la práctica no están disponibles para los radios, lo que puede deteriorar el desempeño de los algoritmos en un ambiente real.

Este trabajo busca proporcionar información sobre las bandas de frecuencia que están subutilizadas mediante el sensado del espectro haciendo uso de la tecnología de Radio Definido por Software, ya que es una buena alternativa para la integración y convergencia de tecnologías inalámbricas, se espera que a corto plazo la tecnología evolucione lo suficiente, para que los estándares puedan adoptarlo y crear así un verdadero soporte de capa física para la interoperabilidad, lo cual permita una evolución del concepto de RDS hacia un nivel superior como es la Radio Cognitiva.

## METODOLOGÍA

---

La metodología a seguir consta de tres etapas:

Investigación sobre radios cognitivas como los algoritmos que se han implementado para la primer etapa del proceso cognitivo (detección del espectro), proyectos realizados con radio cognitiva para implementación de canales de comunicación y proyectos realizados utilizando Radio Definido por Software.

Evaluación de las técnicas de detección de espectro y la selección de la más adecuada y escalable.

Tomando en cuenta consideraciones de los parámetros para la detección de espectro como el nivel de potencia de ruido y potencias de las señales detectadas, por medio de la varianza del ruido se seleccionará un umbral ( $\lambda$ ) y la señal entrante se compara con dicho umbral, así se pueden identificar los canales de TV utilizados.

Las especificaciones serán programadas en el lenguaje Python, que es el lenguaje compatible con los dispositivos USRP, los cuales serán utilizados para realizar las pruebas reales y detectar los canales de TV.

Finalmente, se realizará la recolección de mediciones correspondientes a cada canal de TV mediante el USRP E100, para corroborar resultados se empleará un analizador de espectros y las pruebas se llevarán a cabo en una zona suburbana de México.

En la figura 0.1 se detalla el proceso a seguir para la realización de este proyecto:

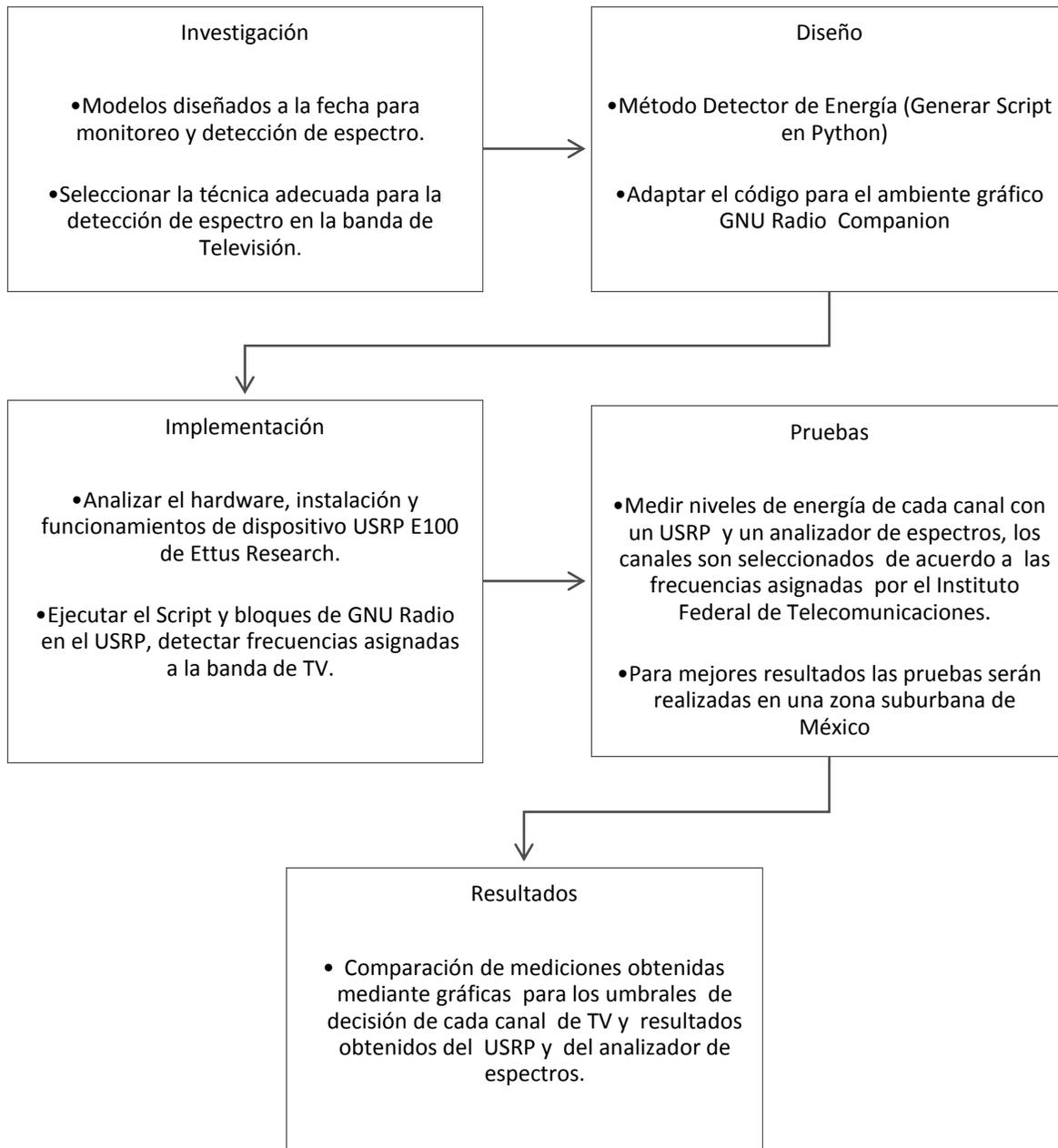


FIGURA 0.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA METODOLOGÍA

El objetivo principal de la radio cognitiva es maximizar la utilización del espectro, permitiendo el acceso dinámico de usuarios sin licencia, también llamados cognitivos, a bandas de frecuencias asignadas a usuarios licenciados [3], es decir, los usuarios cognitivos pueden utilizar las bandas que se encuentren inactivas y liberarlas en el momento que el usuario licenciado requiera su uso.

El acceso dinámico al espectro requiere de las cuatro fases del ciclo cognitivo [4]:

- **Detección del espectro:** Identificar espacios libres del espectro y mantener niveles de interferencia bajos para usuarios licenciados.
- **Decisión del espectro:** Selección del canal disponible y banda apropiada para la comunicación de los usuarios cognitivos.
- **Compartición de Recursos:** Los usuarios cognitivos deben implementar los métodos de planificación de espectro para compartirlo imparcialmente entre ellos.
- **Movilidad:** El usuario cognitivo debe abandonar el canal en caso de que el usuario primario inicie una transmisión de datos y debe ser capaz de reanudar su transmisión en otro espacio en libre del espectro.

El primer paso de un dispositivo de radio cognitiva es el desarrollo de técnicas que permitan la detección fiable de las partes inutilizadas del espectro, lo que se conoce como *Sensado de Espectro*. Así, un dispositivo de radio cognitiva debe escanear periódicamente su entorno de radiofrecuencia para detectar las partes del espectro que no están siendo utilizadas temporalmente por sus usuarios primarios, la fase de detección del espectro o sensado es la etapa de mayor reto en los sistemas de radio cognitivos, actualmente está todavía en sus primeras etapas de desarrollo.

A continuación en la figura 0.2 se mencionan las técnicas de detección y se explican algunas técnicas de detección que se han utilizado en la literatura:

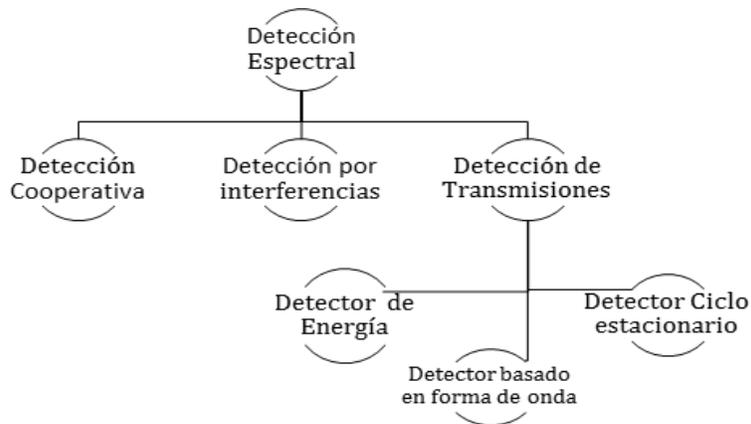


FIGURA 0.2 TÉCNICAS DE DETECCIÓN ESPECTRAL [3]

- Detector de energía

Consiste en medir la potencia de la señal recibida dentro de un ancho de banda y compararla con una señal definida  $\lambda$  que es el umbral, pero no es capaz de discriminar la señal primaria y otro tipo de señal [5], éste es el método más utilizado usando analizadores de espectro superheterodinos pero debido al limitado ancho de banda de los convertidores Análogo/Digitales disponibles, los analizadores de Transformada Rápida de Fourier (FFT) sólo son adecuados para mediciones en señales de baja frecuencia [4].

- Detector basado en la forma de onda

Se requiere información previa y precisa sobre ciertos patrones de las señales primarias, la detección puede realizarse correlacionando la señal recibida con una copia de la señal primaria [5], [6]. Requiere menos muestras de la señal para conseguir una buena detección, pero tiene alta complejidad.

- Detector Ciclo estacionario

Detecta haciendo coincidir las características generales de la señal recibida con las características de la señal primaria previamente conocida, es más robusto en contra de

la incertidumbre del ruido, mejor detección de señales de baja SNR y puede distinguir entre diferentes tipos de transmisiones y sistemas primarios [6], [7].

La detección del espectro se entiende como la medición del contenido espectral, en la radio cognitiva es un término que implica la obtención de las características de uso del espectro tales como tiempo, espacio y frecuencia. Así como qué tipos de señales son las que están ocupando el espectro incluyendo la modulación, la forma de onda, ancho de banda, frecuencia portadora, etc. sin embargo, esto requiere técnicas de análisis de señales con alta complejidad computacional.

En la Figura 0.3 se muestran algunas tareas importantes para la etapa de detección del espectro:

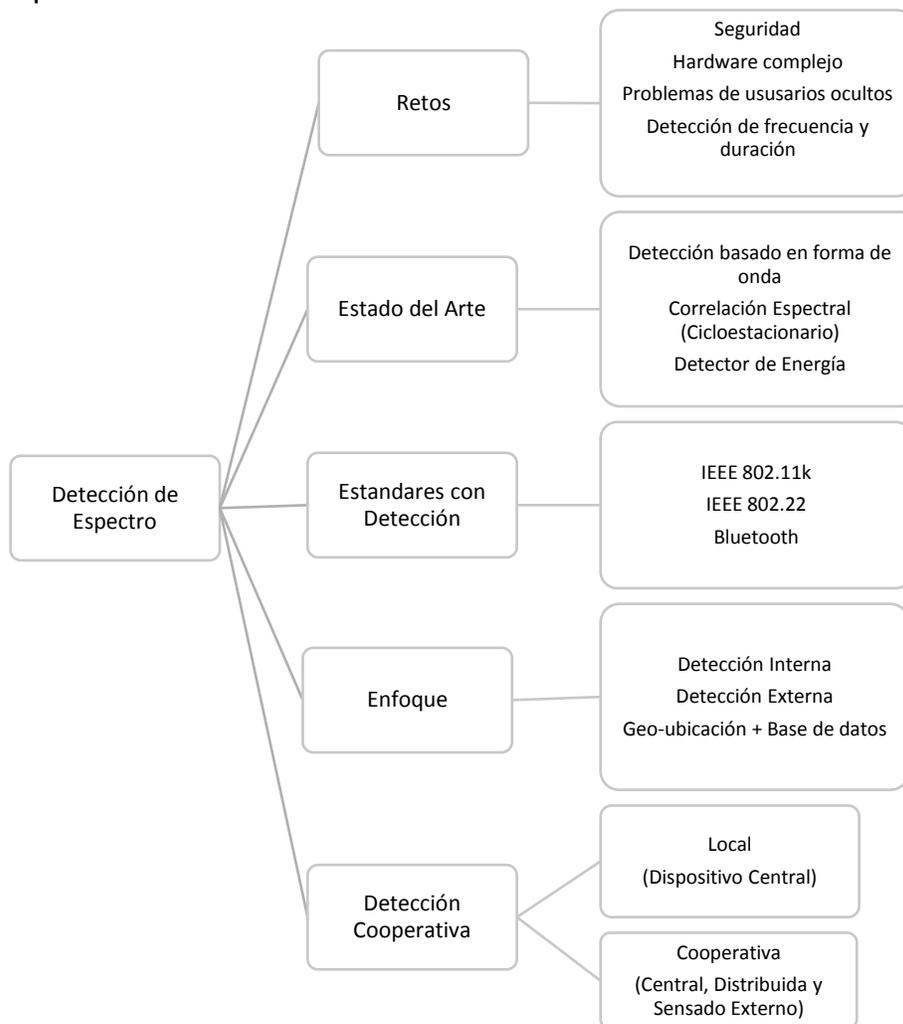


FIGURA 0.3 ASPECTOS DE LA DETECCIÓN PARA RADIO COGNITIVA [5]

De acuerdo a un estudio, para saber si existen huecos espectrales en México se adaptó un programa realizado en la Universidad de Berkeley, California [8].

El estudio se lleva a cabo con la información de las estaciones de televisión en México y se utiliza un modelo de propagación recomendado por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), se genera un mapa de 200x300 pixeles de resolución, el cuál cuantifica por píxel la cantidad de canales de televisión que no se están ocupando.

Las huellas de cobertura de los usuarios primarios son vistas por los secundarios a través de las dimensiones espacial y espectral como versiones ligeramente más amplias de las huellas de cobertura originales de los usuarios primarios y de hasta tres canales de frecuencia, las áreas fuera de estos parámetros es a lo que se conoce como espacios blancos de TV.

En éste reporte queda demostrada la cuantificación de espacios en blanco que no son utilizados desde la perspectiva de tres dimensiones: la temporal, la espectral y la espacial, así como la factibilidad de usarlos para servicios de banda ancha y utilizando información de las estaciones transmisoras de señales de TV (Agosto 2015), la población del país de acuerdo al INEGI y CONAPO y modelos de propagación.

Se obtuvo el siguiente resultado mostrado en la figura 0.4, en donde se muestran dos mapas, el primero consiste en condiciones de un territorio plano con todas las antenas siendo de 30 m de altura y considerando una propagación sin condiciones de desvanecimiento, en el segundo mapa ya se incluye el estudio de propagación de la señal de TV, con la información de las alturas de las antenas pero el cambio se observa en las zonas metropolitanas que ya no se encuentran bien definidas por los efectos de propagación [8].

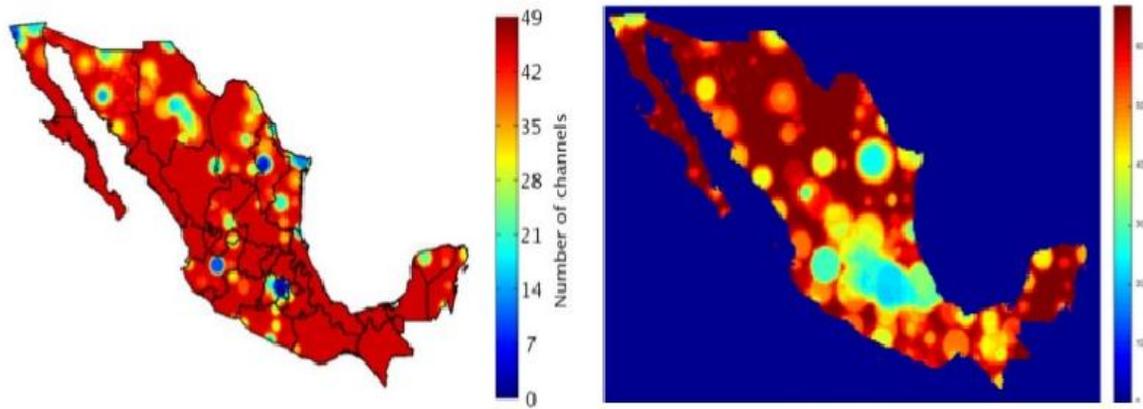


FIGURA 0.4 CANALES DE 6 [MHZ] DISPONIBLES PARA USO SECUNDARIO EN MÉXICO [8]

Concluyendo que en zonas metropolitanas se cuenta con una disponibilidad de 20 a 30 canales de espacios blancos, mientras que en algunas zonas rurales se puede observar que los canales disponibles son al menos 60.

Con base en éste estudio y comprobando que en México efectivamente existen espacios en blanco que pueden ser explotados se puede implementar una infraestructura de radio cognitiva.

# CAPÍTULO 1. SISTEMA DE RADIO COGNITIVA EN FRECUENCIAS DE TELEVISIÓN

---

En éste capítulo se describe el ámbito de la Radio Cognitiva, mostrando definiciones e investigación sobre su arquitectura y aplicaciones, además se aborda la norma IEEE 802.22, la cual contiene las especificaciones necesarias para desplegar una red de área regional inalámbrica (WRAN) y finalmente se mencionan las frecuencias de televisión que se utilizan en México para su análisis en el estudio de huecos espectrales en televisión.

## 1.1 RADIO COGNITIVA

---

Una Radio Cognitiva es un dispositivo de radiofrecuencia capaz de sensar el espectro sobre una amplia banda de frecuencias y explotar esta información para proveer comunicaciones inalámbricas que cumplan con los requerimientos de dicha aplicación [9].

El principal organismo regulador del espectro en Estados Unidos, National Telecommunications and Information Administration (NTIA), la definió como:

“Una radio o sistema que detecta su entorno electromagnético operativo y puede autónomamente y dinámicamente ajustar sus parámetros de operación radio para modificar el funcionamiento del sistema como, por ejemplo, mitigar la interferencia, proporcionar acceso al “mercado” secundario o facilitar la interoperabilidad y maximizar la capacidad.” [10]

Además de ajustar de forma dinámica sus parámetros de operación, estos dispositivos deben ser capaces de: medir, sensar, aprender y estar pendientes de los parámetros característicos relacionados con un canal como: disponibilidad de espectro, potencia, aplicaciones de los usuarios, políticas y restricciones locales, etc.

Así también deben tener la habilidad de detectar automáticamente los canales disponibles en el espectro radioeléctrico y modificar sus parámetros de transmisión/recepción permitiendo que un mayor número de comunicaciones ocurran concurrentemente. Sin embargo, el problema que enfrentan estos equipos es el diseño de detectores de alta calidad y la implementación algoritmos complejos para intercambiar datos de detección del espectro entre los nodos que forman la red [4], el incremento del número de nodos que cooperan en la detección disminuye la probabilidad de que haya detecciones falsas.

---

### 1.1.1 FUNCIONES Y APLICACIONES

---

La Radio Cognitiva es capaz de emplear bandas de frecuencias no utilizadas, a través de una radio inteligente y posteriormente liberar dichas frecuencias cuando un usuario licenciado quiera hacer uso de ellas proporcionando un ancho de banda para la transmisión de información, modulaciones y técnicas de codificación adecuadas para una comunicación óptima.

En un sistema de Radio Cognitiva [11], hay dos grandes subsistemas: una unidad cognitiva que toma decisiones basadas en entradas y una unidad RDS (Radio Definido por Software) flexible, cuyo software operativo proporciona un rango de posibles modos de funcionamiento.

Además, también es común incluir un subsistema de detección del espectro para medir las señales de radio que hay en el entorno y así determinar la presencia de otros servicios o usuarios, con estos tres subsistemas se logran aspectos fundamentales que distinguen a una Radio Cognitiva [12]:

- Capacidad cognitiva

Es la habilidad de obtener información del entorno y del propio estado interno del sistema a través de múltiples sensores.

- Capacidad de aprendizaje, adaptación y auto-reconfiguración.

Permite utilizar esta información para ajustar, dinámica y autónomamente, los parámetros de operación a través de mecanismos de auto-reconfiguración, con el objetivo de optimizar las prestaciones del sistema.

Las aplicaciones que se le pueden dar a la radio cognitiva tienen un gran auge en el sector militar, público y privado por mencionar algunos [13].

En el uso militar, debido a las condiciones ambientales hostiles existen interferencias y problemas de conectividad por lo que las radios cognitivas pueden mitigar este problema

En el sector público en cuestiones como uso eficiente del espectro disponible, esto incrementaría nuevos servicios de comunicación inalámbrica y por ende el desarrollo de nueva tecnología, así como la interoperabilidad de sistemas como servicios de emergencia, proporcionando una comunicación segura, eficiente y accesible.

Para el sector privado, la telefonía y el acceso a internet móviles podrían explotar las bandas no utilizadas y con más espacio para operar, los servicios serían más baratos y con más oferta de aplicaciones como las video-llamadas, además los teléfonos móviles serían capaces de cambiar su frecuencia de operación sin demasiado hardware adicional.

---

### 1.1.2 ARQUITECTURA DE RADIO COGNITIVA

---

La arquitectura del sistema de radio cognitiva es un paquete de algoritmos que son funcionales mediante software, llamados motor cognitivo, y puede ser aplicado para plataformas de radio con implementación de hardware, maneja recursos y adapta la operación del radio para optimizar su función.

En una arquitectura ideal de Radio Cognitiva encontraríamos el siguiente conjunto de componentes funcionales [14]:

1. Funciones de interfaz de aire o usuario.
2. Funciones sensoriales de detección del entorno.
3. Aplicaciones del sistema.
4. Funciones de Radio Definido por Software.
5. Funciones cognitivas.

Entre cada uno de estos componentes funcionales se establecen varias interfaces a través de las cuales se produce el intercambio de datos y señales de control que definen el funcionamiento del sistema. En la figura 1.1 se muestran las capas en las que se agrupa una radio cognitiva, la capa física se encarga del procesamiento de señales en radiofrecuencia, detección de usuarios primarios y adaptación de parámetros para establecer comunicación, mientras que la capa de acceso al medio (MAC) recopila las medidas de sensado y toma decisiones a partir de la información obtenida.

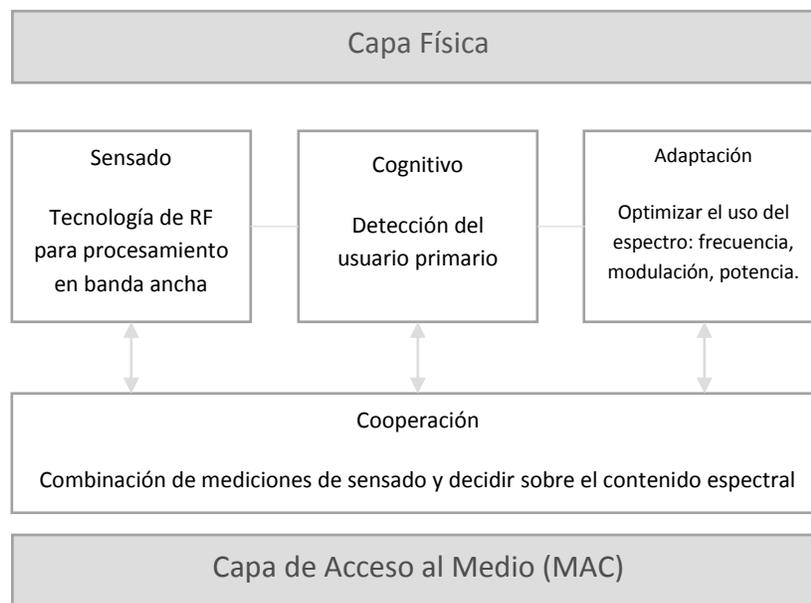


FIGURA 1.1 FUNCIONALIDADES DE LA RADIO COGNITIVA [9]

Los métodos de sensado actuales se basan en el estudio de tiempo, frecuencia y potencia (figura 1.2) para determinar la oportunidad de espectro, se pueden usar

tecnologías de radio que transmiten en una dirección específica ya que el uso de más dimensiones aumenta la complejidad en el diseño del sistema.

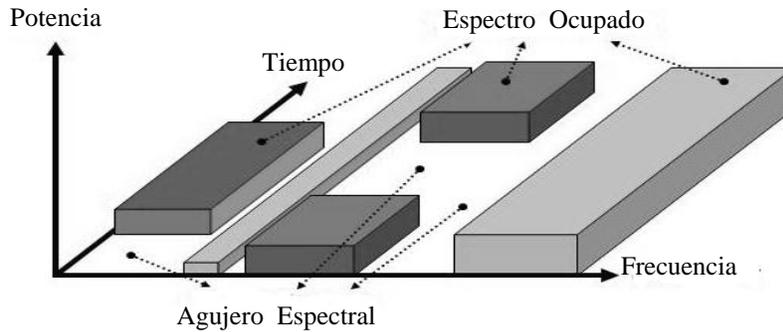


FIGURA 1.2 ESQUEMA DE AGUJERO ESPECTRAL [15]

A partir de la información obtenida de [5], en la tabla 1-1 se resumen las características de los métodos de sensado convencionales para la determinación de oportunidades de espectro.

Dimensión	Característica	Observaciones
Tiempo	Oportunidad de una banda en el tiempo	Habilidad de utilizar una banda del espectro en el tiempo si la banda no está siendo utilizada continuamente.
Frecuencia	Oportunidad en el dominio de la frecuencia	El espectro disponible es dividido en “porciones” de menor ancho de banda. Una oportunidad de espectro en esta dimensión requiere que no todas las bandas estén usadas al mismo tiempo.
Espacio	Ubicación y distancia de los usuarios primarios	El espectro se encuentra disponible en ciertas zonas geográficas mientras que está ocupado en otras. Si un usuario primario se encuentra transmitiendo en cierta dirección, los usuarios Secundarios pueden transmitir en otras direcciones sin introducir interferencia.

TABLA 1-1 DIMENSIONES DE SENSADO [5]

---

### 1.1.3 ESTÁNDAR 802.22 WIRELESS REGIONAL AREA NETWORK (WRAN)

---

Existen organizaciones que han propuesto compartir el espectro con sistemas secundarios, aprovechando los espacios subutilizados en las bandas de televisión dando origen a la norma IEEE 802.22, la cual se publicó en Julio del año 2011 [16].

La normal especifica la interfaz de aire incluyendo las capas cognitivas de acceso al medio (MAC) y física (PHY) de redes punto-multipunto tipo Wireless Regional Area Network (WRAN) compuestas por radio bases fijas (BS) y terminales de usuarios fijos o móviles (CPE) operando en las bandas de TV (VHF/UHF) entre 54MHz y 862MHz [17] y en las bandas de guarda.

En la figura 1.3 se muestra que cada CPE realiza un sensado del espectro y luego envía los reportes (en un formato establecido) al BS quien toma las decisiones de los parámetros que se utilizarán para establecer la comunicación bajo la restricción de no interferencia.

