



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

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

**TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN RECEPTOR ONE SEG
UTILIZANDO LA PLATAFORMA DE RADIO DEFINIDO POR
SOFTWARE USRP PARA EL ESTANDAR ISDB-Tb**

AUTOR: GARZÓN GAONA, JORDY GABRIEL

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

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“IMPLEMENTACIÓN DE UN RECEPTOR ONE SEG UTILIZANDO LA PLATAFORMA DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE USRP PARA EL ESTANDAR ISDB-Tb”** realizado por el señor ***GARZÓN GAONA JORDY GABRIEL***, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor ***GARZÓN GAONA JORDY GABRIEL*** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de febrero de 2018.



Phd. Gonzalo Fernando Olmedo Cifuentes

C.I. 171169634-2



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

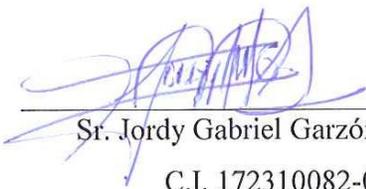
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **GARZÓN GAONA JORDY GABRIEL**, con cédula de identidad N° 1723100820, declaro que este trabajo de titulación **“IMPLEMENTACIÓN DE UN RECEPTOR ONE SEG UTILIZANDO LA PLATAFORMA DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE USRP PARA EL ESTANDAR ISDB-Tb”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 8 de febrero de 2018.



Sr. Jordy Gabriel Garzón Gaona
C.I. 172310082-0



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **GARZÓN GAONA JORDY GABRIEL**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en su totalidad en el repositorio Institucional el trabajo de titulación **“IMPLEMENTACIÓN DE UN RECEPTOR ONE SEG UTILIZANDO LA PLATAFORMA DE RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA EL ESTANDAR ISDB-Tb”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 8 de febrero de 2018.

A handwritten signature in blue ink is positioned above a horizontal line. The signature is stylized and appears to read 'Garzón Gaona'.

Sr. Jordy Gabriel Garzón Gaona

C.I. 172310082-0

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación simboliza el final de una gran etapa en mi vida llena de sacrificios, esfuerzos y logros, por ese motivo quiero dedicarlo a mis padres, quienes pusieron su fe ciega en mí, apoyándome constantemente pese a la distancia desde el primer día de clases hasta la defensa de este proyecto y sé que lo seguirán haciendo con el resto de las metas de vida que me imponga.

A mis hermanos Vanessa, Jason, Jonathan, Junior, Jordan y Josue dedicarles este trabajo para demostrarles que las metas bien definidas se pueden alcanzar, a través de la responsabilidad, la disciplina, la objetividad y con la ayuda de la familia, los amigos y aquellos con quienes coincidimos en el camino.

A los amigos que conocí en esta linda etapa y que se convertirán en grandes profesionales, este proyecto se los dedico como el reflejo del compañerismo, de la amistad y del trabajo en equipo que se realizó durante la carrera universitaria.

Jordy Gabriel Garzón Gaona

AGRADECIMIENTO

De todo corazón agradezco a mis padres, a mi mami Fanny Lucrecia Gaona Jaramillo, por todo el apoyo incondicional y decirte que soy reflejo de tu disciplina de tu perseverancia y que te amo, gracias mama.

A mi papá Walter Darwin Garzón Bastidas, que sería de mi sin tu ayuda, por tu esfuerzo, por trabajar día a día para apoyarme en este camino, gracias y estoy seguro que seré un gran profesional y un gran padre porque te tengo a ti como inspiración.

A Dios por darme esta linda oportunidad de ingresar a la Universidad y convertirme en ingeniero y sobre todo porque aún tengo a mis papas juntos en vida para que aprecien este momento en familia.

A mis hermanos agradecerles porque sé que ustedes no tuvieron la misma oportunidad que yo y aun así me ayudaron, también por estar en esos momentos especiales y aquellos difíciles.

A mi director de Tesis y el mejor profesor que he tenido durante este ciclo de mi vida, el PhD. Gonzalo Olmedo gracias por los consejos, la paciencia, por creer en mí y sobre todo por compartir sus experiencias y conocimientos para la consecución del trabajo de titulación.

Jordy Gabriel Garzón Gaona

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia	3
1.3 Alcance del Proyecto.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 General	5
1.4.2 Específicos	5
1.5 Metodología	5
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 Introducción	7
2.2 Sistema en Recepción	7
2.2.1 Recepción <i>One-Seg</i>	10
2.3 Problemas en recepción ISDB-Tb.....	17
2.3.1 Sincronización.....	18
2.3.2 Ecuación	22
2.3.3 Entrelazamiento en tiempo y frecuencia	24
2.3.4 Algoritmos de correcciones errores	26
2.3 Medidas de calidad.....	26
2.3.1 MER (Modulation Error Rate).....	27
2.3.2 BER (Bit Error Rate).....	29
2.4 Efectos en las constelaciones	30

2.5 Estado del Arte.....	31
2.5.1 gr-isdbt Un Receptor implementado en GNU-RADIO.....	32
CAPÍTULO 3 RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE.....	34
3.1 ¿Qué es SDR?	34
3.2 USRP 2920.....	34
3.2.1 Panel Frontal y conectores	35
3.2.2 Arquitectura.....	37
3.2.2.1 Tarjeta Madre FPGA.....	39
3.2.2.2 Tarjeta Hija SBX.....	40
3.2.3 Conexión con el USRP-2920	40
3.2.4 Software	42
3.2.4.1 Matlab	42
3.2.4.2 LabVIEW	43
3.2.4.3 GNU Radio	44
3.2.4.3 Determinación del Lenguaje de Desarrollo.....	46
3.3 No idealidades en SDR	48
3.3.1 Problemas con el Oscilador Local.....	48
3.3.2. Frecuencia de muestreo en SDR	49
3.3.3 Costo Computacional	51
CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DE UN RECEPTOR ONE-SEG.....	52
4.1 Arquitectura del Sistema.....	52
4.2 Entorno de GNU Radio.....	53
4.2.1 Propiedades de los Bloques.....	55
4.2.3 Definición de variables y Tipo de Datos.....	56
4.2.3 Programación y Compilación en GNU Radio.....	57
4.2.4 Errores Comunes en GNU Radio.....	58
4.3 Algoritmo del Receptor de One-Seg	60
4.3.1 Adquisición de Datos	62
4.3.2 Filtro.....	64
4.2.3 Sincronización OFDM	65

4.2.4 Decodificador TMCC.....	68
4.2.5 Desentrelazamiento en Tiempo y Frecuencia	69
4.2.6 Demapeo de Símbolos	69
4.2.7 Decodificador One-Seg.....	69
4.2.8 MER <i>One-Seg</i>	70
4.2.9 Ejecución del algoritmo	70
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
5.1 Recepción de Video	72
5.2 Análisis de la señal <i>One-Seg</i>	76
5.3 Análisis de Constelaciones.....	81
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	83
6.1 Conclusiones	83
6.2 Recomendaciones.....	85
6.3 Trabajos Futuros	86
REFERENCIAS	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cantidad de Ceros para Zero Padding en el símbolo OFDM.....	12
Tabla 2 Parámetros ISDB-Tb.....	16
Tabla 3 Randomizing en modo 1	25
Tabla 4 Rangos del MER para una señal de calidad.	28
Tabla 5 Leds indicadores del USRP-2920	36
Tabla 6 Comparaciones de los firmwares del USRP	47
Tabla 7 Opciones de Generación en GNU Radio.....	55
Tabla 8 Parámetros del Bloque USRP Source	62
Tabla 9 Frecuencia de los canales nacionales	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Visión General del Sistema de Recepción.....	8
Figura 2 Procesamiento de la señal de <i>One-Seg</i> en recepción	9
Figura 3 Prefijo Cíclico y el símbolo OFDM.....	10
Figura 4 Modelo OFDM y aplicación de la FFT.	11
Figura 5 Espectro ISDB-Tb Trasmisión jerárquica	13
Figura 6 Proceso de la señal de un segmento en el Modo 3	14
Figura 7 Constitución del Cuadro OFDM Modo 3.	15
Figura 8 Estructura de la señal OFDM con CP y de los conjuntos \mathcal{L} y \mathcal{L}'	20
Figura 9 Picos de Inicio de símbolo OFDM obtenidos por el Algoritmo.....	21
Figura 10 Circuito que genera la ubicación de las SP en un cuadro OFDM	23
Figura 11 Time interleaving, I = longitud de cada capa, n_c = Portadoras de datos por segmento, $m_i = (i*5)$	24
Figura 12 Entrelazamiento en frecuencia.....	25
Figura 13 Mediciones en un sistema ISDB-Tb	27
Figura 14 Punto de medición del BER en receptores	29
Figura 15 Efectos en las Constelaciones	30
Figura 16 Efectos en un símbolo ideal en la recepción.....	31
Figura 17 USRP 2920 y un sistema embebido.....	35
Figura 18 Panel Frontal del USRP-2920.....	36
Figura 19 Arquitectura General de SDR.....	37
Figura 20 Diagrama de Bloque del NI-USRP2920.....	38
Figura 21 Antena VERT400	39
Figura 22 Tipos de conexión con el USRP-2920.....	41
Figura 23 a) Efectos del desvío de la portadora en QPSK, 16QAM, 64QAM y b) Efectos del ruido de fase en QPSK, 16QAM, 64QAM.....	49
Figura 24 Desvío en el reloj interno del receptor, respecto del reloj del transmisor .	50
Figura 25 Escenario del sistema de implementación	52
Figura 26 Entorno de GNU Radio	54

Figura 27 Propiedades del Diagrama de bloques	55
Figura 28 Variable en GNU Radio.....	56
Figura 29 Tipo de datos en GNU Radio.....	57
Figura 30 Entorno de programación en GNU Radio	58
Figura 31 Error de conexión indebida de bloques	59
Figura 32 Error en modo de interfaz de usuario	59
Figura 33 Algoritmo del receptor One-Seg implementado en GNU Radio.....	60
Figura 34 Modulo <i>gr-isdbt</i> añadido a la librería	62
Figura 35 Diagrama para grabar una señal	64
Figura 36 Propiedades del Bloque Low Pass Filter	65
Figura 37 Seguimiento OFDM One-Seg	67
Figura 38 Activación y desactivación de variables.....	73
Figura 39 Picos que indican el inicio de símbolo OFDM.....	73
Figura 40 Mesetas formadas por error del CP	74
Figura 41 Gráfica ocasionada por error del Modo	74
Figura 42 Impresión del TMCC.....	75
Figura 43 Reproducción del video con <i>ffmpeg</i>	75
Figura 44 Ejecución del Receptor <i>One-Seg</i>	76
Figura 45 MER vs Potencia de Recepción del canal Gamavisión.....	77
Figura 46 SNR vs Potencia de Recepción de Gamavisión	78
Figura 47 BER Viterbi vs Potencia de Recepcion de Gamavisión	79
Figura 48 BER Reed Solomon vs Potencia de Recepción de Gamavisión.....	80
Figura 49 Mensaje de alerta error de sincronismo	80
Figura 50 Constelaciones obtenidas con el receptor de un Segmento	82

RESUMEN

En el presente proyecto se propone la implementación del receptor de televisión digital terrestre bajo el estándar ISDB-Tb (en inglés, *Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial Build*) para el servicio móvil en el dispositivo basado en Radio Definido Por Software de última tecnología como el USRP (en inglés, *Universal Software Radio Peripheral*). El sistema de recepción implementado permite recuperar la señal digital en banda estrecha para observar en tiempo real la transmisión de los diferentes canales nacionales y determinar al mismo tiempo la calidad a través de medidas objetivas como el MER, BER, potencia de Recepción, etc. El Análisis realizado sobre las funcionalidades en hardware y software del USRP 2920 constituye un punto importante en la investigación, debido a que se caracterizó las virtudes del nuevo equipo y sus limitaciones. Durante el desarrollo de la aplicación se explican más a fondo las etapas en recepción a través de algoritmos matemáticos, en las secciones donde la norma del estándar no profundiza como la sincronización OFDM (en inglés, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), la ecualización de canal, la extracción del TMCC (en inglés, *Transmission and Multiplexing Configuration*), etc. El algoritmo se fundamentó en una interfaz que permite interactuar con las distintas señales y aparte provee de un modelo de observación dinámico para el análisis mencionado, donde el punto relevante es lidiar con la complejidad del diseño de una aplicación real para modelar el funcionamiento del estándar.

Palabras claves

- **SEÑAL MÓVIL**
- **USRP**
- **RECEPCIÓN**
- **MEDIDAS OBJETIVAS**

ABSTRACT

In this project we propose the implementation of the digital terrestrial television receiver under the ISDB-Tb standard (Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial Build) for the mobile service in the device based on Radio Defined by Software of the latest technology such as the USRP (Universal Software Radio Peripheral). The implemented reception system allows recovering the digital signal in narrow band to observe in real time the transmission of the different national channels, and at the same time determine the quality through objective measures such as MER, BER, Reception power, etc. The analysis performed on the hardware and software functionalities of the USRP 2920 constitutes an important point in the investigation, because the virtues of the new equipment and its limitations were characterized. During the development of the application, the reception stages were modeled through mathematical algorithms, in the sections where the norm of the standard does not deepen as the OFDM synchronization (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), the channel equalization, the extraction of the TMCC (Transmission and Multiplexing Configuration), etc. The algorithm was based on an interface that allows interacting with the different signals and apart provides a dynamic observation model for the mentioned analysis, where the relevant point is to deal with the complexity of the design of a real application to model the operation of the standard.

Keywords

- **MOBILE SIGNAL**
- **USRP**
- **RECEPTION**
- **OBJECTIVE
MEASURES**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Desde su invención la televisión se convirtió en un medio de información de gran importancia e influencia en la sociedad, desde el punto de vista técnico representó una innovación en el campo de la Radio Frecuencia. Transmitir imágenes y sonido en alta frecuencia, modulada en señales de magnitudes analógicas a través de redes de Múltiples Frecuencias no permitía cubrir la alta demanda del servicio en calidad.

A medida que los sistemas electrónicos evolucionaban, las operadoras de televisión empezaban a digitalizar sus equipos, migrando sus sistemas de producción de analógicos a digitales. Un escenario que describe la televisión consiste en 3 procesos, la producción de señales de forma digital y las etapas de transmisión y recepción de manera analógica. Con la necesidad de que todos los procesos del escenario de la tecnología sean digitales para ofrecer el mejor servicio, aparece el concepto de Televisión Digital.

Los sistemas de Televisión Digital consisten en un conjunto de etapas que se pueden estandarizar o que se pueden aplicar distintos protocolos como la codificación de la señal de audio y video, su protocolo común es MPEG (en inglés, *Moving Picture Experts Group*) en la etapa de producción, los procesos de multiplexación de paquetes de audio, video y datos, la multiplexación de los diferentes servicios y la modulación de la señal banda base para adaptarla al canal en sus tres formas terrestre o *broadcast*, cable y satélite. Con esta gama de procesos y el conjunto protocolos asociados aparecen los estándares de televisión digital, dentro de los principales tenemos a ATSC (en inglés, *Advanced Television System Committee*), DVB (en inglés, *Digital Video Broadcasting*) e ISDB (en inglés, *Integrated Services Digital Broadcasting*) (Portal DTV, 2013).

Cuando la señal de televisión se envía de manera *broadcasting*, a la tecnología se la conoce como TDT (en inglés, *Terrestrial Digital Television*). El estándar ISDB fue desarrollado por ARIB (en inglés, *Association of Radio Industries and Businesses*) y por DIBEG (en inglés, *Digital Broadcasting Experts Group*), su método de transmisión

terrestre conocido como ISDB-T (en inglés, *Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial*) fue implementado en Japón en 1999, cubriendo ciudades como Tokio, Osaka y Nagoya (Constante & Valencia, 2015).

Posteriormente los resultados revelaron el aumento de la eficiencia espectral brindando un servicio de mayor calidad, de allí surge la necesidad en Latinoamérica de adoptar o migrar a los sistemas digitales de transmisión. Brasil en 2006 se apropió del estándar modificando los códec de compresión de fuente, usando para audio AAC (en inglés, *Advanced Audio Coding*) y H264 para video. Como punto relevante insertaron el middleware de interactividad conocido como *Ginga* en sus dos versiones de desarrollo *Ginga NCL* y *Ginga Java*, a esta edición se lo conoce como ISDB-Tb o ISDB-T internacional (Larroca et al, 2015). El estándar está diseñado para priorizar la televisión en HD (en inglés, *High definition*) y sobre todo la recepción móvil o portable, destinada para equipos de bajo consumo energético como los celulares, al servicio también se lo conoce como *One-Seg* (DiBEG, 2007).

La adopción del estándar no tardó para el resto de países en Latinoamérica, excepto Colombia que decidió optar por el estándar DVB-T. Con la idea la integración de la tecnología en el continente, Ecuador adoptó oficialmente el 26 de marzo del 2010 el estándar japonés-brasileño ISDB-Tb, lo que permitirá obtener un sin número de ventajas que la señal analógica no posee, como la posibilidad de tener múltiples programas dentro de una misma señal emisora, acceder a contenidos interactivos en temas de salud, turismo, información entre otros y lo más destacable es el servicio móvil, todo esto como resultado de la convergencia en la Telecomunicaciones (MINTEL, 2015).

En la actualidad una cantidad limitada de emisoras nacionales se encuentran transmitiendo en señal analógica y digital a la vez o señal *multicasting*, con el objetivo de realizar pruebas de la señal digital para llegar a cumplir con el apagón analógico, el cual consiste en apagar las emisiones analógicas de televisión y transmitir solo señales digitales. Ecuador espera cubrir la mayor parte de la población con emisiones digitales y realizar el apagón analógico en diciembre del 2018 (MINTEL, 2014).

El estándar significó un nuevo campo de investigación en el país para las diferentes instituciones, que se han visto en la necesidad de impulsar recursos para el estudio y análisis de esta tecnología. La plataforma de Radio Definido por Software (SDR, en inglés *Software Defined Radio*) ideada por Joe Mitola resultó ser una idea revolucionaria en el campo investigativo en las telecomunicaciones, constituye un sistema integrado de última tecnología basado en un dispositivo FPGA y DSP en conjunto con una tarjeta de RF, que se comunican con un computador personal que permite procesar las señales en un rango de frecuencia para una determinada aplicación (Mitola, 2000).

Actualmente existen un sin número de dispositivos basados en esta tecnología, pero los más utilizados son los USRP, ideado por Matt Ettus fundador de Ettus Research, y que ahora vende y distribuye en nuevas versiones National Instruments, con el objetivo que la familia USRP se convertirá en la tecnología principal en las telecomunicaciones (Ettus Research, 2017). La integración de SDR y el estándar representa un concepto interesante que abre las puertas para el desarrollo de aplicaciones complejas y de alta relevancia investigativa.

1.2 Justificación e Importancia

Desde que se adoptó ISDB-Tb como estándar de Televisión Digital hasta la actualidad se han desarrollado muchos trabajos de investigación referentes al mismo, pero muy pocos utilizan la tecnología de Radio Definido por Software y como plataforma de hardware a los USRP.

El receptor de *One-Seg* permite analizar el funcionamiento del estándar receptando señales móviles de las distintas emisoras recuperando los paquetes de TS (en inglés, *Transport Stream*) en tiempo real y además determina la calidad de la señal a través de medidas objetivas, utilizando para su implementación herramientas distintas y de última tecnología que pretenden dominar las distintas áreas de las telecomunicaciones en sus campos investigativos.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE contamos con un sin número de equipos que permiten analizar y realizar investigaciones referentes al estándar, sin

embargo con la nueva idea de trabajar bajo Radio Definido por Software y enfocarse en un nuevo método de enseñanza e investigación utilizando los USRP, se ha visto la necesidad de implementar el receptor de *One-Seg* como punto de partida para el desarrollo de aplicaciones en tiempo real basados en el estándar y sobre todo en la plataforma SDR.

De esta manera el proyecto en mención es justificable y será de gran utilidad para la comunidad de los investigadores que trabajan en el área de Televisión Digital, debido a que constituye una herramienta eficiente basada en un algoritmo robusto e implementado en un sistema de última tecnología.

1.3 Alcance del Proyecto

Con el presente trabajo de investigación se obtuvo un receptor de paquetes TS del estándar ISDB-Tb que permitirá procesar la señal móvil o de banda estrecha de los distintos canales de televisión del país que provean de este servicio, para observar el canal en tiempo real mediante el uso en conjunto de un algoritmo y una herramienta de reproducción de video como *ffmpeg*.

Además, funciona como un analizador de televisión digital de un segmento, el cual permitió modelar el estándar en su servicio móvil observando distintos parámetros como la modulación, el TMCC y las medidas de rendimiento en función de métricas técnicas como la potencia de la señal, MER, BER y otros, en base las características técnicas del USRP.

El receptor se diseñó bajo una interfaz de control elegante, interactiva y fácil de usar, con la idea de tener mayor control y mejor análisis en recepción. En el campo investigativo servirá como guía para desarrollar trabajos a futuro como un receptor *One-Seg* para aplicaciones interactivas, así como un sistema de recepción EWBS (en inglés, *Emergency Wireless Broadcasting System*). Para corroborar el funcionamiento del proyecto se realizaron pruebas de tipo laboratorio en la Universidad con canales nacionales que se encuentren transmitiendo y con equipos transmisores propios del laboratorio de televisión digital del Departamento de Eléctrica y Electrónica de la ESPE.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Implementar un receptor *One-Seg* en una plataforma de radio definido por software USRP para observar la señal móvil de los canales de televisión y analizar el estándar ISDB-Tb en un segmento.

1.4.2 Específicos

- Analizar la estructura del receptor *One-Seg* a nivel de radiofrecuencia y capa física del estándar ISDB-Tb.
- Evaluar las características técnicas del USRP 2920 para determinar la factibilidad del equipo frente a las necesidades de programación de OFDM en las funcionalidades de LabVIEW, Matlab y GNU Radio.
- Implementar un algoritmo que permita procesar las señales móviles del estándar ISDB-Tb para recibir a través del USRP 2920 y un sistema embebido los paquetes de *Transport Stream* y analizar el estándar en un segmento.
- Realizar pruebas de funcionamiento con el algoritmo implementado para determinar su funcionamiento frente a las necesidades de recepción de audio y video, así como la evaluación de la calidad de los distintos canales de televisión digital en base a métricas objetivas.

1.5 Metodología

La presente investigación tuvo dos metodologías la primera de un enfoque experimental, donde se fundamentó en la implementación de un receptor de *One-Seg* como herramienta para el análisis del estándar ISDB-Tb a través de pruebas de laboratorio, todo con la idea de recepción de tramas TS en diferentes calidades de video

y compresiones como MPEG-4, basados en la estructura definidas por el estándar en un segmento.

La siguiente con un enfoque deductivo donde se realizó una investigación previa, tanto en conceptos como análisis matemático y demás procesos que abarcan la complejidad para receptor *One-Seg* en el equipo USRP-2920. Para cumplir con los objetivos del trabajo de investigación se plantean cuatro etapas que se llevarán a cabo a lo largo del proceso.

La primera etapa consistió en una investigación o estudio del arte, que haga referencia a trabajos similares realizados en los últimos años en el país o exterior, con el objetivo de entender los fundamentos teóricos, análisis matemáticos, algoritmos implementados y demás temas que contribuyan con la implementación del receptor.

La siguiente etapa se fundamentó en las herramientas a utilizar para la elaboración del proyecto de investigación, en hardware como es el USRP-2920 y en software se efectuará un análisis de las funcionalidades, determinando las ventajas entre los firmwares de programación como LabVIEW, Matlab y GNU Radio para decidir quién contribuye de mejor manera a la implementación del receptor, también tomando en consideración proyectos de investigación realizados referentes al campo y al lenguaje de programación.

La tercera etapa consiste en la implementación del receptor de un segmento en el USRP-2920 y un computador en el lenguaje de programación previamente determinado, tomando en consideración características técnicas y recursos del sistema.

En la última etapa se realizó pruebas a nivel de laboratorios utilizando el receptor de *One-Seg*, con el objetivo de visualizar la señal en vivo, con la reproducción de las tramas TS a través del reproductor *ffmpeg*. Además de modelar el funcionamiento del estándar frente a los efectos nocivos del canal y hardware utilizado, determinando la calidad de la señal receptada en función de métricas objetivas en parámetros cualitativos como la potencia de recepción de la señal y parámetros cuantitativos como el MER (en inglés, *Modulation Error Rate*) y BER (en inglés, *Bit Error Rate*).

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introducción

En este capítulo se describe el proceso de demodulación bajo en el estándar ISDB-Tb, con la idea de modelar la recepción de un segmento, así como los problemas de radiofrecuencia que se presentan en los receptores. Además, se añaden conceptos matemáticos referentes a las medidas de calidad utilizadas para representar la eficiencia del receptor al momento de recuperar las tramas de *Transport Stream*. Un punto importante en este capítulo es el estado del arte que hace referencia a estudios similares realizados en los últimos años y recalca otros proyectos de investigación de la Universidad que aportaron con la elaboración del receptor de *One-Seg*.

2.2 Sistema en Recepción

La Televisión digital utiliza un sin número de equipos de última tecnología para receptor y presentar la imagen de una señal, sin duda alguna ISDB-Tb es uno de los estándares que ha sido diseñado para ofrecer una alta calidad de recepción tanto en receptores fijos como móviles, una de las ventajas que presenta el sistema referente a recepción móvil o parcial es su bajo consumo de energía y bajo costo computacional, esto permite que el sistema pueda ser fácilmente implementado en dispositivos embebidos, como celulares, PDA(en inglés, *Personal Digital Assitant*), Sintonizadores USB, etc.

Una visión general del sistema ISDB-Tb en recepción se observa en la figura 1, el procesamiento consiste, primero en la sintonización de la señal en recepción a la frecuencia de la televisora, además convierte la señal de radio frecuencia a frecuencia intermedia utilizando mezcladores, filtros y osciladores de frecuencia variable, posteriormente el bloque demodulador obtiene la señal de banda base realizando procesos como la demodulación OFDM, la regeneración de sincronización, el proceso

FFT (en inglés, *Fast Fourier Transform*), desentrelazado en tiempo y frecuencia, entre otros (ABNT 15604, 2007). El demultiplexador realiza la desencapsulación del flujo de Transporte MPEG-2 TS, separando información de control de las tramas de la información deseada, para luego realizar la decodificación de audio (AAC) y video (H.264).

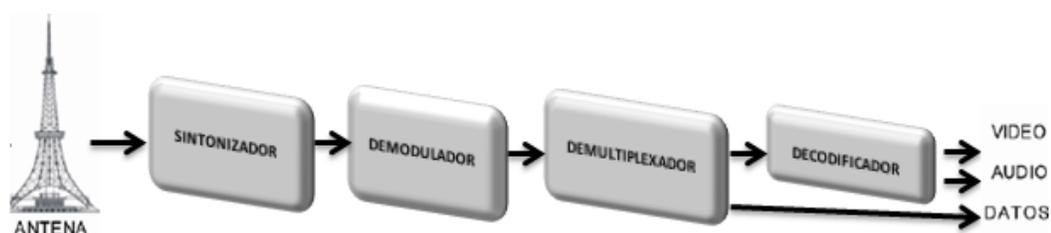


Figura 1 Visión General del Sistema de Recepción

Fuente. Propia

La sintonización y demodulación son los procesos que interesan para el desarrollo del proyecto y en los cuales se harán más énfasis, el esquemático que describe más a fondo el procesamiento de la señal en banda estrecha o señal móvil se puede observar en la figura 2, tal y como lo determina la norma (ABNT 15604, 2007). Cabe recalcar que dichos procesos son los estandarizados para el diseño ideal de receptores, pero como la idea es implementarlo en Radio Definido por Software (SDR), en específico en el USRP, este esquemático variará dependiendo de las funcionalidades del hardware y software a disposición y que un posterior capítulo se detallará.

Dentro de los principales bloques que se destacan en el procesamiento de la señal en el receptor de un segmento, consta el demodulador ortogonal que permite obtener las muestras de cada símbolo OFDM recibido, la recuperación de sincronismo cumple con la función de la sincronización del receptor de acuerdo a la frecuencia de muestreo de la FFT evitando errores comunes en los receptores.

La operación FFT es importante debido a que en sistemas de múltiples portadoras esta convierte las muestras en el tiempo a portadoras en frecuencia, por último la extracción de cuadros y el decodificador del TMCC cuya función es determinar la

configuración del sistema de transmisión para con ello emplear el control en varios módulos en recepción. Las funciones de los bloques restantes como el desmapeador el desentrelazamiento en tiempo y frecuencia y el decodificador de Viterbi se las encuentra en (ABNT 15604, 2007). Las operaciones que se aplica a la señal en banda base son prácticamente estandarizadas y no deben cambiar cuando se trata de diseños de receptores a diferencia de los anteriormente mencionados.

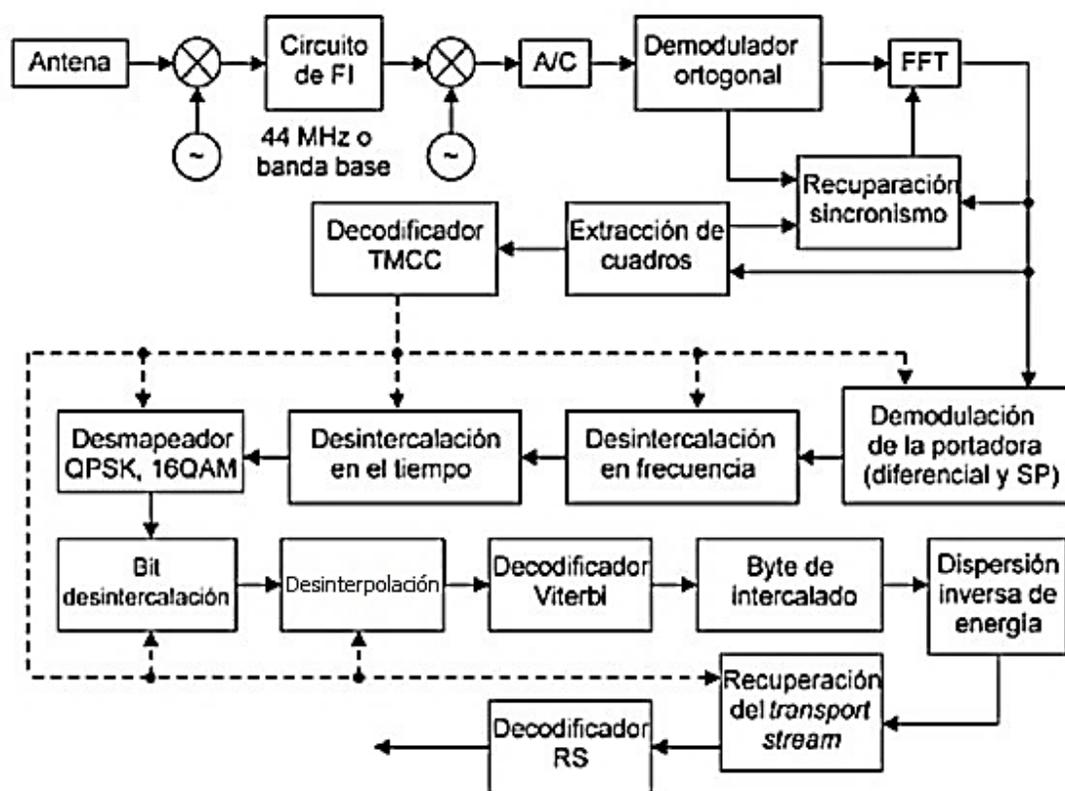


Figura 2 Procesamiento de la señal de *One-Seg* en recepción

Fuente. (ABNT 15604, 2007)

Para entender aún mejor la recepción *One-Seg* es importante hablar más a fondo sobre la demodulación ortogonal basada en OFDM, los fundamentos y no idealidades que se presentan en ISDB-Tb.

2.2.1 Recepción *One-Seg*

OFDM es una técnica de modulación digital de múltiples portadoras (MCM), consiste en la transmisión de portadoras ortogonales con diferentes secuencias de bits en paralelo. Su historia se remonta a los años 60, cuando en una publicación de R.W. Chang demostró los principios de los múltiples mensajes simultáneos sobre un determinado canal, sin interferencia intersimbólica (ISI) (Chang, 1996). Posteriormente en los años 70 Weinstein y Ebert introdujeron el uso de la Transformada de Fourier Discreta (DFT), este trabajo se fundamentó en la eliminación de la interferencia entre canales (ICI) y de la ya mencionada ISI, así como la eliminación de los bancos de osciladores (Weinstein & Ebert, 1971).

El prefijo cíclico (CP) introducido en 1980 por Peled y Ruiz, fue una brillante innovación que permitió resolver el problema de la ortogonalidad, donde se utilizó una extensión del símbolo OFDM en vez de un intervalo de guarda vacío (Anónimo, 2008). El estándar determina que esta copia sea al principio de la señal, tomando en cuenta los valores que puede tomar su periodo de guarda (T_g) de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$ y $\frac{1}{32}$ del periodo del símbolo (T_s), tal y como se observa en la figura 3.

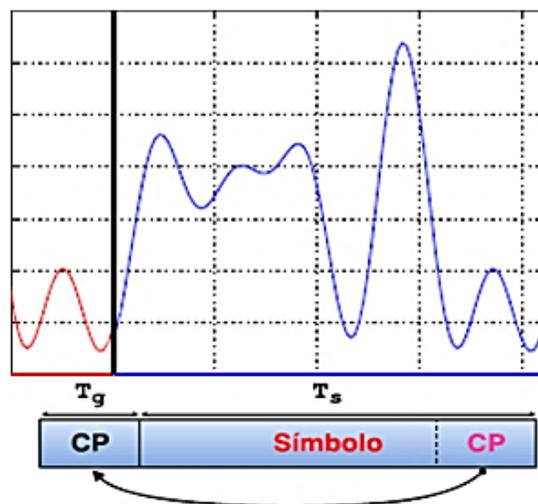


Figura 3 Prefijo Cíclico y el símbolo OFDM.

Fuente. (Contrera & Ferrer, 2016)

Este permite eliminar la ISI, y su uso vuelve a la señal óptima frente a el multitrayecto, en los receptores consiste en determinar el inicio del símbolo y remover el Prefijo Cíclico (Contrera & Ferrer, 2016). Continuando con el proceso de demodulación es necesaria la aplicación de la FFT, una vez las muestras de cada símbolo sean capturadas, en la figura 4 se indica como la FFT es aplicada en un sistema OFDM y la conversión de los símbolos serie-paralelo necesaria antes de su aplicación. La transformada maneja potencia en base 2 para obtener una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, es decir pasar de las muestras a portadoras, los valores que se manejan en el estándar son de 2048 (2^{11}), 4096 (2^{12}) y 8192 (2^{13}), que a su vez se los conoce como modos de operación (modo 1, modo 2 y modo 3 respectivamente).

El manejo de modos de operación permite al sistema establecer una cantidad determina de portadoras de datos, es decir si tenemos un modo 3 de operación tendremos más portadoras, por lo tanto un símbolo OFDM que consta de una cantidad de 8192 portadoras será más lento, esto lo vuelve más robusto frente al multitrayecto, pero mucho más vulnerable al ruido blanco, por ende es indispensable determinar un modo de operación en transmisión y en recepción, dependiendo de parámetros como calidad y tipo de servicio, ruido del canal inalámbrico, zona de cobertura, entre otros.

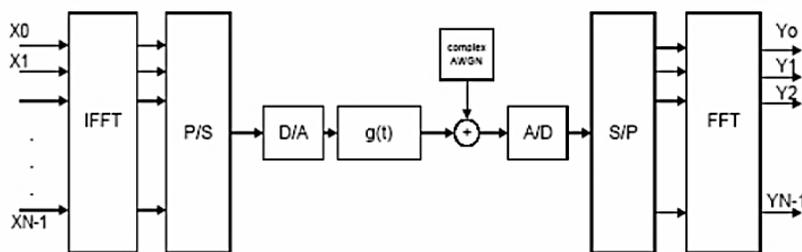


Figura 4 Modelo OFDM y aplicación de la FFT.

Fuente. (Anónimo, 2008)

Independientemente del modo de operación, la frecuencia de muestreo del estándar (F_s) o frecuencia de la FFT debe estar de acuerdo a la ecuación 1.

$$f_s = \frac{\text{Numero de portadoras}(N)}{\text{Tiempo de Símbolo } (T_s)} = \frac{8192}{1008\mu\text{seg}} \approx 8.127 \text{ MHz} \quad (1)$$

De las portadoras obtenidas por el proceso FFT, el estándar determina que una cantidad son consideradas como información, el resto son portadoras nulas este proceso es conocido como Zero Padding, en el modo 3 de las 8192 portadoras 5617 son portadoras de información o portadoras activas y 2575 son portadoras nulas (Flores, 2016). La posición de las portadoras nulas se observa en la tabla 1.

Tabla 1
Cantidad de Ceros para Zero Padding en el símbolo OFDM

Modos	N portadoras Nulas	A la izquierda	A la derecha
Modo 1	643	322	321
Modo 2	1287	644	643
Modo 3	2575	1288	1287

Fuente: (Flores, 2016)

Toda la información transmitida en las portadoras activas representa una cantidad de datos por segmentos OFDM, el espectro de 6 MHz de ISDB-Tb está compuesto por 13 segmentos de datos y uno de guarda o libre, los segmentos de datos TDT están relacionados con capas A, B y C, esta técnica es conocida como BST-OFDM (en inglés, *Band Segmented Transmission-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), es una técnica óptima basada en múltiples portadoras que sirve para prestar diferentes servicios, a lo que también se lo conoce como la transmisión jerárquica (Olmedo, 2016).

En la figura 5 se presenta un ejemplo de configuración de las capas utilizando, 1 segmento para la capa A, 7 segmentos para la capa B y 5 para la capa C, observando el ordenamiento que se le debe dar a los mismos para la formación del espectro de ISDB-Tb y el cual se debe obtener en el receptor.

Cada capa jerárquica constituida por uno o más segmentos son independientes entre sí, es decir llevan diferentes flujos de datos, que pueden representar diferentes servicios y calidades de imagen. El segmento cero, localizado en el centro de espectro con un ancho de banda de 428.57 kHz $\left(\frac{6}{14}MHz\right)$ es por lo común utilizado para prestar el servicio móvil o *One-Seg* de baja definición (SD), debido a que se encuentra en la frecuencia central y utiliza un solo segmento.

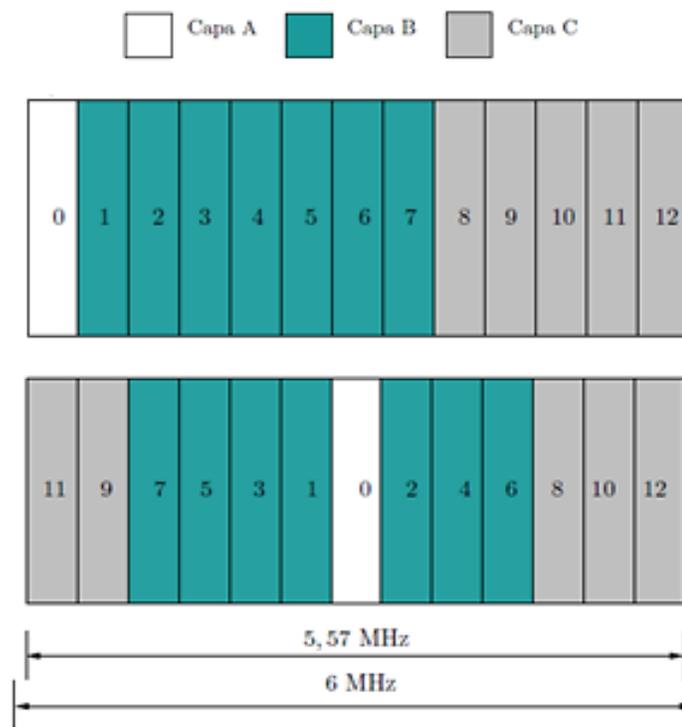


Figura 5 Espectro ISDB-Tb Trasmisión jerárquica

Fuente: Propia

Como se mencionó con anterioridad la principal característica de los receptores móviles es su bajo consumo de energía, debido a que solo trata las portadoras que vienen en el segmento central (recepción parcial), disminuyendo así la velocidad de procesamiento de la señal en el receptor. Para disminuir el consumo de energía los receptores parciales tienden a bajar su frecuencia de muestreo en 1/8 de la frecuencia de

la FFT, la cual se mencionó en la ecuación (1), con la idea de representar una señal OFDM en el tiempo con menor cantidad de muestras, tal como lo describe la figura 6. Con ello las portadoras FFT también disminuyen en un octavo, de 8192 a 1024 subportadoras mantenido así la duración del símbolo activo en 1008 (μseg), todo esto en el modo 3 de operación, donde se toma en cuenta que el periodo de muestreo (T_d) es de 1 μseg aproximadamente, logrando mayor tiempo de duración por muestra, otra forma de indicar el bajo procesamiento en receptores parciales (DiBEG, 2007).

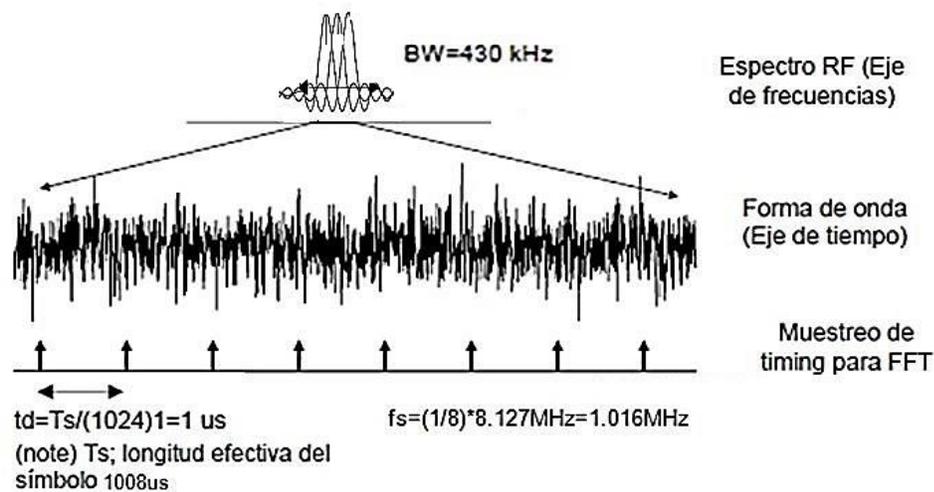


Figura 6 Proceso de la señal de un segmento en el Modo 3

Fuente. (DiBEG, 2007)

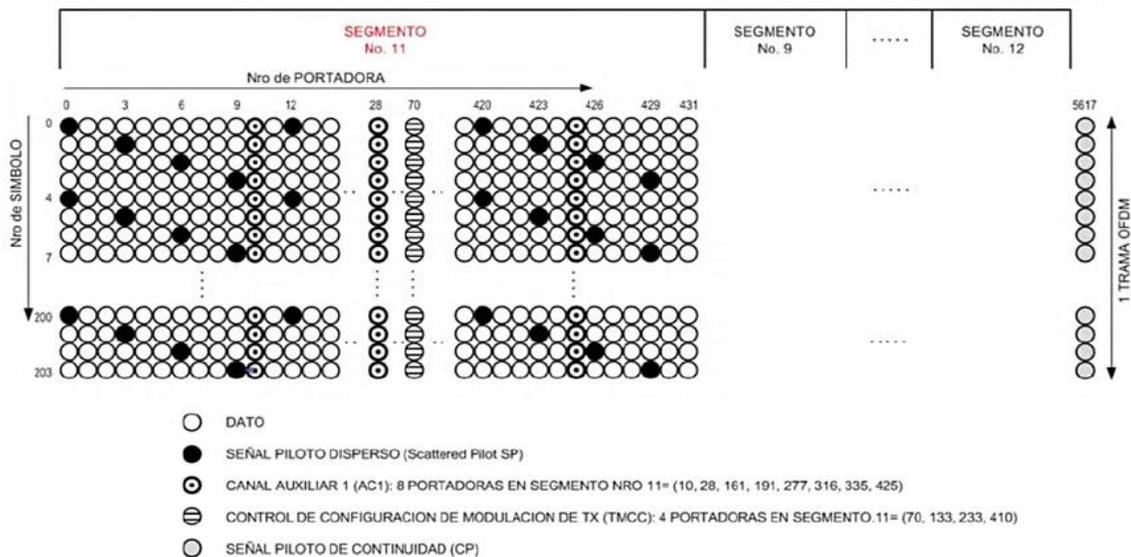
De las 5617 portadoras activas (modo 3), 432 portadoras pertenecen a un solo segmento de los 13 utilizados (existe una portadora particular ubicado fuera del espectro), estas portadoras van a representar un símbolo OFDM de un segmento y si tomamos en consideración la duración de un símbolo activo por modo de operación, obtendremos el ancho de banda procesado por el receptor parcial, como se indica en la ecuación 2.

$$AB_{1SEG} (MHz) = \frac{N_{1SEG}}{T_s} = \frac{432}{1008 \mu\text{seg}} = 428.57 \text{ kHz} \quad (2)$$

Dónde:

- AB_{1SEG} = es el Ancho de banda de un segmento.
- N_{1SEG} = Numero de muestras de un segmento por modo.
- T_S = Periodo del símbolo Activo por modo.

Algunas portadoras de un solo segmento son utilizadas como información de control, entre ellas tenemos a las portadoras piloto o SP (en inglés, *Scattered Pilot*) y una portadora piloto CP (en inglés, *Continual Pilot*), las cuales son utilizadas por el receptor para la ecualización. Las portadoras TMCC llevan la información agregada por los paquetes IIP en el proceso de multiplexación, esta información describe en número de segmentos por capas, la modulación, el modo de operación, la longitud del intervalo de guarda y otras, que sirven al receptor para la demodulación. Todos estos conjuntos de portadoras son añadidos por el transmisor para la formación del cuadro OFDM, donde está constituido por 204 símbolos OFDM (ver figura 7).



CASO DE MODULACION SINCRONA EN "MODO 3"

Figura 7 Constitución del Cuadro OFDM Modo 3.

Fuente. (Flores, 2016)

Los receptores en la etapa de extracción de cuadro y de la decodificación del TMCC descritos en el diagrama de la Figura 2, extraen estos 204 símbolos y decodifican la señal para determinar las características de la señal OFDM transmitida para poder realizar una adecuada recepción de los datos. En la figura 7 se observa la ubicación de las portadoras por cuadro OFDM para el modo 3 de operación, donde las portadoras SP varían su posición de forma cíclica por portadora y por símbolo y las TMCC de manera predefinida y estacionaria, donde estas portadoras van moduladas en BPSK y DBPSK respectivamente, con el objetivo de volverlas más robustas frente a los fenómenos del canal. En la Tabla 2 se observa la información resumida del estándar, para mayor información referirse a (ABNT 15601, 2007).

Tabla 2
Parámetros ISDB-Tb

Parámetro	Valor
Numero de segmentos	13
Ancho de banda de un segmento	$6/14 = 428.57\text{kHz}$
Ancho de banda utilizado	5.575MHz (modo 1) 5.573MHz (modo 2) 5.572MHz (modo 3)
Numero de portadoras activas de todo el espectro	1405 (modo 1) 2809 (modo 2) 5617 (modo 3)
Esquema de Modulación	DQPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Tiempo de símbolo activo	252useg (modo 1) 504useg (modo 2) 1008useg (modo 3)
Portadoras activas por segmento	108(modos 1) 216(modos 2) 432(modos 3)
Portadoras de datos por segmento	96(modos 1) 192(modos 2) 384(modos 3)
Duración del intervalo de guarda	$1/4, 1/8, 1/16$ y $1/32$ del tiempo del símbolo activo
Tasa de código convolucional	$1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8$
Índice del entrelazado de Tiempo	0, 1, 2, 4 (modo 1) 0, 2, 4, 8 (modo 2) 0, 4, 8, 16 (modo 3)

Fuente: (ABNT 15601, 2007)

En el receptor parcial una vez realizada la demodulación ortogonal OFDM, mediante la determinación del prefijo cíclico y el proceso FFT, así como la extracción de cuadro OFDM para la recepción adecuada de la señal, es necesario realizar el procesamiento en banda base, el cual incluyen el desentrelazado en tiempo y frecuencia, el desmapeador de símbolos, los decodificadores de Viterbi y Reed Solomon, entre otros y de los cuales no se hará mucho énfasis para los fundamentos teóricos, debido a que son estandarizados y en los cuales podemos encontrar su funcionamiento en la Norma técnica del transmisor de ISDB-Tb encontrado en (ABNT 15601, 2007).

Es importante tomar en cuenta que para el diseño de receptores basados en OFDM, como lo es el receptor de *One-Seg*, se presentan problemas provocados por el canal inalámbrico, así como errores producidos por el esquema de modulación de OFDM, que pueden influenciar en el desempeño del receptor, por eso discutiremos estos temas en la siguiente sección.

2.3 Problemas en recepción ISDB-Tb

En un sistema de Telecomunicaciones los problemas pueden provenir ya sea del transmisor, producto de los fenómenos del canal inalámbrico y así como del receptor, por ende, los sistemas evolucionan con la idea de mitigar estas dificultades para prestar el mejor servicio posible. En el transmisor encontramos efectos como: baja potencia o atenuación, el desbalance I-Q (deterioro de la amplitud en la constelación), desbalance en fase (deterioro en la orientación de la constelación), etc. En cambio, que los efectos comunes introducidos cuando la señal viaja por el canal tenemos: el ruido Gaussiano, diferentes tipos de interferencia, desvanecimiento, el efecto Doppler y demás efectos de canal de los cuales no se profundizan en este capítulo.