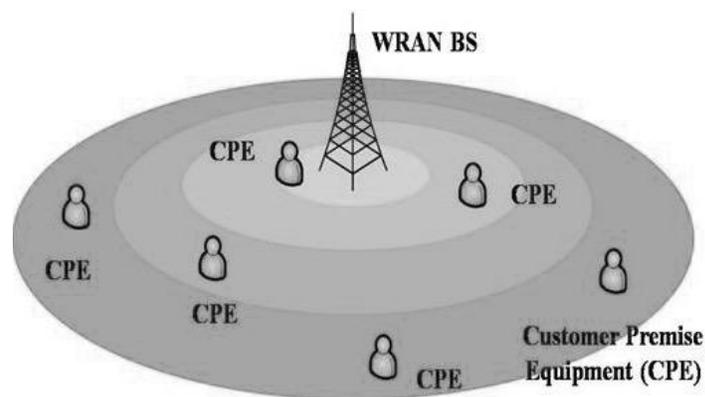


FIGURA 1.3 APLICACIÓN RED WRAN IEEE 802.22 CON BS Y CPE [18]

Debido a la gran importancia en la etapa de detección, la norma no obliga el uso de un detector determinado, pero sí menciona las condiciones de desempeño que debe cumplir y los parámetros de entrada y salida que debe tener para ser compatibles con la norma IEEE 802.22.

En dicho estándar se especifican los umbrales para desocupar un canal ante la presencia de las siguientes señales, tabla 1-2:

Señales	Sensibilidad	SNR
Televisión Digital	-116 [dBm] sobre un canal de 6MHz	-21 [dB]
Televisión Analógica	-94 [dBm] en el pico de la portadora	1 [dB]
Micrófonos inalámbricos	-107 [dBm] en un ancho de banda de 200kHz	-12 [dB]

TABLA 1-2 UMBRALES PARA DIFERENTES SEÑALES [14]

Las señales con licencia (por ejemplo, TV digital) deben ser detectadas a un nivel muy bajo de SNR. Esto representa el reto principal en la detección del espectro, el reto es asegurar la protección de transmisiones con licencia.

Para mitigar la interferencia sobre estas señales, el protocolo 802.22 considera la utilización de tablas de ocupación de espectro, actualizadas vía software, tanto por la propia radio cognitiva como por el administrador del sistema. Además, también establece límites sobre la máxima potencia transmitida e interferencias sobre bandas adyacentes.

Para el caso de estudio en Televisión Digital, en el formato Advanced Television System Committee (ATSC) y considerando una figura de ruido de receptor de 11dB [16] las condiciones de desempeño mencionadas en la norma se detallan en la tabla 1-3.

Parámetros	Valores
Tiempo de detección	$\geq 2$ (seg)
Probabilidad de detección	$> 0.9$
Probabilidad de falsa alarma	$< 0.1$

TABLA 1-3 REQUERIMIENTOS DE SENSADO – NORMA IEEE 802.22 [17]

Existe un bloque de Función de Detección de Espectro (SSF) y se encuentra implementado tanto en el CPE como en el BS con las características de la figura 1.4

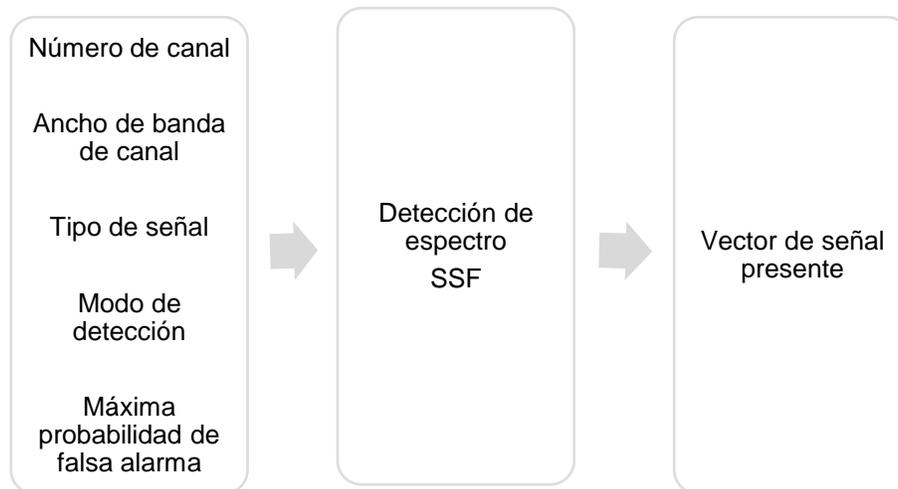


FIGURA 1.4 FUNCIÓN DE DETECCIÓN DE ESPECTRO [19]

El número de canal y el ancho de banda son necesarios para conocer qué canal se debe detectar.

El tipo de señal a detectar incluye las diversas señales de TV analógicas (por ejemplo, NTSC), señales de TV digital (por ejemplo ATSC), señales de micrófono inalámbrico, etc.

La señal de entrada en el modo de detección especifica cuál de los modos de detección utilizar, la más utilizada es cuando la decisión presente de señal está activa y a la salida se obtiene el “Vector de Señal Presente”, el cual indica si se detectó presencia de señal primaria en el canal, es decir, si el estadístico de la prueba de detección superó ampliamente el nivel del umbral entonces el valor del vector de confianza será alto. Finalmente, la probabilidad máxima permitida de falsa alarma cuando sólo hay ruido presente en el canal.

La salida de Decisión de Presencia de Señal es un valor binario que especifica si el tipo de señal que se especificó en los parámetros de entrada está presente en el canal.

## 1.2 FRECUENCIAS DE TELEVISIÓN EN MÉXICO

---

La Ley Federal de Telecomunicaciones tiene como objeto regular el uso, aprovechamiento y explotación del espectro radioeléctrico, por su parte, la Ley Federal de Radio y Televisión (LFRTV) también de orden público tiene como objeto regular el servicio de radiodifusión; en este sentido ambos compendios normativos expresan la rectoría y dominio directo del Estado sobre los bienes de la nación. Proveer servicios de banda ancha en zonas rurales depende de la disponibilidad de número de canales de TV disponibles por zonas geográficas de la República Mexicana.

---

### 1.2.1 EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO Y SU ESCASEZ

---

El espectro radioeléctrico está formado por las ondas electromagnéticas propagadas por el espacio en las frecuencias comprendidas entre 30 MHz hasta los 300 GHz. Es un recurso natural y limitado, y sobretodo es el recurso más valioso usado por los sistemas de telecomunicaciones, defensa, servicios de seguridad y emergencias, entre otras aplicaciones, numerosos estudios han demostrado que no se está haciendo un uso eficiente de este, y por tanto es necesaria una nueva estrategia de ya que cada vez se hace más difícil encontrar bandas de frecuencias vacantes para desplegar servicios o mejorar los ya existentes.

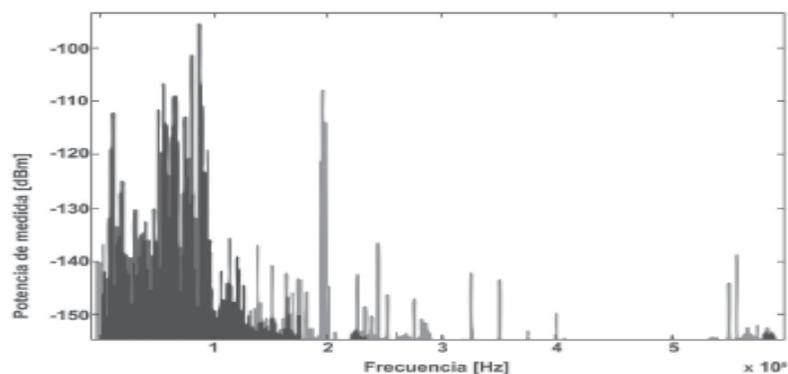


FIGURA 1.5 MEDICIONES DEL USO DEL ESPECTRO [9]

La atribución fija del espectro radioeléctrico impide que las frecuencias que raramente son utilizadas por usuarios licenciados, puedan ser utilizadas por usuarios no autorizados, pero la regulación del espectro es necesaria para asegurar la coexistencia de la totalidad de los servicios sin interferencias y garantizar un uso eficiente del mismo.

Las previsiones sobre la demanda futura del espectro para aplicaciones de banda ancha coinciden en que tal demanda no podrá ser cubierta conforme a los mecanismos tradicionales de identificación y asignación de bandas de frecuencia. Organizaciones como la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y Desarrollo (UNCTAD), GSM Association (GSMA), entre otras, ofrecen panoramas bastante claros en los que queda de manifiesto el déficit de espectro que podría sufrir el despliegue de servicios y aplicaciones de banda ancha móvil en los próximos años [17].

En la figura 1.6 se puede observar como el tráfico móvil a nivel mundial se sextuplicó en un periodo de sólo dos años, consecuencia clara de la demanda de tráfico, así como de la disponibilidad de las tecnologías que soportan tales capacidades.

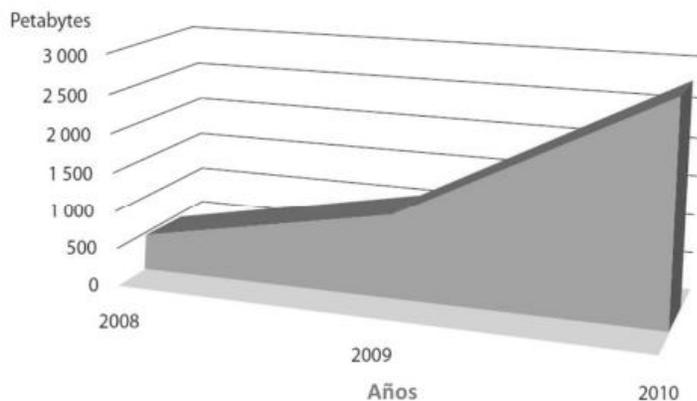


FIGURA 1.6 TRÁFICO GLOBAL MÓVIL [20]

Las propiedades que caracterizan a los terminales de radio cognitiva hacen de ellos un dispositivo óptimo para el empleo de técnicas de acceso dinámico al espectro, siendo esta una solución eficaz para el vigente problema de escasez espectral en el que nos encontramos.

**Banda 470-698 MHz.** Conforme la planificación de las bandas originalmente atribuidas a los servicios de radiodifusión, todo el segmento de 470-806 MHz forma parte del proceso de transición a la TV digital, para las bandas por debajo del canal 51 (470-698 MHz) se tiene prevista a mediano plazo una liberación de los servicios de TV para otras aplicaciones.

La operación del servicio de TV en la banda 470-512 MHz no es el más óptimo, ya que en este segmento operan múltiples sistemas de radiocomunicación privada, actualmente se encuentran registrados alrededor de 2000 sistemas, los que generan serios problemas en la operación del servicio de radiodifusión de TV. En este sentido, se da particular atención a la liberación de servicios de radiocomunicaciones a efecto de favorecer el reacomodo de canales de televisión en estas bandas [21].

Una vez ejecutada la transición establecida en la Política de Transición a la Televisión Digital Terrestre de 2004 y reformada mediante el Decreto Presidencial de 2010, los canales analógicos fueron paulatinamente liberados, generando oportunidades para re-planificar progresivamente el espectro a efecto de comprimirlo hacia las bandas bajas de UHF por debajo del canal 36. En este sentido, la asignación de canales de televisión estaría concentrada entre los canales 14 al 36, permitiendo así la liberación de los canales 38 al 51 (banda de 600 MHz) y en su caso retribuir esta banda para otros servicios de radiocomunicaciones [21].

Canal	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
Banda (MHz)	470-512						512-608						614-698						698-806																																					
Ancho (MHz)	42						96						84						108																																					
status	proceso de transición a TDT												despeje a mediano plazo (2018-2020)						dividendo digital																																					

FIGURA 1.7 ESTRUCTURA DE BANDAS INVOLUCRADAS EN LA TRANSICIÓN A LA TV DIGITAL [21]

A continuación se enlistan en la tabla 1-4 algunos de los canales de Televisión Digital Terrestre con permiso vigente para transmitir en la Ciudad de México de acuerdo a la información hecha pública por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) [22].

El objetivo de asignar canales virtuales, forma parte de la transición a la televisión digital, que permite una mayor oferta en la programación de las televisoras, algo que se conoce como multiprogramación. La nueva señal ofrece mayor calidad en imagen y audio, así como otros servicios interactivos como subtítulos y guías de programación, de acuerdo con información del IFT [22].

<b>Canal</b>	<b>Frecuencias</b>	<b>Distintivo</b>	<b>Propietario</b>
20	506 – 512 [MHz]	XHUNAM – TDT	Universidad Nacional Autónoma de México
21	512 – 518 [MHz]	XHCDM – TDT	Gobierno de la CDMX
23	524 – 530 [MHz]	XEIMT - TDT	Televisión Metropolitana S.A de C.V
24	530 – 536 [MHz]	XHIMT – TDT	Televisión Azteca S.A de C.V
25	536 – 542 [MHz]	XHDF – TDT	Televisión Azteca S.A de C.V
26	542 – 548 [MHz]	XHTVM – TDT	Televisora del Valle de México
27	548 – 554 [MHz]	XHTRES - TDT	Compañía Internacional de Radio y Televisión S.A
29	560 – 566 [MHz]	XHCTMX – TDT	Cadena Tres I S.A de C.V
30	566 – 572 [MHz]	XHOPMA – TDT	Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano
33	584 – 590 [MHz]	XEIPN – TDT	Instituto Politecnico Nacional
44	650 – 656 [MHz]	XEQ – TDT	Televimex S.A de C.V
48	674 – 680 [MHz]	XEW – TDT	Televimex S.A de C.V
49	680 – 686 [MHz]	XHTV – TDT	Televimex S.A de C.V
50	686 – 692 [MHz]	XHGC – TDT	Televimex S.A de C.V

TABLA 1-4 FRECUENCIAS DE TV EN LA CDMX [22]

---

### 1.2.3 LOS HUECOS ESPECTRALES EN TELEVISIÓN

---

Los huecos espectrales o espacios en blanco son recursos no usados desde la perspectiva de tres dimensiones: temporal, espacial y espectral, es decir son frecuencias no utilizadas o zonas en donde los proveedores de servicios no tienen área de cobertura. En el 2003 la FCC mostró que el espectro utilizado por usuarios primarios en zonas específicas solo operan del 15% al 85% y en lapsos de tiempo determinados, esto permite que se puedan aprovechar las frecuencias libres en un instante de tiempo, y en el 2008 la FCC emitió la reglamentación para permitir operar a dispositivos no licenciados utilizando los huecos espectrales [8]. Con el fin de reestructurar recursos espectrales, el gobierno creó estrategias como el apagón analógico donde se aprovechan las tecnologías digitales para transmisión de TV liberando frecuencias.

Los dispositivos que pueden operar en los espacios en blanco se clasifican en [8]:

Fijos: Adquieren una lista de canales disponibles mediante una base de datos.

Portátiles: Adquieren la lista de canales disponibles mediante los dispositivos fijos o poniéndose en contacto directamente con la base de datos.

Para una óptima utilización de los espacios en blanco es necesario contar con dispositivos de radio cognitiva que seleccionen los canales disponibles de TV más apropiados en la zona a estudiar, no todos los canales de espacios en blanco son iguales debido al área de cobertura de los usuarios, los dispositivos deben ser capaces de auto localizarse o contar con procedimientos de sensado que ayuden a determinar una gama de espacios en blanco en su localidad. Es necesario que los dispositivos secundarios tengan bien definido que es un espacio en blanco y como se asociarían a esos canales para no interferir a los que están siendo utilizados por un usuario primario. Así mediante una red ad-hoc a través de algoritmos de ruteo se pueden proporcionar servicios de Internet usando tecnologías tipo Wi-Fi y esto beneficiaría a zonas rurales y suburbanas o para dotar a los sistemas de comunicaciones móviles de mayor ancho de banda.

## CAPÍTULO 2. RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE (RDS)

---

Se presentan los sistemas de Radio Definido por Software (RDS) que complementan el estudio de los huecos espectrales en TV, una descripción del equipo físico utilizado (hardware) que forman parte del sistema RDS: el ordenador, el USRP y las antenas, además del equipo lógico (software) utilizando el entorno GNU Radio, se describen los programas empleados como Python y C++ para llevar a cabo la implementación del sistema RDS.

### 2.1 ORÍGENES DEL RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

---

La Radio Cognitiva tiene como antecedente al Radio Definido por Software, ya que permite analizar el entorno radioeléctrico y tomar decisiones autónomamente, reconfigurando los parámetros de comunicación conforme a las demandas de la red y de los usuarios, siempre intentado que los niveles de energía consumidos para estas acciones sean lo más bajos posibles.

El término Radio Definido por Software (RDS) fue introducido por Joseph Mitola III en 1991 para referirse a un tipo de radios reprogramables donde un mismo componente hardware podía utilizarse para realizar diferentes funciones, en distintos instantes de tiempo, cuando se aplicaban cambios en su configuración a través de software. Mitola lo definió de la siguiente manera, [29]:

“El software radio es una radio donde las señales portadoras que se van a modular y transmitir por un canal son definidas mediante software. Es decir, las formas de onda son generadas como señales digitales muestreadas, convertidas de digital a analógico a través de un Conversor Digital-Analógico (DAC) de banda ancha y con la posibilidad de subir la señal de Frecuencia Intermedia (IF) a radiofrecuencia (RF). De la misma manera, el receptor emplea un Conversor Analógico-Digital (ADC) de banda ancha que

captura todos los canales del nodo del software radio. Entonces, el receptor extrae, baja y demodula la señal utilizando software en un ordenador de propósito general.”

En resumen, es una tecnología que tiene como objetivo el procesamiento de la señal a través de software, por lo tanto se reducen costos por la fabricación de hardware y facilita la disponibilidad de aplicaciones.

## 2.2 PLATAFORMA RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

---

La tecnología RDS habilita la creación de dispositivos inalámbricos interoperables con muy diversas ventajas.

Permite acercar el código lo máximo posible a la antena, convirtiendo así problemas de hardware en problemas software, es un conglomerado de tecnologías de software, hardware de procesamiento de señal y RF que hace realidad el concepto RDS.

La tecnología RDS no es ningún estándar pero necesita ser estandarizada, ya que de otro modo muchos de sus beneficios no podrían ser aprovechados.

La estructura básica del sistema RDS se compone de tres etapas y el diagrama de la figura 2.1 muestra el esquema del sistema con sus componentes principales:

La etapa de radiofrecuencia en transmisión, modula y amplifica las señales de frecuencia intermedia ajustándolas para que puedan ser transmitidas vía radio; en recepción, adecua las señales de RF mediante filtrado y las convierte a frecuencia intermedia.

La etapa de Frecuencia Intermedia (IF) en transmisión, convierte las señales de banda base a IF y, posteriormente, convierte dichas señales digitales en señales analógicas; en recepción, digitaliza las señales analógicas de IF y, después, las convierte a banda base.

La etapa de banda base (BB) es la encargada, tanto en transmisión como en recepción, de todo el procesado digital en banda base de las señales.

Cabe especificar que, mientras que la etapa de RF, generalmente, se constituye de hardware analógico, las etapas de IF y BB se implementan con módulos hardware digital.

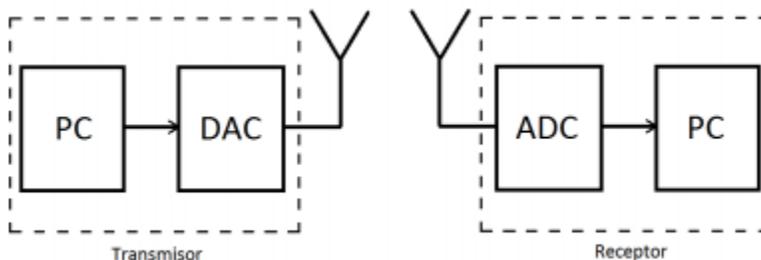


FIGURA 2.1 SISTEMA DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE [24]

Por otra parte, para minimizar el potencial problema que conlleva las operaciones que tiene que soportar la unidad de procesado se utiliza un hardware que normalmente está constituido por una combinación de DSP (Digital Signal Processor) con FPGA (Field Programmable Gate Array) y ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Las operaciones de procesado que conlleven un alto coste computacional serán realizadas por dispositivos ASIC o bien FPGA, liberando así de carga computacional al ordenador.

---

### 2.2.1 GNU RADIO

---

GNU Radio es un software libre creado por Eric Blossom en 2001 y tiene como principales objetivos proporcionar funciones de procesado de señal para implementar Radios Definidos por Software, es frecuentemente utilizado en ambientes académicos para enseñanza y apoyar la investigación de las comunicaciones inalámbricas y de los sistemas radio basado en tecnología RDS [25].

Es un conjunto de archivos y aplicaciones agrupados en librerías, que permiten manipular señales mediante procesamiento digital, corre sobre los sistemas operativos Linux, Mac OS y Windows y puede ser usado conjuntamente con hardware externo como los dispositivos USRP, o bien, sin incluir hardware, para trabajar en un entorno de simulación, si bien cuenta con una amplia variedad de bloques previamente programados, una de las principales ventajas de GNU Radio radica en su flexibilidad ya que es posible programar nuevos bloques de procesamiento de acuerdo a los requerimientos de la aplicación e incluirlos como un elemento más dentro de sistema de comunicación.

Todo el procesamiento de la señal se realiza exclusivamente dentro de los bloques, los cuales son como un nodo del grafo por donde entra y sale información de la señal (figura 2.2), las aplicaciones en GNU Radio son escritas en lenguaje C++ y Python, mientras que las interconexiones entre los bloques se realizan utilizando lenguaje Python, las cuales forman un flowgraph (llamado así en el entorno GNU Radio), que es el diagrama de bloques por donde fluye la información.

Mediante esta forma de programación se puede implementar, de manera relativamente sencilla, un sistema de radio de alta capacidad que permita trabajar en tiempo real.

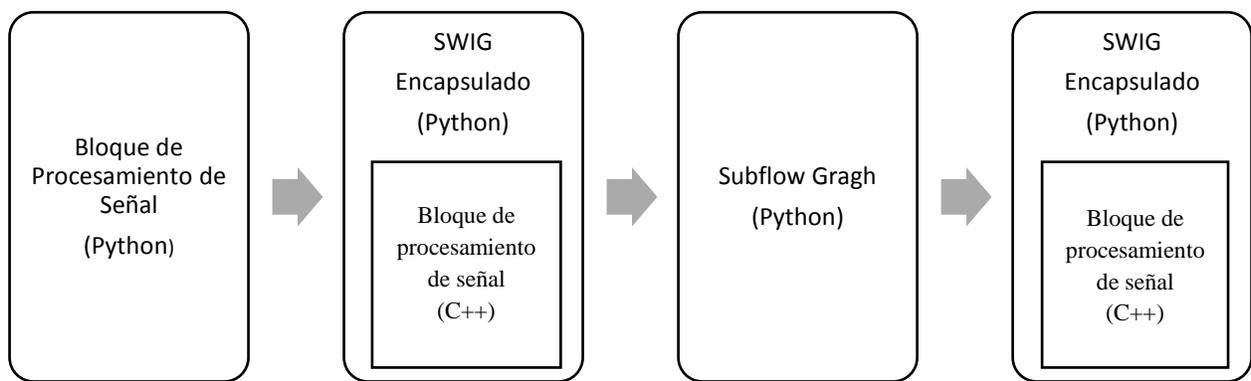


FIGURA 2.2 FLOWGRAPH EN PYTHON [26]

El flowgraph de Python desconoce los detalles de la implementación de los bloques de C++, simplemente se encarga de interconectarlos para formar el sistema de comunicación.

## 2.2.2 GNU RADIO COMPANION (GRC)

GNU Radio Companion (GRC) es la interfaz gráfica de GNU Radio (figura 2.3), la cual permite visualizar, mediante un diagrama de bloques (o flowgraph), el sistema de comunicación diseñado. De esta manera, se facilita la comprensión del funcionamiento de la aplicación, observando el flujo de los datos, los distintos bloques de procesamiento involucrados y sus interconexiones sin escribir líneas de código, eliminando la necesidad de conocimientos de lenguajes de programación por parte del usuario.

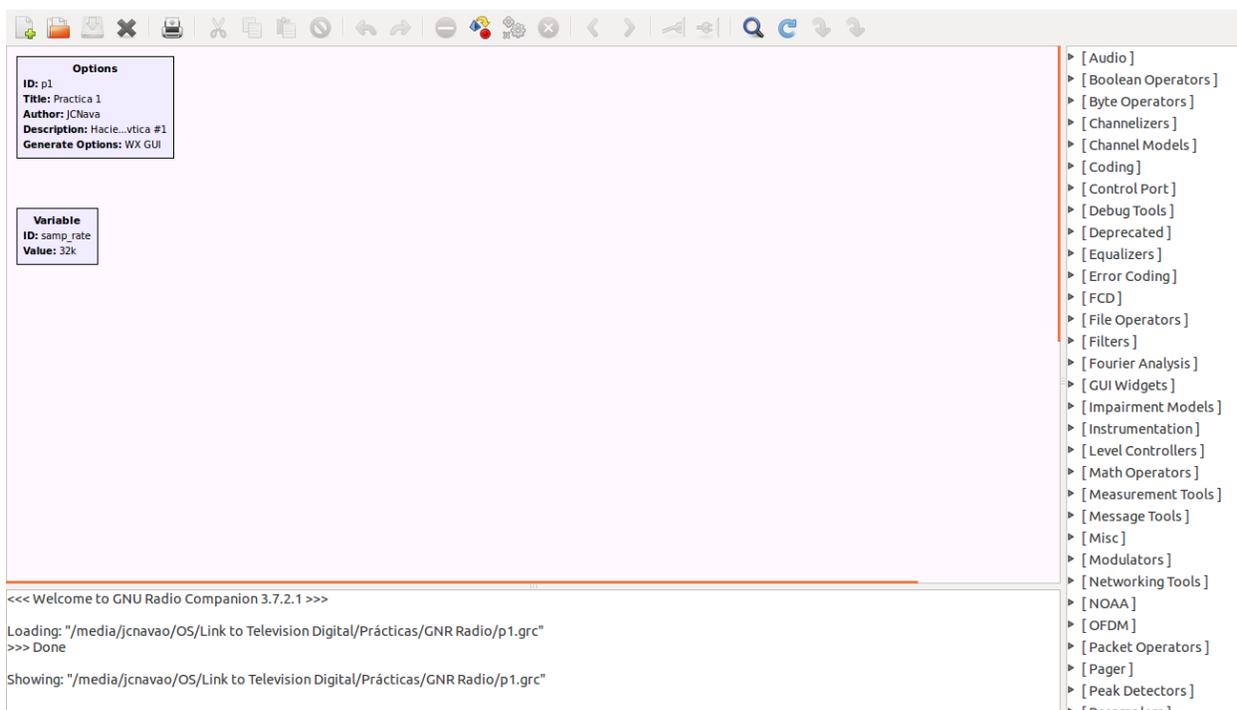


FIGURA 2.3 ESPACIO DE TRABAJO EN GNU RADIO

Para añadir un bloque en el esquemático basta con hacer doble clic sobre aquel elemento que se desea añadir. Dependiendo del bloque elegido, se tendrán parámetros de configuración. Si se desea modificar los parámetros que vienen por defecto en el bloque, hay que hacer doble clic sobre él para que aparezca la ventana de configuración y se puedan cambiar los valores preestablecidos.