Pero para el diseño de receptores, hay que mitigar errores provenientes ya sea de la arquitectura en hardware del receptor y de no idealidades provocadas por la modulación, por ejemplo, el error de fase producido por el oscilador local, el desvío de la portadora, la distorsión de fase y amplitud, entre otros. Los sistemas de recepción OFDM presentan un sin número de ventajas que lo convierten en la tecnología de transmisión más

eficiente y ampliamente utilizada, de las cuales destacan el obtener una mayor eficiencia espectral, reducir los efectos de los múltiples trayectos en el canal, disminuir la sensibilidad a los efectos de sincronización temporal, etc. Pero también presenta efectos contradictorios, como la alta sensibilidad a los errores de sincronización en frecuencia, desvío de la portadora central y el error frecuencia residual y demás que se detallarán a continuación, primero identificando el error y sus efectos, segundo detallando las técnicas utilizadas para contrarrestarlos (Jiménez, 2009).

2.3.1 Sincronización

Cuando utilizamos la modulación de múltiples portadoras ortogonales es necesario que los receptores se encuentren diseñados para la identificación del inicio y fin de un símbolo de OFDM, es decir, el transmisor envía un símbolo en el tiempo determinado y el receptor captura esa señal en un tiempo distinto, produciendo el error de sincronización temporal en el receptor o error de sincronismo de símbolo (Anónimo, 2008). Los errores de sincronización también se presentan a nivel de frecuencia, donde existen el error de sincronismo de la portadora y el de la frecuencia de muestreo.

El error de la portadora es ocasionado por que el oscilador local en los receptores no genera una portadora a la misma frecuencia de la receptada, la ecualización y determinados algoritmos nos ayudan a mitigar este problema. En cambio, que el error de frecuencia de muestreo se debe a un desvío del reloj interno en el receptor que no permite tomar las muestras de la señal correctamente, para ello tienen dos soluciones, la primera tener un sistema controlado en el oscilador de cristal para alinear los relojes internos del transmisor y el receptor, el segundo consiste en mantener una frecuencia fija en el receptor y realizar un post-procesamiento digital basado en un algoritmo que se explicará más adelante (Valdivieso, 2017).

El mencionado error de sincronismo de símbolo tiene un tiempo de duración, el cual está delimitado por la duración del prefijo cíclico de la señal OFDM para identificar cuál es su efecto sobre la señal receptada. Si el tiempo es mayor que la duración del prefijo cíclico, esto provocará que aparezca interferencia intersimbólica (ISI), mientras que, si

es menor a la duración del intervalo de guarda, esto producirá una rotación en fase de los símbolos recibidos (Gallardo, 2006).

Un sistema OFDM es robusto frente los errores de sincronismo temporal, el cual es diseñado para que estos se mantengan como despreciables, todo por la inclusión del intervalo de guarda y por la duración extensa de sus símbolos. Existen diferentes técnicas para lograr la máxima sincronización temporal, una se basa en las portadoras pilotos nulos, de la cual no se hará énfasis y la otra técnica, es aquella que se basa en la inclusión del prefijo cíclico y la máxima verosimilitud.

Para entender más a fondo esta técnica es necesario indicar como llega una señal OFDM en el receptor, la ecuación 3, muestra un modelo matemático discreto de la señal recibida.

$$r[k] = s[k - \theta]e^{\frac{j2\pi\epsilon k}{N}} + n[k] \quad (3)$$

Dónde:

- $s[k]$ = señal transmitida.
- $n[k]$ = Ruido del Canal AWGN
- θ = Retraso del símbolo OFDM
- ϵ = Offset de las portadoras

El algoritmo propuesto por Van de Beek et al (1997), propone encontrar los valores de θ y ϵ , donde estos parámetros indican la magnitud del error de sincronismo temporal y de la portadora a nivel de frecuencia, respectivamente. Para ello se propone tomar una ventana de muestreo mínima de $2N+L$ muestras, con N la cantidad de muestras de un símbolo y L las muestras del prefijo cíclico, de las cuales se dividen en dos grupos.

$$\mathcal{L} = \{\theta, \dots, \theta + L - 1\}, \quad (4)$$

$$\mathcal{L}' = \{\theta + N, \dots, \theta + N + L - 1\} \quad (5)$$

Siendo \mathcal{L} las muestras del prefijo cíclico y \mathcal{L}' las muestras del símbolo con su copia en el intervalo de guarda, donde se puede apreciar estos grupos en la figura 8, el objetivo es encontrar la correlación o la máxima verosimilitud entre los conjuntos.



Figura 8 Estructura de la señal OFDM con CP y de los conjuntos \mathcal{L} y \mathcal{L}'

Fuente. (Sandell, Borjesson, & Van de Beek, 1997)

Tomando en consideración los grupos de muestras mencionados, se nota que entre estos existe una fuerte correlación, donde para encontrar la máxima verosimilitud de θ utilizamos la ecuación 6.

$$\theta_{MV} = \arg_{\theta}^{\max} |\gamma(\theta)| - \rho\varphi(\theta) \quad (6)$$

Donde

$$\gamma(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} r[k]r^*[k+N], \quad (7)$$

$$\varphi(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} \frac{|r[k]|^2 + |r[k+N]|^2}{2}, \quad (8)$$

$$\rho = \frac{SNR}{1 + SNR} \quad (9)$$

Una vez encontrado la fase del complejo de θ_{MV} , se puede determinar el valor máximo de ϵ de acuerdo a:

$$\epsilon_{MV} = -\frac{1}{2\pi} \text{Phase}(\theta_{MV}) \quad (10)$$

En la figura 9, se observa un ejemplo de cómo funciona el algoritmo, se considera tener un valor de $N=1024$ muestras del símbolo OFDM y la longitud del prefijo cíclico de $L=128$ en un determinado sistema de transmisión, si el receptor toma las muestras de la señal con los mismos valores de N y L , se obtendrán los picos que se observan en la figura, cada uno de estos picos representan el inicio de un símbolo OFDM receptado, entonces dentro de las 5000 muestras totales se reciben 5 símbolos. En caso de que el receptor no tome las muestras adecuadamente, es decir, si N es incorrecto esto producirá una gráfica como ruido y si L es incorrecto se obtienen gráficas de tipo mesetas, en cualquiera de los 2 casos no se podrá detectar el inicio del símbolo.

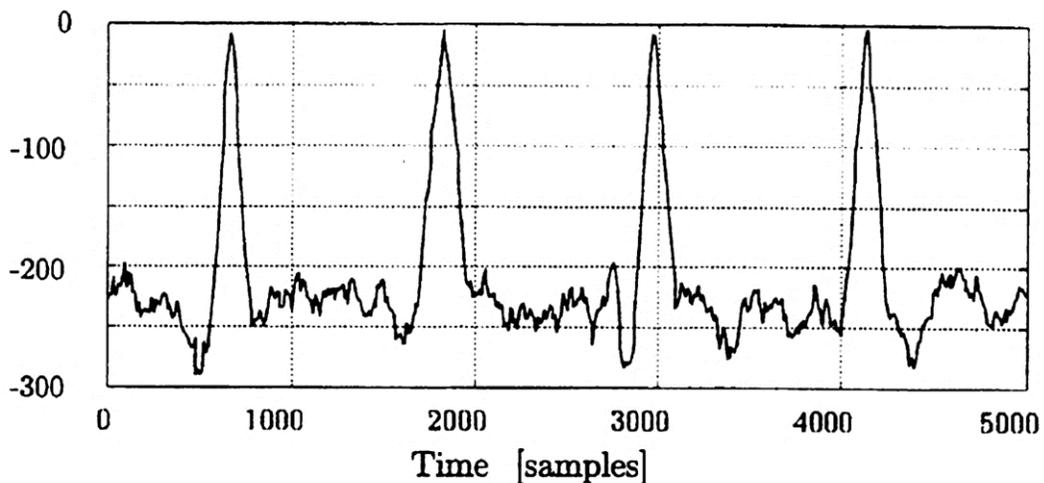


Figura 9 Picos de Inicio de símbolo OFDM obtenidos por el Algoritmo

Fuente. (Sandell, Borjesson, & Van de Beek, 1997)

Cuando encontramos θ_{MV} , determinamos el inicio de un símbolo OFDM en la ventana de observación $2N+L$, es decir, el rango de muestras pertenecientes al símbolo

detectado a través del algoritmo es $[\theta_{MV}, \theta_{MV} + N + L]$, logrando la sincronización temporal necesaria para aplicar posteriormente la FFT a las muestras encontradas. En cambio, que con el valor de ϵ_{MV} se pueden rotar las muestras del símbolo para realizar el ajuste de frecuencia, esta rotación consiste en el ajuste lineal de fase, dejando así la diferencia entre las fases de los grupos de muestras \mathcal{L} y \mathcal{L}' prácticamente nulas, disminuyendo el error frecuencia de muestreo y de la portadora.

Una vez lograda la sincronización, los valores de los máximos no deben cambiar significativamente de símbolo a símbolo, pero se puede dar el caso de que se pierda la sincronización debido a las funcionalidades en el hardware del sistema, ruido del canal y para resolverlo hay que ejecutar nuevamente el algoritmo.

2.3.2 Ecuación

La ecualización de canal permite corregir las rotaciones de los símbolos receptados, provocadas por la naturaleza del canal con desvanecimiento, problemas ocasionados por los osciladores en el sistema y los errores de sincronización temporal. El oscilador local utilizado en los receptores permite bajar la frecuencia de la señal receptada a banda base o frecuencia intermedia en caso de receptores superheterodinos, cuando estos no generan una señal puramente sinodal o con ruido y a la frecuencia de la señal en recepción, generan dos conflictos, el ruido de Fase y el desplazamiento en frecuencia de la portadora respectivamente (Gallardo, 2006).

El desplazamiento en frecuencia u offset frecuencial y el Ruido de fase, pueden ocasionar la no ortogonalidad entre las portadoras en recepción, apareciendo la interferencia inter-portadora o ICI, el algoritmo de Van de Beek, del cual ya se discutió, y la ecualización nos ayuda a contrarrestar este efecto (Anónimo, 2008).

Para poder realizar la Ecuación, hay que conocer la respuesta en frecuencia del canal, por ende, se debe realizar un proceso conocido como la Estimación del canal. Partiendo de un modelo discreto, se tiene $X[i]$, como la señal transmitida en la i -ésima sub-portadora, entonces la señal digital en el receptor será:

$$Y[i] = H[i]X[i] + W[i] \quad (11)$$

Donde $W[i]$ es el ruido AWGN y $H[i]$ viene a ser la ganancia del canal, la cual debe ser estimada para luego dividirla por los complejos receptados y obtener $X[i]$.

La estimación de canal debe realizarse, con la ayuda de los pilotos SP, los cuales varían de manera cíclica, primero dentro del símbolo OFDM cada cuatro subportadoras y luego cada cuatro símbolos como se observó en la figura 7. El problema consiste en que el receptor de ISDB-Tb no sabe cómo llegan actualmente las SP, para ello es necesario, detectar la configuración de las portadoras SP, proceso conocido también como medición de canal (Flores, 2016).

Lo que se hace es realizar un procesamiento inverso al del circuito PRBS (en español, Generador De Secuencia Binaria Pseudo Aleatoria), el cual se observa en la figura 10, demodulando las señales SP, que vienen en BPSK, y comparándolas con una secuencia de inicio determinada para cada segmento, la cual encontramos en (ABNT 15601, 2007), y así detectar la ubicación de las portadoras.

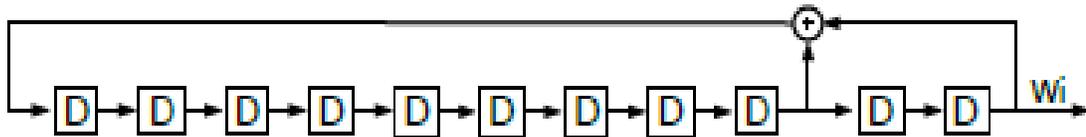


Figura 10 Circuito que genera la ubicación de las SP en un cuadro OFDM

Fuente. (Flores, 2016)

Una vez extraídas las portadoras piloto que vienen en el cuadro OFDM (204 símbolos), es necesario realizar la estimación de $H[i]$, donde existe un sin número de algoritmos matemáticos, pero el que más destaca para sistemas ISDB-Tb, es el Estimador de Wiener, de manera general, lo que hace es una interpolación lineal en frecuencia y tiempo para obtener $H[i]$ y así determinar los símbolos $X[i]$.

2.3.3 Entrelazamiento en tiempo y frecuencia

Los entrelazadores son utilizados en el sistema ISDB-Tb, con el objetivo de dar robustez a la señal frente a los fenómenos del desvanecimiento selectivo y no selectivo. El entrelazamiento de tiempo produce una aleatorización de símbolo después de la modulación, generando la diversidad temporal a la señal. La técnica por lo común utilizada es muy similar a la del entrelazamiento de byte en el sistema de transmisión (INTI, 2011).

Consiste en definir un índice o longitud del *interleaving* (I), el cual es independiente para cada capa y puede tomar valores en función del modo de operación, cómo se observó en la tabla 2. En la Figura 11 tenemos el circuito de atraso de portadoras que se debe dar a cada uno de los segmentos (en recepción parcial solo se la realizará al segmento 0) de acuerdo al índice de la capa jerárquica, Cabe recalcar que en este punto solo se tienen portadoras de datos, ya no las de control como el SP, las TMMC, etc.

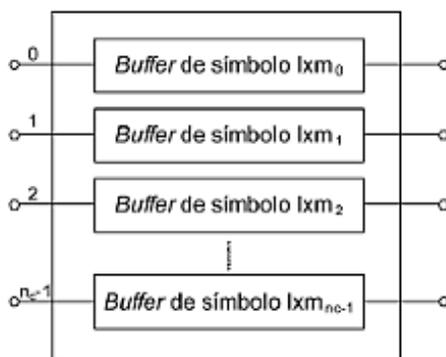


Figura 11 Time interleaving, I= longitud de cada capa, nc= Portadoras de datos por segmento, $m_i = (i*5)$

Fuente. (ABNT 15601, 2007)

El entrelazado de frecuencia permite otorgar una diversidad frecuencial a la señal, distribuyendo los errores producidos por el desvanecimiento del canal y evitando que se pierda todas las portadoras de un segmento (Portal DTV, 2013). El entrelazamiento en frecuencia se dará de acuerdo a la modulación que maneje en el o los segmentos y se

dividen en tres para los segmentos con modulación diferencial (DQPSK), aquellos con modulación coherente (16QAM) y para la recepción parcial (solo aplica la rotación y la aleatorización).

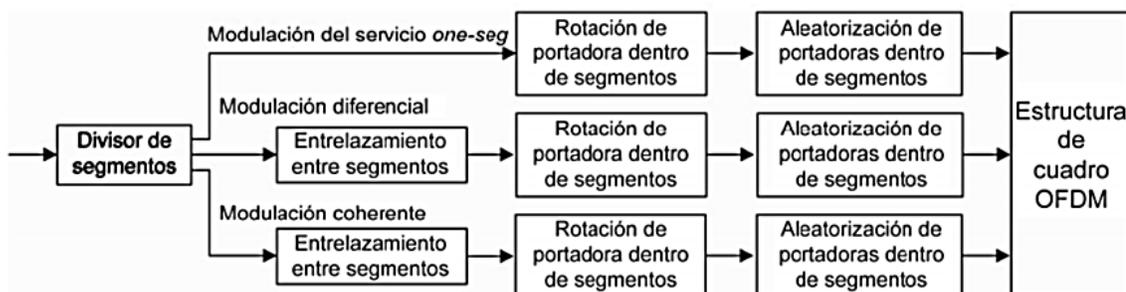


Figura 12 Entrelazamiento en frecuencia

Fuente (ABNT 15601, 2007)

En receptores *One-Seg* después de haber realizado el proceso de la extracción de cuadros y el decodificador TMCC, es necesario quitar la aleatorización y rotación de las portadoras en ese segmento, añadidas por el transmisor. Para la rotación las portadoras son cambiadas de acuerdo al número del segmento, como es el caso del segmento cero las portadoras se mantienen en su ubicación. Ahora para la aleatorización determinada por el modo de operación en el estándar, siguen los siguientes valores de la tabla 3.

Tabla 3

Randomizing en modo 1

Antes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Después	80	93	63	92	94	55	17	81	6	51	9	85	89	65	52	15	73	66	46	71	12	70	18	13
Antes	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47
Después	95	34	1	38	78	59	91	64	0	28	11	4	45	35	16	7	48	22	23	77	56	19	8	36
Antes	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Después	39	61	21	3	26	69	67	20	74	86	72	25	31	5	49	42	54	87	43	60	29	2	76	84
Antes	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
Después	83	40	14	79	27	57	44	37	30	68	47	88	75	41	90	10	33	32	62	50	58	82	53	24

Fuente (INTI, 2011)

Los procesos de entrelazado permitirán una mayor eficiencia a los receptores contra los efectos del desvanecimiento selectivo, movilidad y portabilidad, ISDB-Tb también maneja el entrelazamiento a nivel de byte y de bits, lo que permite reducir el error concatenado producido además por el ruido impulsivo. El estándar al ser el único que posee la función del entrelazador, se convierte significativamente en el superior de los estándares de TVD (en español televisión digital terrestre), en cuanto a desempeño de recepción en áreas urbanas y sobre todo en recepción móvil/portátil (DiBEG, 2007).

2.3.4 Algoritmos de correcciones errores

Los algoritmos de corrección de errores que el estándar maneja son el de Viterbi y el de Reed Solomon, ambos suelen ser eficaces para combatir errores producidos por canales con mucho ruido. El decodificador de Viterbi proporciona una gran herramienta en la corrección de errores, pues su método por aproximación es altamente eficiente y se presta para minimizar los errores en caso de no corregirlos completamente, dejando una tarea más liviana al decodificador de Reed-Solomon (Paz & Ramos, 2006).

El algoritmo de Viterbi se realiza con la ayuda del árbol de Trellis y es el primer bloque decodificador en el receptor, y prácticamente es el responsable de minimizar los errores para las siguientes etapas de decodificación, manejando tasas de código también independientes por capa como se observó en la tabla 2, por lo general *One-Seg* maneja tasa de código de $2/3$ para modulación QPSK.

El decodificador externo Reed Solomon, corrige errores a nivel de bytes (máximo de 8 bytes consecutivos), manejando una matriz de código de (204,188), en recepción se obtendrá a la salida de este bloque paquetes TS de 188 bytes corregidos eliminando la redundancia y de los cuales ya pueden ser analizados y reproducidos (Pérez, 2016).

2.3 Medidas de calidad

Una vez conocido el procesamiento de la señal para su correcta demodulación y captura de los datos, es indispensable conocer que parámetros permiten calificar o

determinar la eficiencia de un sistema de televisión digital, tanto recepción como en transmisión existen mediciones que califican al sistema como se observa en 13.

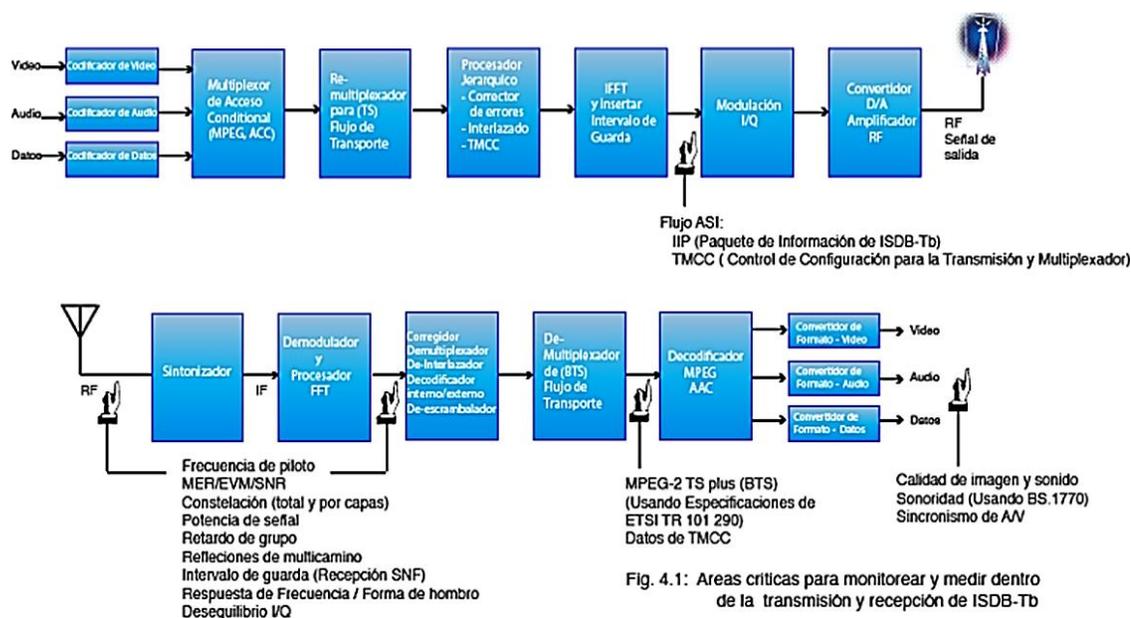


Fig. 4.1: Áreas críticas para monitorear y medir dentro de la transmisión y recepción de ISDB-Tb

Figura 13 Mediciones en un sistema ISDB-Tb

Fuente. (Portal DTV, 2013)

Para esta sección hablaremos principalmente de las mediciones en recepción, y sus algoritmos necesarios para implementarlos en SDR, hay que notar que las mediciones que se contemplan solo en demodulación y no en demultiplexación, serán discutidas. Por lo general cuando se hablan de medidas de calidad en recepción, especialmente en Radio definido por Software las medidas que contemplan la señal de RF no suelen ser tan precisas como para determinar el rendimiento del receptor (Balzarena, Flores, Gonzalez, & Larroca, 2015).

2.3.1 MER (Modulation Error Rate)

Luego de corregir la señal en recepción, frente a los problemas de tiempo y frecuencia, las medidas de calidad serán tomadas. El MER consiste en una comparación

de la constelación receptada con una constelación ideal, se trata de una medida de calidad de la modulación y cuando se habla de receptores de TV digital, el MER tiene valores límites que depende en sí, de cuán robusta sea la modulación (Balzarena, Flores, Gonzalez, & Larroca, 2015).

Los límites pueden estar determinados de manera empírica, por lo general los valores comprendidos del MER para la recepción estable se indican en la tabla 4. Sin embargo, hay que considerar que los valores del MER medidos dentro de la misma área de cobertura, pueden ser distintos aun manteniendo la relación señal a ruido, esto es porque en puntos diferentes del área los efectos del recorrido son distintos como retrasos, multitrayecto e interferencias (Haro, 2012).

Tabla 4

Rangos del MER para una señal de calidad.

Modulación	Rango (dB)
64QAM	33 - 40
16QAM	17 - 20
QPSK	10 - 13

Fuente: (INATEL, 2016)

Para el cálculo del MER, la ecuación 12 es utilizada

$$MER = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^N I_i^{+2} + Q_i^{+2}}{\sum_{i=1}^N ((I_i^+ - I_i)^2 + (Q_i^+ - Q_i)^2)} \right) \quad (12)$$

Donde (I_i^+, Q_i^+) son los símbolos ideales o enviados, en cambio el par (I_i, Q_i) es el símbolo receptado.

2.3.2 BER (Bit Error Rate)

El BER consiste en la relación entre los bits erróneos recibidos y el total. Existen dos formas de medirlo, la primera es fuera de línea, esta consiste en que el transmisor envía una trama conocida y en recepción se determina el error. La segunda en cambio es en línea, y se fundamenta en la cantidad de bits que corrigen los algoritmos en recepción, los cuales son el de Viterbi y el de Reed Solomon, en la figura 14, se observa los puntos de medición, antes y después de los correctores de errores.

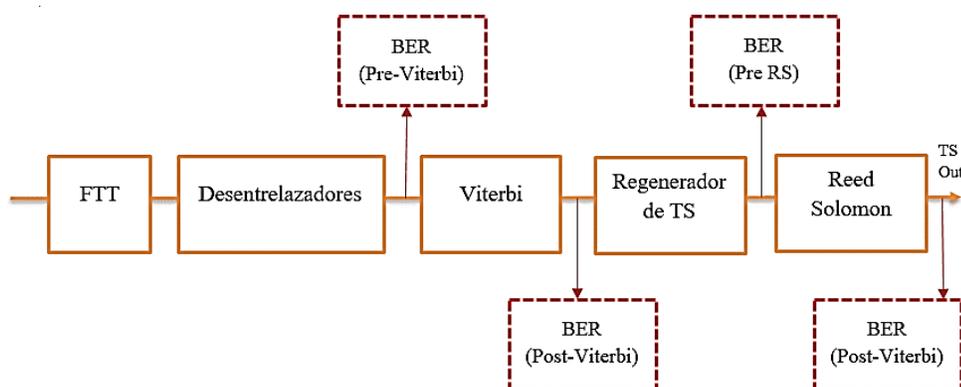


Figura 14 Punto de medición del BER en receptores

Fuente. (INATEL, 2016)

Cuando se trata de receptores de un segmento, se tienen en cuenta que la combinación jerárquica no existe y el procesado de Reed Solomon trabajará solo con la información de la capa jerárquica A. Entonces el BER medido antes y después de los códigos correctores da una visión de la exactitud para las medidas tomadas y que puede ser implementada en SDR.

Las mediciones del BER pre-Viterbi, se lo hace en línea determinando los errores antes de que Viterbi los corrija, es decir, los bits erróneos son los que corrige este algoritmo. El BER POST-Viterbi son los errores observados por Reed Solomon, es decir los bytes que corrige el algoritmo (Flores, 2016). Ahora en muchos equipos se toma en

cuenta el BER post-RS, pero se necesita la información de la decodificación MPEG-2, la cual implica en el cumplimiento del objetivo del proyecto.

Tanto el MER como el BER, son medidas de calidad que determinan el funcionamiento del receptor, pues combina los efectos del ruido (SNR), efectos de no linealidad (Intermodulaciones de segundo y tercer orden), retardo de grupo, problemas de respuesta dentro del canal (Tilt y Ripple) y Micro Reflexiones (INATEL, 2016).

2.4 Efectos en las constelaciones

Por lo general las constelaciones se convierten en un patrón para determinar la eficiencia de los receptores, los valores de las medidas de calidad que se analizaron anteriormente y los efectos del canal pueden verse reflejados en las constelaciones obtenidas. En la figura 15 se tiene por lo común como afecta los fenómenos como el Ruido de Fase, la interferencia AM y el Ruido Gaussiano a las señales receptadas.

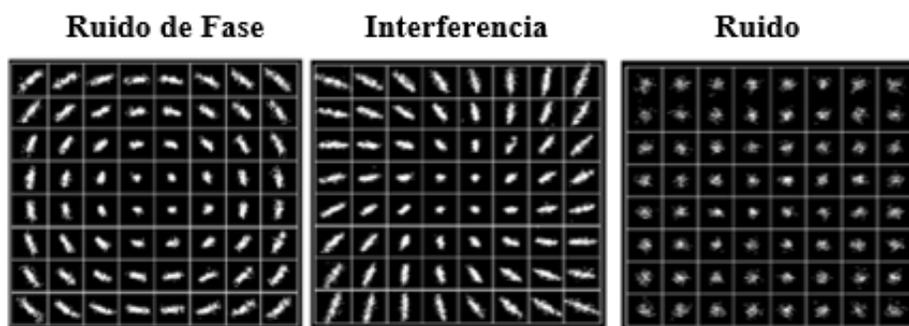


Figura 15 Efectos en las Constelaciones

Fuente. (INATEL, 2016)

En sistemas de recepción de banda angosta, como *One-Seg*, los efectos nocivos en las constelaciones no presentan un punto de observación claro para valores óptimos de la señal, por ejemplo, mayores a los 60 dBm, pero constituyen un análisis importante para ISDB-Tb y es útil para determinar la sensibilidad máxima del receptor (Aguayo, 2001).

Una visión diferente a los efectos en la constelación se muestra en la figura 16, tomando como referencia a un símbolo ideal.

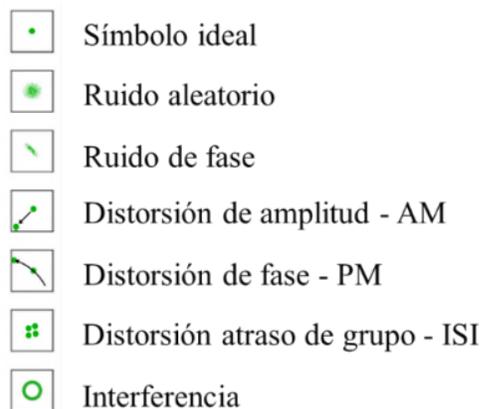


Figura 16 Efectos en un símbolo ideal en la recepción

Fuente. (INATEL, 2016)

2.5 Estado del Arte

Una vez analizado los fundamentos teóricos para el diseño de receptores móviles, en el estándar de televisión digital ISDB-Tb, es importante para la elaboración del proyecto, conocer la situación actual de las áreas relacionadas a través del estado del arte. En esta sección se detalla la situación con respecto a los trabajos más relevantes en SDR dentro de la Universidad, así como otros proyectos realizados a nivel internacional en los últimos años que sirvieron como base para la implementación del receptor.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE se han realizado algunas investigaciones sobre la Radio Definido por Software, tenemos a las más destacables, “Sistema Embebido de Comunicación Digital de voz utilizando Periféricos de Radio Universal USRP E110” (Torres Vega & Vaca Gallardo, 2014), este trabajo describe el diseño de un sistema de comunicaciones digital de voz utilizando al USRP E110 , en Matlab, donde transmiten voz utilizando los códecs G.711 y G.726 e intenta proveer un aporte significativo y comparativo en el desarrollo de los sistemas SDR a través del análisis del BER (en Inglés, *Bit Error Rate*) implementado en Matlab.

Otro proyecto titula “Implementación de un eNodeB LTE Release 9 utilizando SDR” (Tinajero Terán, 2015), se trata del desarrollo de una eNodeB LTE compatible con el Release 9 especificado por la 3GPP (en inglés, *3rd Generation Partnership Project*), mediante el uso de tecnología SDR en el USRP N210, donde se han llevado a cabo algunas pruebas en las que se verifican ciertos aspectos como la funcionalidad en diversas frecuencias y anchos de banda, tasas de transmisión alcanzadas, etc. Un punto importante es el equipo N210 y el análisis relevante que se hace, a nivel de software y hardware, esto una gran ventaja debido a las similitudes con el USRP-2920.

Otra investigación que titula “Modelamiento y simulación en capa física de una red LTE (reléase 8)” (Madrugal Ramos, 2015), este describe la simulación en capa física para comprender el funcionamiento de una red LTE reléase 8 definida en 3GPP donde interacciona con el USRP N210 para el envío de datos en Uplink y Downlink, se destaca la implementación debido a un análisis del costo computacional que se hace en referencia a la comunicación con el equipo y al software utilizado.

Estas investigaciones hacen referencia a tecnologías de última generación en las telecomunicaciones e indican lo que se puede lograr con las plataformas basadas en Radio Definido por Software, sin embargo, no se han realizado trabajos que se enfoquen en la televisión digital. El receptor *One-Seg* nos permite analizar al estándar y comprender su funcionalidad, así iniciar una gama de investigaciones a futuro basándose en SDR y la plataforma USRP.

2.5.1 gr-isdbt Un Receptor implementado en GNU-RADIO

Esta Investigación desarrollada en la Universidad de la Republica en Uruguay por Federico Larroca et al (2016), propone el desarrollo de un algoritmo que permita decodificar la señal de televisión digital en el estándar ISDB-Tb y recuperar la información en paquetes de *Transport Stream* para ver la señal en línea, implementado en Radio Definido Por Software, donde el principal objetivo es el desarrollo de un código abierto.

Se utilizó como piezas de hardware, el Hack RF, Blade RF y el USRP, con la idea de determinar, cual equipo es el más eficiente con el mismo algoritmo. El firmware que manejaron fue GNU Radio. El código se fundamenta fuertemente en los bloques de decodificación del estándar DVB-T, desarrollado por terceros como componente de GNU Radio pero que no forma parte de los bloques raíces del software, donde hacen una adaptación al estándar de ISDB-T en bloques como el de adquisición de símbolos OFDM, sincronización de frecuencias, el decodificador de Viterbi y Reed Solomon y utilizan bloques genéricos de GNU como el de filtro o la FFT.

Esta Investigación será un punto de apoyo para el proyecto, donde la idea es optimizar su trabajo y presentar resultados con respecto a las señales de canales nacionales, para que el receptor pueda ser utilizado por la comunidad para entender el estándar y analizar la situación actual en el país.

Este trabajo de investigación propone las herramientas necesarias para la implementación de un sistema en recepción ISDB-Tb, pero no contempla la complejidad de un sistema completo de análisis y al mismo tiempo recepción en tiempo real de la señal. Para ello se propone un diseño controlado que permita interactuar con los distintos canales, receptando la señal en tiempo real y a su vez modelar el funcionamiento del receptor en un solo algoritmo. La etapa de adquisición se la realizará disminuyendo la frecuencia de muestreo y con ello obtener un receptor parcial más eficiente y de mayor sensibilidad, reduciendo ampliamente el costo computacional y los efectos nocivos con respecto a pérdidas de paquetes implementándolo en un equipo de mayor capacidad de los que fueron utilizados.

CAPÍTULO 3

RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE

En este capítulo se describe en resumen a la tecnología en uso para la implementación del receptor, donde se presenta una introducción sencilla a la arquitectura del equipo, sus lenguajes de desarrollo y no idealidades referentes a SDR, con la idea de identificar al máximo las virtudes y dificultades de la implementación de un sistema de telecomunicaciones en esta tecnología.

Por otro lado, el análisis de los lenguajes de programación del equipo, se realiza bajo el principio de elegir el mejor software, fundamentados principalmente en las herramientas de los firmwares, los procesos teórico matemáticos del receptor, algoritmos base investigados y en cual lenguaje presente mayores virtudes.

3.1 ¿Qué es SDR?

La IEEE (en inglés, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) ha definido a los equipos SDR como “Radio en la cual algunas o todas las funciones de la capa física son Definidas mediante Software” (FORUM, 2007). El objetivo principal de la Radio Definida por Software, es desarrollar las funcionalidades de un sistema de telecomunicaciones a nivel físico, en mayor parte en software. Bajo este concepto, la tecnología pretende reemplazar a los sistemas analógicos de procesamiento en banda base con elementos de procesamiento digitales, presentando ventajas en cuanto a costos, reutilización de frecuencias, interoperabilidad y las múltiples opciones en software para la implementación de un sistema real de telecomunicaciones (National Instruments, 2017).

3.2 USRP 2920

El USRP (en inglés, *Universal Software Radio Peripheral*), en principio fue desarrollado y comercializado por Ettus Research y su empresa matriz National

Instruments, bajo la definición de radio definido por software ideada por Joseph Mitola. La familia USRP fue diseñada principalmente bajo la accesibilidad y hardware de código abierto, permitiendo a los usuarios implementar sistemas de radio, con la ayuda de sus computadores personales o sistemas embebidos a través de un enlace de red de alta velocidad (ver figura 17).

Los sistemas digitales Transceptores de la familia NI USRP-292x, están diseñados para la investigación y enseñanza de las Telecomunicaciones. Estos equipos presentan una gama de aplicaciones de comunicaciones inalámbricas en estándares como radiodifusión, Televisión Digital, GSM celular, 802.11 y ZigBee.



Figura 17 USRP 2920 y un sistema embebido

Fuente. (Orellana, 2013)

3.2.1 Panel Frontal y conectores

La estructura externa del equipo cuenta con conexiones y puntos indicadores sobre el funcionamiento que es importante caracterizar, en la figura 18 se tiene la visión externa del equipo dentro las principales conexiones se tienen a los puertos o conectores SMA (en inglés, *SubMiniature version A*) con una impedancia de 50Ω , dos de estos son para recepción y uno para transmisión. El cable de expansión MIMO es utilizado para conectar dos equipos a la vez y configurarlos a través del enlace Gigabit Ethernet, la alimentación del equipo es de 6V a 3A. Los conectores de referencia REF y PPS,

representan las señales externas que pueden ser usadas, la primera para el oscilador local con una impedancia de $50\ \Omega$ y la segunda como señal de referencia de los pulsos por segundo o señal de tiempo de referencia, esta acepta voltajes de tipo TTL (en inglés, *transistor-transistor logic*) y de igual manera el conector tiene una impedancia de $50\ \Omega$.

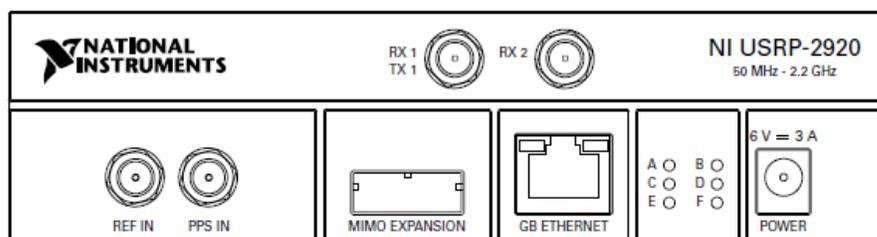


Figura 18 Panel Frontal del USRP-2920

Fuente. (National Instruments, 2015)

Los leds indicadores determinan las distintas operaciones que realiza el equipo, en la tabla 5 se presentan las siguientes características.

Tabla 5
Leds indicadores del USRP-2920

LED	INDICACIONES
A	Indica el estado de transmisión del módulo: APAGADO: el módulo no está transmitiendo datos. VERDE: el módulo está transmitiendo datos.
B	Indica el estado del enlace de cable MIMO físico: APAGADO: los módulos no están conectados con el cable MIMO. VERDE: los módulos se conectan utilizando el cable MIMO.
C	Indica el estado de recepción del módulo: OFF: El módulo no está recibiendo datos. VERDE: el módulo está recibiendo datos.
D	Indica el estado del firmware del módulo: APAGADO: El firmware no está cargado.

Continua 

	VERDE: el firmware está cargado
E	Indica el estado de bloqueo de referencia de LO en el módulo: APAGADO: No hay señal de referencia, o LO no está bloqueado a una señal de referencia. PARPADEO: él LO no está bloqueado con una señal de referencia. VERDE: él LO está bloqueado a una señal de referencia.
F	Indica el estado de energía del módulo: APAGADO: El módulo está apagado. VERDE: el módulo está encendido.

Fuente: (National Instruments, 2015)

3.2.2 Arquitectura

El diagrama general que describe la capa física y la estructura de los sistemas transceptores SDR se observa en la figura 19, constituidos principalmente en la parte de procesamiento RF, los convertidores de señales analógica a digital o viceversa.

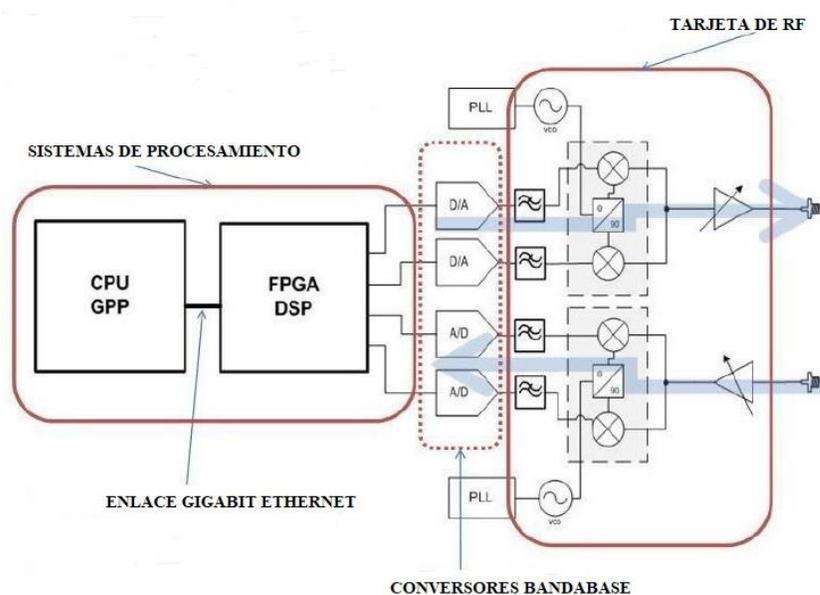


Figura 19 Arquitectura General de SDR

Fuente (Orellana, 2013)

Para entender aún mejor la constitución de la capa física del equipo, se presenta en la figura 20 el diagrama de bloques del USRP 2920, se observa que está constituido por dos tarjetas conocidas como, la tarjeta madre que de manera general se encarga del procesamiento en banda base, a través de la FPGA, constituida por convertidores analógicos-digitales y digitales-analógicos, que se encargan de la adquisición de muestras y de la comunicación con el equipo embebido o computador personal para un procesamiento externo. En cambio, la Tarjeta hija, se encarga del procesamiento de RF, físicamente constituye el rango de frecuencia de operación de subida y bajada.

Hay que tomar en cuenta que el diagrama de bloque difiere de otros modelos por el rango de frecuencia de operación, es decir tendrían otro intervalo más angosto o más amplio de operación dependiendo del modelo de la tarjeta hija, al igual que el tipo de estructura puede incorporarse hardware de GPS como en los modelos 293x.

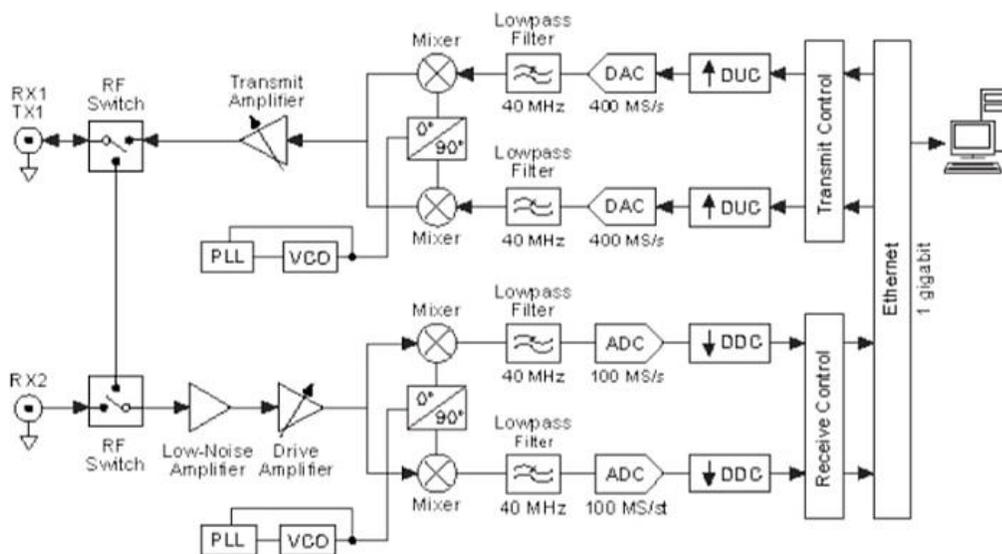


Figura 20 Diagrama de Bloque del NI-USRP2920

Fuente (Bustillos, 2016)

El equipo también maneja una antena transceptora VERT400 (ver figura 21), trabaja en tres bandas de frecuencia (144MHz, 400MHz, 1200MHz), con un valor de potencia

máxima permitida de 10 Watts (Contrera & Ferrer, 2016). Pese a no ser la mejor antena que el equipo posee, será suficiente para la captura de la señal de un segmento, cual situación adversa se analizará en un capítulo posterior.



Figura 21 Antena VERT400

Fuente. (Orellana, 2013)

A continuación, se describe más a fondo las características técnicas de la *daughterboard* y de la *motherboard* para comprender las funcionalidades físicas del equipo.

3.2.2.1 Tarjeta Madre FPGA

Se trata de una FPGA Xilinx Spartan 3A-DSP 3400, su principal función es la de realizar el procesamiento en banda base, a ella se conectan todos los periféricos, la alimentación, puertos MIMO y Gigabit Ethernet. El enlace de gigabit Ethernet soporta una tasa máxima de 25 MS/s cuando se trabaja con 16 bits, y cuando se trabaja con 8 bits de información con una tasa máxima de 50 MS/s, el equipo solo se puede comunicar con un enlace Gigabit Ethernet (Bustillos, 2016).

La tasa de símbolos para el convertor ADC es de 100MS/s y del DAC es de 400MS/s para recepción y transmisión respectivamente, también la incorporación de convertidores digitales Down (DDC) y up (DUC). El DDC se encarga de adaptar la señal en banda base proveniente del ADC, disminuye la tasa para la comunicación con el PC a través del puerto ethernet, constituidos por tres filtros que se encargan de dicha reducción y con dos canales una para la componente en fase (I) y otro para la componente en cuadratura (Q) de la señal banda base, con una tasa de muestreo de 7.68 MS/s. Los DUC realizan el proceso contrario, pero manejan hasta tres subcanales de

comunicación cada uno con un ancho de banda digital de 61.44 MS/s, manejando una tasa total a la salida de 368.64MS/s por sus dos salidas IQ. Esto explica que la comunicación desde el computador personal al equipo sea mayor que en su proceso contrario, lo que implica que para recepción físicamente se encuentra limitado a aplicaciones que no superen su ancho de banda conocido.

3.2.2.2 Tarjeta Hija SBX

La tarjeta SBX con ancho de banda de 400MHz-4.4GHz, permite obtener un ancho de banda máximo de operación de 40MHz a 8 bits de operación y a 16 bits de operación se obtiene un máximo de 20MHz. Constituido principalmente de filtro pasa bajas, el cual permite el paso de señales de frecuencia intermedia, un oscilador local que genera la señal sinodal constituido por el PLL (en inglés, *Phase Locked Loop*) y el VCO (en inglés, *Voltage Controlled Oscillator*), ya sea para adaptarla al canal o para disminuir su frecuencia en recepción (IF) a través del mezclador (Arteaga Arce, 2012).

Por otro lado, los amplificadores, en transmisión se encuentra el que aumenta la potencia de la señal de 0 a 31.5 dB, para la recepción de la señal se presentan dos amplificadores uno que aumenta la señal degradada por el canal evitando aumentar la del ruido y otro que le da ganancia a la en el rango de 0 a 31.5 dB, gracias a la tarjeta hija se tienen dos opciones para recepción (RX1, RX2) y una sola para transmisión (TX1), debido a que incorpora el *switch* que adapta la salida del bloque de transmisión en una nueva entrada en recepción (National Instruments, 2015).

3.2.3 Conexión con el USRP-2920

La comunicación del USRP con un sistema embebido, es a través de un enlace Gigabit Ethernet (1000Mbps), con cualquier otro enlace de menor capacidad no se podrá establecer la comunicación. Sin embargo, la mayoría de equipos personales, como laptops, notebooks o Ultrabooks, dan prioridad en ancho de banda a las comunicaciones inalámbricas como Wi-Fi, para la conexión en red y no poseen un puerto Gigabit

Ethernet, por ende, se presentan alternativas que puede ser utilizadas para establecer la comunicación con el USRP, la cual se observa en la figura 22.

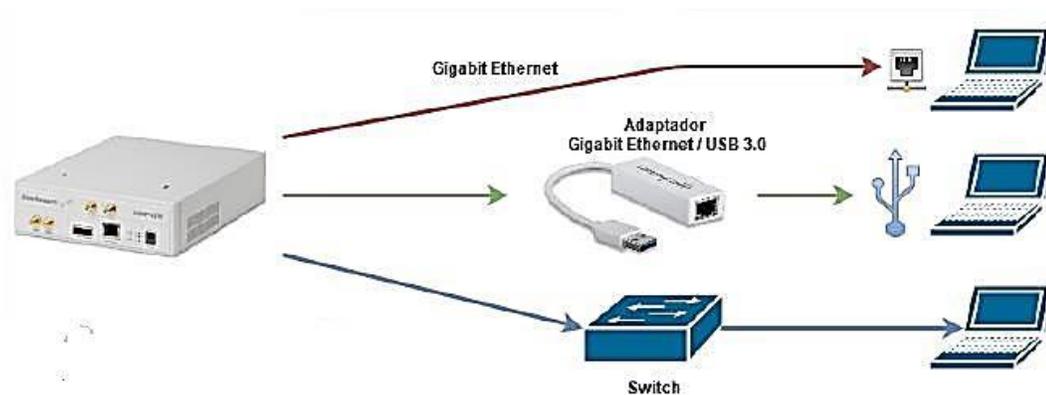


Figura 22 Tipos de conexión con el USRP-2920

Fuente (Bustillos, 2016)

La conexión ideal es a través de un cable Ethernet de categoría 5e o superior, desde el dispositivo hasta el puerto de conexión RJ45 del computador, la siguiente alternativa es utilizar un adaptador Gigabit Ethernet a USB 3.0, es de alta fidelidad, pero se genera un retardo debido a la conversión de paquetes, además de necesitar software controlador que debe ser instalado en el equipo, la última opción y la más costosa sería utilizar un *switch* para establecer el enlace punto a punto y que este se encargue de la negociación de puertos de los equipos.

Una vez determinada la conexión, se debe configurar la conexión punto a punto del sistema, por lo general la NIC (en inglés, *Network Interface Card*) del USRP viene configurada con la dirección IP (en inglés, *Internet Protocol*) 192.168.10.2/24, la idea es configurar la interfaz del computador en esa misma red. Para reconocer los paquetes, en las computadoras se debe instalar el driver del Hardware del USRP (UHD), el cual es compatible con los tres lenguajes, para GNU Radio y Matlab se debe instalar desde servidores externos en cambio que LabVIEW lleva incorporado en el controlador en su paquete de comunicación del equipo NI-USRP.

3.2.4 Software

Comercialmente el USRP 2920 se lo proyecta al consumidor con el lenguaje de desarrollo LabVIEW, sin embargo, el equipo presenta las características físicas similares a las del USRP N210 el cual podía ser programados con tres lenguajes, Matlab, LabVIEW y GNU Radio. A continuación, se detallan las características principales de los entornos de desarrollo.