Una vez que se han incluido en el esquemático todos los bloques que se ha considerado pertinentes, lo único que queda por hacer es interconectarlos. Para interconectar bloques, únicamente es necesario seleccionar los bloques que se quieren unir siguiendo el orden que imponga la dirección en que se quiere que fluyan los datos.

GRC cuenta con una gran cantidad de aplicaciones previamente programadas como las que se muestran en la tabla 2-1:

<b>Bloques de GNU Radio Companion</b>
Filtros
Generadores de señales
Simuladores de canal
Moduladores/Demoduladores
Codificadores/Decodificadores
Análisis de Fourier
Herramientas de medición
Herramientas gráficas

TABLA 2-1 BLOQUES EN GRC

Por lo general, los sistemas de comunicación inalámbrica trabajan con señales complejas en pasa banda, sin embargo GNU Radio permite cualquier tipo de dato: bits, bytes, vectores, complejos, enteros, reales, etc. Existen bloques particulares que permiten transformar de un tipo de dato a otro para lograr interconectar los bloques que forman el sistema.

En la figura 2.4 se muestra la construcción de gráfica de flujo con generador de señales y analizador de espectros.

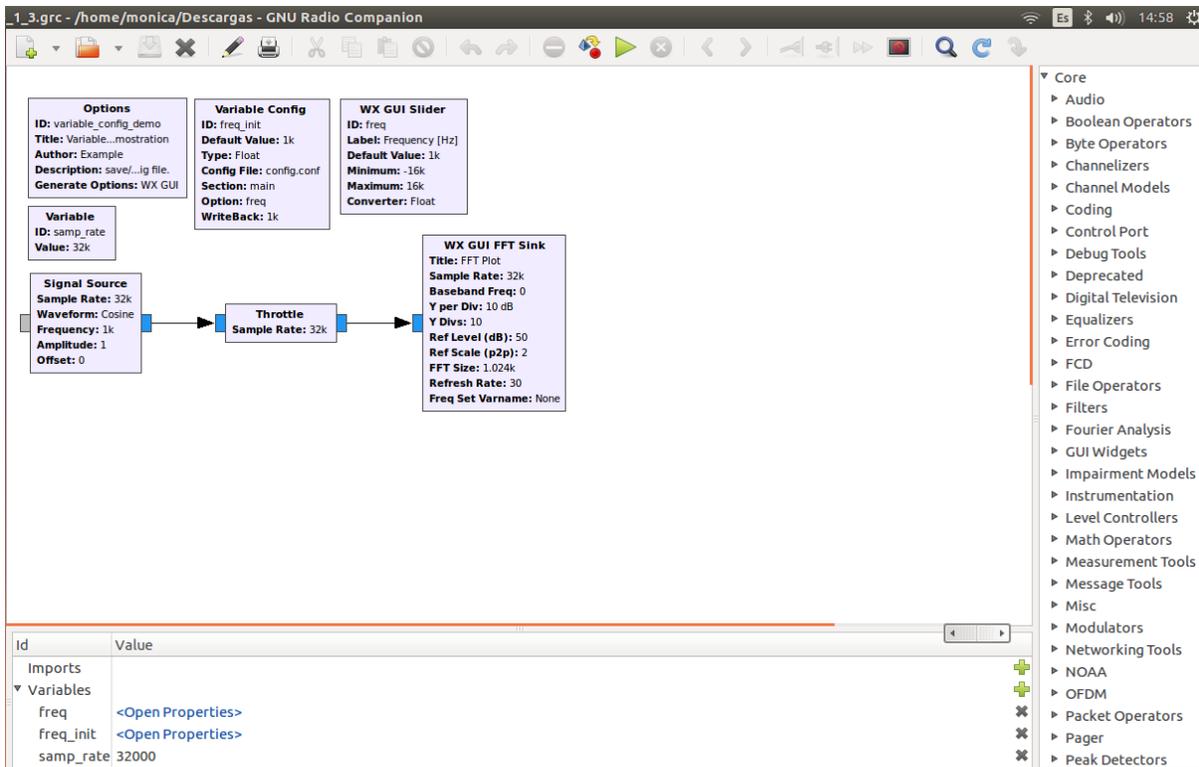


FIGURA 2.4 BLOQUES DE PROCESAMIENTO DE SEÑAL

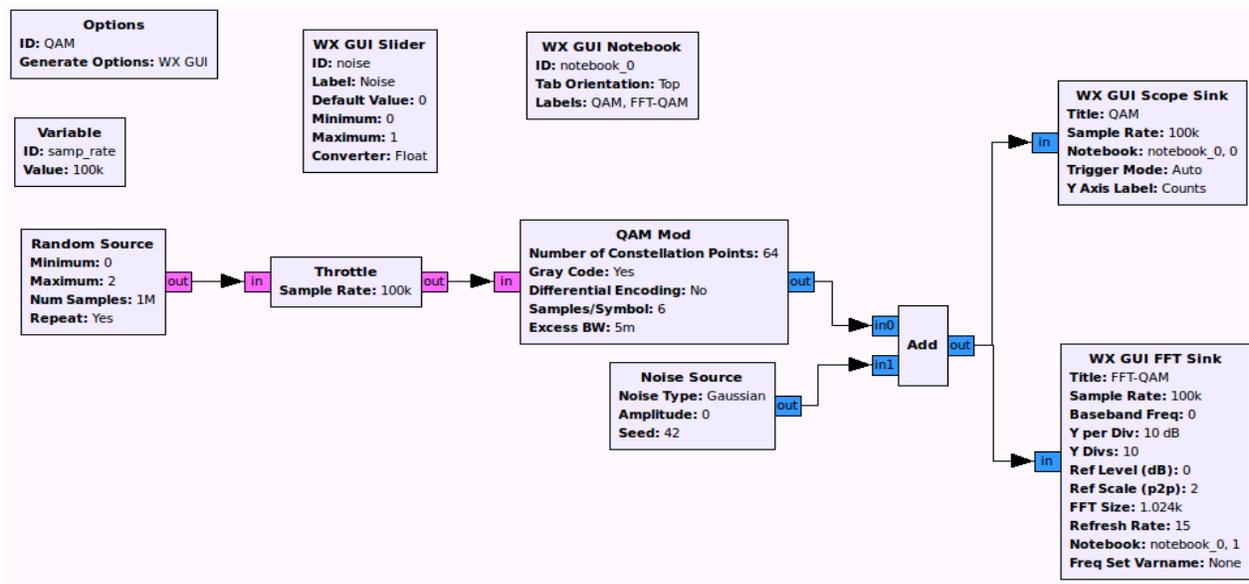


FIGURA 2.5 ESQUEMA DE MODULACIÓN QAM

En la figura 2.5 se observa un ejemplo que se construyó para un sistema QAM, es decir, se modulan datos de una fuente aleatoria mediante la modulación por amplitud y

cuadratura (QAM) y a la señal resultante se le suma ruido. La simulación nos permite observar una señal QAM y QAM con ruido en el dominio del tiempo (figura 2.6) y de la frecuencia (figura 2.7) se observan los resultados obtenidos:

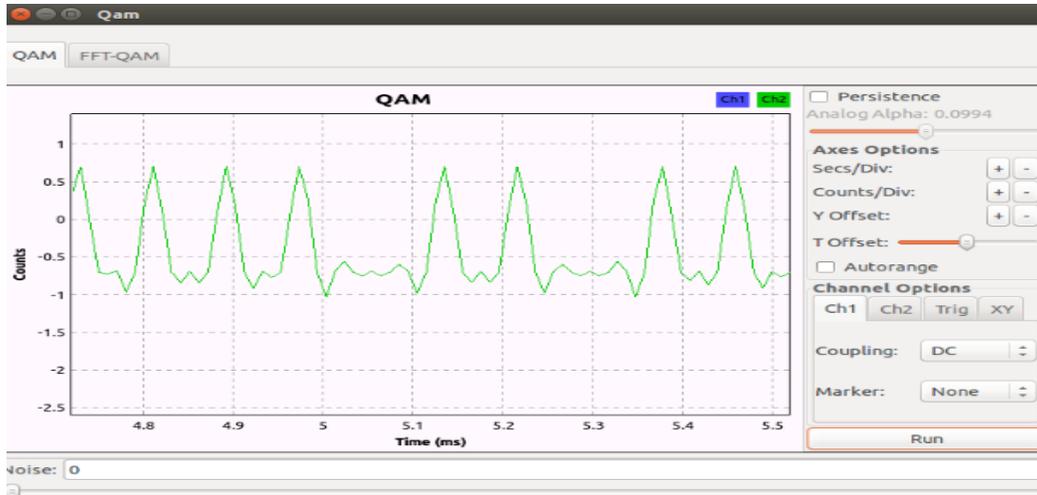


FIGURA 2.6 OSCILOGRAMA DE LA SEÑAL 4QAM

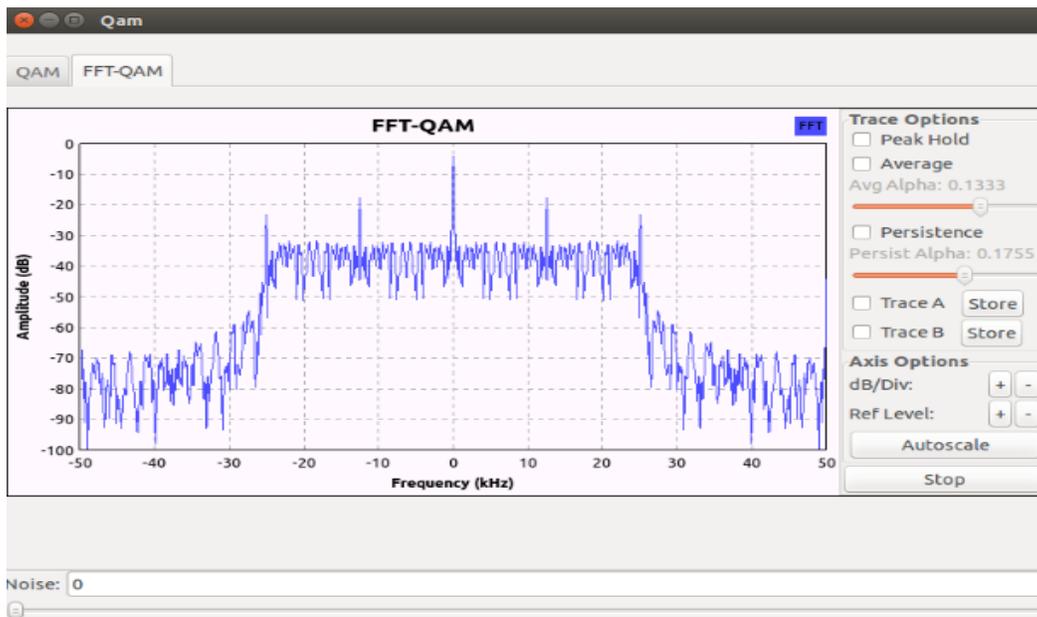


FIGURA 2.7 ESPECTRO DE LA SEÑAL 4QAM

En las figuras se visualiza el oscilograma de una señal 4QAM sin ruido, en el cual se pueden observar las cuatro diferentes amplitudes y fases empleadas por cada símbolo, en la figura 2.7 se visualiza el espectro en frecuencia de dicha señal.

### 1.3 UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL

---

Los Universal Software Radio Peripheral (USRP) son una gama de radios definidas por software diseñadas y vendidas por Ettus Research y su empresa matriz, National Instruments. Desarrollado por un equipo liderado por Matt Ettus, la familia de productos USRP está destinada a ser una plataforma de hardware comparativamente barata para la radio de software, y es comúnmente utilizada por laboratorios de investigación, universidades y aficionados [27].

La mayoría de los USRPs se conectan a un ordenador central a través de un enlace de alta velocidad para controlar el hardware USRP y transmitir o recibir datos. Algunos modelos USRP también integran la funcionalidad general de una computadora con un procesador integrado que permite que el dispositivo USRP funcione de manera independiente.

La familia USRP fue diseñada para la accesibilidad, y muchos de los productos son hardware de código abierto [28]. Los USRP se usan comúnmente con el paquete de software GNU Radio para crear complejos sistemas de radio definidos por software.

En el Anexo E se presenta la hoja de especificaciones del USRP E100, el cual es utilizado para la realización de este proyecto, es una serie embebida para ser ejecutada independientemente sin necesidad de un ordenador, es decir, los usuarios pueden desarrollar y desplegar sus aplicaciones directamente en un USRP E100, cuenta con un reloj configurable, que permite seleccionar las tasas de acuerdo a los requisitos de la aplicación.

La arquitectura del producto incluye Xilinx Spartan 3A-DSP 1800 FPGA, un conversor DAC de doble canal de 14 bits de resolución y 128 MS/s de tasa de muestreo, un conversor ADC de 12 bits de resolución y una tasa de muestreo de 64 MS/s, un Digital Down Converter (DDC) y un Digital Up Converter (DUC), ambos de 15 mHz de resolución [29].

Al USRP se le puede ver como un dispositivo formado, en su esencia, por dos placas: una placa madre y una placa hija. A continuación se describe de forma más detallada las funciones que realizan estas placas dentro del USRP.

### 1.3.1 PLACA MADRE (USRP E100)

La placa madre es el cerebro del USRP y ejerce de intermediario en el tratamiento de la señal entre la PC y la placa hija. Sus funciones principales son: la conversión de la señal del dominio analógico al digital (cuando se recibe), la conversión de la señal del dominio digital al analógico (cuando se transmite), el ajuste de la tasa binaria del sistema, controlar el circuito FPGA y regular la energía [28], el esquema de funcionamiento se muestra en la figura 2.8.

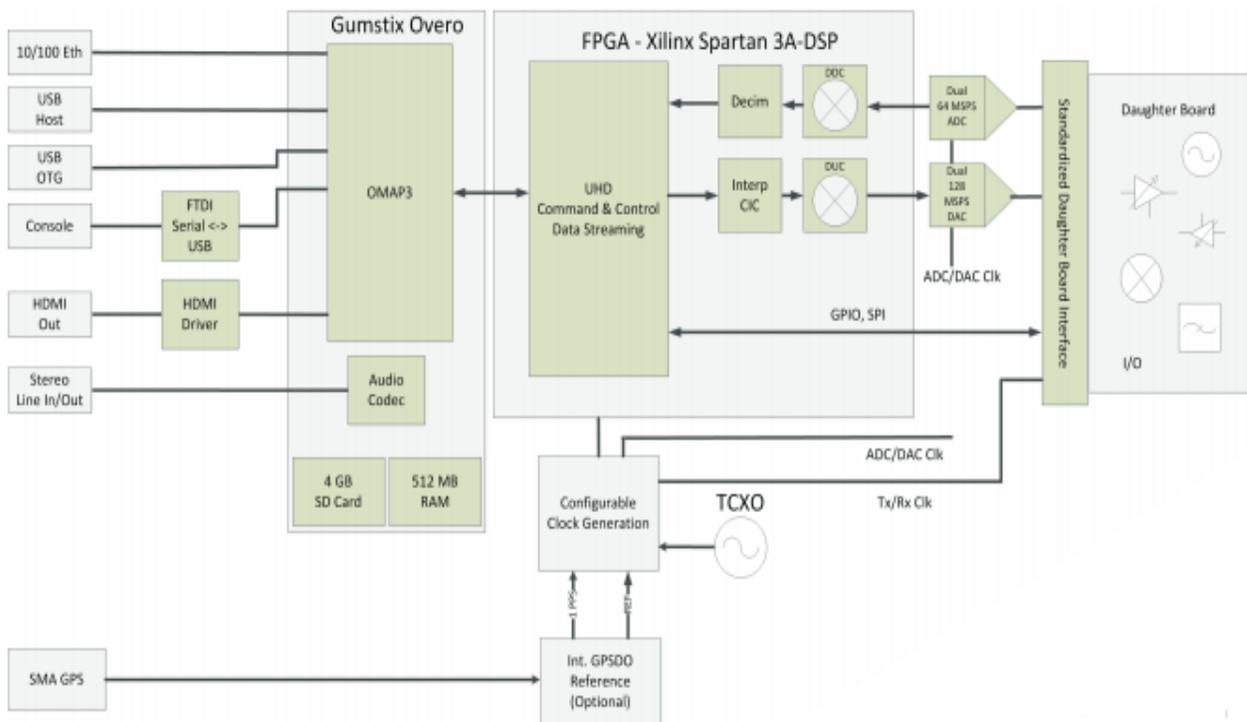


FIGURA 2.8 ARQUITECTURA DE LA TARJETA MADRE USRP E100 [29]

Para el caso de recepción de la señal, que es el objetivo del proyecto, la señal a IF llega al ADC procedente de la placa hija. Por consiguiente, las muestras de la señal pasan del dominio analógico al dominio digital y son enviadas a la FPGA. Una vez en la FPGA, la señal es convertida a banda base y tratada mediante filtros digitales (proceso de diezmado), que entrelazan las componentes en fase y cuadratura.

---

### 1.3.2 PLACA HIJA (WBX-40)

---

La placa hija adecua las señales para que puedan ser recibidas o transmitidas. La placa madre y la placa hija se comunican mediante dos ranuras que hay en la placa madre. Una ranura para la tarjeta de transmisión, etiquetada como TX, y otra ranura para la tarjeta de recepción, etiquetada como RX. La ranura TX tiene acceso al DAC, mientras que la ranura RX tiene acceso al ADC. Al igual que ocurría con las familias de USRP, hay distintos modelos de placas hijas para cubrir distintas necesidades del usuario.

La placa WBX – 40, utilizada en este proyecto, es un transceptor (transmisor y receptor) de banda ancha que proporciona una potencia típica de salida de 100 mW y una figura de ruido de 5 dB. El oscilador de la cadena de transmisión y el oscilador de la cadena de recepción son independientes, lo que permite operar en modo full-duplex (transmitir y recibir en ambas direcciones al mismo tiempo) con señales complejas. El transceptor proporciona un ancho de banda de 40 MHz y un rango de operación de frecuencia que va de los 50 MHz a los 2.2 GHz. La ganancia que presenta en transmisión tiene como rango de 0 dB a 31 dB en pasos de 1 dB, mientras que la ganancia en recepción va de 0 dB a 31.5 dB en pasos de 0.5 dB [30].

Finalmente, indicar que la placa WBX tiene dos conectores SMA, uno de ellos se puede configurar bien como transmisor o bien como receptor (TX/RX), mientras que el otro sólo puede actuar como receptor (RX2).

---

### 1.3.3 ANTENAS

---

Las antenas serán las encargadas de transmitir o recibir las ondas de radiofrecuencia.

La antena a utilizar en este proyecto es LP0410 y las especificaciones son las siguientes [31].

- Log Antena direccional PCB periódica
- Rango de funcionamiento: En el rango de los 400 MHz – 1 GHz.
- Ganancia: 5 – 6 dBi
- Conector: SMA



FIGURA 2.9 ANTENA LP0410 [31]

## CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN DE ESPECTRO

---

En éste capítulo se explica el análisis de una porción del espectro para comprobar si está disponible para ser utilizada por un usuario secundario o cómo detectar la presencia de usuarios primarios, también se describen tres de los algoritmos más utilizados en la literatura para la detección del espectro en radios cognitivas como el detector de energía, el análisis cicloestacionario y el detector basado en forma de onda.

### 3.1 MODELO PARA SENSAR EL ESPECTRO

---

El monitoreo del espectro es la etapa responsable de la obtención de información sobre el entorno, rastreando de forma inteligente el espectro radioeléctrico y buscando bandas de frecuencia no utilizadas, las cuales cambian dinámicamente en tiempo y espacio, si se detecta un usuario primario se debe implementar un control de interferencias.

Existen dos hipótesis para la detección de oportunidades en el espectro mostradas en las ecuaciones (2.1) y (2.2), [24]:

$$y(n) = r(n) \quad (\text{usuario primario ausente}) \quad (2.1)$$

$$y(n) = x(n) + r(n) \quad (\text{usuario primario presente}) \quad (2.2)$$

En donde:

$$y(n) = \text{señal recibida}$$

$$x(n) = \text{usuario primario}$$

$$r(n) = \text{ruido}$$

$n \rightarrow$  índice de la muestra en el dominio del tiempo

## 3.2 MÉTODOS DE SENSADO

---

Se muestran las técnicas empleadas por una radio cognitiva para obtener información sobre el espectro [24] y en la tabla 3-1 sus características más importantes:

**Bases de datos:** El terminal cognitivo tiene permiso para acceder a una base de datos, mantenida por las autoridades regulatorias, y obtener información sobre el uso del espectro, cuando un usuario secundario necesita transmitir, consulta la base de datos, selecciona una banda de frecuencia disponible y se le reserva para su uso. Cuando un usuario primario o secundario finaliza las transmisiones, la banda asociada es liberada y queda disponible para otros usuarios.

**Señales de balizamiento:** Difusión periódica de mensajes para proporcionar, en tiempo real, información sobre los sistemas primarios ubicados en la zona geográfica en donde la señal es distribuida y así autorizar o denegar el acceso al espectro a los usuarios secundarios, las prestaciones de este método se degradan cuando los mensajes no pueden alcanzar a los usuarios secundarios debido al comportamiento del canal inalámbrico, como por ejemplo por la aparición de desvanecimientos.

**Sensado:** Es la técnica usada en este proyecto y trata de determinar, mediante técnicas de procesamiento de señal, si la señal primaria está presente en la banda del espectro observada. Entre las técnicas más comunes se encuentran el detector de energía, el detector ciclo estacionario y el detector de filtro adaptado.

<b>Características</b>	<b>Sensado Espectral</b>	<b>Base de Datos</b>	<b>Balizas</b>
<b>Costo de Infraestructura</b>	Bajo	Alto	Alto/Medio
<b>Complejidad de terminal</b>	Alto	Medio	Bajo
<b>Fiabilidad</b>	Bajo/Medio	Alto	Alto/Medio
<b>Necesidad de un sistema externo</b>	No	Si	Si
<b>Dinámica Espectral</b>	Alto	Bajo	Si

TABLA 3-1 TÉCNICAS DE SENSADO DE ESPECTRO [24]

---

### 3.2.1 DETECTOR DE ENERGÍA

---

El detector de energía es el método de sensado más simple y consiste concretamente en medir la potencia de la señal recibida dentro de un ancho de banda y compararla con un umbral ( $\lambda$ ). Se debe tener un preciso conocimiento del piso de ruido, para ajustar correctamente el umbral como se verá más adelante. La principal ventaja de este método radica en que no es necesario tener conocimiento previo de la señal primaria; de cualquier manera él mismo no es capaz de discriminar entre señal primaria y otro tipo de señal, es decir, al basarse en medir potencia, esta puede provenir tanto de un usuario primario como de cualquier otra señal, como ruido, otros usuarios secundarios e incluso puede llevar a que se detecte la existencia de un usuario primario erróneamente.

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques del detector que recibe de entrada una señal compleja en bandabase y consiste en un filtro pasabajos (elimina componentes indeseables fuera de la banda en estudio), un bloque que calcula el módulo de las muestras al cuadrado, un bloque integrador y por último un comparador.

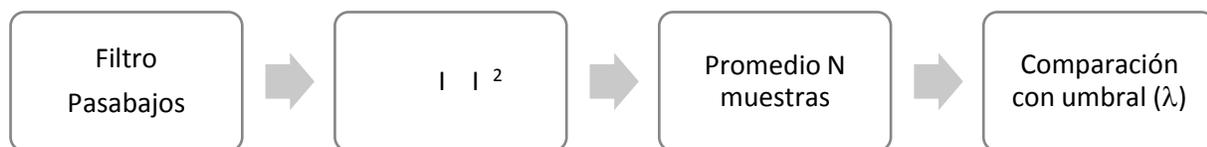


FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL DETECTOR DE ENERGÍA [32]

Es claro que el método resulta muy sencillo de implementar e intuitivo. Más adelante se verá que las muestras complejas en bandabase se obtienen a la salida del dispositivo de RF utilizado para la recepción de la señal, el cual convierte señales analógicas reales (pasabanda) a señales digitales complejas en (bandabase) con componentes en fase y cuadratura.

De acuerdo al modelo para sensar el espectro en tiempo discreto, se obtienen las siguientes ecuaciones [32]:

$$H_0 \rightarrow y(n) = r(n) \quad (\text{usuario primario ausente}) \quad (2.3)$$

$$H_1 \rightarrow y(n) = x(n) + r(n) \quad (\text{usuario primario presente}) \quad (2.4)$$

También se deben considerar probabilidades de detección para tener un umbral ( $\lambda$ ) óptimo.

$$P_D \rightarrow P(M > \lambda | H_1) \quad (\text{detección acertada}) \quad (2.5)$$

$$P_{FA} \rightarrow P(M > \lambda | H_0) \quad (\text{detección falsa alarma}) \quad (2.6)$$

La métrica  $M$  de la detección de energía corresponderá a la suma de las muestras detectadas en una banda del espectro.

$$M = \sum_{n=1}^N |y(n)|^2 \quad (2.7)$$

$N \rightarrow$  número de muestras que se pueden almacenar en el detector de usuarios primarios

Las muestras tomadas son independientes una de otra, por lo tanto se mejorará el desempeño de detección, De esta forma la métrica  $M$  deberá superar el umbral ( $\lambda$ ), el cual depende de la varianza del ruido, un pequeño error en la estimación de potencia del ruido produce una baja significativa en el desempeño.

En el caso en que  $M > \lambda$  entonces el detector determinará que existe presencia de una señal primaria. Por el contrario en caso que resulte  $M < \lambda$  el detector concluirá la hipótesis  $H_0$ .

La probabilidad de falsa alarma ( $P_{FA}$ ) ocurre cuando se detecta al usuario como activo cuando en la realidad no lo está, lo cual deriva en la pérdida de una oportunidad de transmisión de un usuario cognitivo. La meta de la detección mediante este análisis es

maximizar la probabilidad de detección manteniendo una probabilidad de falsa alarma dada [4]. En la práctica generalmente se fija el nivel del umbral en base al requerimiento en la probabilidad de falsa alarma [5] (siendo esta independiente de los eventuales niveles de SNR medidos de un usuario primario).

En el caso hipotético en que dos dispositivos cognitivos secundarios desean establecer una comunicación y uno de ellos es únicamente transmisor y el otro receptor, no basta con que solamente el transmisor sense el espectro para afirmar que dicha comunicación no afectará a otros posibles usuarios primarios. Es importante tener en cuenta que el transmisor secundario puede no detectar la presencia de usuarios primarios durante el sensado ya sea porque se encuentran fuera del radio de detección, por lo tanto este ejemplo está dentro de un caso de detección fallida ( $P_{DF} = 1 - P_D$ ) [24].