3.2.4.1 Matlab

Matlab es un lenguaje matemático de programación de alto nivel, a los equipos de radio definido por software permite programarlos ya sea bajo scripts o con las funciones del Simulink de Matlab. Las herramientas de Simulink son similares a las de GNU Radio, es decir son bloques de procesamiento de señales que permiten realizar bajo un diagrama gráfico el análisis y procesamiento en banda base de señales inalámbricas capturadas por el equipo. Para la formación de scripts de procesamiento Matlab tienen incluido en el *Toolbox* la herramienta llamada *SDR4all*, la cual permite el desarrollo de software de interacción con el equipo, bajo línea de programación y utilizar un complemento como *GUIDE*, el cual crea interfaces gráficas de control. Sin embargo, una de las desventajas es su elevado coste en las licencias que impiden el desarrollo de algoritmos de uso libre para la investigación (Anónimo, 2008).

Otro punto importante al momento de la elección del lenguaje de programación es sin duda su costo computacional, cuando se trabaja en Matlab, este tiene la tendencia de elevados tiempos de ejecución y si se incluye las herramientas del control del USRP en scripts o *Simulink* su costo aumentaría.

Para ISDB-Tb, suponemos las condiciones necesarias para la captura de los paquetes TS que reflejarían un costo computacional, cuando la señal receptada viene en modo tres de operación maneja 8192 muestras por símbolo y un prefijo de 1/16, si mínimo se necesita una ventana de observación de $2N+L$, para que el algoritmo de Van de Beek funcione, tendríamos un total de 16896 muestras en corto tiempo, a esto hay que

agregarle procesos que elevarían el costo computacional del sistema como la ecualización, FFT, Viterbi, etc.

Un trabajo realizado por Terán (2016), el cual consiste en un receptor DVB-T, indica que su coste computacional es elevado, pero para contrarrestarlo, recomienda bajar la frecuencia de muestreo arriesgando calidad y resolución en la señal receptada en todo el espectro, lo cual no es lo ideal para recepción completa y podría ocasionar problemas de frecuencia elevados para el estándar.

Una ventaja que se plantea Matlab es su facilidad al momento de programar algoritmos matemáticos complejos, como el de Van de Beek, gracias a su entorno y orientación matemático.

3.2.4.2 LabVIEW

LabVIEW es el software de entorno gráfico diseñado por National Instruments, permite proveer un entorno de programación basado en estructuras y diagramas de funcionamiento. Con el hardware NI USRP permiten crear sistemas completos de telecomunicaciones, tiene la flexibilidad para proveer un sistema de programación rápida y fácil comprensión e integración con otro software como los scripts de Matlab. Actualmente es líder en el campo de la computación basado en medidas y adquisición de datos por computadora, en procesamiento y análisis de señales cuenta con un sin número de complementos y herramientas que permiten otorgar fidelidad al algoritmo desarrollado como *Modulation Toolkit* (National Instruments, 2017).

Además permite generar entornos de control o paneles de control más estéticos y mucho más fáciles de manejar sin tanta complejidad a diferencia del *GUIDE* de Matlab, un punto a favor cuando se quiera analizar la señales de un segmento, pero a medida que se requiera mayor procesamiento de la señal, el código gráfico de bloques se vuelve más complejo y si no se lleva a cabo una programación correctamente estructurada, el desarrollo del algoritmo podría volverse complicado, fenómeno conocido como código espagueti.

Para solucionar el código espagueti, se propone la creación de subVis, similares a las funciones en Matlab, y manejar una programación continua de izquierda hacia la derecha, pero suele ser muy tedioso y para detectar un error en algún algoritmo es relativamente complejo. Otro punto a favor es que cuenta con el paquete integrado de *Labview Modulation Toolkit*, el cual integra al entorno de programación con paquetes y funciones de procesamiento de banda base, desde modulación digitales analógicas hasta decodificadores de alta fidelidad.

La estructura general del entorno de programación en LabVIEW está constituida por un panel frontal (interfaz donde se coloca el panel de control de usuario) y el diagrama de bloques (es la representación de los flujos de procesamiento de la señal), que para cualquier usuario que no tenga experiencia en programación a base de código. Un punto en contra es cuando manejan conceptos matemáticos muy complejos como el algoritmo de Van de Beek, la ecualización de canal ISDB-Tb, el extractor de cuadros OFDM y sobre todo el decodificador del TMCC, suele ser muy tedioso de programar y muy sensible a fallas de programación sin contar con el costo computacional muy similar a Matlab.

Por otro lado, provee con el USRP desde el punto de vista empírico, el mejor sistema de adquisición de la señal, permitiendo configurar distintas características y dar mayor control del equipo para la recepción de los datos. Se tienen dos formas de adquisición, la primera para aplicaciones que requieran alto procesamiento, esta consiste en configurar los parámetros una sola vez por ciclo de ejecución y la segunda que permite adquirir la señal cada ciclo de ejecución del algoritmo útil cuando tenemos un canal muy variante en el tiempo.

3.2.4.3 GNU Radio

GNU Radio (en inglés, *GNU is Not Unix*) es una plataforma de código abierto orientado a los sistemas de telecomunicaciones que está destinado para el control de equipos basados en tecnología SDR, su programación consiste en un grupo de archivos base que permite la creación de bloques de procesamiento de señales en un entorno

gráfico, muchos de estos propios del software, pero permite también la creación a los distintos usuarios.

Su programación se basa en lenguajes de programación Python, C++ y en XML para a formación de los bloques de procesamiento, disponible para Linux, Mac OS X y Windows, dichos lenguajes se conectan mediante la librería SWIG (en Inglés, *Simplified Wrapper and Interface Generator*) (Miyano & Wada, 2010).

Por lo general el código de Python sirve para conectar el procesamiento del algoritmo desarrollado en C++, en cambio cualquier código desarrollado en XML que debe estar de acuerdo a las entradas definidas en C++, permite la estructura gráfica del bloque de procesamiento. Pero también permite crear el algoritmo de procesamiento de señales solo en Python y conjuntamente con XML formar el bloque gráfico en GNU, esta versatilidad por parte del software es una gran ventaja ya que el usuario puede manejar lenguajes libres para el desarrollo de un algoritmo (Contrera & Ferrer, 2016).

Un punto negativo es la forma que como se verifica el código desarrollado ya sea en C++ o Python, a través de archivos de prueba en la cual debemos generar los valores de entrada del bloque de procesamiento, para luego comprobar sus salidas a través de la ejecución del archivo de prueba desde el terminal, pero gracias a su gran versatilidad, GNU permite generar estos archivos con la ayuda de IDEs de desarrollo externos como GCC (en Español, Colección de Compiladores de GNU), BlueFish y otros (Anónimo, 2012).

GNU para su programación en el entorno gráfico, que se ejecuta secuencialmente, provee de varios modos en su panel de programación, es decir una vez se tenga y se haya probado los bloques de procesamiento requeridos, en el panel gráfico se colocan los bloques formando el diagrama de procesamiento de la señal en recepción ese archivo final resultara en un diagrama con extensión *.grc*, otro modo es programar este diagrama de flujo en Python llamando a los bloques de procesamiento a través de librerías generando con la ayuda del compilador de GNU el archivo *grc*, sin duda el software tiene variabilidad para la facilidad del usuario

Una de las desventajas es las herramientas que posee para la presentación gráfica y la creación panel del control (como GUI de Matlab o el panel de control de LabVIEW),

maneja diversos modos de presentación, uno de ellos QT GUI, el cual consume menos recursos, pero refleja la presentación de datos de manera simple, y el WX GUI, permite mostrar datos con mayor control y observación de calidad, pero consume más recursos, para un determinado algoritmo de diversos procesos podría colapsar la máquina.

GNU también maneja librerías como la de VOLK (en inglés, Vector-Optimized Library of Kernels), que optimiza la ejecución de algoritmos y permite operaciones matemáticas vectorizadas, aparte cuenta con señalización de paquetes, basado en etiquetas de flujo y mensaje bidireccionales, esto es importante ya que permite avisar a otros bloques cuando ocurra un determinado evento, por ejemplo, como el inicio de un cuadro OFDM.

Sin embargo, GNU ha sido uno de los lenguajes favoritos de los últimos años por los desarrolladores al trabajar con el USRP, debido a que cuenta con una gama de bloques de procesamiento de señales desde osciladores, ecualizadores, moduladoras digitales decodificadores, orientados a diferentes tecnologías como LTE, 802.11, TVD, etc (Ettus Research, 2015). Un punto importante es que tiene bloques de procesamiento en el estándar de televisión digital DVB-T (muy similar a ISDB-T y que otros softwares no poseen), facilitando el desarrollo del proyecto.

3.2.4.3 Determinación del Lenguaje de Desarrollo

Es indispensable determinar la mejor plataforma de desarrollo del proyecto y que este estudio sirva como guía para cualquier persona que se adentre con la tecnología SDR. Tanto LabVIEW, Matlab y GNU Radio son softwares de grandes capacidades, que, sin importar la aplicación, se puede crear un sistema de telecomunicaciones robusto, de alta fidelidad y funcionalidad. Todos estos presentan ventajas y desventajas propios de los desarrolladores, de la cual para su elección se analizó tomando en cuenta la experiencia con el lenguaje (en lo que compete al desarrollo previo de ejemplos para familiarizarse con las funcionalidades del equipo), investigaciones anteriores y el cumplimiento de los objetivos.

En la tabla 6 se tiene una comparativa de los lenguajes de programación del equipo, identificando su principal ventaja con respecto a otro lenguaje de programación.

Tabla 6
Comparaciones de los firmwares del USRP

	LabVIEW	Matlab	GNU Radio
LabVIEW		LabVIEW presenta mayores prestaciones gráficas y de control que Matlab.	Presenta un control con la adquisición de datos más óptimo y versátil.
Matlab	Matlab es mucho más eficaz y sencillo para implementar algoritmos matemáticos complejos.		Para el análisis vectorial de la señal y a la observación de datos Matlab es ampliamente superior.
GNU Radio	GNU radio tiene mayores ventajas de ejecución, reduce el consumo computacional óptimo para aplicaciones en tiempo real	GNU presenta mayores prestaciones de control gráfico y comparándolo con <i>Simulink</i> es un entorno basado en programación de bloques más sencillo de implementar y ejecutar	

El firmware que mayores prestaciones para el cumplimiento de los objetivos es el de GNU Radio, la elección de este software se basa en mayor parte, a que cuenta con bloques de procesamiento ya establecidos para el estándar de televisión digital. Pese a que no se presentan mayores prestaciones que LabVIEW o Matlab para la presentación gráfica de los resultados y análisis de datos, se ha decidido por este software debido a

que el objetivo principal es el recuperar las tramas de *Transport Stream*, y GNU cuenta con herramientas que permiten generar un archivo *.ts* sin mucha complejidad y su bajo coste en la ejecución de software externos permiten la eficaz reproducción de la señal en vivo. Un punto importante es que trabaja con lenguajes de desarrollo mas conocidos como C++ y Python, además cuenta con un amplio repositorio digital, lo cual es una ventaja ya detalla sobre los otros lenguajes.

3.3 No idealidades en SDR

Una vez entendido los conceptos teóricos, así como la determinación del software para la implementación del receptor de un segmento, es importante analizar aquellos problemas que podría ocasionar el hardware del sistema, tanto el USRP como el computador, al momento de la adquisición y procesamiento de la señal. Es un aspecto importante debido a que consideraciones en hardware podrían tener efectos en software o el algoritmo implementado.

3.3.1 Problemas con el Oscilador Local

ISDB-Tb una aplicación basada en OFDM, esta técnica de modulación es sensible a errores de frecuencia, como ya se mencionó en el capítulo 2, la mayoría de estos errores en frecuencia tanto en receptores como en transmisores se debe al hardware de Radiofrecuencia.

Cuando el Oscilador local de la SBX no genera una portadora a la misma frecuencia de la receptada para que el mezclador demodule la señal a banda base, esto puede ocasionar problemas en frecuencia problemas como la reducción de la amplitud de la señal y sobre todo ocasiona ICI perdiendo la Ortogonalidad. El ruido de fase también es producto del oscilador local cuando este no genera una señal puramente sinusoidal, los efectos se pueden observar en la figura 23.

Estos efectos también pueden ser ocasionados por el efecto Doppler y el canal, es importante recalcar que el algoritmo propuesto por Van de Beek et al (1997), ayuda a

mitigar estos errores de frecuencia, pero no en gran escala, este tipo de errores suelen incrementarse en el tiempo y ocasiona errores en frecuencia que las diferentes técnicas utilizadas no son suficientes, estos se conocen como errores residuales en frecuencia y fase, para solucionarlos se propone un sistema de seguimiento en frecuencia el cual se analizará en un posterior capítulo.

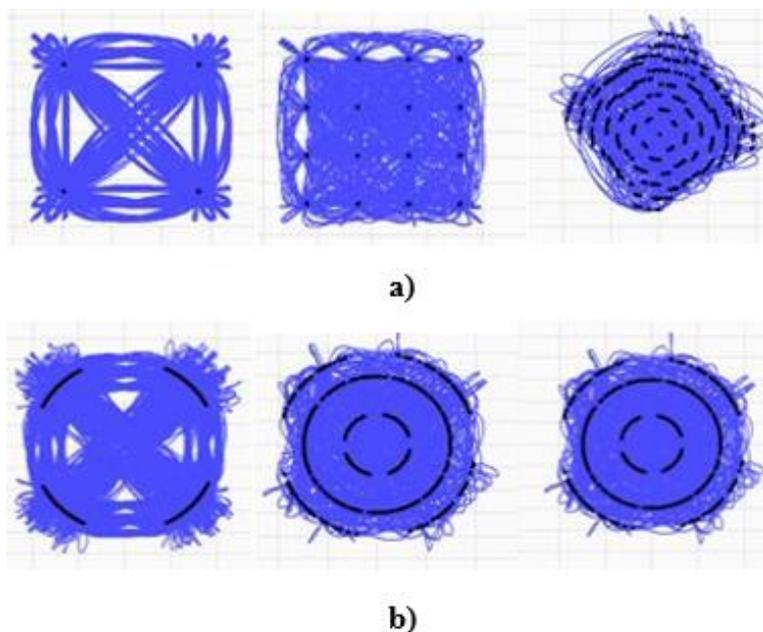


Figura 23 a) Efectos del desvío de la portadora en QPSK, 16QAM, 64QAM y b) Efectos del ruido de fase en QPSK, 16QAM, 64QAM

Fuente (Anónimo, 2016)

3.3.2. Frecuencia de muestreo en SDR

En el USRP contamos con ADC's y DAC's para la recepción y transmisión de señales banda base, si se implementa un transceptor en el mismo equipo podrían ocasionar problemas de sincronización, debido a que los conversores no funcionan a la misma tasa, y el algoritmo colapsará por los requerimientos de alta velocidad de procesamiento y almacenamiento en los buffers.

Los equipos de SDR, son utilizados para establecer la recepción y transmisión por separado y así observar de mejor manera los efectos del canal, esto no quita que existan problemas en la sincronización de relojes del transmisor y receptor. Esto quiere decir que cuando el transmisor y el receptor no se encuentran en la misma frecuencia transmisión y captura de datos ocasionan problemas de sincronización, como se ve en la figura 24.

El receptor toma muestras en instantes de tiempo diferentes a las enviadas por el transmisor, lo que ocasiona la pérdida de la ortogonalidad, generando ICI. Este efecto siempre se tendrá al momento de trabajar con los USRP, el cual es prácticamente nulo cuando el sistema transceptor se implementa por separado, pero cuando hablamos de diseño de receptores o cuando queremos capturar una señal proveniente de un sistema de transmisión independiente este error es muy común e influyente.

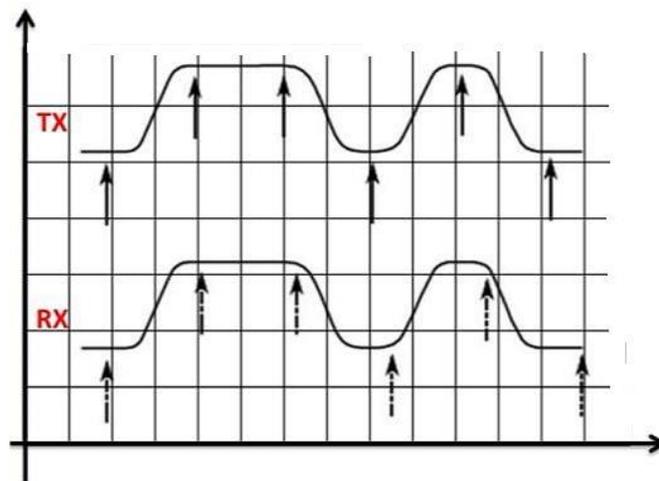


Figura 24 Desvío en el reloj interno del receptor, respecto del reloj del transmisor

Fuente Propia

Como el sistema ISDB-Tb se encuentra transmitiendo a la frecuencia de la FFT (8.126MHz), lo correcto sería que el USRP tome muestras a la misma frecuencia para evitar los mencionados errores, pero esto no es el caso ya que la tarjeta SBX del equipo no puede generar cualquier tasa de muestreo. Ahora como se indicó antes los receptores de un segmento suelen variar su frecuencia de muestreo en 1/8 para disminuir el

procesamiento, pero aun así esta frecuencia de 1.016MHz tampoco puede ser generada por la SBX del USRP por sí sola, para ello se puede corregir en software utilizando procesos de diezmado e interpolación para obtener la misma cantidad de muestras en el mismo tiempo. Igualar la frecuencia de muestreo a través del diezmado e interpolación implica el uso de buffers del computador, y dependerá de la capacidad en hardware del computador para tener un sistema más eficiente.

3.3.3 Costo Computacional

El costo computacional siempre estará presente en sistemas implementados en SDR y dependerá de que tan complejo sea el algoritmo, pero también es importante considerar que las limitaciones que tiene el USRP con respecto a la frecuencia de muestreo aumenta el costo.

SDR es un tipo de tecnología que requiere de procesamiento externo, es decir aparato del procesamiento de la FPGA requiere del uso de un computador o sistema embebido, lo cual implica una constante comunicación entre las dos partes, es decir, si la aplicación diseñada requiere un ancho de banda considerable, el uso de la tarjeta de red incrementará los procesamientos del computador, al igual que del USRP.

Existen diversas formas de adaptar esta comunicación para el caso del USRP-2920, cuando no dispone de un computador con un puerto Gigabit Ethernet, a través del uso de NIC externas y de adaptares USB 3.0 a Gigabit Ethernet, lo cual supone un proceso nuevo, que no solo incrementa el costo, sino también aumenta el uso de recursos del equipo lo que podría ocasionar la pérdida de paquetes.

El costo computacional elevado produce pérdidas de paquetes y error de sincronización debido a los colapsos en el tiempo que pueda tener el sistema, esto puede concluirse en un paquete TS erróneo e irreproducible.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DE UN RECEPTOR ONE-SEG

En este capítulo se describe la implementación del receptor de un segmento ISDB-Tb en el USRP-2920 utilizando GNU Radio. Se detallan principalmente la arquitectura del sistema de implementación y el diseño del algoritmo en el entorno de GNU Radio para la recepción en línea.

4.1 Arquitectura del Sistema

El escenario de la implementación se observa en la figura 25, el cual está constituido por una laptop, conectado a través del puerto USB 3.0 con el NI USRP-2920, el adaptador intermedio permite la conexión del enlace y establece la velocidad a Giga Ethernet.



Figura 25 Escenario del sistema de implementación

Fuente. Propia

Cada uno de los componentes realizan una función importante que determina la eficacia del sistema, en resumen, las características de cada componente son descritas a continuación:

- La computadora, HP-Pavilion 15-ay1011a, procesador AMD A6 de 64 bits y 2.7 GHz de velocidad de procesamiento, RAM de 8 GB, Tarjeta Gráfica Radeon y un puerto USB 3.0.
- NI USRP-2920, contiene una tarjeta SBX, dos antenas VERT400 e interfaz Gigabit Ethernet.
- Adaptador TPLINK de USB 3.0 a Gigabit Ethernet de alta fidelidad y alta tasa de transmisión (5000Mbps), el controlador e información de instalación puede encontrarse en (Tplink, 2015).

GNU Radio puede ser instalado en Windows y MAC OS, pero es recomendable tenerlo en el sistema de origen en cual es Linux para un mejor rendimiento. El sistema operativo de la aplicación entonces es Ubuntu 1604 LTS, previo a un proceso de partición del disco de la laptop que se utilizó.

Para establecer la comunicación entre el USRP-2920 y la computadora, se requiere la instalación de GNU Radio y también el controlador de comunicación del equipo conocido como UHD, tomando en consideración la versión y el Kernel de Linux. Este proceso de instalación es muy sencillo ya que se basa en línea de comandos desde la terminal, por ese motivo no se detalla, pero toda la información necesaria se encuentra en el sitio de la empresa desarrolladora (Ettus Research, 2015).

4.2 Entorno de GNU Radio

Antes de explicar el desarrollo y funcionamiento del algoritmo, es necesario conocer más fondo el firmware de programación a utilizar. GNU Radio como entorno de programación gráfico, genera bloques de procesamiento de señales para radios definido por software donde se puede utilizar en conjunto con hardware RF externo o sin él en un entorno de simulación (GNU Radio Companion, 2016).

En la figura 26, tenemos la interfaz de programación de GNU, consta de 4 partes:

- Biblioteca: sección donde se encuentran todos los bloques de procesamiento por defecto de GNU Radio, así como los programados por el usuario, dividido en diferentes categorías, donde los bloques diseñados aparecen en una categoría sin identificar.
- Barra de herramientas: aquí se encuentran las herramientas necesarias para que el usuario desarrolle un control sobre el área de trabajo y cuenta con ciertas funcionalidades que permiten ejecutar, evaluar y corregir el diagrama de bloques desarrollado.
- Terminal: en la sección que permite la impresión de mensajes por parte de los bloques de GNU.
- WorkSpace: El área donde colocaremos las variables definidas y los bloques de procesamiento de señales, el cual esta dimensionado, con la idea de reducir la complejidad del algoritmo.

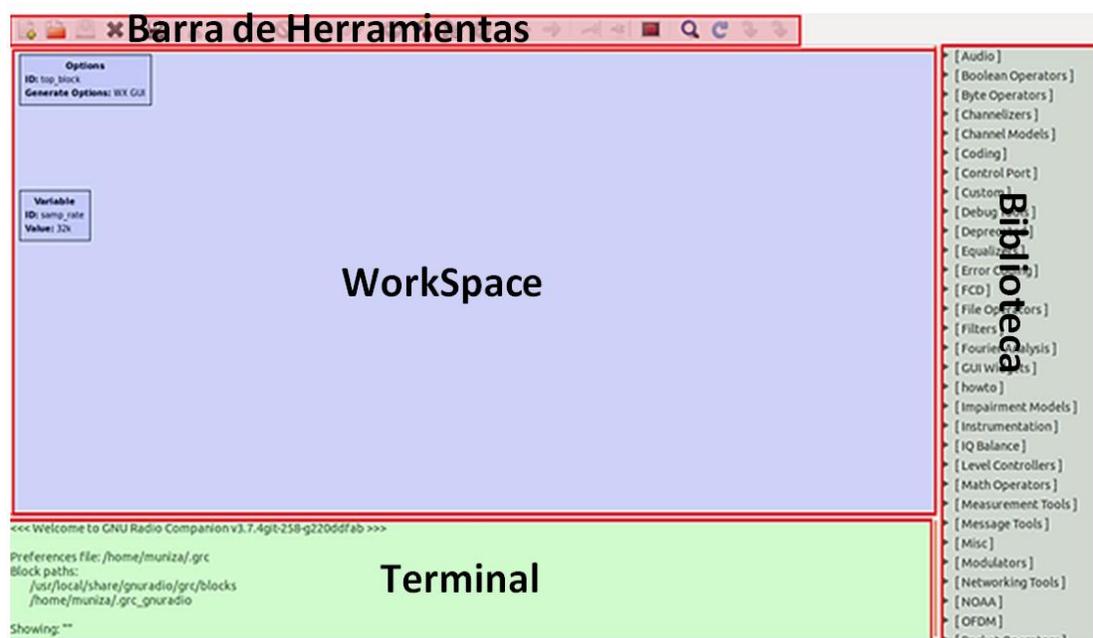


Figura 26 Entorno de GNU Radio

Fuente (GNU Radio Companion, 2016)

4.2.1 Propiedades de los Bloques

Cuando se crea el primer diagrama de bloques, lo primero es definir sus características, para ello en la parte de *OPTIONS* mostrada en la figura 26, se configuran las características generales de todo el diagrama de bloques, como se indica en la figura 27. Dentro de las características principales se encuentran, la definición del ID, esta opción es indispensable, ya que determina el nombre del archivo generado, así como el nombre de la clase en Python luego de un proceso de compilación, por ejemplo, si el ID es HolaMundo se obtiene el archivo con el HOLAMUNDO.py

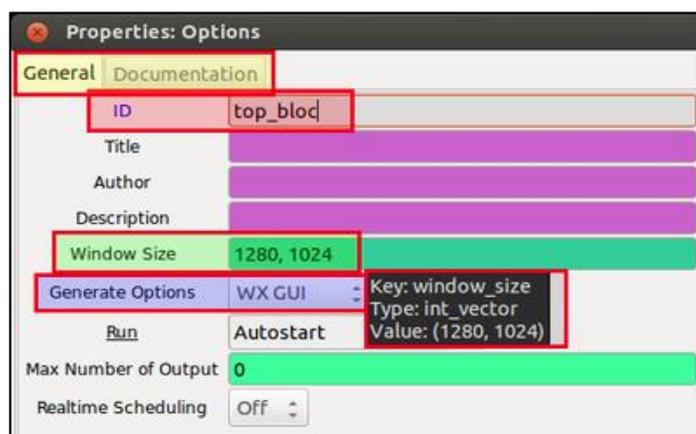


Figura 27 Propiedades del Diagrama de bloques

Fuente (GNU Radio Companion, 2016)

La opción del tamaño de la ventana determina en ancho y alto la dimensión del workspace. La opción de generación, presentan diferentes funciones que determinan el tipo de trabajo en el que nos enfocaremos en GNU y el cual se describe en la tabla 7.