Con el fin de comparar los resultados de diferentes valores de umbral, se pueden utilizar curvas de ROC (Receiver Operating Characteristic). Las curvas ROC (figura 3.2) permiten explorar la relación entre la sensibilidad (probabilidad de detección) y la especificidad (probabilidad de falsa alarma) de un método de detección para diferentes umbrales, permitiendo así la determinación de un umbral óptimo.

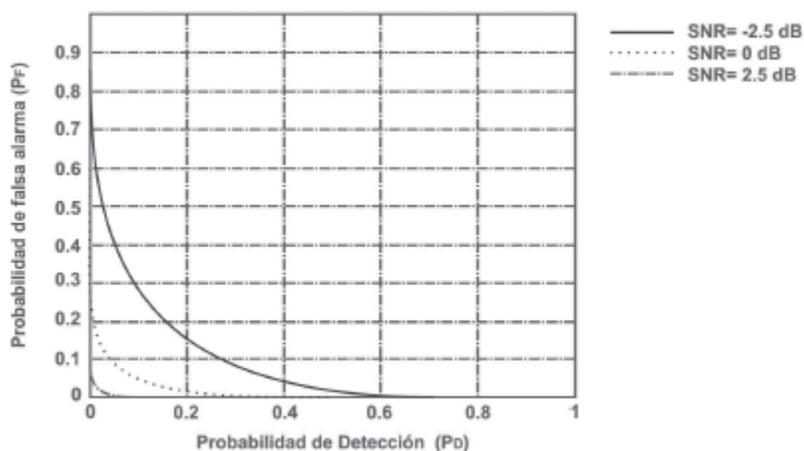


FIGURA 3.2 CURVAS DE LA CARACTERÍSTICA OPERATIVA DEL RECEPTOR (ROC) PARA EL DETECTOR DE ENERGÍA BAJO DIFERENTES VALORES DE SNR [5]

Se hará la suposición que el ruido  $r(n)$  es Additive White Gaussian Noise (AWGN) por lo tanto las muestras del ruido se consideraran variables aleatorias independientes con una distribución de probabilidad Normal de media nula y varianza  $\sigma_r^2$ . Al mismo tiempo se considerará  $x(n)$ , de media nula, varianza  $\sigma_x^2$  e independiente del ruido  $r(n)$ . Por lo tanto en caso de  $H_1$  se obtiene que:

$$\sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_r^2 \quad (2.8)$$

Donde  $\sigma_y^2$  representa la varianza de la señal recibida

Si se considera que la cantidad de muestras  $N \gg 1$ , mediante el uso del Teorema Central del Límite, es válido aproximar el estadístico  $M$  a una distribución Gaussiana, como se muestra a continuación:

Bajo las hipótesis:

$$H_0 : M \sim N \left( \sigma_r^2, \frac{2}{N} \sigma_r^4 \right) \quad (2.9)$$

$$H_1 : M \sim N \left( (\sigma_x^2 + \sigma_r^2), \frac{2}{N} (\sigma_x^2 + \sigma_r^2)^2 \right) \quad (2.10)$$

Para la hipótesis  $H_1$  se define la relación señal a ruido (SNR) como:

$$SNR = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_r^2} \quad (2.11)$$

Luego es válido expresar  $\sigma_y^2$  de la siguiente forma:

$$\sigma_y^2 = \sigma_r^2 (SNR + 1) \quad (2.12)$$

Para el cálculo de umbral y cantidad de muestras se detalla a continuación cómo se pueden obtener las fórmulas del umbral  $\lambda$  y cantidad de muestras  $N$  para el Detector

de Energía. Estas dependerán de la probabilidad de falsa alarma ( $P_{FA}$ ) y probabilidad de detección ( $P_D$ ) por lo tanto, haciendo uso de la simplificación de considerar el estadístico de distribución Normal, se obtiene:

$$P_{FA} = P(M > \lambda) |_{H_0} = Q \left( \frac{\lambda - \sigma_r^2}{\sigma_r^2 \sqrt{\frac{2}{N}}} \right) \quad (2.13)$$

$$P_D = P(M > \lambda) |_{H_1} = Q \left( \frac{\lambda - (\sigma_x^2 + \sigma_r^2)}{(\sigma_x^2 + \sigma_r^2) \sqrt{\frac{2}{N}}} \right) \quad (2.14)$$

Utilizando la ecuación de  $\sigma_y^2$  en función de SNR (2.12) y reduciendo las ecuaciones anteriores (2.13) y (2.14) se obtiene:

$$N = \frac{2[Q^{-1}(P_{FA}) - Q^{-1}(P_D)(SNR + 1)]^2}{SNR^2} \quad (2.15)$$

Por último se observa que el umbral  $\lambda$  se puede despejar tanto de la ecuación de  $P_{FA}$  (2.13) como de la de  $P_D$  (2.14), obteniendo dos ecuaciones diferentes pero que ambas dependen de la potencia del ruido  $\sigma_r^2$ . Dado que el Detector de Energía busca maximizar la  $P_D$  bajo una restricción en  $P_{FA}$  se presenta en (2.16) la fórmula del umbral en función de  $P_{FA}$ :

$$\lambda_{FA} = \sigma_r^2 \left[ \frac{Q^{-1}(P_{FA})}{\sqrt{\frac{N}{2}}} + 1 \right] \quad (2.16)$$

Como se adelantó al inicio del capítulo, en la ecuación (2.16) se observa que es necesario tener conocimiento del piso de ruido de manera de poder fijar correctamente el umbral.

Para la incertidumbre en potencia de piso de ruido, según las ecuaciones anteriores en caso de tener un conocimiento perfecto del piso de ruido, eligiendo un número  $N$  lo suficientemente grande y ajustando correctamente el umbral sería posible garantizar cierta probabilidad de detección para cualquier nivel de SNR.

En la práctica real existe incertidumbre sobre el valor del piso de ruido lo cual conlleva a que exista un nivel límite de SNR para el cual el detector resulta robusto (definido según la literatura  $SNR_{WALL}$  [33]). Si se considera que la potencia del piso de ruido varía según el intervalo:  $[\frac{1}{\tau}\sigma_r^2, \tau\sigma_r^2]$ , siendo  $\tau \geq 1$ , se define la  $SNR_{WALL}$  como:

$$SNR_{WALL} = \frac{\tau^2 - 1}{\tau} \quad (2.17)$$

Mientras que la incertidumbre del piso de ruido se define como:  $(\tau - 1)$ . Se observa que para una incertidumbre nula, la  $SNR_{WALL}$  resulta de valor cero lo que equivale en decibeles a:  $SNR_{WALL} \rightarrow -\infty$ . Reescribiendo la ecuación (2.16) considerando el máximo valor de potencia de ruido posible de acuerdo al intervalo de incertidumbre se obtiene la ecuación 2.18:

$$\lambda_{FA\tau} = \tau\sigma_r^2 \left[ \frac{Q^{-1}(P_{FA})}{\sqrt{\frac{N}{2}}} + 1 \right] \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) es la que se utiliza en el diseño del detector implementado.

---

### 3.2.2 DETECTOR CICLOESTACIONARIO

---

Las señales moduladas se acoplan con portadoras de onda sinusoidal, trenes de pulso o prefijos cíclicos, lo cual convierte la señal en periódica. Por lo tanto, estas señales moduladas se identifican como cicloestacionarias, ya que su media y autocorrelación muestran periodicidad. El detector cicloestacionario utiliza esta periodicidad inherente a la señal del usuario primario para distinguir entre la energía del ruido y la energía de la señal modulada, por lo tanto, el ruido es una señal estacionaria sin correlación, mientras que las señales moduladas son cicloestacionarias con correlación espectral, debido a la periodicidad incorporada.

La ventaja principal de este detector es su robustez frente a la incertidumbre en la potencia de ruido, también es capaz de diferenciar distintos tipos de señales y tolerar las falsas alarmas causadas por señales externas, como los procedentes de otros usuarios de radio cognitiva o de interferencia. Por lo tanto, un detector cicloestacionario puede funcionar mejor que el detector de energía en la diferenciación de los distintos tipos de señales. Sin embargo, es computacionalmente complejo y se requiere un tiempo de observación largo [7].

La función de Densidad Espectral Cíclica (DEC) de una señal recibida puede ser calculada como [5],

$$S(f, \alpha) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_y^{\alpha}(\tau) e^{-2j\pi f\tau} \quad (2.19)$$

En donde

$$R_y^{\alpha}(\tau) = E [ y(n + \tau) y^*(n - \tau) e^{2j\pi\alpha n} ] \quad (2.20)$$

(\*) representa la operación de conjugación

$R_y^{\alpha}(\tau)$  es la Función de Autocorrelación Cíclica (FAC) y  $\alpha$  es la frecuencia cíclica.

La función de la DEC entrega a la salida valores pico cuando la frecuencia cíclica es igual a las frecuencias fundamentales de la señal transmitida  $x(n)$  . Se puede suponer que se conocen las frecuencias cíclicas o pueden ser extraídas y utilizadas como características para identificar las señales transmitidas [34].

Existen 2 alternativas para el desarrollo del cálculo del espectro cíclico de una señal:

- Análisis temporal: se basa en el estudio de la Serie de Fourier que define la autocorrelación periódica de la señal.
- Análisis frecuencial: surge a partir de realizar la correlación de las componentes espectrales de la señal

En la figura 3.3 se muestra un diagrama del procedimiento para diseñar un detector cicloestacionario.

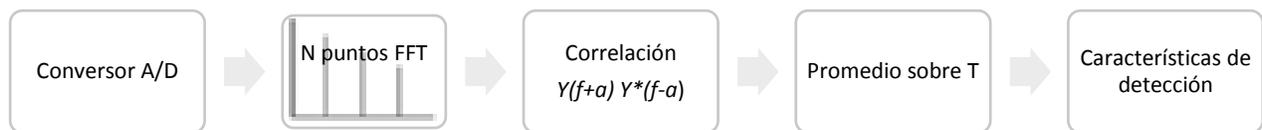


FIGURA 3.3 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN DETECTOR CICLOESTACIONARIO [34]

Las funciones FAC y DEC logran detectar señales haciendo uso de las propiedades cicloestacionarias propias de cada señal. De esta manera, se pueden obtener diferentes espectros cíclicos para diferentes señales. Esta característica brinda al método cicloestacionario una ventaja importante sobre otros métodos de sensado, debido a que permite no sólo detectar una señal, sino además identificar de qué tipo de señal se trata.

Para el caso del detector de energía, no habría manera de identificar al usuario secundario (únicamente se mide la energía de la señal) por lo que se pasaría la comunicación a otra banda. Esto se consideraría como una falsa alarma, mientras que un detector cicloestacionario, detectará que se trata de un usuario no primario por lo que no sería necesario pasarse a otra banda para continuar la comunicación.

---

### 3.2.3 DETECTOR DE FILTRO ACOPLADO

---

Cuando los usuarios secundarios conocen la información de la señal de un usuario primario, el método óptimo es el detector basado en filtro acoplado, ya que puede correlacionar la señal primaria ya conocida con la señal recibida para detectar la presencia del usuario primario, y por lo tanto maximizar la SNR en la presencia de ruido. Otra de las ventajas de este detector es el corto tiempo que se requiere para alcanzar un determinado rendimiento de detección, ya que necesita menos muestras de la señal. Sin embargo, el número requerido de muestras de la señal también crece a medida que la SNR recibida disminuye [33]. Adicionalmente, la complejidad en la implementación y el consumo de energía son demasiado altos [8], debido a que el filtro adaptado necesita receptores para todos los tipos de señales y los algoritmos de recepción correspondientes para ser ejecutados [6].

El filtrado adaptado requiere conocimiento de las características de la señal del usuario primario como la modulación, forma de pulso y formato de paquete. Si esta información no es exacta, entonces el desempeño del filtro baja drásticamente. Por otro lado, la mayoría de sistemas de comunicaciones inalámbricas exhiben ciertos patrones, como los tonos piloto, los preámbulos, los códigos de ensanchamiento, etc., que favorecen la detección de la señal.

La detección de filtro adaptado puede ser expresada como [9]:

$$M = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(k-n)y(n) \quad (2.21)$$

Consiste en correlacionar la señal recibida con una réplica de la misma (generada previamente) y hallar el máximo de dicha correlación. Esto es equivalente a realizar la convolución de la señal desconocida a detectar con la señal conocida conjugada e invertida en el tiempo, Donde  $y$  es el vector de la señal recibida y se convoluciona con  $h$ , que es la respuesta al impulso del filtro adaptado. Inicialmente, la señal de

entrada pasa a través de un filtro pasabanda y a continuación se convoluciona con el filtro adaptado, como se muestra en la figura 3.4.

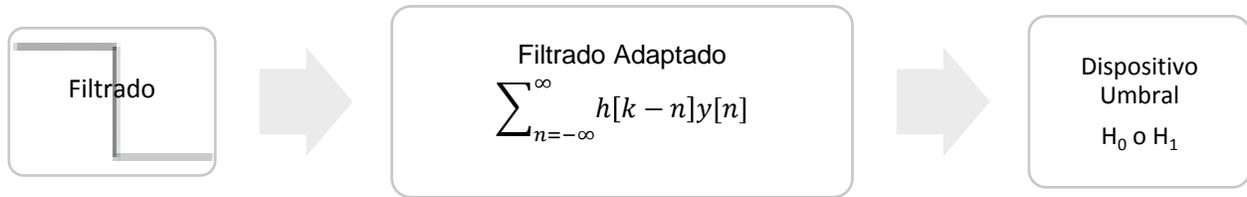


FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN DETECTOR DE FILTRO ACOPLADO [35].

Si no se puede obtener la información perfecta de una señal de un usuario primario, se puede utilizar la detección coherente para decidir si un usuario primario está transmitiendo o no, mediante algunos patrones.

Hay dos hipótesis en la detección coherente:

$$H_0 : y(t) = w(t) \quad (2.22)$$

$$H_1 : y(t) = \sqrt{\epsilon} x_p(t) + \sqrt{1-\epsilon} x(t) + w(t) \quad (2.23)$$

Donde  $x_p(t)$  es un tono piloto conocido,  $\epsilon$  es la fracción de la energía asignada al tono piloto,  $x(t)$  es la señal deseada asumida como ortogonal al tono piloto y  $w(t)$  es el AWGN. Las estadísticas de prueba de la detección coherente se definen como la señal recibida proyectada en la dirección del piloto, es decir:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t) \widehat{x}_p(t) \quad (2.24)$$

$\widehat{x}_p$  es un vector de unidad normalizado en la dirección del tono piloto. A medida que  $N$  aumenta, las estadísticas de prueba  $T$  bajo la hipótesis  $H_1$  serán mucho mayores que

bajo  $H_0$ . Mediante la comparación de  $T$  con un umbral de detección predeterminado, se puede decidir la presencia de un usuario primario.

Este método brinda mejor desempeño frente al detector de energía y el ciclo estacionario, es decir provee altas probabilidades de detección dada una SNR de la señal recibida habiendo fijado cierta probabilidad de falsa alarma. En otras palabras, fijadas ambas probabilidades es el método que permite cumplir los requerimientos para señales con muy baja SNR [36].

Conceptualmente el método resulta simple pero las complejidades surgen a la hora de implementarlo debido a que se debe tener una muy buena señal de referencia para relacionar con la señal a sensor. Por lo tanto, es necesario conocer en detalle la señal recibida para poder generar la réplica mencionada [37]. Una de las principales ventajas del Filtro Acoplado es que tiene rápidos tiempos de respuesta debido a su robustez a la incertidumbre de ruido y a la moderada complejidad computacional que requiere implementarlo.

Los indicadores que se utilizarán para medir y comparar la performance de los métodos de sensado serán principalmente la probabilidad de detección ( $P_D$ ) y probabilidad de falsa alarma ( $P_{FA}$ ).

La probabilidad de detección ocurre cuando el estadístico calculado por el detector resulta mayor al umbral y efectivamente el usuario está activo. Por otro lado la probabilidad de falsa alarma refleja los casos en que se detecta al usuario como activo cuando no lo está. La elección del umbral determina la capacidad del método para detectar al usuario primario. Un umbral demasiado alto no distinguirá entre el ruido del canal y la señal del transmisor, ocasionando que se interfiera con el usuario primario. En cambio, un umbral demasiado bajo no será eficiente ya que el detector siempre indicará que el usuario primario se encuentra transmitiendo, desaprovechando las oportunidades de espectro.

### 3.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE SENSADO ÓPTIMO

Para la implementación del método de detección de usuarios primarios, se analizaron los algoritmos que actualmente se han diseñado en la literatura ya que ésta etapa afronta mayores dificultades técnicas, una detección adecuada es el punto de partida para el funcionamiento de las siguientes etapas de la radio cognitiva.

En la tabla 3-2 se mencionan las características de cada algoritmo en la literatura:

Método de detección	Operación	Ventajas	Desventajas
<b>Detector de Energía</b>	Medición del nivel de energía de la muestras de la señal recibida	No se requiere conocimiento previo de la señal primaria y las señales se detectan comparando el nivel de salida del detector con respecto a un umbral que depende del ruido.	Alta falsa alarma debido a la Incertidumbre del ruido. Poco confiable en señales de baja SNR (Relación señal a Ruido). No puede diferenciar un usuario primario de otra fuente de señales.
<b>Detector Ciclo estacionario</b>	Se basa en la periodicidad de las señales	Detección de señales de baja potencia y características de modulación, frecuencia de portadora, tiempo de símbolo, etc.	Alto grado de conocimiento de la señal que se quiere detectar y su implementación posee mayor complejidad y demanda un mayor nivel de procesamiento computacional.
<b>Detector por Filtro Acoplado</b>	Conocimiento de la señal primaria o un cierto patrón de señal	Más robusto ante la incertidumbre del ruido y mejor detección de señales de baja SNR que el detector de características. Requiere menos muestras de la señal para conseguir una buena detección.	El receptor de radio cognitivo debe demodular las señales recibidas y requiere conocimiento alto de las características de la señal primaria.

TABLA 3-2 TABLA COMPARATIVA DE METODOS DE DETECCIÓN

La elección del método óptimo para detección después de evaluar cada uno de los modelos es mediante **Detección de Energía**, ya que es la forma más común de detectar oportunidades en el espectro debido a su bajo nivel de complejidad en términos de computación e implementación [25], se adecua con las características de procesamiento del Universal Software Radio Peripheral (USRP E100) ya que las aplicaciones gráficas se hacen directamente en el embebido lo cual limita memoria de almacenamiento y tiempo de procesamiento.

Otra de las ventajas de trabajar con este detector es que al no requerir conocimiento previo de la señal primaria, se puede adaptar para cualquier tipo de señal que se desee detectar en alguna otra banda de comunicación simplemente ajustando parámetros involucrados como número de muestras y potencia de ruido.

Este método de detección de radiocanales libres y/o ocupados es uno de los más utilizados, puesto que el objetivo es detectar la presencia de señales primarias, sólo cuando su energía se encuentre por encima del umbral de detección, la selección de un valor apropiado para el umbral resulta crítica, ya que además de la señal primaria va a existir un cierto nivel de ruido y potencialmente la presencia de señales interferentes que pueden ocasionar errores en la detección. El demostrador de Radio Cognitiva se diseñará de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma IEEE 802.22, la cual menciona tanto el nivel de ruido como el de interferencia y, por ende, se fija un valor de umbral lo más óptimo posible.

# CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL DETECTOR DE ENERGÍA

---

En el capítulo 4 se explica con detalle el diseño y la implementación del detector de energía, que permite al usuario cognitivo identificar las oportunidades espectrales en la banda de televisión, describiendo mediante diagramas los scripts creados para la detección de portadoras de televisión y comprobar dicho código con simulaciones de señal en el entorno GNU Radio.

## 4.1 IMPLEMENTACIÓN

---

En el entorno GNU Radio se ha realizado una simulación para poner en práctica el detector de energía, el código ha sido programado en lenguaje C++ y posteriormente convertido a lenguaje Python para ser probado en un entorno gráfico.

Para calcular la potencia de la señal se obtiene un promedio de su energía, sumando una cantidad de  $N$  muestras puntuales  $e[i]$  y dividiendo entre la misma  $N$ , en donde:

$$e[i] = |x[i]|^2 \quad (4.1)$$

$x =$  señal compleja recibida

$i =$  muestras

$e =$  energía puntual

Cada muestra obtenida a la salida del bloque detector es comparada con base a una cantidad configurable de elementos de la entrada. Los parámetros para el diseño del detector de energía se mencionan en la tabla 1-3, los cuales vienen especificados en la

norma IEEE 802.22. Haciendo uso de la ecuación (2.15) presentada previamente en el fundamento teórico, recordando ecuación:

$$N = \frac{2[Q^{-1}(0.4602) - Q^{-1}(0.1841)(7.94 * 10^{-3} + 1)]^2}{(7.94 * 10^{-3})^2} \quad (4.2)$$

El número de muestras  $N$  en función de  $P_D$ ,  $P_{FA}$  y  $SNR$  según la tabla 1-3 para televisión digital, se obtiene que  $SNR = -21$  dB,  $P_D = 0.9$  y  $P_{FA} = 0.1$  la cantidad de muestras es  $N = 210072$ .

Habiendo elegido el valor de  $N$ , el bloque calculará la potencia de la señal en base a un total de 210072 muestras para luego realizar la comparación con el umbral. Para el cálculo del umbral se utilizó la ecuación (2.18) presentada también en el fundamento teórico, recordando ecuación:

$$\lambda_{FA\tau} = \tau\sigma_r^2 \left[ \frac{Q^{-1}(P_{FA})}{\sqrt{\frac{N}{2}}} + 1 \right] \quad (4.3)$$

Para la elaboración del código programado en C++ con la incertidumbre de ruido que se define como  $(\tau - 1)$  se obtiene (4.4):

$$umbral = potencia\_ruido * (1 + incertidumbre\_ruido) * \left( 1 + \frac{Q^{-1}(probabilidad\_FA)}{\sqrt{\frac{coeficiente\_decimador}{2}}} \right) \quad (4.4)$$

Existe una etapa de inicialización de manera que el detector pueda obtener una estimación del piso de ruido, el cual se asume que es el mismo a un canal que se encuentre desocupado. El valor del piso de ruido es necesario para calcular el umbral pero además para hacer una estimación de SNR.

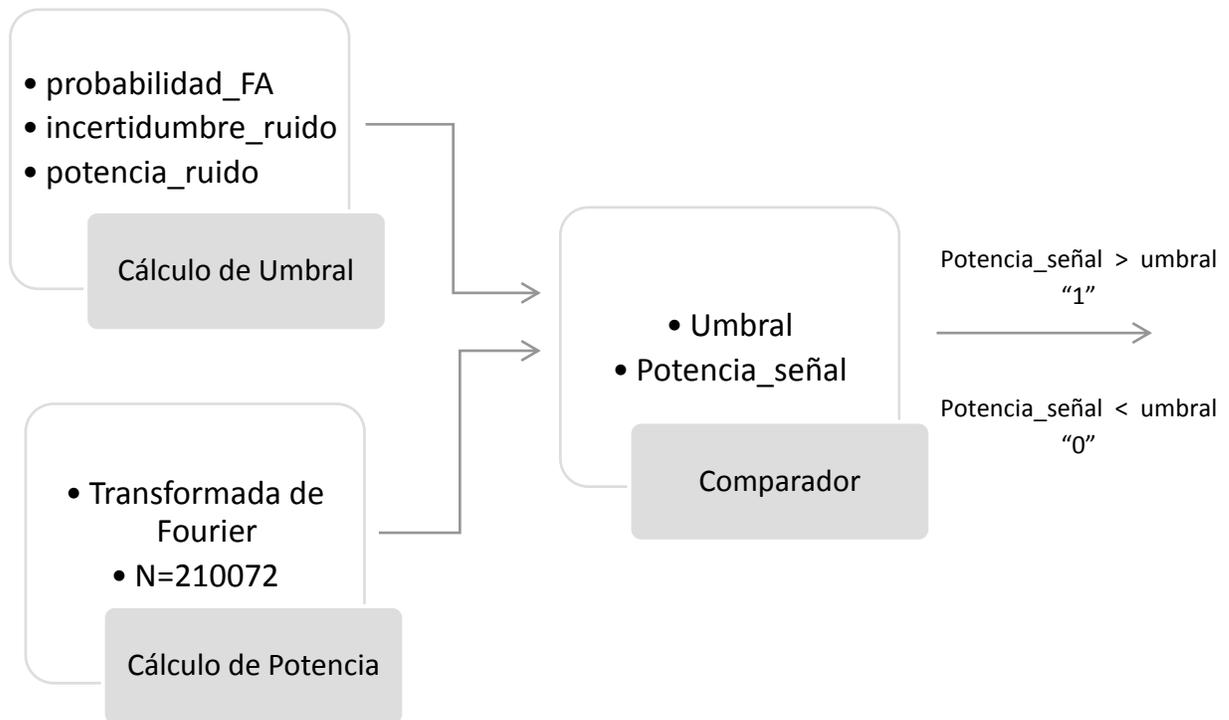


FIGURA 4.1 DIAGRAMA DE BLOQUE DE ENERGÍA

Para complementar la validación del método se decide utilizar una señal de prueba simulada en GNU Radio cuya potencia puede ser calculada matemáticamente para posteriormente comprobar que el cálculo de potencia realizado por el programa sea correcto.

La etapa de simulación permite verificar que el umbral calculado sea correcto y a partir de los parámetros de entrada que se le dieron al programa, permita hacer una comparación adecuada. La señal simulada elegida es un coseno de amplitud  $A$  y frecuencia  $f_p$ , y de acuerdo a la fórmula de Euler:

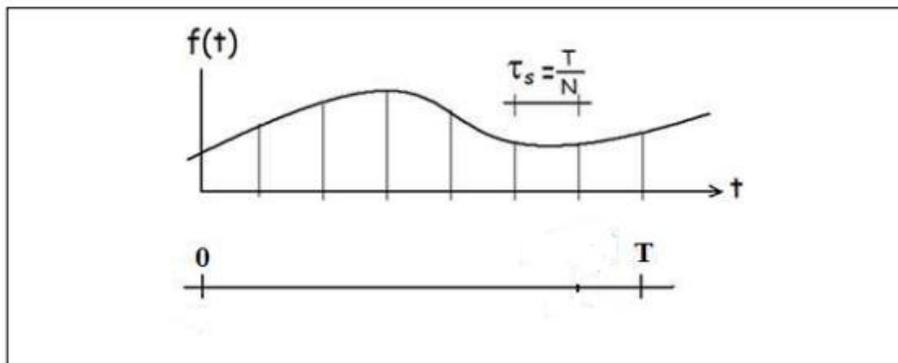
$$x_{cos}(t) = A \times [\cos(2\pi f_p t) + i \text{seno}(2\pi f_p t)] \quad (4.5)$$

Haciendo el cálculo de potencia de la señal, se obtiene:

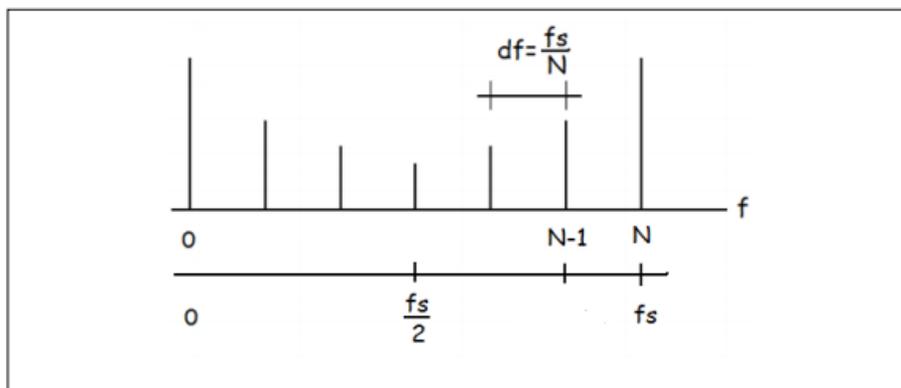
$$Px_{cos} = \frac{1}{T} \int_0^T |Ae^{(2\pi f_p t i)}|^2 dt = |A|^2 \quad (4.6)$$

La transformada de Fourier se utiliza para representar el espectro y también para calcular la potencia de una señal en el dominio de la frecuencia, ya que su módulo al cuadrado tiene un sentido físico, que es la densidad espectral de energía.

El Teorema de Nyquist en el dominio de la frecuencia es la rapidez de muestreo ( $f_s$ ) de una señal es por lo menos el doble de la frecuencia máxima contenida en la señal ( $f_{max}$ ):  $f_s \geq 2f_{max}$ , tomando como base la Transformada Discreta de Fourier:



$T =$  periodo de la señal  
 $N =$  número de muestras  
 $\tau_s =$  periodo de muestreo



$df =$  resolución frecuencial  
 $f_s = 1/\tau_s =$  frecuencia de muestreo

En el Anexo B se muestra ejemplo de código para cálculo de potencia de la señal.

## 4.2 PRUEBAS DE IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE SIMULACIONES

Una vez programado el código para la detección del canal libre u ocupado, se traduce a un entorno gráfico para una interpretación más sencilla.

Se genera un diagrama de bloques, algunos de ellos son parte de la herramienta GNU Radio Companion (GRC), la fuente de señal será un *coseno con 3 unidades de amplitud y frecuencia central de 3 [kHz]* como se observa en la Figura 4.2, el siguiente segmento de bloques harán la comparación de la potencia de la señal con el valor del umbral programado.

En el caso de que la potencia de la señal sea mayor al umbral calculado el programa arrojará un “1”, el cual indica que existe una señal de usuario primario presente y no se puede ocupar dicho canal. Cuando la potencia de la señal sea menor al umbral, el programa arrojará un “0”, por lo tanto es posible ocupar el canal por un usuario cognitivo.

Finalmente la parte gráfica se observa con los bloques de osciloscopios y analizadores de espectro también incluidos en GRC.

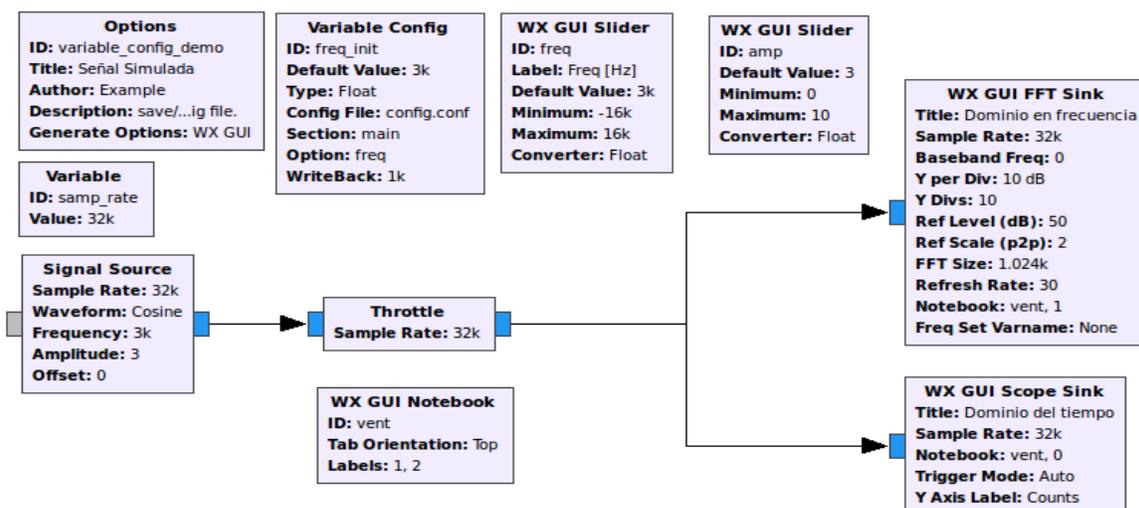


FIGURA 4.2 BLOQUES EN GRC

En la Figura 4.3 se muestra la señal cosenoidal en el dominio del tiempo con la frecuencia y amplitud descritas anteriormente.



FIGURA 4.3 REPRESENTACIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

En la Figura 4.4 se muestra la señal en el dominio de la frecuencia centrada a 3 [kHz].

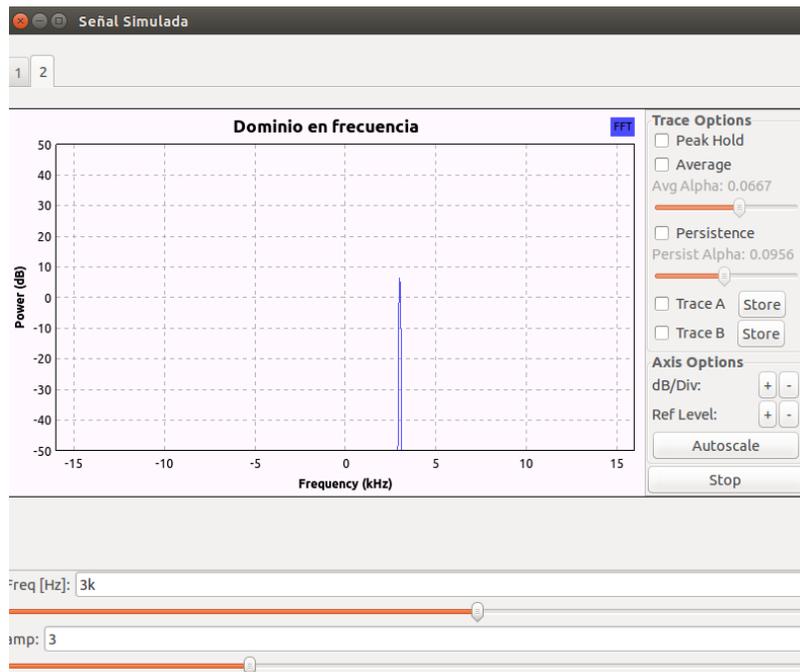


FIGURA 4.4 REPRESENTACIÓN EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Los resultados obtenidos muestran que la potencia de la señal aumenta su valor de acuerdo a la amplitud de la señal de entrada, es decir, sin agregar Additive White Gaussian Noise (AWGN), el umbral detecta que existe un usuario primario y manda a la salida "1", como se muestra en la figura 4.5.

La potencia de la señal se eleva al cuadrado resultando en 9 unidades la cual rebasa el umbral definido a 2.20967 unidades, este umbral calculado en base a los parámetros de entrada es consistente, la incertidumbre de ruido y la  $P_{FA}$  tienen un valor de  $100\text{ m} \approx 0.1$ , el cual se menciona en la norma IEEE 802.22, se considera una potencia de ruido de 2 unidades y la SNR obtenida de 5.4407 dB.

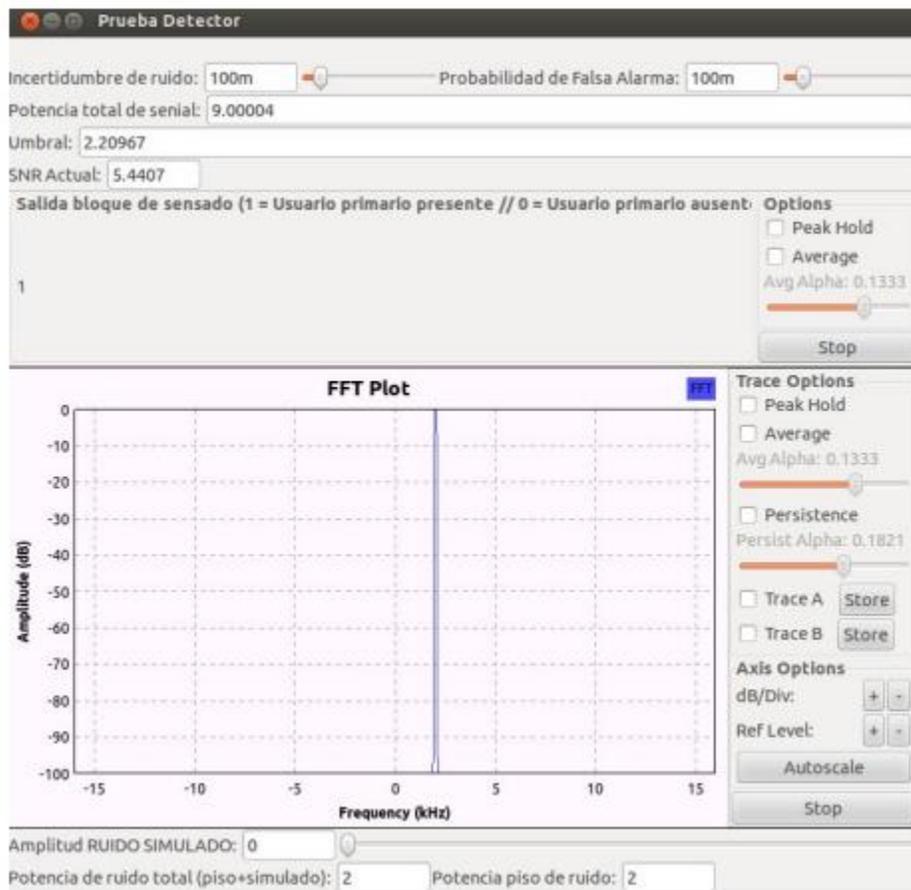


FIGURA 4.5 SEÑAL SIN RUIDO AWGN

En la Figura 4.6, al agregar ruido Additive White Gaussian Noise (AWGN), el umbral y el piso de ruido aumentan y por lo tanto la relación señal a ruido (SNR) disminuye y es difícil detectar un usuario primario, por lo tanto a la salida se tiene un “0”, usuario primario ausente.

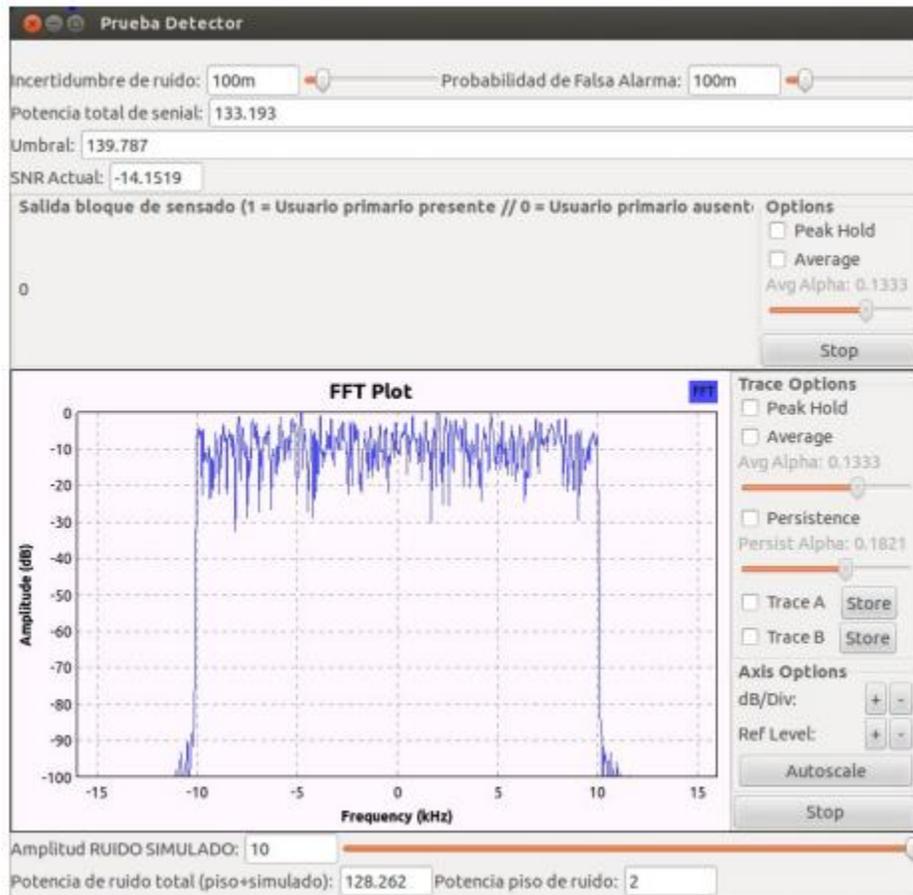


FIGURA 4.6 SEÑAL CON RUIDO AWGN

La  $P_{FA}$  y la incertidumbre de ruido se mantienen en 0.1, la SNR tiene un decremento a -14.1519 dB, la potencia de la señal aumenta a 133.193 unidades pero no rebasa el umbral calculado en 139.787 unidades por lo tanto arroja resultado de un canal desocupado, es decir sin transmisión de un usuario primario.

Los valores obtenidos en ésta simulación únicamente son para demostrar que el umbral programado funciona correctamente, los valores de pruebas en la práctica real cambiarán dependiendo de la señal recibida.

# CAPÍTULO 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DETECTOR DE ESPECTROS

---

En este capítulo se pone en práctica el código diseñado para el detector de energía con un Universal Software Radio Peripheral (USRP E100), se detalla el procedimiento utilizado para realizar las pruebas con señales reales de TV Digital, la elección del área de pruebas y se analizarán los datos obtenidos comparando la sensibilidad y la SNR del USRP con el analizador de espectros para corroborar resultados de las mediciones.

## 5.1 DISEÑO DE PROGRAMA PARA IMPLEMENTACIÓN EN UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL (USRP)

---

A continuación se detalla en el diagrama de bloques (figura 5.1), cada elemento a utilizar para la implementación del bloque detector de energía en el USRP E100.

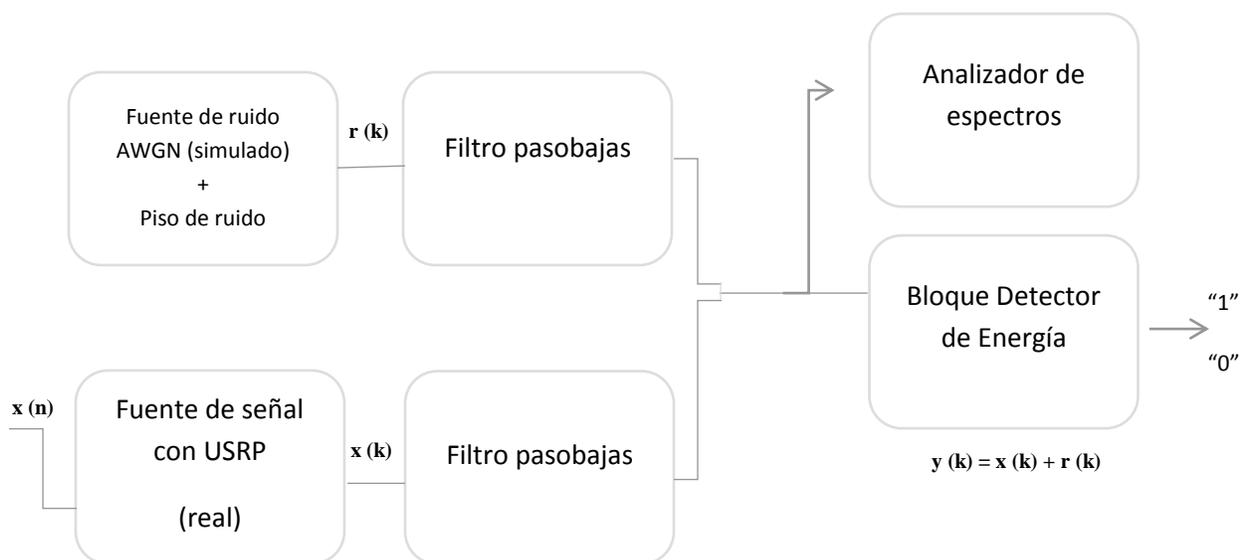


FIGURA 5.1 ESQUEMA DE IMPLEMENTACIÓN DE CÓDIGO EN USRP

El resultado de sumar ruido simulado ( $r(k)$ ) a la señal de entrada ( $x(k)$ ) forma la señal ( $y(k)$ ) y es enviada al bloque *Analizador de espectros*, el cual grafica la Densidad Espectral de Potencia de la señal de entrada. El bloque detector recibirá la señal de entrada y de acuerdo a los parámetros programados realizará el procesamiento necesario para determinar si del usuario primario está presente “1” o ausente “0”.

Para el cálculo de SNR se obtiene la potencia del ruido simulado filtrado utilizando un filtro IIR de orden 1 el cual calcula la energía de una determinada muestra y luego para la siguiente muestra se utiliza el resultado anterior de manera ponderada y aditiva al resultado de energía actual, la potencia de la señal filtrada se obtiene por el método tradicional para el detector de Energía ya mencionado en el capítulo 3.2.1.

$$SNR = 10 \log \left( \frac{P_y - P_r}{P_r} \right) \quad ( 5.1 )$$

$(P_r)$  = suma de la potencia de ruido existente en el canal y el ruido AWGN simulado

$(P_y)$  = potencia del usuario primario, potencia del piso de ruido y potencia de ruido simulado AWGN

## 5.2 MONITOREO DE FRECUENCIAS DE LA TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE (TDT)

---

La ocupación del espectro se midió en el intervalo de 506 MHz a 692 MHz con saltos de algunas frecuencias.

Para corroborar los niveles de energía a través del *USRP E100*, el equipo de medición se complementa con un analizador de espectro *Spectran HF-6060*, el cual es utilizado para las mediciones de potencia en el espectro y el registro de la actividad espectral sobre el rango de frecuencias en la banda de televisión, de esta manera se puede hacer una comparación con ambas lecturas y mostrar resultados más precisos.

Los rangos de medición de las bandas en el analizador de espectro como en el equipo *USRP* se basaron en aspectos como el tiempo de barrido, el ancho de banda de resolución y el *span*, que es definir una frecuencia central y una ventana de frecuencias alrededor de ella, con el fin de garantizar una adecuada medida en función del piso de ruido y el ancho de banda del canal de la tecnología a medir.

Obtener cifras representativas tomó un tiempo de 6 horas por cada uno los intervalos de medición durante 2 semanas, aunque el tiempo requerido suficiente de acuerdo con la cantidad de muestras necesarias para alcanzar un intervalo de confianza mayor al 95 % es de 48 horas.

---

## 5.2.1 INFRAESTRUCTURA

---

### ***Analizador de Espectros***

El analizador utilizado fue un *Spectran HF-6060*, que se muestra en la figura 5.2. Tiene una gama de frecuencia de 10 MHz a 6 GHz, rango de sensibilidad hasta de -135 dBm, la resolución de ancho de banda que lee es 10 kHz mínimo y 50 MHz máximo. Cuenta con visualización directa del espectro RF, visualización de la frecuencia y la intensidad de la señal, detector de energía en tiempo real y tiempo de muestra de 10ms, estas son algunas de las características útiles para fines del proyecto.

El analizador de espectros fue utilizado para comparar los valores obtenidos con las pruebas en el USRP y estimar si los niveles de decisión coincidían.



FIGURA 5.2 ANALIZADOR DE ESPECTRO SPECTRAN HF-6060

En el caso del analizador de espectro el *span* para cada medición fue de 10 MHz, cuando la tecnología por medir es conocida (en este caso la señal de TV), con el fin de garantizar un estimado razonablemente preciso de ocupación. Los segmentos menores a 10 MHz permitieron escoger la resolución del ancho de banda de  $RBW = 100\text{ kHz}$ , con tiempos de barrido que oscilaron entre 100 *milisegundos* lo que para 6 horas de

medición por canal conlleva a obtener entre 216000 trazas de medida, para la lectura de nivel de energía de cada canal de TV, se sintoniza la frecuencia central de cada canal.

En la tabla 5-1 se mencionan las características de cada componente utilizado para las mediciones tomadas con el analizador de espectros.

Equipos	Rango de Frecuencia	Referencia
Antena direccional	380MHz - 8GHz	HyperLOG 3080
Cable de 1m SMA, adaptadores SMA	_____	_____
Analizador de espectro	10 MHz – 6 GHz	Spectran HF-6060

TABLA 5-1 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS PARA MEDICIONES CON EL ANALIZADOR DE ESPECTRO [37]

En la figura 5.3 se muestra un esquema de las conexiones del analizador de espectros, un adaptador conectado al cable de banda ancha y posteriormente a la antena que puede utilizarse para recibir señales de 380 MHz a 8 GHz.

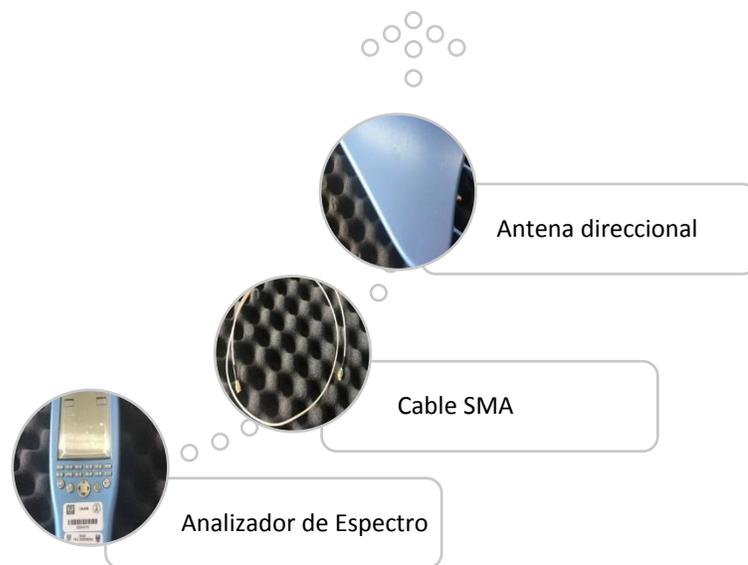


FIGURA 5.3 ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN DEL ANALIZADOR DE ESPECTRO

## USRP E100

Las mediciones con el equipo USRP E100 (figura 5.4) se obtuvieron de igual manera para las bandas de televisión digital con la técnica de detección de energía programada en Python.



FIGURA 5.4 EQUIPO USRP E100

Para el USRP el componente que limita el ancho de banda (BW) es el conversor ADC con resolución de 12 bits/muestra y  $32 * 10^6$  muestras por segundo, por lo tanto se puede recibir una señal que tenga un ancho de banda menor o igual a 16 MHz para evitar *aliasing*.

$$f_s > 2BW$$

$$32 * 10^6 > 2BW$$

$$BW < 16 \text{ MHz}$$

$$N = 210072$$

*número de muestras*

$$\tau_s = 1/f_s = \frac{1}{32 * 10^6} = 31.25 \text{ ns}$$

*periodo muestral temporal*

$$T = N * \tau_s = 6.56 \text{ ms}$$

*duración del espacio muestral temporal*

$$df = f_s/N = \frac{32 * 10^6}{210072} = 152.3 \text{ Hz}$$

*resolución frecuencial*

Como ya se mencionó en el capítulo 3, a continuación se muestra en la tabla 5-2 un resumen con las características del equipo utilizado:

<b>Equipos</b>	<b>Rango de Frecuencia</b>	<b>Referencia</b>
Antena Direccional	400 MHz – 1 GHz	LP0410
Cable SMA-SMA	0 Hz – 6 GHz	_____
Tarjeta Hija	50 MHz – 2 GHz	WBX - 40
Equipo SDR	_____	USRP E100

TABLA 5-2 ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO USRP

En la figura 5.5 se muestra un esquema de las conexiones utilizadas para detección de espectro mediante el USRP E100 con todos los componentes empleados.

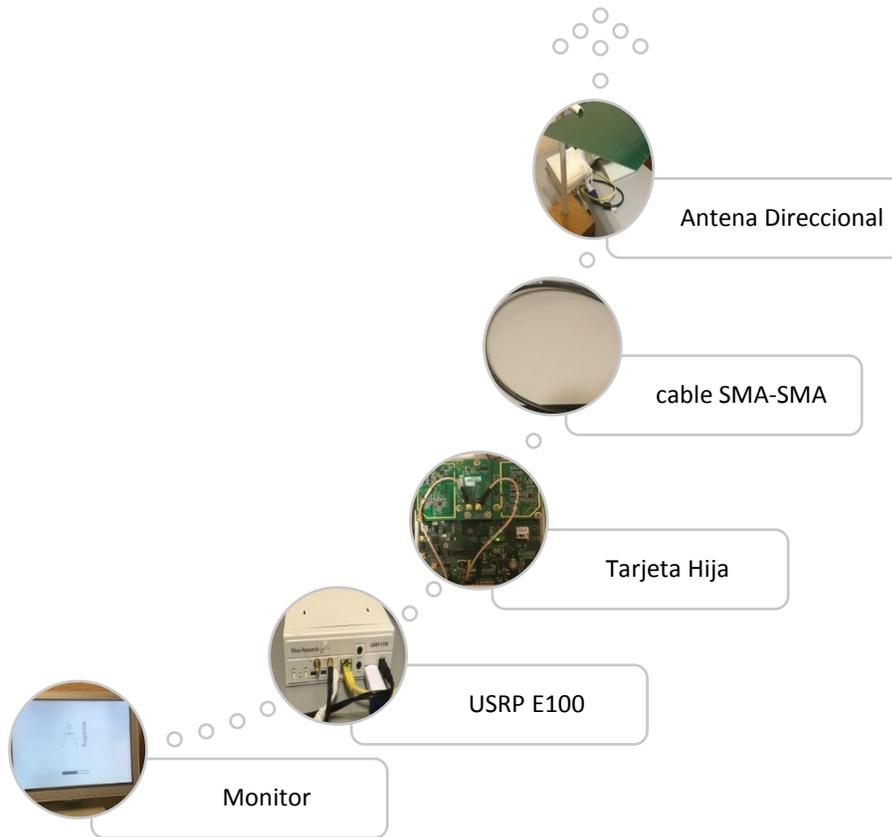


FIGURA 5.5 ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO RDS

---

## 5.2.2 ÁREA DE PRUEBAS

---

De acuerdo al estudio realizado en México en el cual se adaptó un programa realizado en la Universidad de Berkeley, California (mencionado en el estado del arte), para saber si existían huecos espectrales en la banda de televisión, concluyendo que efectivamente existían esos espacios sin utilizar por usuarios primarios y el mayor número de canales desocupados se presentaban en zonas rurales y suburbanas [8].