Tabla 7
Opciones de Generación en GNU Radio

Opciones	Características
WX GUI	Modo gráfico GUI (en inglés, <i>Graphical User Interface</i>), en conjunto con las herramientas de la Biblioteca WX

Continua 

QT GUI	Modo gráfico que utiliza los bloques de QT , tiene menor capacidad y es sencillo en comparación con WX GUI.
No GUI	Se trata de ejecución en consola basada en textos, aquí no podemos utilizar la representación gráfica de datos
Hier Block	Se trata de programación jerárquica, basada en bloques que dicha compilación genera un bloque distinto que aparece en la biblioteca

4.2.3 Definición de variables y Tipo de Datos

Cuando se desarrolla un diagrama de bloque en GNU, siempre se toma en consideración la definición de variables para obtener un flujo más controlado, al momento de crear un nuevo diagrama, la variable que viene por defecto es la de *Sample Rate*, aquella puede ser utilizada y no altera el funcionamiento del código. Las variables tienen como parámetro un ID y un valor que la define, como se indica en la figura 28, estas pueden ser llamadas solo desde bloques de procesamiento y obtener el valor de las variables.

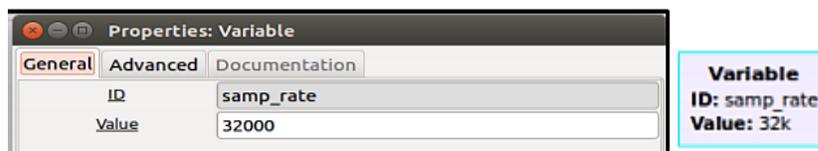


Figura 28 Variable en GNU Radio

Fuente (GNU Radio Companion, 2016)

Existen además las variables del panel de control o conocidas como widgets las cuales tiene estricta relación con la opción de generación que se ha seleccionado, si se tiene como opción seleccionada a QT GUI, las variables de control que se permitirán usar deben pertenecer a este modo de otra manera se genera un error.

El entorno gráfico de GNU provee un sistema de definición de datos de mayor control cuando creamos bloques, los tipos de datos que se manejan en las entradas y salidas de los bloques de procesamiento están relacionados con un color en particular como se observa en la figura 29.

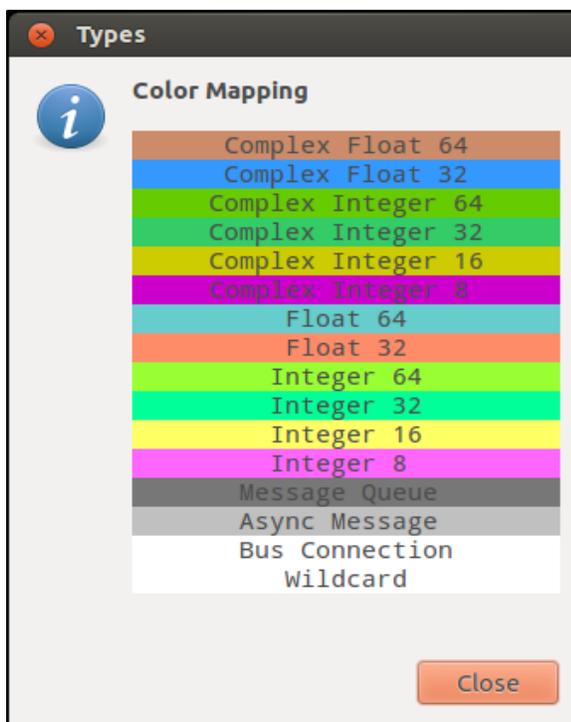


Figura 29 Tipo de datos en GNU Radio

Fuente (GNU Radio Companion, 2016)

4.2.3 Programación y Compilación en GNU Radio

Los diagramas de bloques implementados en GNU Radio se almacenan como archivos con la extensión. *grc* (en inglés, *GNU Radio Companion*), cuando lo compilamos generamos un archivo de Python, que describe en código, las conexiones del diagrama y como librerías a los bloques de procesamiento.

El entorno de programación de GNU está orientado a tres lenguajes como son C++, Python y XML, cuando el usuario programa un bloque para agregar una determinada

funcionalidad a las fuentes de GNU Radio, debe integrar los lenguajes de programación, a estos bloques, que se los conoce como OOT (en inglés, *Out Of Tree*), debido a que no pertenecen a la raíz de diagramas de GNU Radio.

La herramienta en software utilizada para la creación de bloques OOT es *gr-modtool* (GNU Radio Companion, 2017), con ello se puede crear códigos en C++ o Python que describan el procesamiento de la señal banda base en cada bloque, por lo general se usa C++ como lenguaje para la programación de los bloques y Python para describir la conexión y dar el control a los bloques de C++, como se describe en la figura 30.

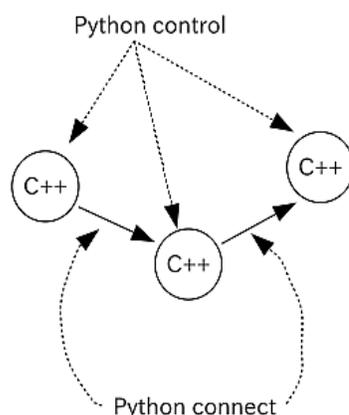


Figura 30 Entorno de programación en GNU Radio

Fuente (Miyano & Wada, 2010)

En cambio, el lenguaje XML es utilizado para describir gráficamente al bloque, aquí se definen la longitud de la entrada y salida del bloque, así como las variables de control o parámetros de entrada que usa cada bloque, que pueden ser definidas por un valor de las variables en GNU Radio (el código debe estar relacionado con el código desarrollado en C++).

4.2.4 Errores Comunes en GNU Radio

Los errores que se presentan en GNU pueden ser por la programación y en la interfaz de usuario, cuando se trabaja en la interfaz los errores comunes se dan por la conexión

indebida de diferentes bloques que manejan distintos tipos y longitud de datos como se observa en la figura 31, este tipo de errores no permiten la compilación ni ejecución del diagrama.

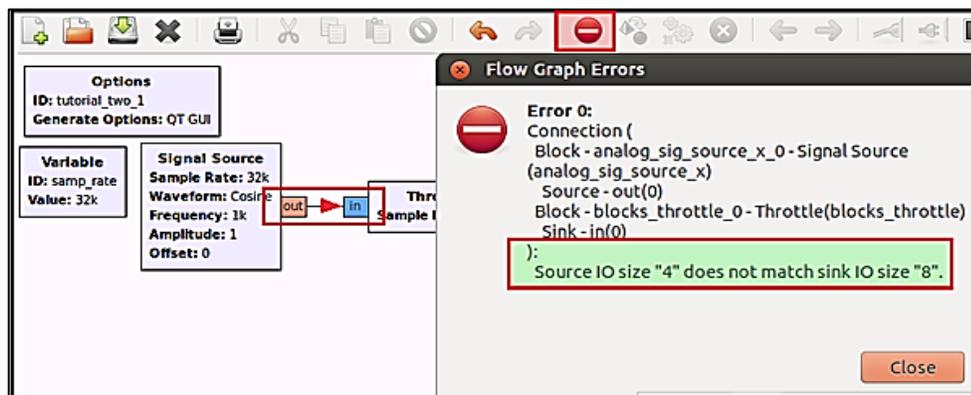


Figura 31 Error de conexión indebida de bloques

Fuente (GNU Radio Companion, 2017)

Otro error es cuando se trata con la opción de generación diferente a los tipos de variables de control, por ejemplo, cuando se configura QT GUI como modo de interfaz de usuario y dentro del diagrama se coloca una variable de tipo WX GUI se genera el siguiente error de la figura 32.

```
Executing: "/home/muniza/Documents/grc_files/gnuradio_tutorials/tutorial2/grc_files/tutorial_two_1.py"
Traceback (most recent call last):
  File "/home/muniza/Documents/grc_files/gnuradio_tutorials/tutorial2/grc_files/tutorial_two_1.py", line 106, in <module>
    tb = tutorial_two_1()
  File "/home/muniza/Documents/grc_files/gnuradio_tutorials/tutorial2/grc_files/tutorial_two_1.py", line 55, in __init__
    self.GetWin(),
  File "/usr/local/lib/python2.7/dist-packages/gnuradio/gr/top_block.py", line 101, in __getattr__
    return getattr(self, tb, name)
AttributeError: 'top_block_sptr' object has no attribute 'GetWin'
>>> Done
```

Figura 32 Error en modo de interfaz de usuario

Fuente (GNU Radio Companion, 2016)

Los errores de programación dependen de la capacidad del usuario para detectarlos y corregirlos durante su diseño. GNU presenta la opción de crear archivos de evaluación y así determinar el correcto funcionamiento de los códigos programados en C++.

Una vez conocido de una manera rápida el entorno de GNU Radio es tiempo de hablar del algoritmo implementado, describir el funcionamiento y programación de los bloques utilizados.

4.3 Algoritmo del Receptor de One-Seg

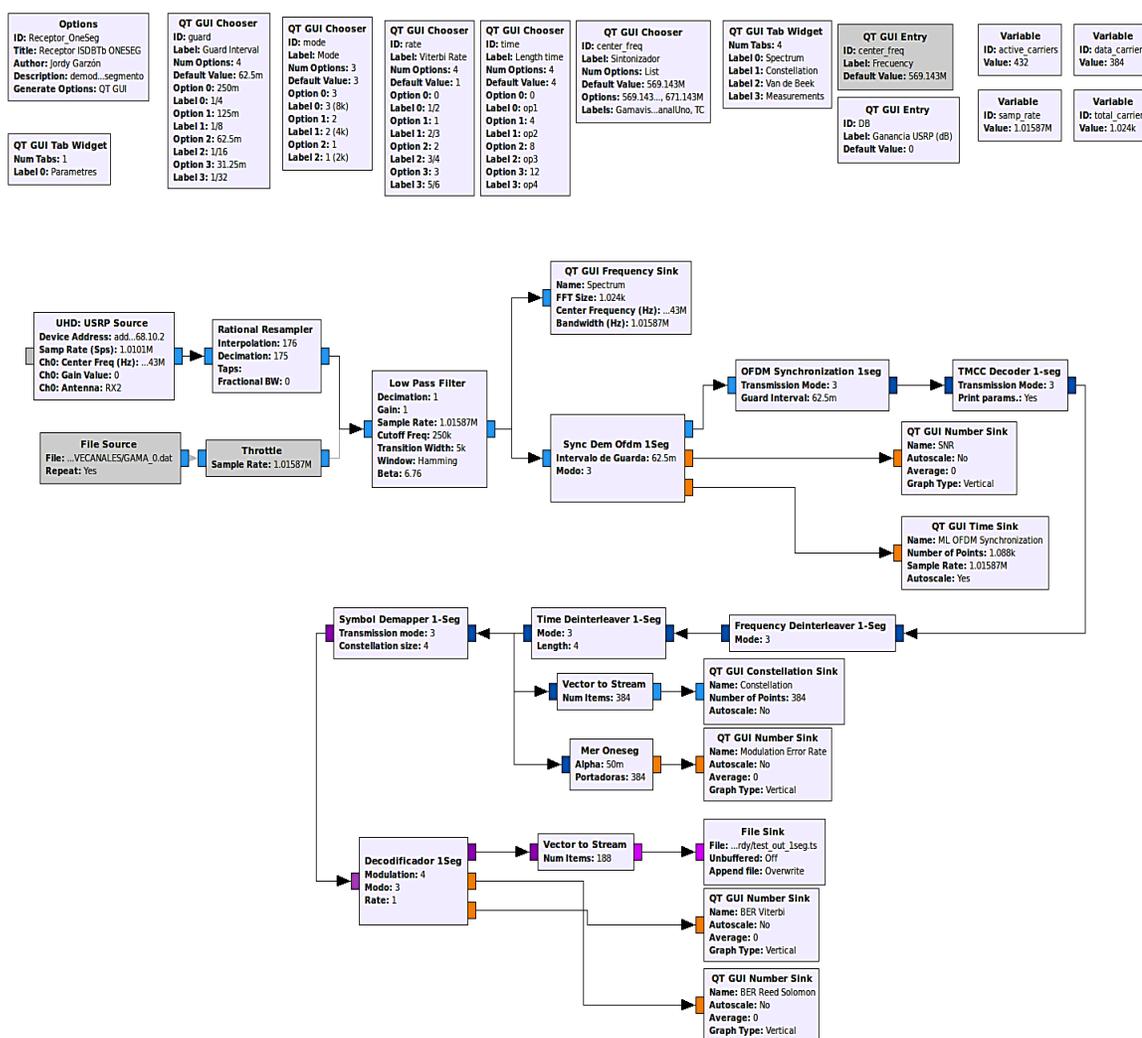


Figura 33 Algoritmo del receptor One-Seg implementado en GNU Radio

En la figura 33, se presentó el diagrama de bloques del receptor de un segmento en GNU Radio, donde se implementó un sistema controlado, que permitió mostrar la señal en línea a una frecuencia determinada y analizar el estándar mediante medidas objetivas de calidad. En él se observan, además, las variables definidas, las variables de control o widgets y los bloques GUI que permiten representar gráficamente la señal en las diferentes etapas de procesamiento.

Como se indicó en capítulo 2, el proyecto utiliza determinados bloques de procesamiento del algoritmo desarrollado por la Universidad de Montevideo en Uruguay, conocido como el módulo *gr-isdbt*, como son *Ofdm_synchronization_Iseg* y el *TMCC Decoder-Iseg*. Estos bloques de procesamiento fuera de árbol OOT, permiten procesar la señal el estándar en el espectro de 6MHz, sin embargo, hay que adaptar el algoritmo para su implementación en el USRP-2920 optimizando la captura de los datos en conjunto con la propuesta de diseño en un panel controlado.

Para contar con estos bloques se coloca la siguiente línea de código en la terminal:

```
git clone https://github.com/git-artes/gr-isdbt.git
```

Esta línea de comando permite descargarse en la raíz del sistema o en una carpeta específica los ficheros necesarios para tener los bloques en la interfaz de GNU. Luego se ingresa a la carpeta descargada y creamos una nueva llamada *build* y se ingresa a ella mediante los siguientes comandos.

```
cd gr-isdbt  
mkdir build  
cd build
```

Una vez en la carpeta procedemos a compilar los ficheros e instalarlos con los siguientes comandos.

```
cmake ../
make && sudo make install
```

Para sistemas Ubuntu es necesario colocar la siguiente instrucción `sudo ldconfig`. Con ello se observa la incorporación de los módulos de ISDB-T en una categoría no definida, como se observa en la figura 34.



Figura 34 Modulo *gr-isdbt* añadido a la librería

Fuente. Propia

En las siguientes secciones se describen cada uno de los bloques que conforman el diagrama del receptor, determinando su funcionalidad, como se lo implementó, sus principales parámetros y su propiedad de desarrollo.

4.3.1 Adquisición de Datos

Mediante el bloque USRP Source controlamos al equipo para la adquisición de los datos por unidad de tiempo, en la tabla 8 se tienen las configuraciones de este bloque.

Tabla 8
Parámetros del Bloque USRP Source

Parámetros	Valores
Dirección IP-USRP	192.168.10.12
Frecuencia	569.143 MHz
Antena	RX2
Frecuencia de muestreo	1.010101MHz
Ganancia	15 dB

En este bloque proveniente del controlador UHD para GNU radio, se colocan la dirección IP que lleva el equipo y la frecuencia del canal de ISDB-Tb. Un punto importante es la frecuencia de muestreo como parámetro del USRP, la idea es colocar la frecuencia de muestreo teórica en receptores de un segmento, pero la SBX no puede generar cualquier tasa, por lo que es necesario un proceso de remuestreo para lograr la frecuencia teórica *One-Seg*, en el anexo 1 se tienen las tasas que puede lograr el equipo.

La frecuencia que se ha colocado debe ser la más cercana posible a la teórica (1.01587MHz), por ende, esta es 1.010101MHz. Luego para aplicar el remuestreo a la señal de entrada, es necesario colocar dos parámetros que representan el valor de un factor de diezmado e interpolación, en la ecuación 13, se observa cómo se obtienen estos valores enteros.

$$x = \frac{1.010101..}{1.015873..} = \frac{\frac{100}{99}}{\frac{64}{63}} = \frac{176}{175} = \frac{\textit{interpolación}}{\textit{diezmado}} \quad (13)$$

Se obtiene entonces un factor de interpolación de 176 y diezmado de 175, con ello se logra que en cada tiempo de símbolo un número de muestras o puntos de factor FFT, por ejemplo, en el modo tres cada 1008useg se capturan 1024 muestras FFT. Sin embargo, este proceso de remuestreo puede ocasionar alertas en la ejecución del diagrama, debido a que se requiere el uso de buffers de la computadora para ir almacenando datos de la señal y seguir con un proceso continuo, pero como la frecuencia de muestreo lograda por el USRP y la teórica no existe tanta diferencia, la alerta se considera despreciable.

Existe un conflicto cuando trabajamos con el USRP-2920 y un enlace Gigabit Ethernet en un sistema particionado, se debe al filtrado de paquetes que en muchos computadores viene configurado por defecto y lo que puede ocasionar es que el *throughput* del enlace disminuya en una magnitud considerable, generando a su vez problemas de sincronización y pérdida de la señal de TV en línea.

Para solucionarlo simplemente hay que aumentar la capacidad en los buffers de memoria del enlace, utilizando los siguientes comandos.

```
sudo sysctl -w net.core.wmem_max=1048576
sudo sysctl -w net.core.rmem_max=50000000
```

Los cuales adaptan el valor necesario a los requerimientos del controlador UHD al máximo, evitando la pérdida de paquetes entre el equipo y el computador. Existe otra forma de fuente de datos dentro del diagrama de bloques presentado, este es a través de *File source* y *Throttle*, estos bloques lo que generan es el envío de datos de una señal pregrabada mediante un diagrama independiente del receptor a la frecuencia de muestreo para *One-Seg*, logrando así la independencia del algoritmo con el equipo.

Esta fuente se utiliza para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo implementado y del panel de control, donde hay que tomar en cuenta que, si estos bloques se encuentran activos, se deben desactivar *UHD USRP Source* y *Rational Resampler*, el proceso contrario es necesario cuando se utilice el equipo.

En la figura 35 se observa el diagrama para grabar una señal de un segmento, donde se incluye el proceso de filtrado, lo adicional es el bloque *file Sink* que almacena la señal en un archivo *.dat*, en la ubicación establecida.

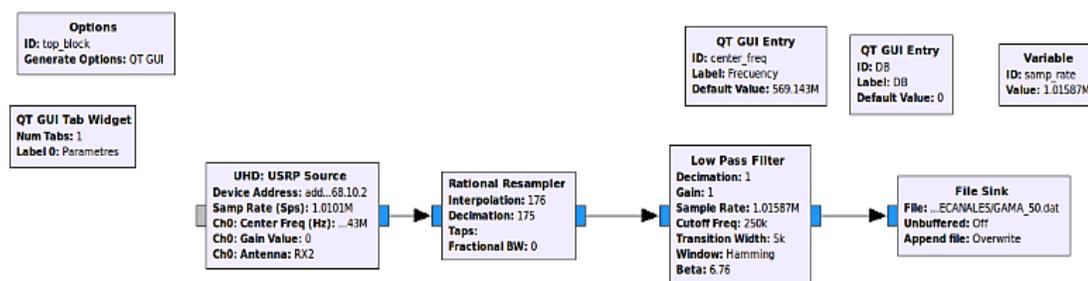


Figura 35 Diagrama para grabar una señal

4.3.2 Filtro

El bloque *Low Pass Filter*, propio de GNU radio, aplica un filtro pasa bajas a la señal en muestras complejas, donde el tamaño de la ventana es de 250 kHz eliminando así

posibles emisiones fuera del servicio de un segmento, en la figura 36 se indican los parámetros de configuración del bloque en mención.



Figura 36 Propiedades del Bloque Low Pass Filter

Fuente. GNU Radio Companion

4.2.3 Sincronización OFDM

El proceso más importante del receptor se encuentra programado en los bloques *SYNC_DEM_OFDM_ISEG* y *Ofdm_synchronization_Iseg*, ambos están destinados a la demodulación ortogonal y a contrarrestar los efectos del sincronismo en tiempo y frecuencia en el sistema OFDM.

El primero se trata de un bloque jerárquico, que fue programado de manera gráfica, esto quiere decir que se utilizaron otros bloques provenientes de la librería, en un diagrama de flujos de procesamiento diferente para generarlo. En el Anexo 2 se observa con más detalle el diagrama de bloques que conforma *SYNC_DEM_OFDM_ISEG*, donde es importante recalcar que cuando se genera un bloque de tipo jerárquico (la opción de generación debe ser de tipo *Hier Block* como se mencionó en la tabla 7), aparecen los bloques que definen el tamaño, tipo de entrada y de salida, estos son *Pad*

Source y *Pad Sink* respectivamente. En cambio, que como parámetros de entrada tiene el modo de operación y el intervalo de guarda.

La principal función consiste en aplicar el algoritmo de máxima verosimilitud de Van de Beek, explicado en una sección anterior, en una ventana de observación de $2N+L$, donde N es el número de muestras del símbolo en un segmento por modo de operación, por ejemplo, de 1024 para el modo de operación 3, en cambio que L es la longitud en muestras en el tiempo del intervalo de guarda, esto permite indicar no solo el tiempo de inicio de un símbolo OFDM, si no también determinar la configuración del modo de operación y el intervalo de guarda del canal antes de la extracción del TMCC.

Otra de sus funcionalidades, es determinar la SNR (en inglés, *Signal to Noise Ratio*) en recepción, el parámetro es una medida de calidad para un proceso fiable y que permite observar la calidad de la señal y sus variaciones en recepción. La última salida de este bloque es la señal en muestras complejas, el algoritmo detecta un pico de inicio de símbolo, el cual no debe variar en el tiempo, manteniendo así el sincronismo de la señal, en el caso de que existiese una variación fuera de los límites indicados en el diagrama, el código debe ser recalculado. Por lo general cuando existe alta pérdida de paquetes o cuando la señal receptada está muy deteriorada por los efectos del canal, este pico tiende a variar abruptamente en el tiempo, indicando así que la señal no será decodificable.

El siguiente bloque *Ofdm_synchronization_Iseg*, propio de *gr-isdbt*, realiza todos los procesos necesarios para convertir a la señal de muestras en el tiempo a portadoras en frecuencia, está constituido por una entrada compleja, las cuales siempre viene en paquetes de 8 muestras, debido al tipo de dato y una salida de longitud igual a las portadoras activas en un segmento, por ejemplo para el modo 3 de operación esta salida sería de 432, donde están conformadas por las portadoras piloto, auxiliares, del TMCC y las de datos y como parámetros de configuración de este bloque tenemos el modo de operación y el respectivo prefijo cíclico.

El bloque antes mencionado pertenece a los módulos de *gr-isdbt*, este permite procesar la señal por etapas, la primera es la de adquisición, la cual calcula el algoritmo de Van de Beek para extraer el símbolo OFDM y estima el error en frecuencia ϵ . Esto

podría parecer como un cálculo redundante, pero no es así, debido a la incorporación del bloque anterior, se evita que *Ofdm_synchronization_1seg* calcule al algoritmo para todas las combinaciones posibles del modo e intervalo de guarda.

Una vez extraída las muestras pertenecientes al símbolo OFDM viene la etapa de seguimiento, que se basa en el conjunto de procesos, descrito en la figura 37. Cuando el error fraccional de frecuencia (ϵ) es elevado, por lo general mayor a la frecuencia del símbolo ($1/T_s$), la corrección realizada por Van de Beek no es suficiente, por lo que es necesario realizar el nuevo ajuste conocido como corrección entera en frecuencia (Δf) (Flores, 2016).