El lugar seleccionado para realizar una detección del espectro fue elegido de acuerdo a las áreas de cobertura de las estaciones transmisoras de televisión en la Ciudad de

México, número de habitantes en cada región ya que las zonas rurales y suburbanas serían las más beneficiadas, en el Anexo C se encuentran fotografías tomadas del lugar y observar que efectivamente es una localidad poco poblada.

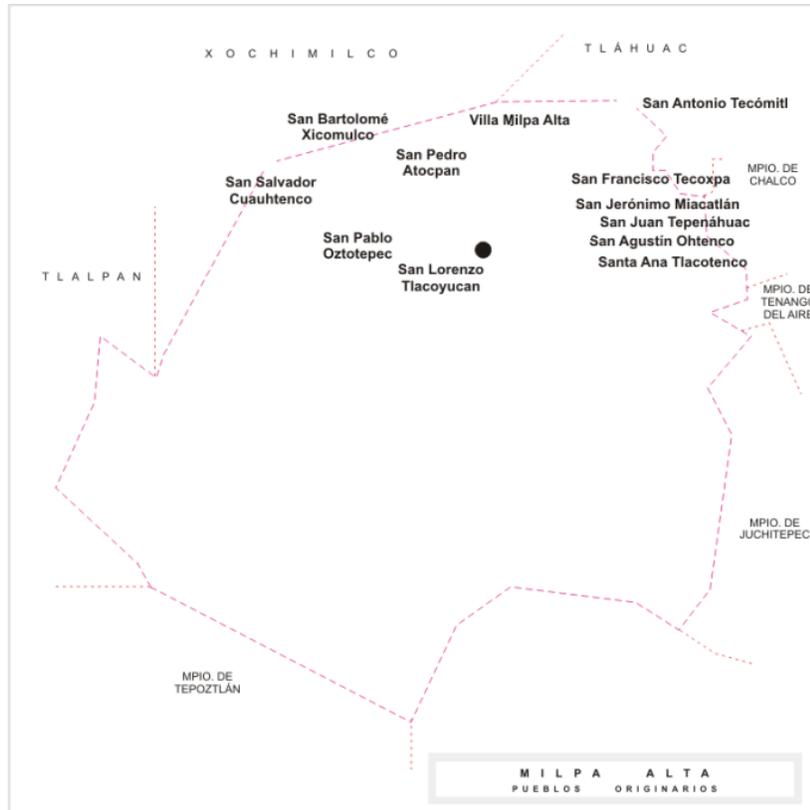


FIGURA 5.6 PRUEBA DE MEDICIÓN EN MILPA ALTA (PUEBLO SAN LORENZO TLACOYUCAN)

Después de un estudio realizado a diferentes localidades en zonas límites a los mapas de cobertura de emisoras de TV en la CDMX según el Instituto Nacional Electoral, las pruebas fueron realizadas en San Lorenzo Tlacoyucan (figura 5.6) que está situado en el Municipio de Milpa Alta (CDMX). San Lorenzo Tlacoyucan, es una zona suburbana con 3676 habitantes aproximadamente [39] y está a 2615 metros de altitud.

Antes de realizar las mediciones con los equipos se corroboró que efectivamente hubiera recepción de señal de televisión abierta con un televisor convencional en cada uno de los canales de TV, se pudo observar que en algunos lapsos de tiempo la señal para ciertos canales de TV se perdía, es así que se optó por tomar las mediciones en ese lugar.

---

### 5.2.3 PRUEBAS DE NIVEL DE ENERGÍA DETECTADO PARA EL CANAL 20 DE TELEVISIÓN

---

El canal 20 fue el rango de frecuencias elegido para hacer pruebas y plasmar los resultados obtenidos gráficamente del monitoreo de espectro en esta tesis, aunque el análisis y el sensado se realizó para cada uno de los canales de TV analizando sus respectivas frecuencias.

En la tabla 5-3 se muestran las características del canal sensado:

Especificaciones del canal de recepción	
Canal asignado	20 (506 – 512 MHz)
Distintivo de llamada	XHOPMA – TDT
Programación	TV UNAM
Ubicación del equipo transmisor	Cerro del Chiquihuite, CDMX
Población a servir	Ciudad de México
Sistema de radiación	Omnidireccional
Horario de funcionamiento	24 horas

TABLA 5-3 CARACTERÍSTICAS DEL CANAL DE RECEPCIÓN [19]

En la figura 5.7 se observa el área de cobertura de dicho canal, cabe destacar que el área de cobertura para los canales presentados en la tabla 1-4 es similar, pero la elección del canal 20 XHOPMA – TDT para plasmar los resultados gráficos se debe a que es canal de la Universidad Nacional Autónoma De México.

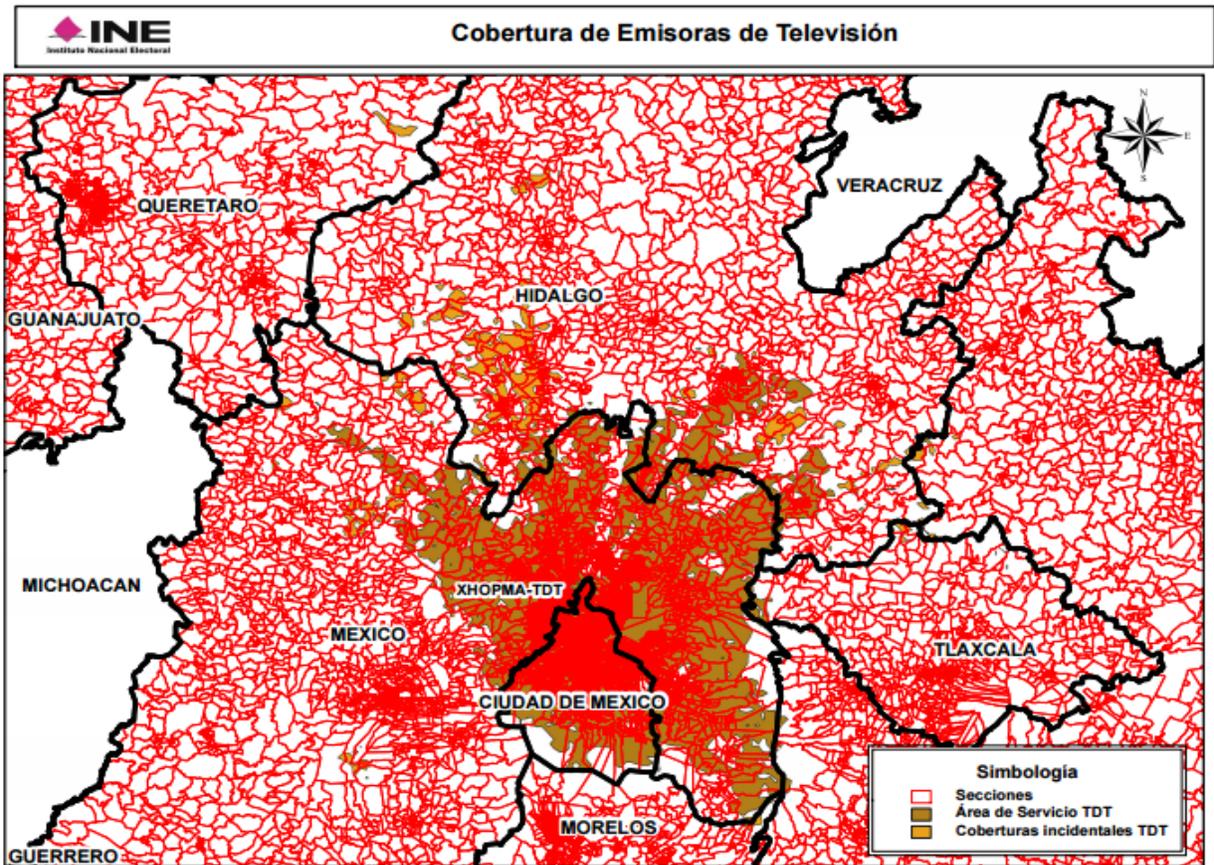


FIGURA 5.7 ÁREA DE COBERTURA XHOPMA - TDT [40]

Siguiendo el esquema de detección con el USRP E100 mencionado en la figura 5.1, se suman las componentes de potencia de ruido a la señal recibida por el USRP, posteriormente la señal simulada de ruido y la señal recibida por el USRP son filtradas por un filtro pasabajos con frecuencia de corte  $f_c = 3$  [MHz] cada una resultando un ancho de banda de 6 [MHz] luego del filtrado.

Una vez elegido el lugar de pruebas y montado el equipo del USRP, se sintoniza el canal 20 con el programa en Python "Sensing Spectrum" (Anexo B) a la frecuencia central de 569 MHz, cabe mencionar que las frecuencias plasmadas en la figura 5.8 (frecuencias de 506 – 512 MHz) no corresponden al ancho de banda del canal, sino a el ancho de banda resultante después de los filtros pasobajas.

Configurando los parámetros de detección se obtiene la salida gráfica que se observa en la Figura 5.8 con los valores de los parámetros de entrada como la incertidumbre de ruido, probabilidad de falsa alarma ( $P_{FA}$ ) y potencia del piso de ruido; también el umbral resultante calculado, la potencia total de señal, la densidad espectral de potencia y la salida del detector.

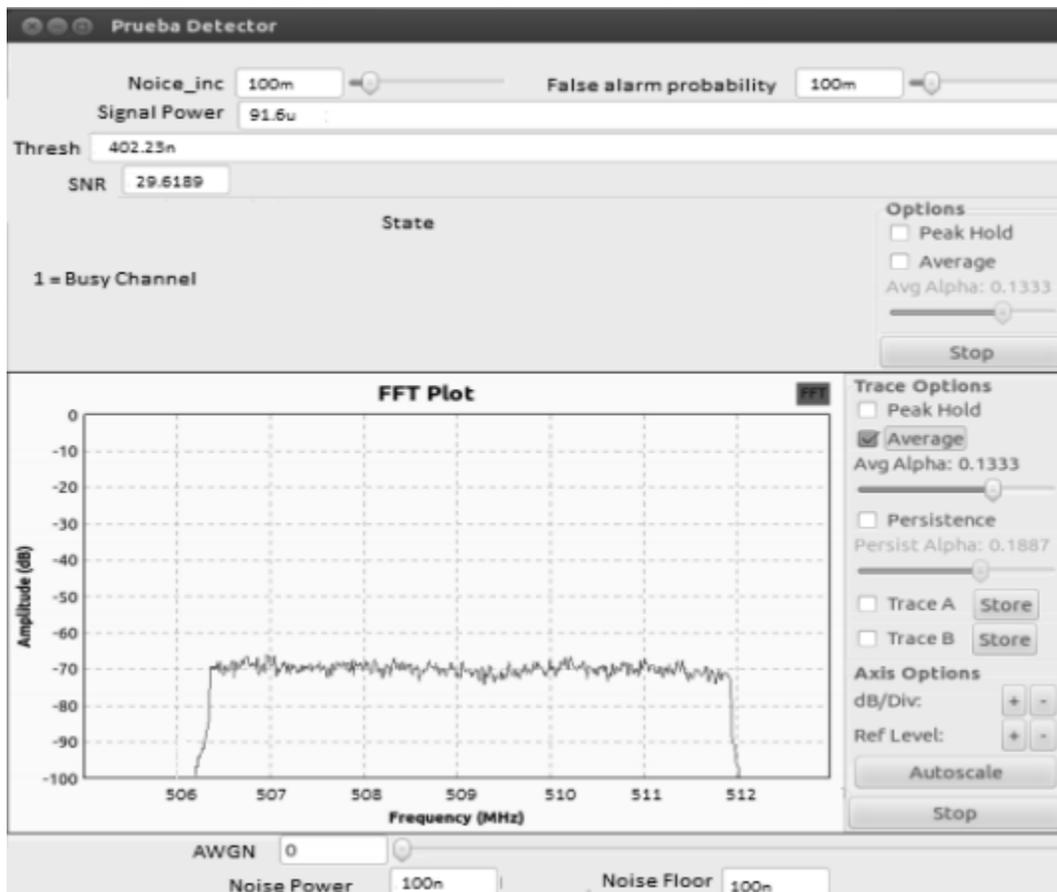


FIGURA 5.8 ESPECTRO OBTENIDO DEL DETECTOR DE ENERGÍA EN EL CANAL 20

Al aumentar la incertidumbre del ruido y manteniendo la probabilidad de falsa alarma, aumenta el umbral y al aumentar la probabilidad de falsa alarma que la norma IEEE 802.22 propone, disminuye el umbral, lo que puede provocar interferencia a un usuario primario y mala calidad del detector de energía, recordando que la probabilidad de detección tiene un valor mayor ( $P_D = 0.9$ ) ya que en un entorno cognitivo se prefiere perder oportunidad de transmisión más que interferir a un usuario primario.

Por último, al agregar ruido simulado se observa cómo varían los niveles de SNR y la salida del umbral. Concluyendo que efectivamente se cumple que cuando la potencia total de la señal a la entrada del detector (potencia usuario primario + potencia piso de ruido + potencia ruido simulado) supera el nivel del umbral la salida del bloque equivale a “1” o en caso contrario equivale a “0”. El aumento de ruido simulado se toma en cuenta por el bloque y también actualiza el valor del umbral en base a ello.

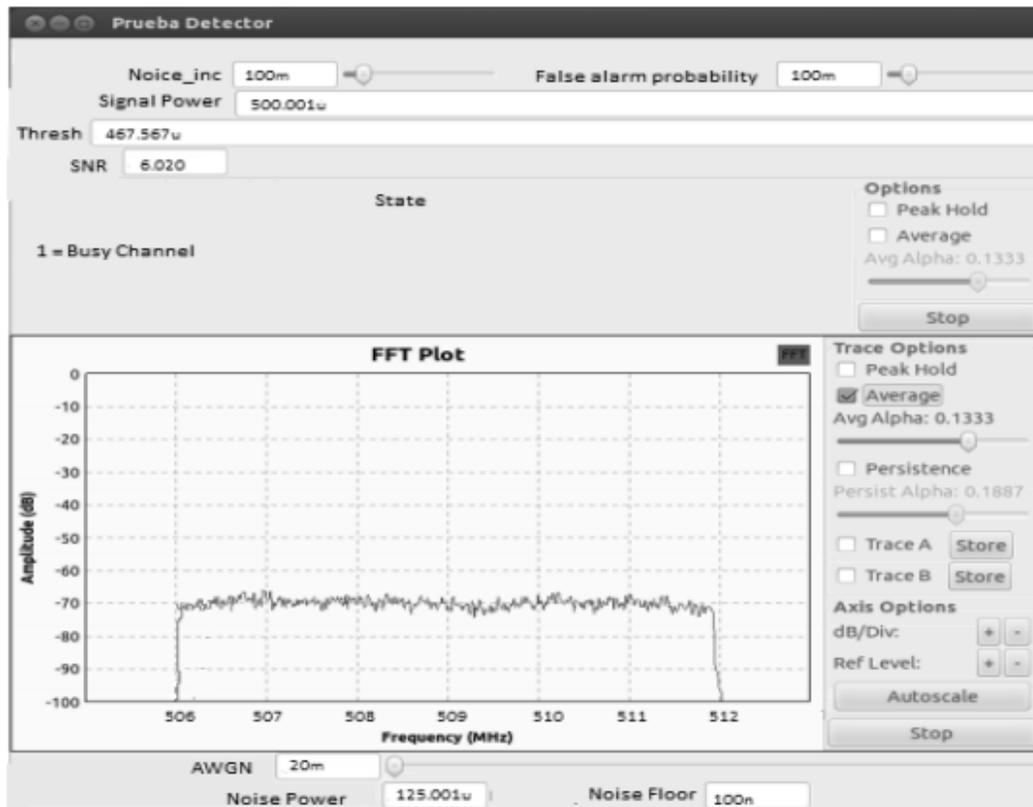


FIGURA 5.9 AMPLITUD DEL RUIDO GAUSSIANO SIMULADO 1

En la figura 5.9 se observa que al aumentar el ruido gaussiano a  $20 \times 10^{-3}$ , el cual no es un valor muy grande, el umbral se modifica pero la potencia de la señal continua siendo mayor al umbral, el ruido sumado no afecta a la señal transmitida por el usuario primario así que se detecta la presencia de un usuario primario en entorno real “1” y el usuario cognitivo no puede iniciar el protocolo de transmisión.

Mientras que en la figura 5.10 aumenta el valor a  $35 \times 10^{-3}$  el cálculo del umbral aumenta al igual que la potencia de la señal, pero haciendo una comparación entre

ellos para determinar si existe un usuario primario transmitiendo, se observa que la potencia de la señal no rebasa el valor del umbral arrojando un "0" como resultado o usuario primario ausente, esto es, debido a que el detector únicamente detecta ruido y por lo tanto da pauta para que el usuario cognitivo pueda comenzar con el protocolo de transmisión.

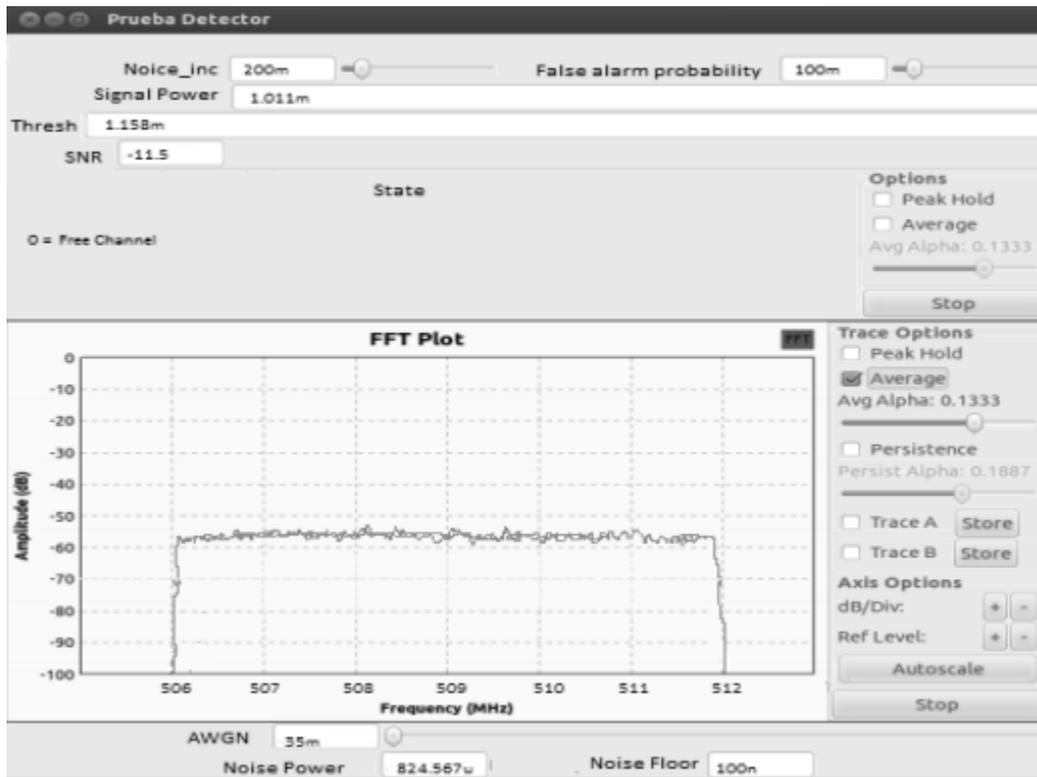


FIGURA 5.10 AUMENTO DEL RUIDO SIMULADO 2

## 5.2.4 NIVELES DE ENERGÍA DETECTADOS PARA LA BANDA DE TELEVISIÓN

Los niveles de amplitud se ajustaron en cada segmento del analizador de espectro y del equipo USRP E100 sin exceder los niveles de señal a la entrada; pues de lo contrario se producen alteraciones mayores que la variación promedio de ruido de piso, para cada medida. El objetivo era tener tanta sensibilidad como fuera posible en el receptor, evitando que los niveles de señales externas pudieran ser detectados como actividad de un usuario primario. El nivel de ruido promedio del instrumento para cada medida fue determinado con la ubicación de una impedancia de  $50 \Omega$  a la entrada del analizador de espectro, con un nivel de atenuación de 0 dB, detección RMS y un periodo considerable de medición para cada frecuencia. Los niveles de decisión ( $\lambda$ ) se presentan en las tablas 5-5 y 5-6, y se encontraron con una probabilidad de falsa alarma ( $P_{FA}$ ) del 10 %.

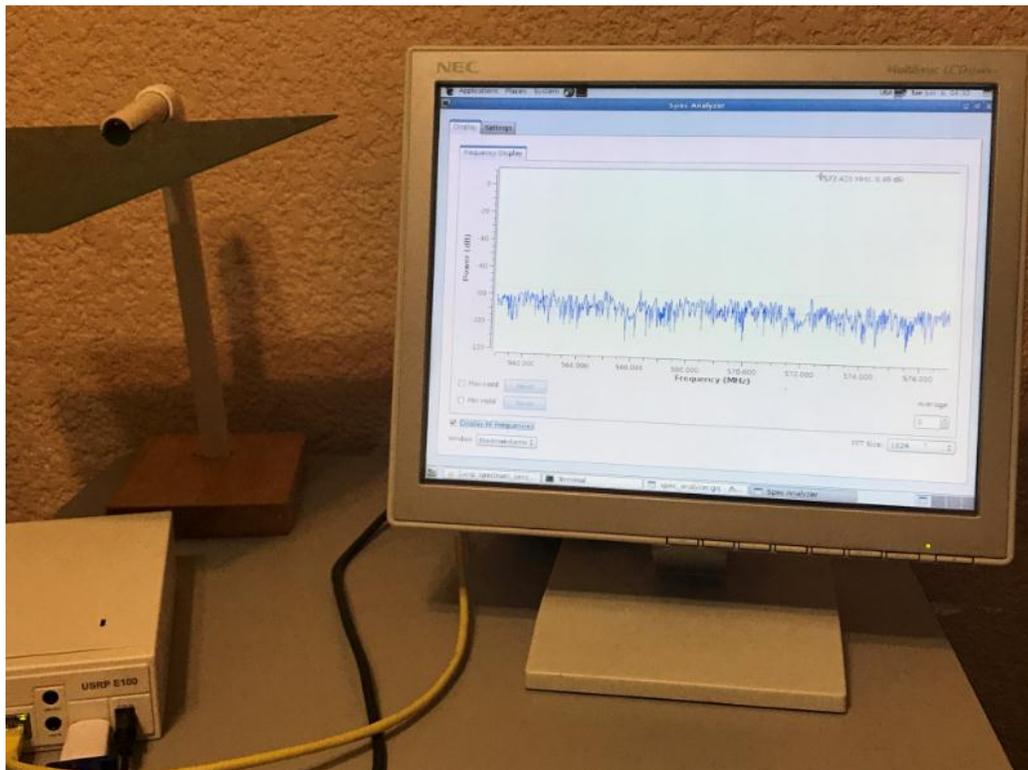


FIGURA 5.11 MONITOREO DE BANDAS DE TV

## Promedio de mediciones obtenidas para el Analizador de Espectros

TABLA 5-2 UMBRAL DE DETECCIÓN PARA EL ANALIZADOR DE ESPECTRO

Banda	Nivel de ruido promedio detectado	Nivel de sensibilidad promedio	Estado
506 – 512 [MHz]	- 120 dBm	-106 dBm	Ocupado
512 – 518 [MHz]	-133 dBm	-84.5 dBm	Ocupado
524 – 530 [MHz]	-135 dBm	-108 dBm	Ocupado
530 – 536 [MHz]	-120 dBm	-72.5 dBm	Ocupado
536 – 542 [MHz]	-133 dBm	-63.7 dBm	Ocupado
542 – 548 [MHz]	-126 dBm	-106 dBm	Ocupado
548 – 554 [MHz]	-126 dBm	-102 dBm	Ocupado
560 – 566 [MHz]	-133 dBm	-80.3 dBm	Ocupado
566 – 572 [MHz]	-135 dBm	-104 dBm	Ocupado
584 – 590 [MHz]	-122 dBm	-69.73 dBm	Ocupado
650 – 656 [MHz]	-127 dBm	-70.2 dBm	Ocupado
674 – 680 [MHz]	-128 dBm	-105 dBm	Ocupado
680 – 686 [MHz]	-122 dBm	-63.4 dBm	Ocupado

Estas mediciones se tomaron desde Ciudad Universitaria, CDMX para corroborar la sensibilidad de las señales de TV, el área de cobertura que muestran los transmisores de cada canal cubren totalmente el lugar de pruebas, los niveles de sensibilidad mostrados en la tabla son un promedio de las lecturas obtenidas por el analizador de espectros. Como se muestra en el estado de cada canal, no hubo en ningún momento lapsos sin transmisión y los niveles de sensibilidad son mayores a -116 dBm.

Promedio de mediciones obtenidas para el Analizador de Espectros en zona suburbana (San Lorenzo Tlacoyucan)

TABLA 5-3 UMBRAL DE DETECCIÓN PARA EL USRP E100

Banda	Nivel de ruido promedio Detectado	Nivel de sensibilidad promedio	Estado
506 – 512 [MHz]	-118 dBm	Ocupado: -116 dBm Libre: -118 dBm	Ocupado: 85 % Libre: 30 seg
512 – 518 [MHz]	-106 dBm	-102 dBm	Ocupado
524 – 530 [MHz]	-108 dBm	-90.4 dBm	Ocupado
530 – 536 [MHz]	-111 dBm	-60.4 dBm	Ocupado
536 – 542 [MHz]	-118 dBm	-116 dBm	Ocupado
542 – 548 [MHz]	-119 dBm	-106 dBm Libre: -119 dBm	Ocupado: 90 % Libre: 1-10 seg
548 – 554 [MHz]	-119 dBm	-109 dBm Libre: -118 dBm	Ocupado: 90 % Libre: 3 min
560 – 566 [MHz]	-118 dBm	-106 dBm Libre: -118 dBm	Ocupado: 80 % Libre: 1-10 seg
566 – 572 [MHz]	-119 dBm	-104 dBm Libre: -120 dBm	Ocupado: 90 % Libre: 1 min
584 – 590 [MHz]	-118 dBm	-60.4 dBm	Ocupado
650 – 656 [MHz]	-107 dBm	-104 dBm	Ocupado
674 – 680 [MHz]	-112 dBm	-95.6 dBm	Ocupado
680 – 686 [MHz]	-119 dBm	-80.4 dBm	Ocupado

Los canales que presentaron más actividad sin/con transmisión durante el tiempo de monitoreo fueron el 20, 26, 27,29 y 30. Los tiempos marcados eran los lapsos en los que no se captaba transmisión y la sensibilidad arrojada por el USRP disminuía su valor. El porcentaje marcado indica la cantidad de veces que se perdía la señal de recepción.

90% = La señal se fue 2 veces, aproximadamente durante el tiempo marcado.

85%= La señal se fue 3 - 4 veces, aproximadamente durante el tiempo marcado

80%= La señal se fue 4 o más veces, aproximadamente durante el tiempo marcado

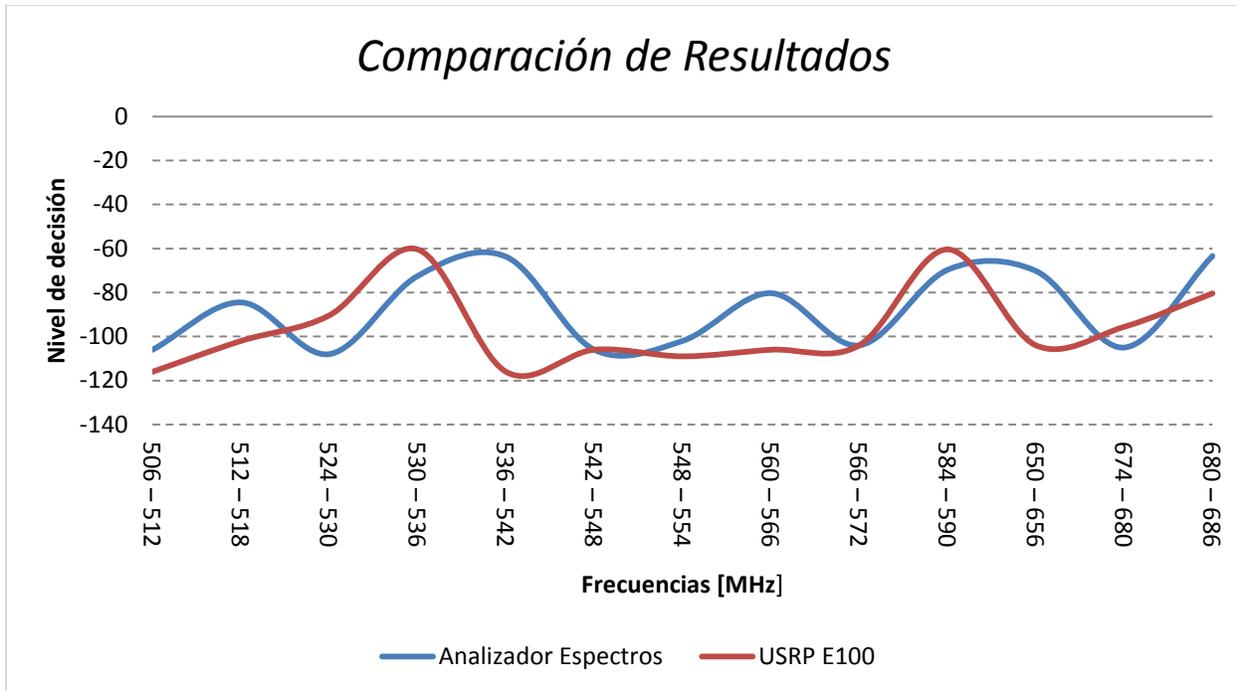


FIGURA 5.12 GRÁFICA COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ANALIZADOR DE ESPECTROS Y USRP

Los resultados presentados en las gráficas no son perfectamente ideales, las bandas de frecuencia detectadas presentadas incluyen un gran número de transmisores de diversa naturaleza, desde sistemas de banda estrecha hasta de banda ancha y desde señales débiles recibidas cerca del piso de ruido hasta señales fuertes.

De acuerdo a la tabla del Instituto Federal de Telecomunicaciones [22], la banda de televisión digital (entre 584 y 692 MHz) presenta una ocupación espectral de aproximadamente el 100 %. Pero hay muchos canales individuales desde 542 hasta 572 MHz que presentaron bajos niveles bajos de ocupación, aproximadamente una ocupación del 90% para toda la banda que está entre 542 y 572 MHz.

## 5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

### Desempeño del Detector de Energía

La gráfica de probabilidad de detección ( $P_D$ ) en función de  $SNR$  sirve para visualizar las condiciones en las que el método detecta las señales primarias.

Para observar el desempeño se simuló una señal como la utilizada en la sección 4.2 y dada una determinada probabilidad de falsa alarma ( $P_{FA}$ ) que permitió fijar un umbral  $\lambda$ , se varía la amplitud del ruido simulado AWGN para tener distintas  $SNR$ .

$$P_D = Q \left( \frac{\lambda - (SNR + 1)}{(SNR + 1) \sqrt{\frac{2}{N}}} \right) \quad (5.2)$$

Para un determinado nivel de amplitud de ruido AWGN se registraron varias salidas del detector, estas salidas se promediaron al igual que la  $SNR$  de cada una y así obtener cada punto de la gráfica, se obtuvieron aproximadamente 500 muestras.

En la figura 5.9 se graficó el resultado de probabilidad de detección para dos incertidumbres de ruido diferentes (0.1 y 0.02) y diferentes probabilidades de falsa alarma. En la curva azul y verde se asume un piso de ruido con un error del 10 % que es la estimación que se tiene en la práctica.

Tomando como referencia la curva azul se observa que por debajo de una  $SNR$  de -23 dB el bloque detector obtiene una probabilidad de detección  $P_D$  nula, por lo tanto se muestra que por debajo de esos valores el detector no es efectivo. Por otro lado, con una  $SNR$  de -21.5 dB el método obtiene una probabilidad de detección unitaria, lo cual indica que a partir de este valor el bloque de Energía siempre detectará señal.

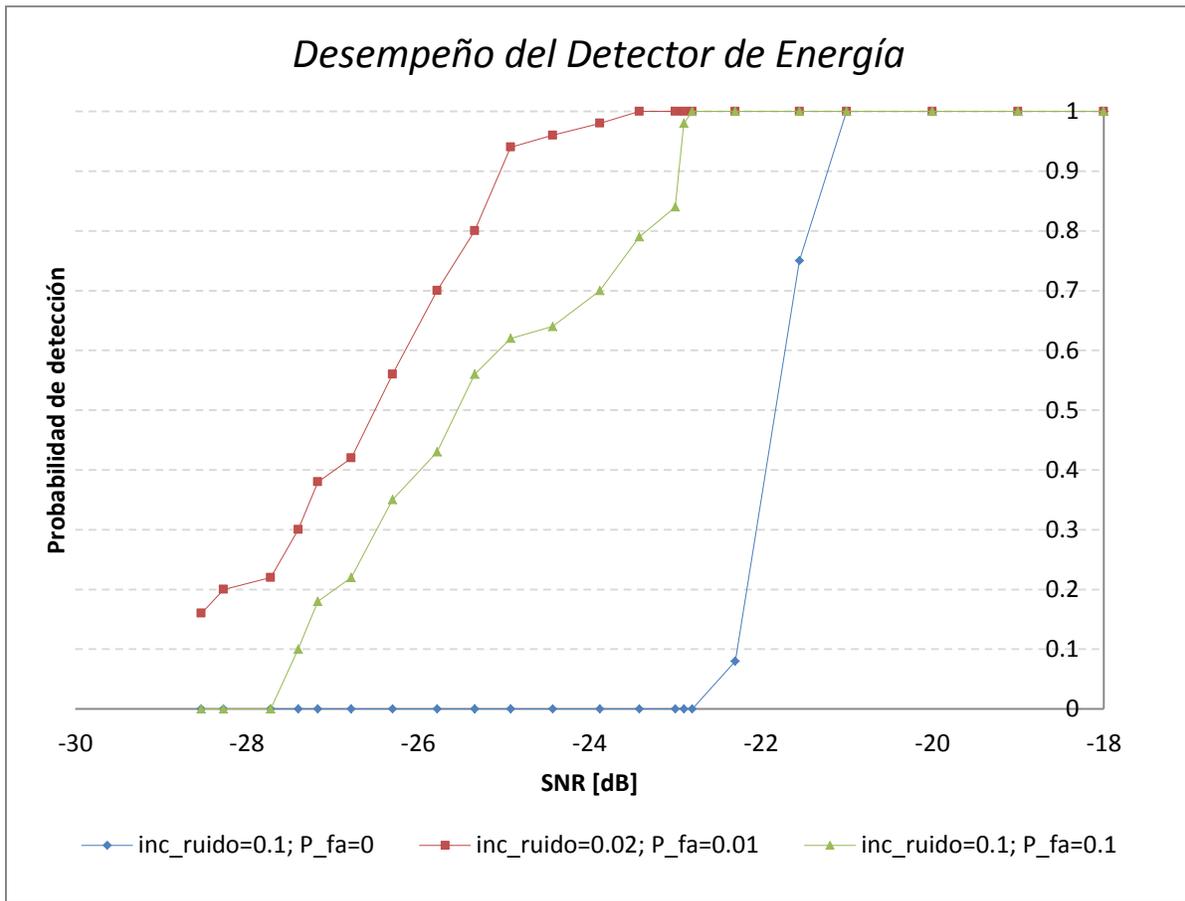


FIGURA 5.9 DESEMPEÑO DEL DETECTOR DE ENERGÍA

### Curvas Receiver Operating Characteristic (ROC)

Esta gráfica es  $P_D$  en función de  $P_{FA}$  permite observar el comportamiento del método en función de la probabilidad de detección y falsa alarma bajo distintas condiciones de SNR es importante destacar que la  $P_{FA}$  está fuertemente vinculada a la señal no primaria con la cual se prueba el detector.

Las señales de entrada del detector son un canal vacío y un canal de TV variando el umbral para ambas entradas y como la salida se puede vincular al mismo vector de valores de umbrales se puede obtener la gráfica, para este método se optó por variar el parámetro de incertidumbre de ruido el cual impacta directamente sobre el umbral.

En la figura 5.10 también se observa que al disminuir la SNR se obtienen valores más bajos de  $P_D$  y el desempeño del detector no es bueno, como la curva azul. Se puede observar en la gráfica cómo la curva que se acerca más rápido a una  $P_D$  unitaria es la que corresponde a la SNR más alta ( $-19\text{ dB}$ ), mientras que la curva que tarda más en llegar a la misma probabilidad es la que posee menor SNR ( $-21\text{ dB}$ ), pero fijando una probabilidad de falsa alarma se puede llegar a una buena detección de un usuario primario.

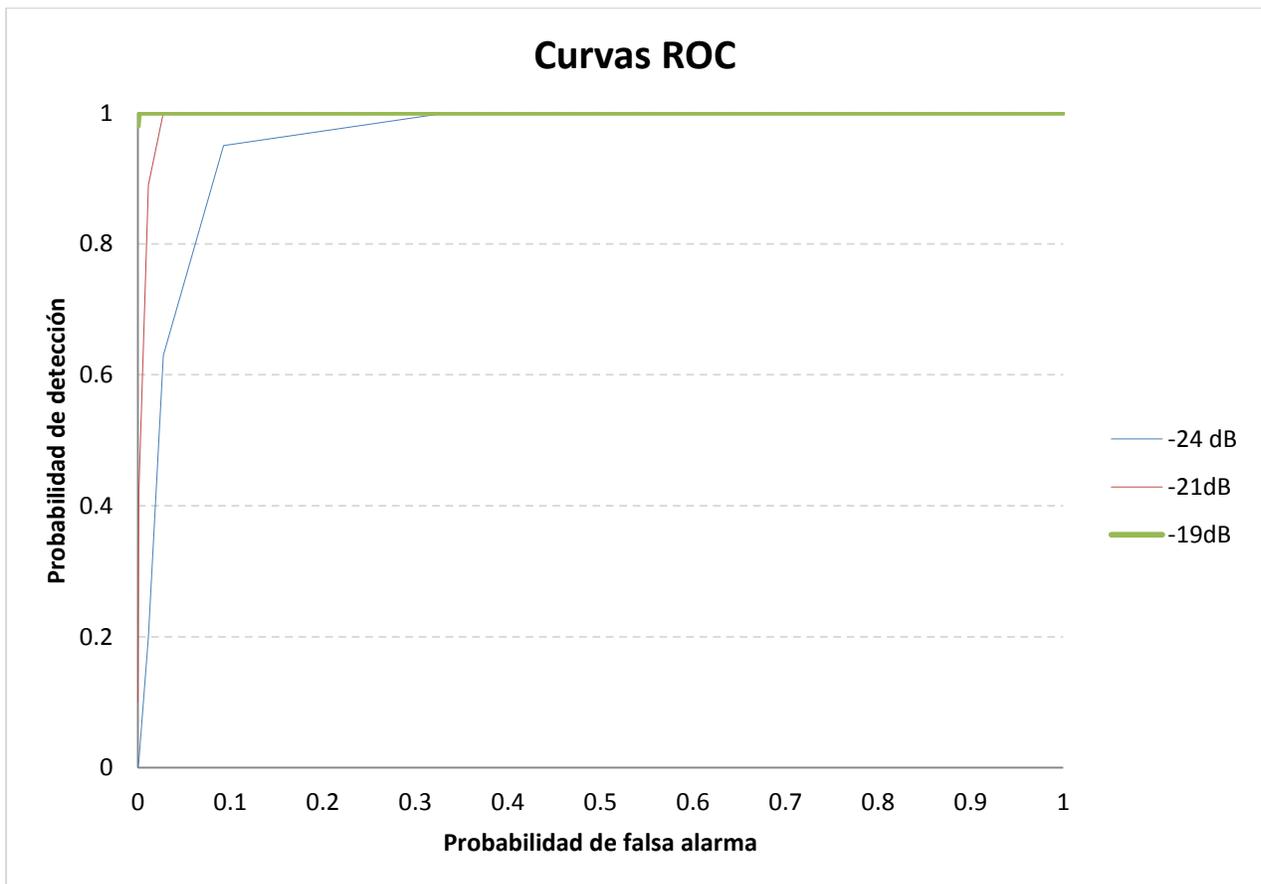


FIGURA 5.10 CURVAS RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC (ROC)

Por último se observa que la forma cualitativa de 5.11 es coherente con la ROC de ejemplo presentada en el capítulo 2.2.1

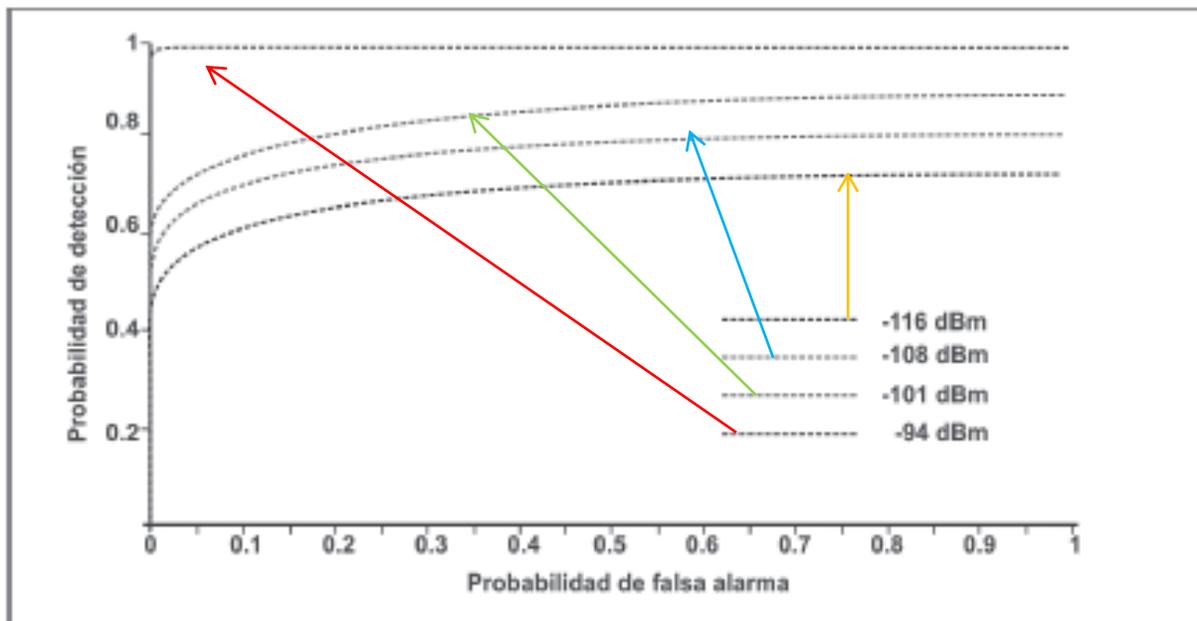


FIGURA 5.11 CURVAS ROC PARA USRP N200 [23]

## CONCLUSIONES

---

Como conclusiones finales del trabajo, se evalúan los objetivos alcanzados de acuerdo a la planificación de la tesis. Puesto que el objetivo principal del proyecto se centró en el sensado del espectro, se realizó un estudio comparativo de los métodos seleccionados, determinando fortalezas y debilidades de cada uno de ellos.

Una vez elegido el método Detector de Energía e implementándolo en el USRP E100, de acuerdo a los valores obtenidos durante el sensado se muestran las estadísticas de ocupación promedio de espectro, en función de los servicios de TV Digital y los resultados obtenidos muestran que algunas bandas tienen lapsos de tiempo sin ocupación.

Para conocer la ocupación de cada canal se pudo observar que las señales de entrada de -118 dBm y por encima de este valor se pueden detectar de forma fiable con el dispositivo USRP E100, y estos resultados se ven reflejados en las curvas ROC, cabe señalar que estas curvas son válidas para la configuración específica de la USRP E100 con tarjeta hija WBX 50-2200 MHz.

Por otra parte para detectar que un canal está ocupado por un usuario primario, según la norma IEEE 802.22 el nivel de energía es -116 dBm, en las tablas obtenidas con los valores de decisión de umbral, muchos canales en efecto se mostraban ocupados, sin embargo había otros que por lapsos de 10 a 180 segundos no llegaban a niveles de -116 dBm, por lo tanto mediante el estudio de ciclo de trabajo calculado como el cociente entre el número de muestras de la densidad espectral de potencia correspondientes a canales ocupados y el número total de muestras de capturadas durante el periodo de medida, la banda de televisión digital (entre 584 y 692 MHz) presenta una ocupación espectral de aproximadamente el 100 %. No obstante, hay muchos canales individuales desde 542 hasta 572 MHz que exhiben niveles bajos de ocupación.

En la siguiente tabla se resumen las características encontradas durante el proceso de detección de Energía en los diferentes canales de televisión:

Característica	Energía
Complejidad	Bajo
Nivel de procesamiento	Bajo
Nivel de conocimiento de la señal primaria	Nulo
Nivel de conocimiento de piso de ruido	Alto
Tiempo de sensado	Bajo
Capacidad de distinguir señales	No
SNR   $p_d = 0.1$	-19 [dB]
SNR   $p_d = 0.9$	-21 [dB]

TABLA 0-1 CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS DEL DETECTOR DE ENERGÍA IMPLEMENTADO

### Trabajo a futuro

Como trabajo a realizarse en el futuro, se considera útil continuar el estudio de los métodos de sensado (Detector de Energía, Cicloestacionario y Filtro Adaptado). En particular, se sugiere trabajar en aspectos relacionados con el desempeño, implementando los bloques en códigos más eficientes, continuar el estudio de la señal del usuario primario (ATSC) para comprender en profundidad cuales son las características útiles para su detección. No se descarta evaluar el estudio de otros métodos de sensado, los cuales pueden aportar mejoras a la etapa de detección.

Finalmente se propone completar el estudio de Radios Cognitivos con la etapa de cambio de banda, una vez completado este estudio, se deben reunir ambas etapas (sensado y cambio de banda) para lograr implementar una red cognitiva funcional. Por último puede evaluarse el uso de la técnica de sensado cooperativa, para lo cual debe incorporarse un dispositivo central, el cual recibe la información de sensado de los nodos de la red cognitiva y determina las acciones a seguir.

## REFERENCIAS

---

- [1] Y. Yuan, P. Bahl, R. Chandra, P. A. Chou, J. I. Ferrell, T. Moscibroda, S. Narlanka and Y. Wu. "Knows: Cognitive radio networks over white spaces". Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 416-427. 2007.
- [2] Galvis Quintero Alexander, "Acceso dinámico al espectro: estado actual, tendencias y retos", Entre Ciencia e Ingeniería, ISSN 1909-8367 Año 2, pp. 38-57, 2008.
- [3] I. Akyildiz y e. al, "CRAHNS: Cognitive radio ad hoc networks", de Ad Hoc Networks Journal (Elsevier), 2009.
- [4] Galeano Romero Katherine, "Modelo de decisión del espectro para radio cognitiva que integra las pérdidas de propagación en la banda GSM del espectro radioeléctrico. "Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C, Colombia 2015.
- [5] T. Yucek y H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2009.
- [6] Mansi Subhedhar y Gajanan Birajdar, "Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Network: A Survey", Department of Electronics and Telecommunication Engineering, SIES Graduate School of Technology, Navi Mumbai, India, 2011.
- [7] B. Wang and K.J.R. Liu, "Advances in cognitive radio networks: A survey", IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 5, no. 1, pp. 5-23, 2011.
- [8] Rosales Vargas, Cesar, "La explotación de espacios blancos de Televisión en México", Academia de la Ingeniería, Junio 2016.
- [9] Danijela Cabric, y Robert W. Brodersen. "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios", Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004.
- [10] National Telecommunications and Information Administration on FCC ET Docket No. 03-108, "cabric for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies", 2005.
- [11] Wireless Innovation Forum, consultado el 15/06/2017  
([http://www.wirelessinnovation.org/Cognitive\\_Radio\\_Architecture](http://www.wirelessinnovation.org/Cognitive_Radio_Architecture)).
- [12] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications ", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, No.2, 2005.
- [13] J.H. Aguilar, A. Navarro, "Radio Cognitiva-Estado del Arte", Universidad Icesi, Revista Sistemas y Telemática. Vol.9. No.16, 31-53, Marzo 2011.

- [14] Raikel Bordón López, Samuel Montejó Sánchez, "La Radio Cognitiva y su Impacto en el Uso Eficiente del Espectro de Radio", RIELAC, Vol.XXXVI, ISSN: 1815-5928., pp. 42-55, 2015.
- [15] A. Casanova, "Uso eficiente del Espectro radioeléctrico", <http://www.cept.org/>, 2016.
- [16] IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks Webpage - <http://www.ieee802.org/22/>.
- [17] MAN/LAN Committee and IEEE Standards. Part 22:Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands IEEE Computer Society. IEEE, 2011.
- [18] Electrical, Computer and Energy Engineering, "802.22 General Information", Universidad de Colorado.
- [19] Steve Shellhammer, Victor Tawil and Monisha Ghosh, "Spectrum Sensing Simulation Model, IEEE 802.22-06/0028r10", 2006.
- [20] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications", M.2243-0 , 2011.
- [21] Instituto Federal de Telecomunicaciones, "El Espectro Radioeléctrico en México. Estudio y Acciones", consultado el 03/04/2017
- [22] Registro Público de Concesiones – Instituto Federal de Telecomunicaciones, [rpc.ift.org.mx/rpc/](http://rpc.ift.org.mx/rpc/).
- [23] Christophe Bobda, "Introduction to Reconfigurable Computing: Architectures, Algorithms, and Applications", ISBN: 1402060882 9781402060885, p. 313.
- [24] I. Perejil, "Implementación de terminales de Radio Cognitiva en la banda de TV", Universidad Politécnica de Catalunya, 2016.
- [25] Mohamed Abd El Ghany, Mostafa Amr, Mohamed Gamal, "Communication Systems Using USRP Kits", ISBN: 978-3-659-56172-6, Abril 2015.
- [26] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, "Cognitive Radio Communications and Networks Principles and Practice. Academic Press", 2009.
- [27] Quinn Norton, "GNU Radio Opens an Unseen World", Wired.com. 2014.
- [28] Ettus Research LLC, "UHD Start", 2012.
- [29] "USRP E100 Datasheet", Ettus Research, 2012, descargable desde <http://www.ettus.com/product/details/UE100-KIT>
- [30] "WBX 50-2200 MHz Rx/Tx (40 MHz)", Ettus Research, 2012, descargable desde <https://www.ettus.com/product/details/WBX>

- [31] Ettus Research - <https://www.ettus.com/product/details/LP0410>.
- [32] Danijela Cabric, Artem Tkachenko, and Robert W. Brodersen. "Experimental study of spectrum sensing based on energy detection and network cooperation." Association for Computing Machinery, 2006.
- [33] Rahul Tandra and Anant Sahai. SNR Walls for Signal Detection. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2008.
- [34] A. Fehske, et al., "A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks," in New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, 2005, pp. 144-150.
- [35] L. F. Pedraza, et al. "Ocupación espectral y modelo de radio cognitiva para Bogotá", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Primera edición, 2015.
- [36] I. K. Aulakh. "Spectrum Sensing for Wireless Communication Networks". IEEE, pages 179–183, 2009.
- [37] S. Kapoor, S. Rao, y G. Singh. "Opportunistic Spectrum Sensing by Employing Matched Filter in Cognitive Radio Network". 2011. International Conference on Communication Systems and Network Technologies, pages 580–583, Jun 2011
- [38] Aaronia Spectran HF-4060- <http://www.testequipmentdepot.com/aaronia/rf-spectrum-analyzers/hf-4060.htm>
- [39] Secretaria de Desarrollo Social, Informe Anual Sobre La Situación de Pobreza y Rezago Social - [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/32193/Distrito\\_Federal\\_009.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/32193/Distrito_Federal_009.pdf)
- [40] Instituto Nacional Electoral, Mapa de Coberturas de las Estaciones de Radio y Canales de INE.