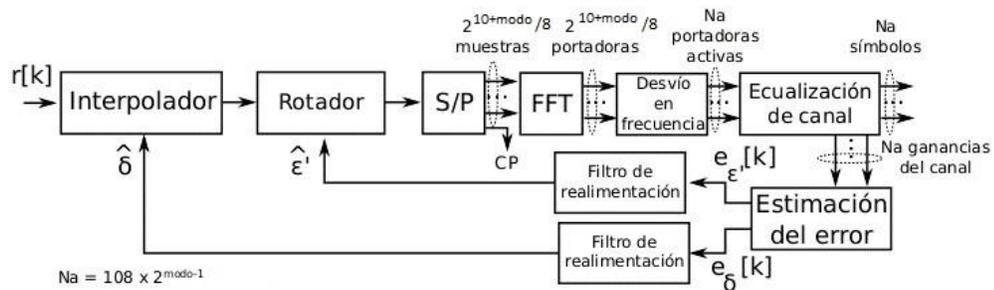


Figura 37 Seguimiento OFDM One-Seg

Fuente (Flores, 2016)

Del estudio realizado por Flores (2016) se afirma que, de manera general este error en frecuencia aún existe, por lo que la etapa de adquisición no logra corregir toda la diferencia en fase en el símbolo extraído apareciendo además el error residual en frecuencia (ϵ'). La frecuencia de muestreo tanto en el transmisor como el receptor no son las mismas aun pasando por el proceso de remuestreo, generando un desfase (δ), este valor más el error residual producen un desfase, aumentando el ICI y generando una fase variable en el tiempo para cada portadora.

Del bloque de seguimiento, se puede acotar que proviene después de la etapa de adquisición, el interpolador propone la etapa de remuestro obteniendo las muestras como si la frecuencia lograda por el equipo fuese la ideal, es decir corrige (δ), posterior el

rotador realiza un ajuste lineal de los errores en frecuencia (ϵ , ϵ' y Δf), luego calcula la FFT para convertir las muestras en portadoras.

Cuando la FFT es calculada no se puede determinar con exactitud la cantidad de ceros a la izquierda y a la derecha insertada por el proceso Zero-Padding en el transmisor, esto es ocasionado por el error de frecuencia entera, para disminuirlo, hay que estimar este valor de un proceso post FFT y así extraer correctamente las portadoras nulas insertadas en el transmisor (Contrera & Ferrer, 2016).

El proceso de ecualización de canal realiza la rotación de las portadoras en el receptor estimando la ganancia del canal como se explicó anteriormente. En este punto el bloque separa las portadoras de datos por segmento del resto, donde tanto las portadoras TMCC como las SP son utilizadas para volver a calcular el error residual y entero en frecuencia para corregirlas cerrando así el circuito tipo PLL.

4.2.4 Decodificador TMCC

Permite extraer la información contenida de los paquetes IIP insertada por la multiplexación MPEG-2 en el transmisor, con esta información se configuran los bloques restantes del proceso, como el desentrelazador en tiempo y frecuencia, el decodificador de Viterbi, etc. Como entrada tiene las portadoras activas por segmento y como salida solo las de datos, en cambio que, como parámetros de configuración, necesita el modo de operación y una solicitud de impresión del TMCC, esto emite un mensaje en la terminal de GNU Radio con información sobre la estructura de las capas del canal ISDB-Tb.

Por lo general las portadoras TMCC llevan la misma información moduladas en DBPSK, esto quiere decir que así tratemos solo con el segmento *One-Seg*, se podrá conocer la configuración completa del sistema de transmisión. La TMCC está constituida por 204 bits, este coincide con los 204 símbolos de cada cuadro OFDM, pero para su correcta extracción es necesario detectar su inicio, proceso conocido como la sincronización TMCC. Este consiste en demodular las portadoras TMCC que vienen en posiciones fijas dentro del segmento y dependiente del modo de operación, estas deben

ser comparadas con las secuencias de inicio $w_0 = 0011010111101110$ y $w_1 = 1100101000010001$ según sea el cuadro par o impar.

Una vez detectado el inicio se genera el buffer de almacenamiento de los 204 bit, donde 203 bits son de datos y uno para modulación diferencial, el cual también indica el inicio del cuadro OFDM, donde finalmente se extrae la información del TMCC como lo determina la norma. Este bloque es propio del módulo de *gr-isdbt*, fue debidamente utilizado para optimizar el sistema de recepción controlado.

4.2.5 Desentrelazamiento en Tiempo y Frecuencia

Tanto *Time Deinterleaver 1-Seg* y *Frequency Deinterleaver 1Seg* están destinados para volver las posiciones iniciales a las portadoras, están programados con la misma longitud para la entrada y salida, esta es la cantidad de portadoras de datos en un segmento, para el bloque de la frecuencia solo se requiere el modo de operación como parámetro de control. En cambio, para el desentrelazamiento en tiempo es necesario el modo y la longitud de entrelazado que varía de acuerdo a el modo de operación, el cual es ya conocido, fueron una edición de los entrelazadores de GNU Radio.

4.2.6 Demapeo de Símbolos

Convierte la señal en banda base receptada a secuencias de bits, su entrada maneja la longitud de las portadoras de datos y su salida es de tipo entero de igual longitud. Como parámetros de configuración requiere el modo de operación y el número de símbolos de modulación, en este caso como siempre es QPSK, su valor fijo es de 4.

4.2.7 Decodificador One-Seg

En él se realiza el conjunto de procesos no tan relevantes y estandarizados en ISDB-Tb como el desentrelazador de bit y de byte, el decodificador de Viterbi, Reed Solomon y el dispersor de Energía. Fue diseñado en modo jerárquico, que cuenta con una entrada

de longitud igual a las portadoras de datos en un segmento dependiendo del modo de operación y con tres salidas, la primera representa los bytes del paquete de *Transport Stream*, los cuales son agrupados en tramas de 188 bytes. Las siguientes salidas pertenecen al BER de Viterbi y Reed Solomon respectivamente en escala logarítmica. Los parámetros de configuración o de control necesarios son el modo de operación, el mapeo de símbolos y la tasa de código expresada en opciones es decir si quiero una tasa de código de $\frac{1}{2}$ su valor será de 0, si se requiere de $\frac{2}{3}$ su valor será de 1, se lo hace así debido a las limitaciones que se presentan con el uso de datos fraccionarios.

4.2.8 MER One-Seg

El Bloque destinado al cálculo del MER, tomando en cuenta parámetro de entrada como el número de portadores de datos en un segmento y un valor de *alpha* que debe estar entre 0 y 1, dicho parámetro determina el índice del promedio de los valores del MER.

La modulación siempre es QPSK, por ende, no se requiere algún parámetro de configuración que la relacione. Los valores del MER representan la principal medida de calidad del sistema, el bloque se desarrolló a través de Python mostrando mejoras al disminuir el costo computacional.

4.2.9 Ejecución del algoritmo

En resumen, el diagrama funciona de la siguiente manera, cuando se ejecuta el código el USRP con la dirección configurada adquiere las muestras de la señal a la frecuencia de muestreo permitida por el equipo, donde se aplica el proceso de remuestreo para lograr la frecuencia teórica, dichas muestras son filtradas para posteriormente corregir los efectos que se presentan en la señal, mencionados en las secciones 2.3 y 3.3. Luego se aplica la FFT obteniendo las portadoras de un segmento todo bajo el proceso del seguimiento OFDM para correcciones de sincronismo y ecualización de canal.

El siguiente paso es la decodificación TMCC que indica las características de la señal transmitida obteniendo las portadoras de datos de un segmento e imprimiendo la información del análisis del TMCC, luego aplica los entrelazamientos en tiempo y frecuencia, para posterior a eso, realizar el demapeo de símbolos para *One-Seg* y con ello la decodificación que incluyen procesos como Viterbi y Reed Solomon, capturando los bytes en un archivo *ts*. En paralelo se ejecutan los procesos para las medidas de calidad para el cálculo del MER, se lo hace con las portadoras de datos que entrega el decodificador TMCC, el SNR en la etapa de sincronización y el BER de Viterbi y Reed Solomon en la etapa de decodificación.

Con la interfaz del sistema controlado, el primer paso es determinar el modo de operación e intervalo de guarda del canal, a través de Van de Beek, observando los picos de inicio del símbolo de OFDM, si la configuración es correcta, se obtiene la información del TMCC y esto sirve para configurar los demás bloques de procesamiento como los entrelazadores, el demapeador y el decodificador *One-Seg*, si la señal se adquiere y se observa sin ningún problema es porque se encuentra dentro de los niveles de recepción del algoritmo, lo cual se corrobora a través de la observación del espectro, la constelación y las medidas de calidad.

Como el código fuente de todos los bloques que conforman el diagrama es muy extenso para representarlo en el documento, se ha subido todo el código para observar las aportaciones y modificaciones realizadas al repositorio público en el siguiente link: <https://github.com/Jordyggg/gr-oneseg.git>. En el siguiente capítulo se detallan más a fondo la ejecución del código y el análisis de resultados.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describe el funcionamiento del receptor implementado, representando la ejecución del algoritmo y sobre todo evaluando su eficiencia a través de medidas objetivas. El sistema controlado permite interactuar entre los diversos parámetros de configuración y los distintos tipos de canales ISDB-Tb en el área de cobertura.

5.1 Recepción de Video

La sintonización del canal digital fue implementada con el uso de variables de entrada tipo QT GUI. En la tabla 9, se tienen la frecuencia de la operación de los principales canales en el país.

Tabla 9

Frecuencia de los canales nacionales

Canal	Frecuencia (MHz)
Gamavisión	569.143
Teleamazonas	581.143
Ecuavisa	605.143
Televisión	593.143
Canal Uno	659.143
TC	671.143

Para recibir frecuencias distintas a las mencionadas, el panel permite la desactivación de la variable de sintonización, logrando habilitar otra variable de entrada con el mismo identificador que controle el ingreso de la frecuencia del USRP como se observa en la

figura 38. Sin embargo, se debe detener la ejecución del algoritmo antes de deshabilitar la variable.

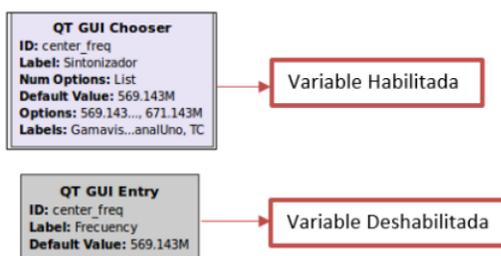


Figura 38 Activación y desactivación de variables

Fuente. GNU Radio Companion

Para observar el canal en línea primero es necesario encontrar el modo de operación e intervalo de guarda del canal, para ello el algoritmo de máxima verosimilitud es utilizado. El código funciona de la siguiente manera, cuando recién ejecutemos el programa y se haya sintonizado la frecuencia de un canal, se debe observar que los picos estén bien definidos como se observa en la figura 39.

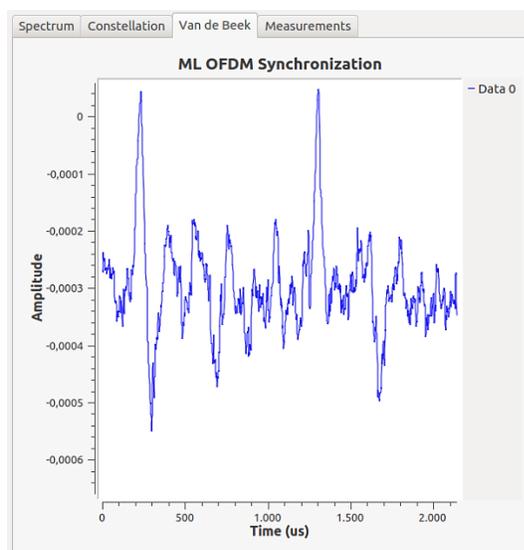


Figura 39 Picos que indican el inicio de símbolo OFDM

Fuente. GNU Radio Companion

En cambio, cuando configuramos erróneamente el prefijo cíclico en el modo de operación correcto se tiene la gráfica de la figura 40.

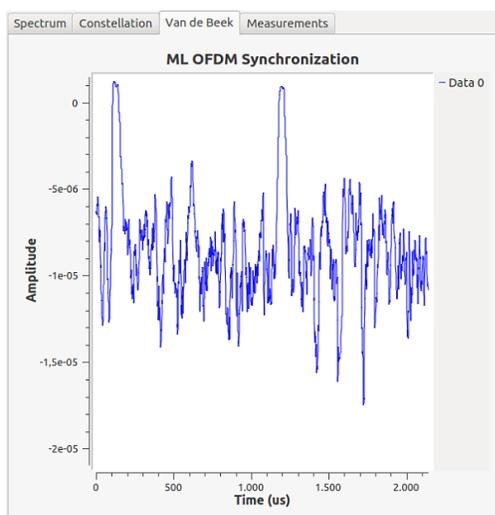


Figura 40 Mesetas formadas por error del CP

Fuente GNU Radio Companion

Si la configuración del modo de operación es errónea se obtiene una señal tipo ruido blanco, como se indica la figura 41.

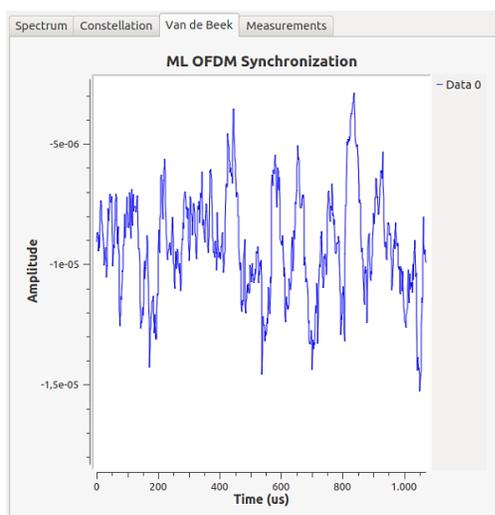


Figura 41 Gráfica ocasionada por error del Modo

Fuente. GNU Radio Companion

Una vez definida las características del canal, el algoritmo debe ser capaz de imprimir la estructura del TMCC en la terminal de GNU Radio, siempre y cuando la señal no se encuentre realmente afectada por el canal inalámbrico, en la figura 42, se tiene el análisis del TMCC del canal Gamavisión y el código QR que hacer referencia a la ejecución del proceso.

```

TMCC ANALYSIS
-----
Layer : A
Carrier Modulation Scheme : QPSK
Convolutional Code Rate : 2/3
Time Interleaving Length : 16(mode 1), 8(mode 2), 4(mode 3)
Number of segments for this layer : 1
-----
Layer : B
Carrier Modulation Scheme : 64QAM
Convolutional Code Rate : 3/4
Time Interleaving Length : 8(mode 1), 4(mode 2), 2(mode 3)
Number of segments for this layer : 12
-----
Layer : C
Carrier Modulation Scheme : UNUSED
Convolutional Code Rate : UNUSED
Time Interleaving Length : UNUSED
Number of segments for this layer : UNUSED
-----

```



Figura 42 Impresión del TMCC

Fuente: GNU Radio Companion

Para observar el video en línea se propone el uso de software externo como *ffmpeg* o Mplayer. Los paquetes de TS que se receiptan en tiempo real deben estar concatenados con el video en *ffmpeg*, para ello es necesario crear un archivo tipo FIFO y de extensión *.ts* y enlazar su ubicación al Bloque *File Sink* del diagrama de receptor como se indica en la figura 43, también se tiene el código QR que explica el proceso.

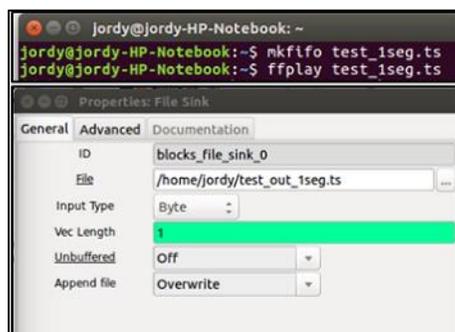


Figura 43 Reproducción del video con *ffmpeg*

Fuente. GNU Radio Companion

En la figura 44, se observa la reproducción del video del canal Gamavisión, además de la constelación de la señal y la resolución del video de *One-Seg*. Para entender más a fondo el proceso y la descripción del algoritmo se agrega el código QR.

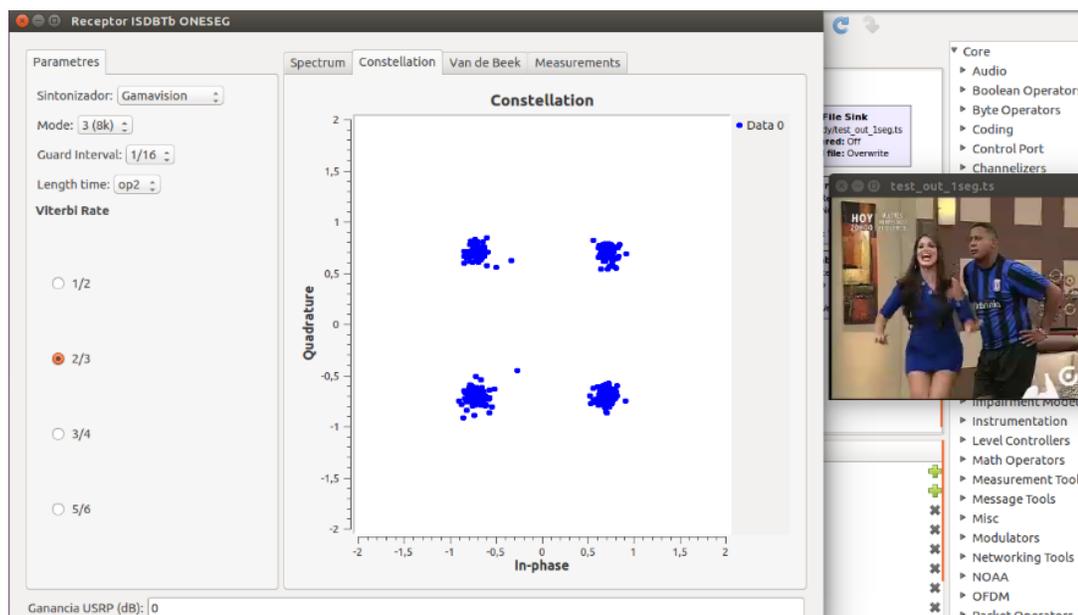


Figura 44 Ejecución del Receptor *One-Seg*

Fuente GNU Radio Companion

5.2 Análisis de la señal *One-Seg*

Las medidas de calidad tomadas en cuenta para el receptor de un segmento son el MER, la SNR y el BER de Viterbi y Reed Solomon, se han excluido al EVM (en inglés,

Vector Magnitude of Error) pese a ser una representación vectorial, esta medida es similar al MER, de hecho, una se puede calcular con la otra y viceversa, pero para evitar la sobrecarga en el diagrama de bloques del receptor se ha decidido excluirlo.

Las medidas tomadas varían en función de la potencia de recepción en un intervalo soportado por el USRP, cuyo valor máximo se logra gracias a la máxima ganancia del USRP en dB, estas escalas se irán variando cada 5 dB de la Ganancia soportada por el equipo. El intervalo de la potencia de recepción va desde los -100 hasta -70 dB, la diferencia es pequeña debido a que se trabaja con señales de un segmento con modulación QPSK robusta y en valores muy óptimos de recepción no se notará una diferencia.

En la figura 45, se muestra como varía el MER en función de la potencia de recepción de la señal de un segmento o del servicio en la capa A, es importante indicar esto ya que existe el MER por diferentes capas y un MER total.

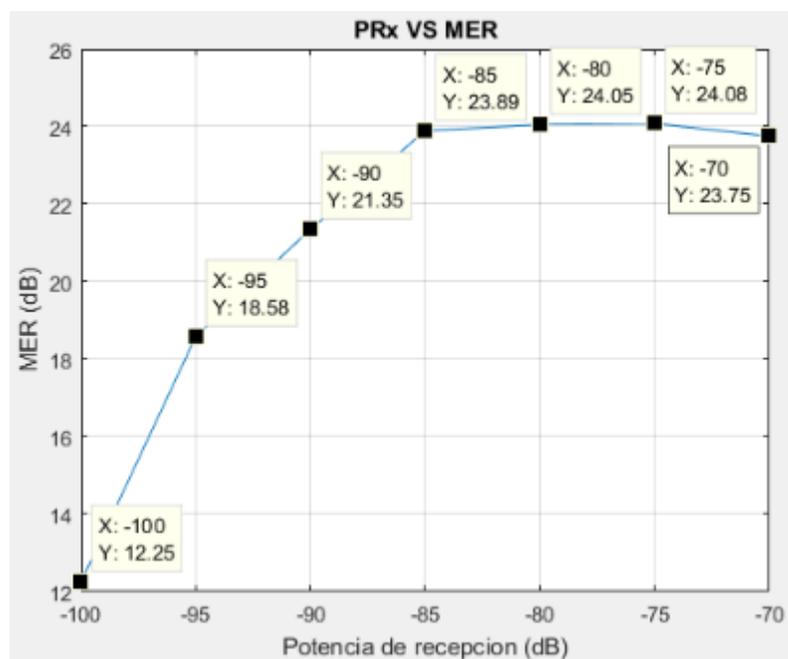


Figura 45 MER vs Potencia de Recepción del canal Gamavisión

Para todos estos valores la señal fue receptada con éxito, variando en la calidad de imagen y audio, a medida que aumentaba el MER. Según la normativa del ETSI

(INATEL, 2016), los valores mínimos experimentales del MER para que la señal de *One-Seg* sea recuperable rodean los 13 dB, algo muy cercano a la medida tomada por el receptor en su potencia más baja.

Se observa que para valores comprendidos entre -100 y -95 dB el cambio del MER es abrupto, lo que indica la robustez de la señal frente a los fenómenos del canal inalámbrico. En este punto podríamos determinar la sensibilidad óptima del algoritmo implementado.

Cuando la señal en recepción toma el valor máximo se observó que el MER descendió, esto puede ser efecto de la ganancia máxima del USRP (la cual realmente es 31.5 dB), dado que para llegar a este valor no solo se aumenta la potencia de la señal si no también se aumenta del ruido

La relación señal a ruido no sufre muchos cambios cuando se incrementa la potencia de recepción como se observa en la figura 46 en el intervalo de variación de la potencia en recepción de señal de 30 dB, solo se incrementa la relación señal a ruido en 1.5 dB, lo que indica que este parámetro no refleja tanta confiabilidad como el MER, recordando además que se están recuperando señales QPSK.

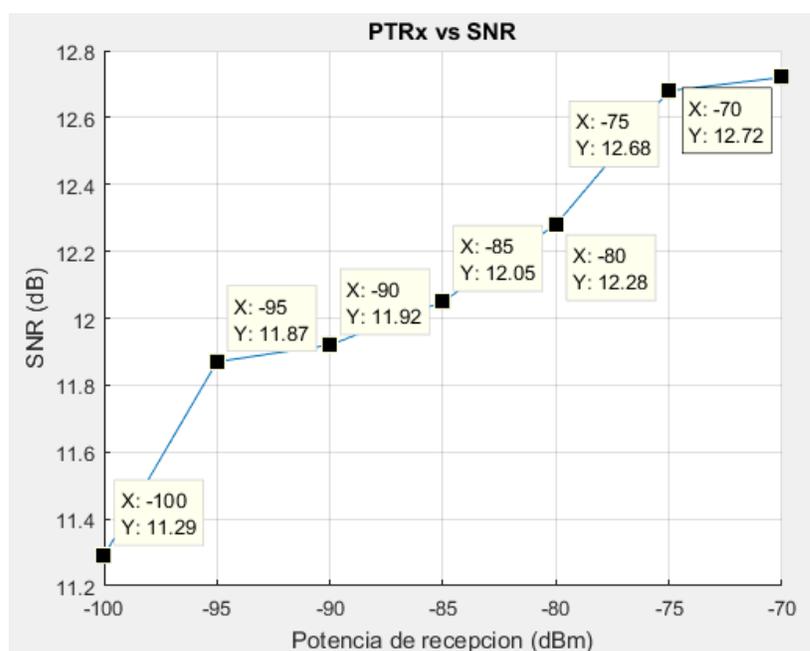


Figura 46 SNR vs Potencia de Recepción de Gamavisión

Los valores medidos del BER de Viterbi en escala logarítmica que se muestran en la figura 47, indican que a medida que la señal mejora el decodificador de Viterbi detecta y corrige menos errores, esto se traduce en la mejora en la calidad de imagen y audio de Gamavisión. Para este resultado cuando el USRP alcanza su ganancia máxima, se tiene que el decodificador detecta menos errores, pese haber disminuido el MER en este punto, lo cual indica que puede existir influencia aun por la pérdida de paquetes o habrá que revisar el algoritmo y su relación.