## ANEXOS

### Anexo A. Registro Público de Concesiones de canales de TV en la Ciudad de México (Instituto Federal de Telecomunicaciones)

Canal	Registro Público de Concesiones (IFT)
Canal 20	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/090252648003784f.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/090252648003784f.pdf</a>
Canal 21	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/0902526480037812.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/0902526480037812.pdf</a>
Canal 44	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/301215-EQ_COMPLEMENTARIO-011479.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/301215-EQ_COMPLEMENTARIO-011479.pdf</a>
Canal 23	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/090252648002a1c4.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/090252648002a1c4.pdf</a>
Canal 24	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/051015-EQ_COMPLEMENTARIO-011227.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/051015-EQ_COMPLEMENTARIO-011227.pdf</a>
Canal 25	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/081015-EQ_COMPLEMENTARIO-011302.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/081015-EQ_COMPLEMENTARIO-011302.pdf</a>
Canal 26	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/190815-TECNICA-010709.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/190815-TECNICA-010709.pdf</a>
Canal 27	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/090252648002a542.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/090252648002a542.pdf</a>
Canal 29	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/86015_160803180414_5004.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/86015_160803180414_5004.pdf</a>
Canal 30	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/0902526480037825.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/0902526480037825.pdf</a>
Canal 33	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/0902526480037810.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/0902526480037810.pdf</a>
Canal 50	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/301215-EQ_COMPLEMENTARIO-011480.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/301215-EQ_COMPLEMENTARIO-011480.pdf</a>

Canal 48	<a href="http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/301215-EQ_COMPLEMENTARIO-011482.pdf">http://rpc.ift.org.mx/rpc/pdfs/301215-EQ_COMPLEMENTARIO-011482.pdf</a>
----------	---

## Anexo B. Códigos de Programación

### B.1 Código del Detector de Energía en Python

from gnuradio import gr, eng_notation
from gnuradio import blocks
from gnuradio import audio
from gnuradio import filter
from gnuradio import fft
from gnuradio import uhd
from gnuradio.eng_option import eng_option
from optparse import OptionParser
import sys
import math
import struct
import threading
from datetime import datetime
import time
class tune(gr.feval_dd):
"""
<b>Esta clase permite llamar el código C++ para convertirlo a Python</b>
"""
def __init__(self, tb):
gr.feval_dd.__init__(self)
self.tb = tb
def eval(self, ignore):
"""
<b>Este método se llama desde blocks.bin_statistics_f cuando quiere cambiar la frecuencia central. Este método sintoniza a la nueva frecuencia central, y devuelve la nueva frecuencia Como resultado.</b>
"""
class parse_msg(object):
def __init__(self, msg):
self.center_freq = msg.arg1()
self.vlen = int(msg.arg2())
assert(msg.length() == self.vlen * gr.sizeof_float)
class my_top_block(gr.top_block):
def __init__(self):
gr.top_block.__init__(self)
usage = "usage: %prog [options] min_freq max_freq"
parser = OptionParser(option_class=eng_option, usage=usage)
parser.add_option("-a", "--args", type="string", default="",
help="UHD device device address args [default=%default]")
parser.add_option("", "--spec", type="string", default=None,

help="Subdevice of UHD device where appropriate")
parser.add_option("-A", "--antenna", type="string", default=None, help="select Rx Antenna where appropriate")
parser.add_option("-s", "--samp-rate", type="eng_float", default=1e6, help="set sample rate [default=%default]")
parser.add_option("-g", "--gain", type="eng_float", default=None, help="set gain in dB (default is midpoint)")
parser.add_option("", "--tune-delay", type="eng_float", default=0.25, metavar="SECS", help="time to delay (in seconds) after changing frequency [default=%default]")
parser.add_option("", "--dwell-delay", type="eng_float", default=0.25, metavar="SECS", help="time to dwell (in seconds) at a given frequency [default=%default]")
parser.add_option("-b", "--channel-bandwidth", type="eng_float", default=6.25e3, metavar="Hz", help="channel bandwidth of fft bins in Hz [default=%default]")
parser.add_option("-l", "--lo-offset", type="eng_float", default=0, metavar="Hz", help="lo_offset in Hz [default=%default]")
parser.add_option("-q", "--squelch-threshold", type="eng_float", default=None, metavar="dB", help="squelch threshold in dB [default=%default]")
parser.add_option("-F", "--fft-size", type="int", default=None, help="specify number of FFT bins [default=samp_rate/channel_bw]")
parser.add_option("", "--real-time", action="store_true", default=False, help="Attempt to enable real-time scheduling")
(options, args) = parser.parse_args()
if len(args) != 2:
parser.print_help()
sys.exit(1)
self.channel_bandwidth = options.channel_bandwidth
self.min_freq = eng_notation.str_to_num(args[0])
self.max_freq = eng_notation.str_to_num(args[1])
if self.min_freq > self.max_freq:
<b># intercambiarlos</b>
self.min_freq, self.max_freq = self.max_freq, self.min_freq
if not options.real_time:
realtime = False
else:
<b># Habilitar la programación en tiempo real</b>
r = gr.enable_realtime_scheduling()
<b># Construir gráfico</b>
self.u = uhd.usrp_source(device_addr=options.args, stream_args=uhd.stream_args('fc32'))
<b># Habilitar dispositivo</b>
if(options.spec):
self.u.set_subdev_spec(options.spec, 0)

```

# Habilitar antena
if(options.antenna):
    self.u.set_antenna(options.antenna, 0)

log = blocks.nlog10_ff(10, self.fft_size,
    -20*math.log10(self.fft_size)-10*math.log10(power/self.fft_size))
# Establece el parámetro freq_step al 75% del rendimiento real de los datos.
# Esto nos permite descartar los contenedores en ambos extremos del espectro.

self.freq_step = self.nearest_freq((1.25 * self.usrp_rate), self.channel_bandwidth)
self.min_center_freq = self.min_freq + (self.freq_step/2)
nsteps = math.ceil((self.max_freq - self.min_freq) / self.freq_step)
self.max_center_freq = self.min_center_freq + (nsteps * self.freq_step)

self.next_freq = self.min_center_freq
return False

def set_gain(self, gain):
    self.u.set_gain(gain)

def nearest_freq(self, freq, channel_bandwidth):
    freq = round(freq / channel_bandwidth, 0) * channel_bandwidth
    return freq

def bin_freq(i_bin, center_freq):
    #hz_per_bin = tb.usrp_rate / tb.fft_size
    freq = center_freq - (tb.usrp_rate / 2) + (tb.channel_bandwidth * i_bin)
    #print "freq original:",freq
    #freq =cercana_freq(freq, tb.channel_bandwidth)
    #print "freq proximas:",freq
    return freq

bin_start = int(tb.fft_size * ((1 - 0.75) / 2))
bin_stop = int(tb.fft_size - bin_start)

timestamp = 0
centerfreq = 0
while 1:

    center_freq = m.center_freq
    freq = bin_freq(i_bin, center_freq)
    #noise_floor_db = -174 + 10*math.log10(tb.channel_bandwidth)
    noise_floor_db = 10*math.log10(min(m.data)/tb.usrp_rate)
    power_db = 10*math.log10(m.data[i_bin]/tb.usrp_rate) - noise_floor_db

    if (power_db > tb.squelch_threshold) and (freq >= tb.min_freq) and (freq <= tb.max_freq):
        print datetime.now(), "center_freq", center_freq, "freq", freq, "power_db", power_db, "noise_floor_db",
        noise_floor_db

if __name__ == '__main__':
    t = ThreadClass()
    t.start()

    tb = my_top_block()
    try:

```

tb.start()
main_loop(tb)
except KeyboardInterrupt:
pass

## B.2 Código para el cálculo de potencia de una señal

### % 1) La frecuencia máxima en la señal

```
fmax=32000000;
```

### % 2 El número de muestras

```
N=262144;
```

### % 3) Parámetros espectrales

```
fs=2*fmax;
```

```
df=fs/N;
```

### % 4) Parámetros temporales

```
ts=1/fs;
```

```
T=N*ts;
```

### % 5) Cálculo de la función cosenoidal

```
t=0:ts:T*(1-1/N);
```

```
X=cos(2*pi*fmax*t);
```

### % 6) Cálculo del espectro

```
fHz=-0.5*fs : fs/N : 0.5*fs*(1-1/N); %frecuencia en Hz
```

```
F=fftshift(fft(X)/N);
```

### % 7) Cálculo de potencia

```
Ex1 = sum((abs(x)).^2)*inct; % En el tiempo
```

```
Ex2 = sum((abs(X)).^2)/T; % En frecuencia
```

```
Ex2 = sum((abs(X)).^2)*(Fs/N);
```

## Anexo C. Fotografías tomadas de monitoreo de señales

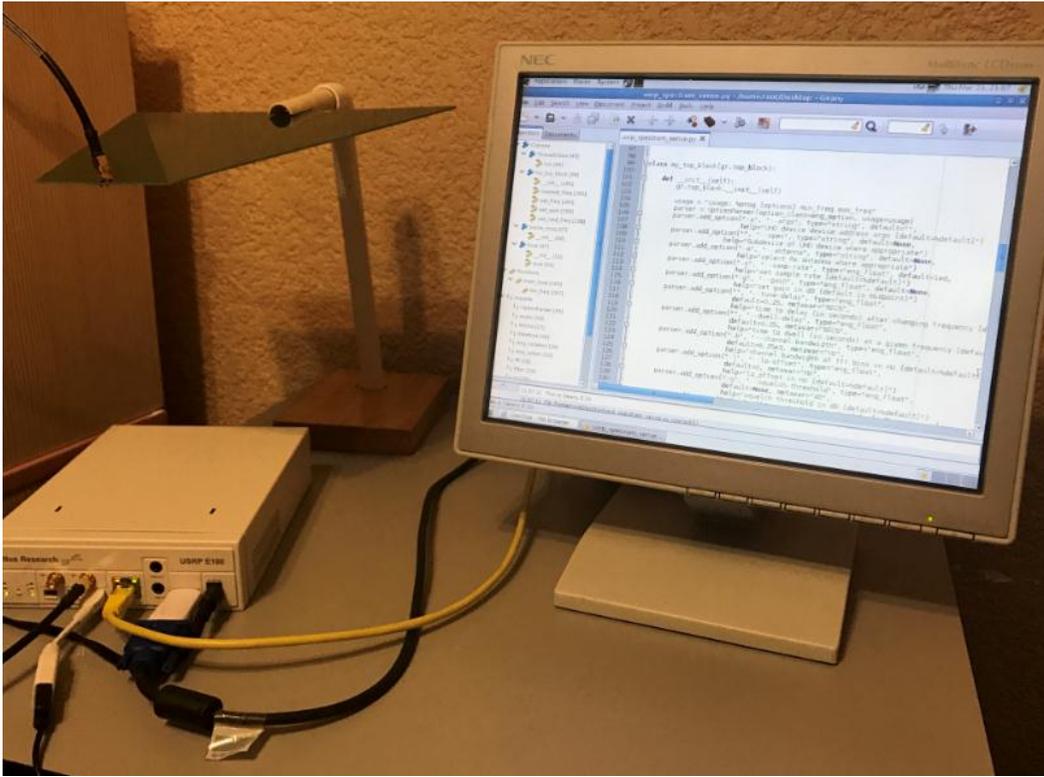


ILUSTRACIÓN 1 CÓDIGO DE PYTHON EN USRP E100

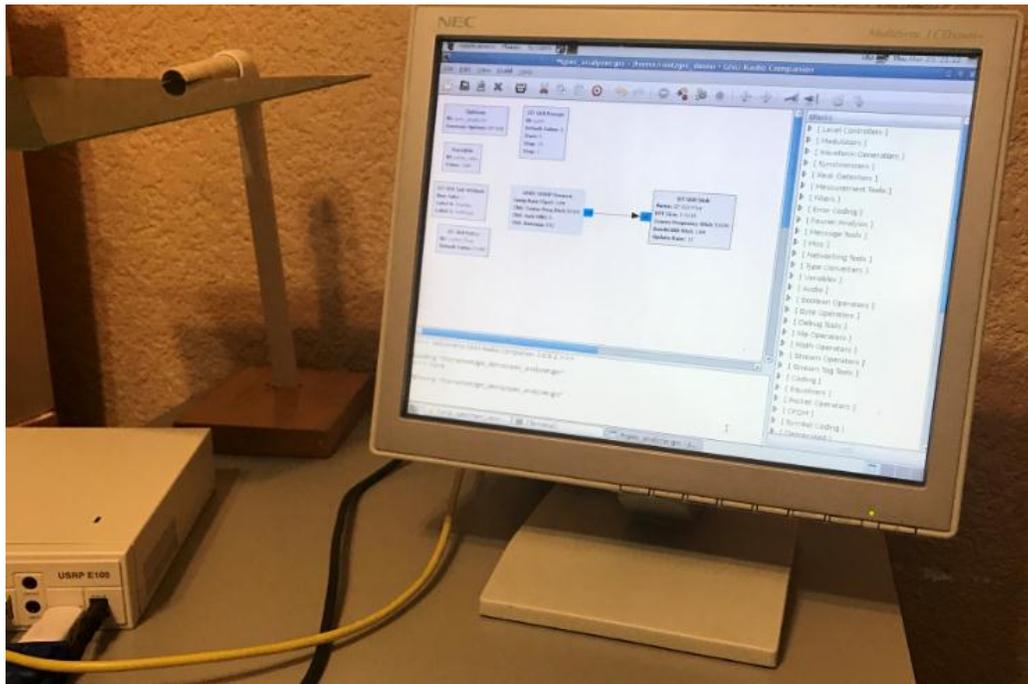


ILUSTRACIÓN 2 FLOWGRAPH EN USRP E100

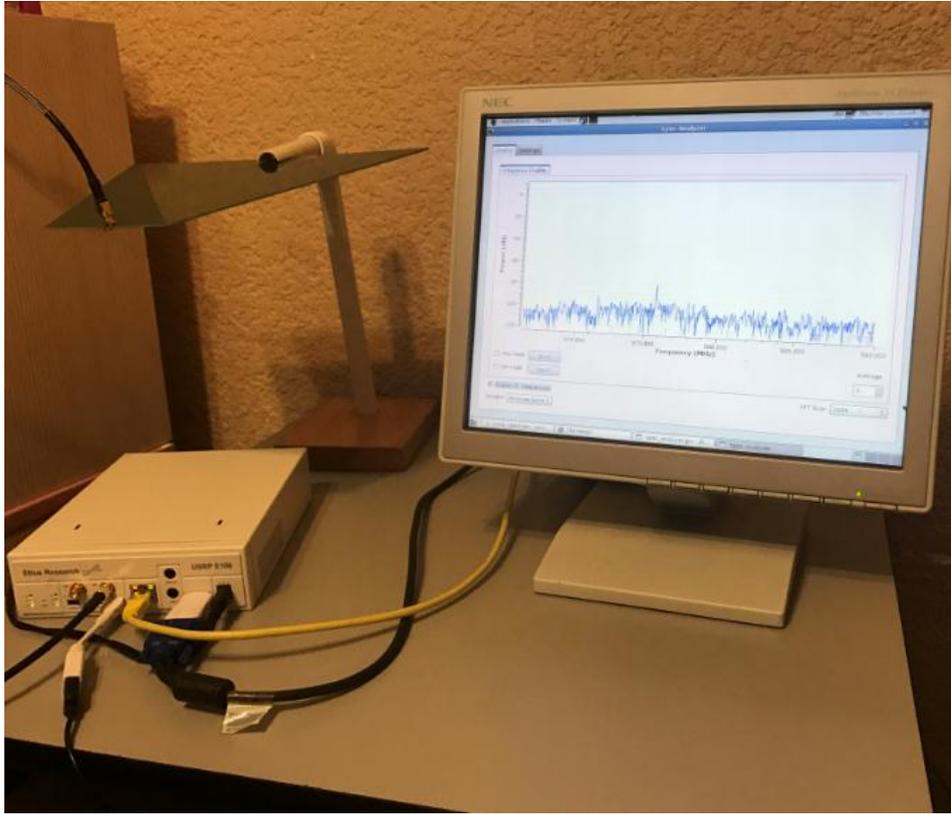


ILUSTRACIÓN 3 BÚSQUEDA DE CANALES DE TV

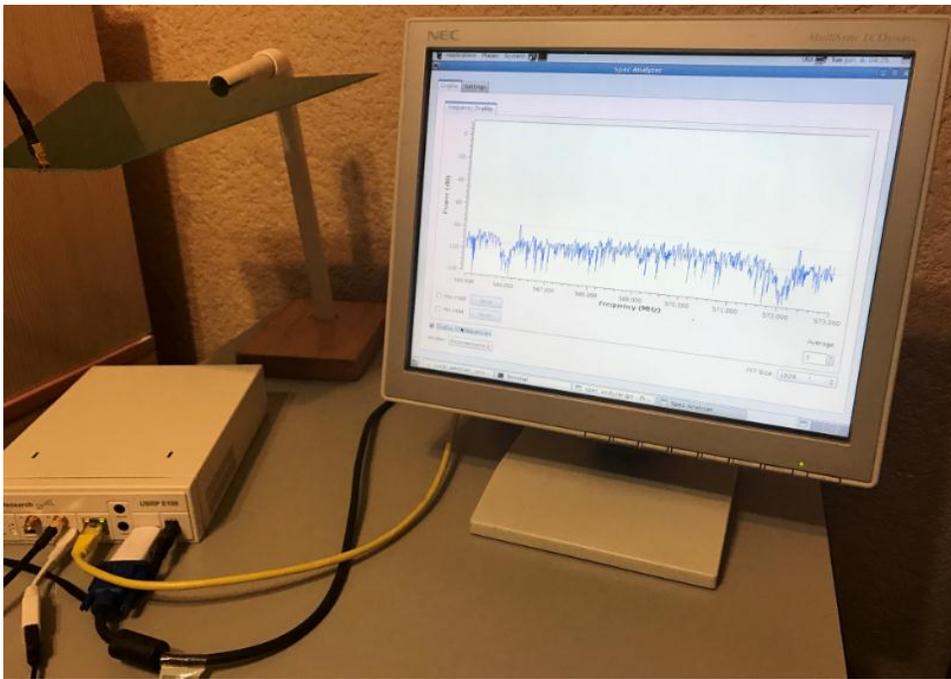


ILUSTRACIÓN 4 MONITOREO DEL CANAL 30 DE 6 MHZ

### Mapa de San Lorenzo Tlacoyucan

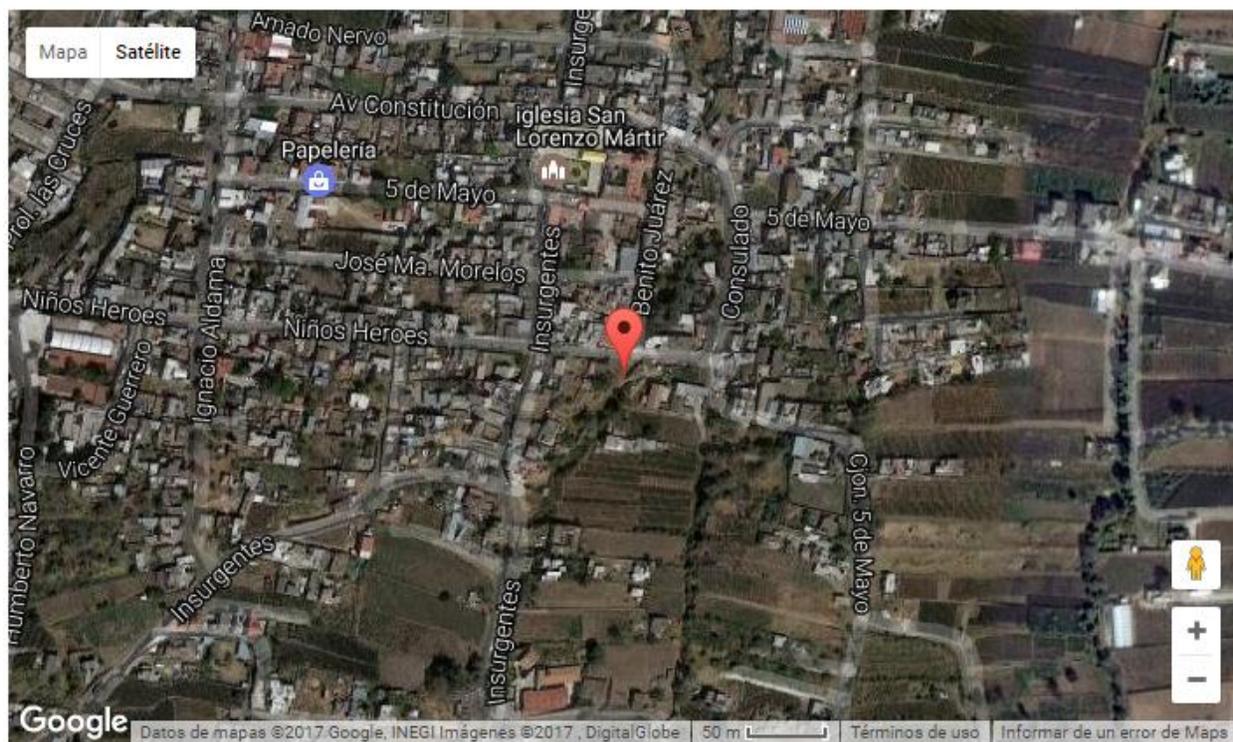
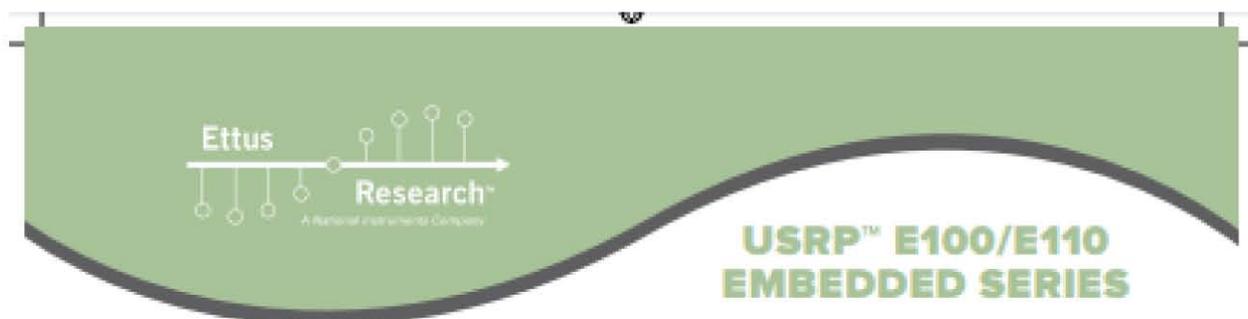


ILUSTRACIÓN 5 MAPA DE SAN LORENZO TLACOYUCAN



ILUSTRACIÓN 6 FOTOGRAFIA TOMADA DESDE SAN LORENZO TLACOYUCAN





**FEATURES:**

- Modular Architecture: DC-6 GHz
- Dual 64 MS/s, 12-bit ADC
- Dual 128 MS/s, 14-bit DAC
- DDC/DUC with 15 mHz Resolution
- Auxiliary Analog and Digital I/O
- 2.5 ppm TCXO Frequency Reference
- 0.01 ppm with Optional GPDSO Module
- Embedded OMAP Overo Module
- 800 MHz ARM Cortex A8 + C64 DSP
- Angstrom Linux w/ GNU Radio Built-In
- 512 MB RAM/4 GB Flash
- USB Console, OTG, and Host
- 10/100 Base T Supports SSH Access
- Stereo In/Out
- DVI Output for Monitor

**E100/E110 PRODUCT OVERVIEW:**

The Ettus Research™ USRP™ E100 and E110 hardware is part of the USRP™ (Universal Software Radio Peripheral) family of products, which enables engineers to rapidly design and implement powerful, flexible software-defined radio systems. The Embedded Series is targeted for deployable radio applications for users that require the software radio to run standalone. Both the E100 and E110 employ a multicore TI OMAP processor featuring an ARM Cortex A8 running at 800 MHz and a TI C64 DSP processor.

With the Embedded Series, users can develop and deploy their applications directly on a USRP E100 or E110. Users can develop their programs natively on the device, or migrate code from host-based platforms. The Embedded Series features a configurable clock, which allows sample rates to be selected based on application requirements.

The Embedded Series comes with two different FPGA configurations with the E110 offering a larger FPGA. Customers may also extend or customize the signal processing capabilities of the on-board FPGA to tailor the Embedded Series to meet individual application requirements. The USRP E100/E110 is shipped with a Linux installation that includes a fully functional version of GNU Radio. This allows users to easily port applications from host environments to the USRP E100 or USRP E110.

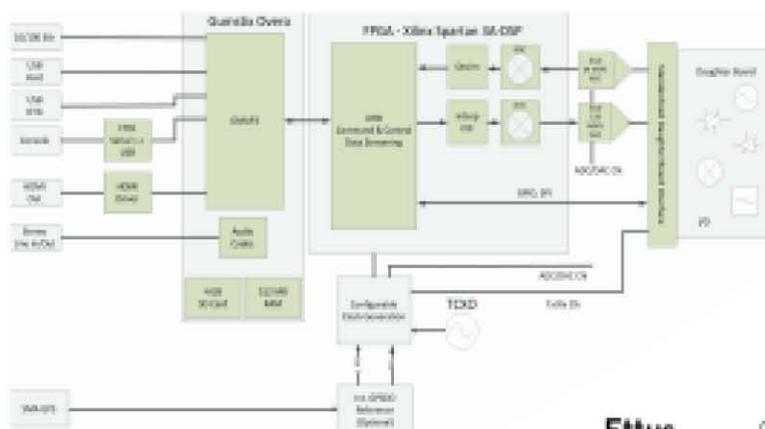
The USRP Hardware Driver™ is the official driver for all Ettus Research products, and supports rapid development in a comprehensive environment. The USRP Hardware Driver supports Linux, Mac OSX and Windows.

# USRP™ E100/E110 EMBEDDED SERIES

## SPECIFICATIONS

Spec	Typ.	Unit	Spec	Typ.	Unit
<b>POWER</b>			<b>RF PERFORMANCE (w/ WBX)</b>		
DC Input	6	V	SSB/LO Suppression	35/50	dBc
Current Consumption	1.5	A	Phase Noise (1.8 GHz)		
w/ WBX Daughterboard	2.5	A	10 kHz	-80	dBc/Hz
<b>CONVERSION PERFORMANCE AND CLOCKS</b>			100 kHz	-100	dBc/Hz
ADC Sample Rate	64	MS/s	1 MHz	-137	dBc/Hz
ADC Resolution	12	bits	Power Output	15	dBm
ADC Wideband SFDR	85	dBc	IIP3	0	dBm
DAC Sample Rate	128	MS/s	Receive Noise Figure	5	dB
DAC Resolution	14	bits	<b>PHYSICAL</b>		
DAC Wideband SFDR	83	dBc	Operating Temperature	0 to 55*	C
Host Sample Rate	4	MS/s	Dimensions (l x w x h)	22 x 16 x 5	cm
Frequency Accuracy	2.5	ppm	Weight	1.1	kg
w/ GPSDO Reference	0.01	ppm			

\* All specifications are subject to change without notice.



### ABOUT ETTUS RESEARCH:

Ettus Research is an innovative provider of software defined radio hardware, including the original Universal Software Radio Peripheral (USRP) family of products. Ettus Research products maintain support from a variety of software frameworks, including GNU Radio. Ettus Research is a leader in the GNU Radio open-source community, and enables users worldwide to address a wide range of research, industry and defense applications. The company was founded in 2004 and is based in Mountain View, California. As of 2010, Ettus Research is a wholly owned subsidiary of National Instruments.

1043 North Shoreline Blvd  
Suite 100  
Mountain View, CA 94043  
P 650.967.2870 [www.ettus.com](http://www.ettus.com)  
F 866.807.0801