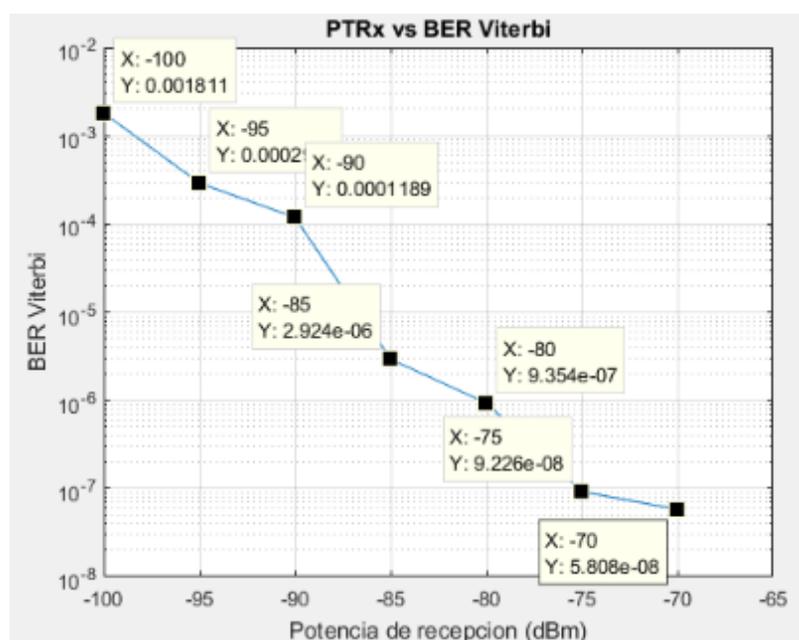


Figura 47 BER Viterbi vs Potencia de Recepción de Gamavisión

En la figura 48, muestra el BER de Reed Solomon, al igual que Viterbi este detecta menos errores cuando la recepción mejora, pero el resultado es interesante comparándolo con las medidas de decodificador de Viterbi, es que este tiende a disminuir más rápido que el de Reed Solomon, este patrón indica que pese a que Viterbi con un FEC de $\frac{2}{3}$ ya no detecta más errores estos aún siguen existiendo, concluyendo la importancia del algoritmo corrector a nivel de bytes.

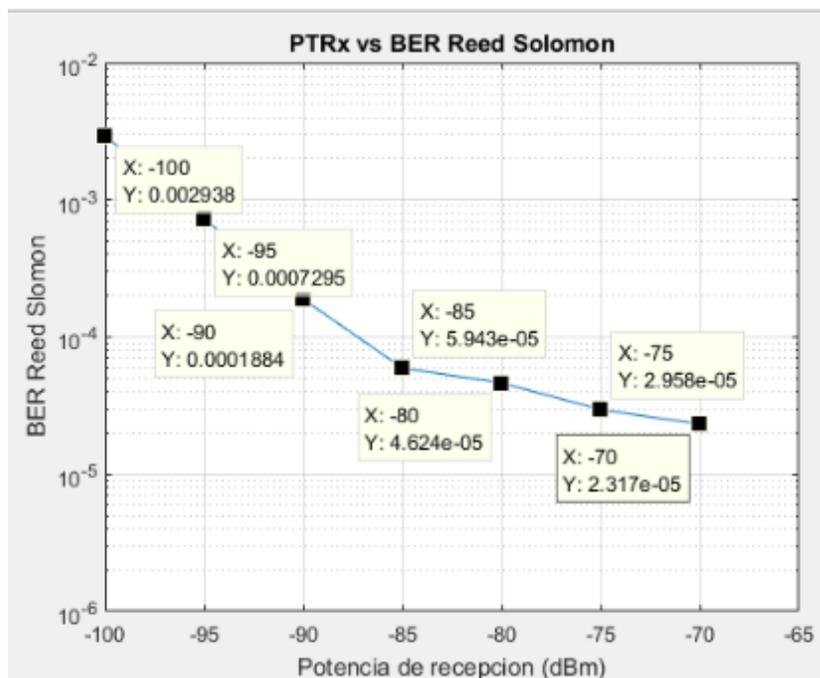


Figura 48 BER Reed Solomon vs Potencia de Recepción de Gamavisión

Cuando ya se han tomado las medidas es importante indicar que la implementación imprime mensajes en el terminal de GNU Radio que indican ciertas dificultades que se generan en SDR, por ejemplo, cuando la pérdida de paquetes es alta o cuando la señal receptada viene muy deteriorada por los efectos del canal se obtiene los mensajes de la figura 49.

```

TMCC OK
OFDM_SYNCHRO: peak at border! peak 0,000418, avg_max 0,000418, avg_min -0,004386,
peak_index: 15
OFDM_SYNCHRO: peak at border! peak 0,000409, avg_max 0,000415, avg_min -0,004430,
peak_index: 15
OFDM_SYNCHRO: peak at border! peak 0,000281, avg_max 0,000291, avg_min -0,003061,
peak_index: 15

```

Figura 49 Mensaje de alerta error de sincronismo

Fuente. GNU Radio Companion

El mensaje emitido por el bloque *ofdm Synchronization Iseg*, indica que el algoritmo no encuentra el valor del pico dentro de un promedio permitido o calculado previamente,

esto quiere decir que la señal presenta problemas y no podremos determinar el inicio del símbolo mientras no se mejore la calidad de la señal, cuando sucede esto, el algoritmo de máxima verosimilitud vuelve a ser calculado. Generalmente se da el caso de que se pierde el sincronismo en la señal pese a que se tiene una recepción considerada como óptima, en el instante en el que algoritmo detecta el problema o imprime el mensaje esto varía abruptamente las medidas de calidad tomadas como si fueran picos erróneos en la medición perdiendo así estabilidad, esto siempre sucederá cuando la pérdida de paquetes es elevada y no se corrigió adecuadamente la configuración de los buffers de memoria del enlace, como se indicó en la sección 4.2.1.

5.3 Análisis de Constelaciones

El sistema implementado, tiene la funcionalidad de mostrar las constelaciones en recepción, pertenecientes a las portadoras de datos, aparte el panel de control diseñado permite observar en tiempo real como varían las constelaciones cuando la señal va mejorando.

En la figura 50 se observa que a medida que la señal mejora, los efectos del canal inalámbrico y las no idealidades del Radio Definido por software afectan menos a las portadoras de datos. Cuando la señal mejora en 5 dB desde el inicio de su captura alcanzando una potencia de recepción de -95 dBm, la mejora es absoluta y es el intervalo de potencia en la que se observa de mejor manera la robustez de la señal frente al ruido y la eficiencia del receptor implementado.

Otro resultado que se analizó es que a partir de los -90dBm de la señal en recepción, las constelaciones no varían en gran magnitud, así mismo lo hace el MER medido. En cambio, cuando se otorga la ganancia máxima al USRP el valor del MER desciende, de esa manera se observa en la constelación para esa potencia de recepción el resultado del efecto nocivo.

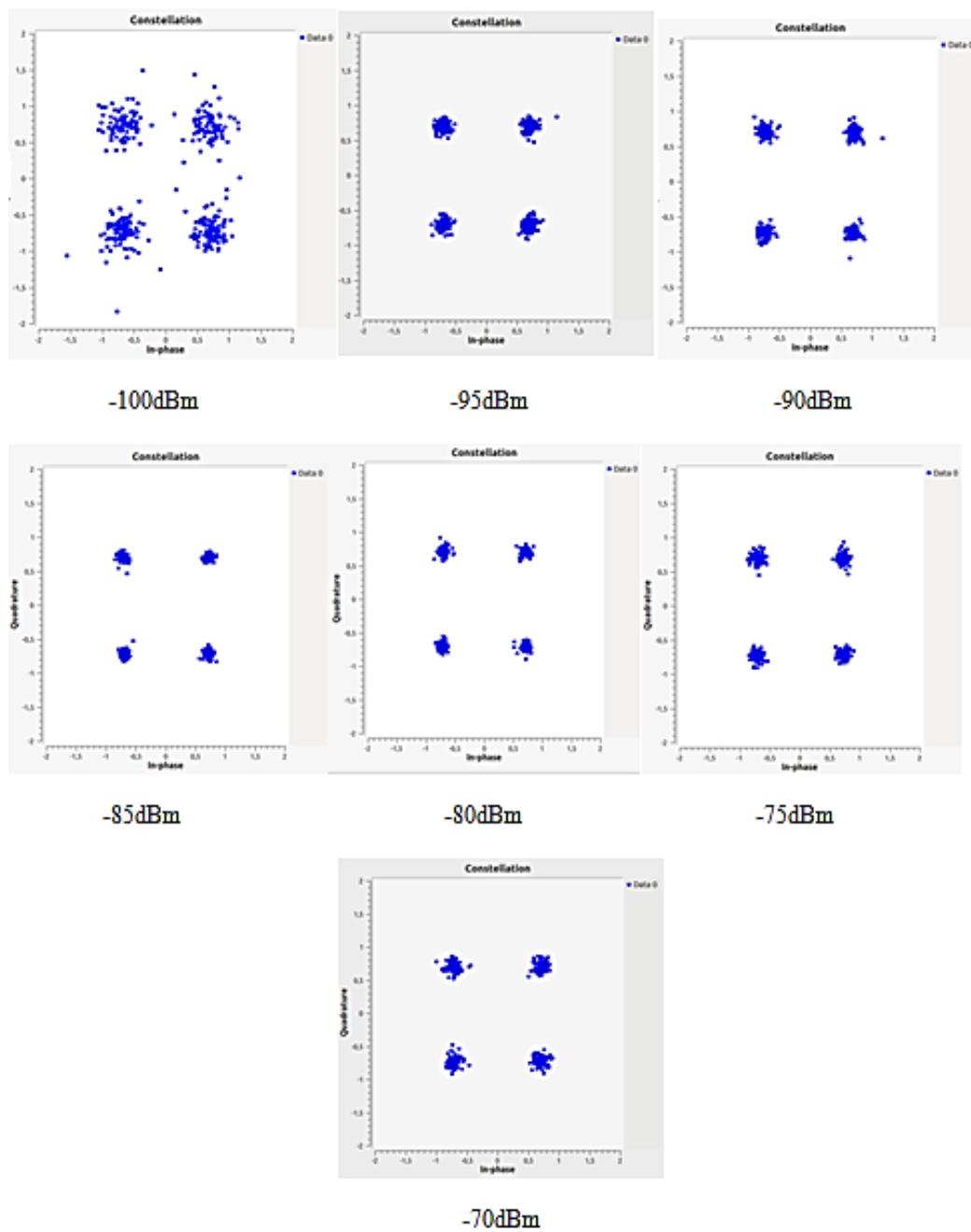


Figura 50 Constelaciones obtenidas con el receptor de un Segmento

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones

Se concluyó mediante el análisis de las características físicas del USRP-2920, que este es un equipo de última generación que presentan un sin número de facultades para diseñar sistemas de recepción en línea y aplicaciones que requieran tasas de datos elevadas como el receptor *One-Seg*.

Se analizó las funcionalidades de los lenguajes de programación soportados por el equipo NI-USRP 2920, en base a criterios experimentales y trabajos relacionados indicados en el estado del arte para determinar el firmware de desarrollo más indicado, concluyendo que la mejor opción es GNU Radio principalmente porque consume menos recursos y es ideal para aplicaciones en tiempo real, además que dentro de su librería cuenta con bloques de procesamiento basados en los algoritmos de recepción, que fueron utilizados y optimizados en la aplicación.

El receptor parcial implementado adquiere la señal a una frecuencia de muestreo 8 veces menor a la frecuencia de la FFT, la teórica para receptores ISDB-Tb, esto permitió obtener mejores resultados que otros receptores, como disminuir los errores de sincronismo en tiempo y frecuencia, reducir el costo computacional mejorando la reproducción en vivo del audio y video, así como disminuir la tasa de datos entre el USRP y el computador, todo esto permite al algoritmo decodificar señales por encima de los -100 dBm.

Con la idea de optimizar la sincronización OFDM de los bloques raíces de GNU y a las aportaciones de externos como *gr-isdbt*, se diseñó a *SYNC_DEM_OFDM_ISEG* el cual permitió obtener un mejor control del diagrama de recepción, a través del uso del algoritmo de Van de Beek se logró visualizar los picos de inicio de símbolo OFDM, detectando así el modo de operación e intervalo de guarda del canal ISDB-Tb, sin la

necesidad de la decodificación del TMCC hasta este punto y de detener la ejecución del programa para configurar el resto de los bloques.

Dentro del diagrama de procesamiento en GNU Radio se presentó el bloque llamado *DECODER_1seg* gracias a esto se realizaron los distintos procesos de la decodificación como el desentrelazado de bit y byte, Viterbi y Reed Solomon, etc en un algoritmo en general más reducido, logrando así un sistema más controlado que permita configurar de manera dinámica los parámetros del TMCC necesarios para la recepción de la señal como la tasa de código, el modo de operación.

Ante los valores alcanzados por las medidas de calidad del receptor de un segmento, se concluye que el sistema implementado es fiable, cuando una señal receptada este por encima de los 13 dB de MER el video no presentará problemas para la reproducción en tiempo real.

Se concluye también que para valores del SNR mayores a los 12 dB la señal del canal no presenta problemas en la recepción del video, en cambio que para valores del BER de Viterbi menores a 2×10^{-4} y del BER de Reed Solomon menores a 7.3×10^{-4} la señal es considerada como nítida y no generará conflictos en la recepción.

El receptor implementado representa un sistema fiable y eficaz que sirve para decodificar las señales de un segmento, incorporando los conceptos de ISDB-Tb y añadiendo algoritmos matemático robustos basados en OFDM para combatir los errores de sincronización del sistema.

El sistema implementado provee la representación de las constelaciones de manera dinámica y controlada, aun cambiando constantemente los parámetros de recepción, se observa continuamente la constelación de cada canal, lo que lo convierte en un sistema controlado frente a las variaciones de la configuración de la señal, manteniendo una fuerte relación entre las medidas de calidad y la potencia de recepción.

Comparando las constelaciones obtenidas con los parámetros objetivos de calidad, se concluye que al igual que se presente un cambio drástico del MER, de la misma manera se lo observó en la constelación para cuando la señal pasa de -100 dB a -95 dB.

Comercialmente el USRP representa una inversión costosa, para la implementación de un receptor, sin embargo, el potencial de esta tecnología en el análisis de una señal de

televisión digital o cualquier otra de tecnología inalámbrica, justifican su gasto, ya que con el equipo y la elaboración de códigos robustos se pueden implementar sistemas de mediciones y control en todas las etapas, de igual o mejor rendimiento que aquellos que se encuentran en equipos analizadores de mayor costo, diseño cerrado y poco versátiles.

6.2 Recomendaciones

Cuando se trabaja con los USRP es importante llevar a cabo un estudio previo del hardware antes de realizar un algoritmo, por ende, se recomienda realizar una investigación del equipo y relacionarse con su estructura para determinar ciertas características o factibilidades que podrían influenciar en el desarrollo de una aplicación SDR.

Es indispensable para el diseño de aplicaciones o receptores en línea, tomar en consideración el mejor sistema de comunicación entre el USRP-2920 y el computador, esto es utilizar un cable Ethernet de mejor categoría y si se cuenta con los recursos necesario siempre trabajar con un computador que posea un puerto Gigabit Ethernet para evitar el menor número de pérdidas de paquetes en el enlace.

El receptor de *One-Seg* implementado está destinado a la recepción de tramas de *Transport Stream* que permita observar la señal en vivo de los canales de TV ISDB-Tb como recomendación es importante trabajar en zonas de cobertura o laboratorios de trabajo con el fin de evitar emisiones espurias que complicarían el proceso de recepción.

Cuando se trabaja en GNU Radio con aplicaciones que requieran una frecuencia de muestreo que no puede ser exactamente alcanzada por la tarjeta hija del USRP como en el caso del receptor de *One-Seg*, es necesario la utilización del bloques de remuestreo o en GNU el Rational Resampler, la principal recomendación es siempre configurar valores enteros para los parámetros de interpolación y diezmado, esto hace que no exista mucha diferencia entre la frecuencia lograda por el equipo y la obtenida por el proceso de remuestreo reduciendo además el costo computacional y el uso de *buffers* de memoria.

Las medidas de calidad determinadas por el algoritmo del receptor en la banda angosta pueden variar, cuando la señal receptada presenta niveles bajos de potencia, pese a que el video se esté reproduciendo en baja calidad, los valores del MER, el SNR y el BER pueden estar variando en pequeños instantes de tiempo, esto es debido a que los cálculos se hacen cada símbolo OFDM adquirido y cuando la señal lleva mucho ruido pierde la sincronización afectando a las medidas pero no en gran magnitud al video, perdiendo fidelidad del sistema de medición, por ende se recomienda descartar aquellas medidas o a aquellas señales que varíen constantemente o en lo posible aumentar la ganancia en la recepción, ya que es un indicativo de la baja calidad de la señal.

Por lo general cuando se trabaja con *ffmpeg*, la recepción de video puede verse afectada porque el software externo no suele soportar la reproducción en línea durante mucho tiempo y es totalmente dependiente de la capacidad del hardware del computador a utilizar, dentro de los efectos nocivos que afectan al algoritmo están la pérdida del video, la incapacidad de no cambiar de canales, ni de parámetros de configuración, perdiendo así la eficiencia del panel de control, la recomendación en caso de trabajar con computadores limitados sería el uso de software como MPlayer, VLC o en tal caso trabajar con señales guardadas.

6.3 Trabajos Futuros

Como punto de partida para trabajos relacionados en televisión digital, se menciona al receptor One-Seg de aplicaciones interactivas, el cual serviría para analizar la eficiencia del sistema broadcasting de transmisión de los canales nacionales cuando emitan aplicaciones que interactúen con los usuarios de servicios móviles y determinar además las características mínimas de la señal en recepción para su correcta decodificación a través de medidas objetivas.

A partir del receptor de One-Seg implementado podría diseñarse el receptor de banda ancha ISDB-Tb o receptor de Full-Seg, tomando en consideración la alta tasa de comunicación entre el equipo y la computadora, así como el alto costo computacional.

El sistema digital de transmisión de señales de TV en el país, se encuentra orientado a los sistemas de alerta temprana o sistemas de emergencia, por ende, una aplicación interesante en el campo es un receptor EWBS (en inglés, *Emergency Warning Broadcast System*), el sistema de emergencia de ISDB-Tb resulta ser de gran utilidad en el país e involucraría además el diseño de un algoritmo similar al receptor de aplicaciones interactivas.

REFERENCIAS

- ABNT 15601. (2007). *Televisión digital terrestre Transmisores*. Recuperado el 01 de octubre de 2017, de ABNT NBR NORMA BRASILEÑA: gingacdn.lavid.ufpb.br/.../ABNTNBR15601_2007Vc_2008.pdf
- ABNT 15604. (2007). *Televisión digital terrestre Receptores*. Recuperado el 01 de octubre de 2017, de ABNT NBR NORMA BRASILEÑA: gingacdn.lavid.ufpb.br/.../ABNTNBR15604_2007Vc_2008.pdf
- Aguayo, C. (2001). *Modulación multiportadora adaptativa para canales selectivos en frecuencia con desvanecimiento*. Tesis Doctoral , UNIVERSIDAD DE MÁLAGA . Recuperado el 12 de noviembre de 2017, de http://webpersonal.uma.es/de/mcat/index_files/Tesis%20Aguayo.pdf
- Anónimo. (2008). *Modulación OFDM*. Recuperado el 16 de octubre de 2017, de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11244/fichero/Volumen+1%252F5_MODULACION_OFDM.pdf
- Anónimo. (2012). *18 Herramientas para programar en GNU/Linux*. Recuperado el 02 de noviembre de 2017, de <https://blog.desdelinux.net/18-herramientas-para-programar-en-gnulinux/>
- Anónimo. (2016). *Sources of Error in IQ Based RF Signal Generation*. Recuperado el 02 de noviembre de 2017, de NI: <http://www.ni.com/tutorial/5657/en/>
- Arteaga Arce, A. (2012). Arquitectura de un Sistema de Monitoreo Radioeléctrico usando Software Defined Radio. *Sistemas & Telemática*, 10(23), 83-93. Recuperado el 18 de agosto de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/4115/411534391005.pdf>
- Balzarena, P., Flores, P. G., Gonzalez, V., & Larroca, F. (2015). *Mediciones en receptor ISDB-T*. Montevideo - Uruguay.
- Bustillos, O. (2016). *Estudio de Técnicas de Modulación mediante Radios NI USRP*. Tesis de Grado, Universidad Nacional Autónoma De México, , Facultad de Ingeniería, Monterrey-Mexico.

- Chang, R. (1996, December). Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. *Bell System Tech*, 6, 1775-1796.
- Constante, R., & Valencia, N. (2015). *Transmisión de señales de tv digital para dispositivos móviles*. Proyecto de Grado, Escuela Politécnica Superior del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil, Ecuador.
- Contrera, D., & Ferrer, F. (2016). *Implementación en un FPGA de la etapa de sincronismo de un receptor OFDM para recepción de señales de DTV del estandar ISDB-T*. Tesis de Grado, Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Montevideo-Uruguay.
- DiBEG. (2007). *Antecedentes técnicos de la recepción parcial de 1 segmento (One-Seg)*. Recuperado el 16 de octubre de 2017, de [http://www.dibeg.org/news/previous_doc/0706_3Argentina_ISDB-T_seminar/Argentina_ISDB-T_seminar_4_one_seg\(Spanish\)rev1.pdf](http://www.dibeg.org/news/previous_doc/0706_3Argentina_ISDB-T_seminar/Argentina_ISDB-T_seminar_4_one_seg(Spanish)rev1.pdf)
- Ettus Research. (2015). *Building and Installing the USRP Open-Source Toolchain (UHD and GNU Radio) on Linux*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de [https://kb.ettus.com/Building_and_Installing_the_USRP_Open-Source_Toolchain_\(UHD_and_GNU_Radio\)_on](https://kb.ettus.com/Building_and_Installing_the_USRP_Open-Source_Toolchain_(UHD_and_GNU_Radio)_on)
- Ettus Research. (2017). *Ettus Research, an NI Company*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <https://www.ettus.com/>
- Flores, P. (2016). *La norma ISDB-T y un receptor implementado en SDR*. Tesis de Grado, Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Montevideo-Uruguay.
- FORUM, S. (2007). *SDR cognitive radio definitions working document*. Recuperado el 16 de octubre de 2017, de <http://goo.gl/cfIDPK>
- Gallardo, J. P. (2006). *Estudio de un sistema OFDM-CDMA*. Proyecto de Fin de Carrera. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11244/fichero/Volumen+1%252F1_PORTADA.pdf

- GNU Radio Companion. (2016). *Guided Tutorial GRC*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_GRC#Tutorial:_GNU_Radio_Companion
- GNU Radio Companion. (2017). *OutOfTree Modules*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <https://wiki.gnuradio.org/index.php/OutOfTreeModules>
- Haro, R. (2012). *Evaluación del desempeño y us sistema de television digital terretre ISDB-Tb e IPTV de la ESPE*. Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Ejército, Departamento de Electrica y Electrónica de la ESPE, Sangolquí. Recuperado el 22 de octubre de 2017, de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6506/1/T-ESPE-047000.pdf>
- INATEL, I. N. (2016). *Medidas*. Recuperado el 02 de noviembre de 2017, de INATEL: <https://www.inatel.br>
- INTI, I. N. (2011). *Introducción a la TV digital, Estándar ISDB-T*. Recuperado el 16 de octubre de 2017, de <https://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/utc/pdf/ISDBT-2011.pdf>.
- Jiménez, L. (2009). *Modulación multiportadora OFDM*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4797263.pdf>
- Larroca, F., Flores Guridi, P., Gomez Sena, G., Gonzalez-Barbone, V., & Belzarena, P. (2015). gr-isdbt: An ISDB-T Receiver Implementation on GNU Radio. *Latin American Coputing Conference (CLEI)*.
- Madrigal Ramos, J. A. (2015). *Modelamiento y simulación en capa física de una red LET (reléase 8)*. Tesis de Grado, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Sangolquí - Ecuador.
- MINTEL. (2014). *Televisión Digital Terrestre en el Ecuador*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/television-digital-terrestre-en-el-ecuador/#>
- MINTEL. (2015). *Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información*. Recuperado el 01 de octubre de 2017, de

<https://www.telecomunicaciones.gob.ec/television-digital-terrestre-en-el-ecuador/#>.

- Mitola, J. (2000). *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo, Suecia.
- Miyano, T., & Wada, T. (2010). Performance Evaluation of Front-End Signal Processing Receiver For. Okinawa, Japan.
- National Instruments. (2015). *Getting started guide NI USRP-2920/2921/2922 Universal Software Radio Peripheral*. Recuperado el 26 de octubre de 2017, de NI: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376358a.pdf>
- National Instruments. (2017). *¿Qué es LabVIEW?* Recuperado el 26 de octubre de 2017, de NI: <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>
- Olmedo, G. (2016). *Televisión Digital Terrestre*. Quito. Recuperado el 22 de noviembre de 2017
- Orellana, S. (2013). *NI USRP Taller de Capacitación Universal Software Radio Peripheral*. Recuperado el 16 de octubre de 2017, de <https://www.inti.gob.ar/electronicaeinformatica/utc/pdf/ISDBT-2011.pdf>.
- Paz, S., & Ramos, E. (2006). Protocolo de Comunicación para Sistemas Inalámbricos de bus de Repetición en Equipos de Medición. *Télématique*, 5(2), 1-12. Recuperado el 22 de noviembre de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/784/78450201.pdf>
- Pérez, C. (2016). *Codificación de canal y modulación*. Recuperado el 10 de octubre de 2017, de <http://personales.unican.es/perezvr/pdf/Codificacion%20de%20Canal.pdf>
- Portal DTV. (2013). *Monitoreando la Red del Sistema ISDB-Tb*. Recuperado el 22 de marzo de 2017, de Portal DTV: http://portaldtv.com/isdb_article.html
- Sandell, P., Borjesson, J., & Van de Beek, M. (1997). ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems. *Signal Processing*, 1800-1805.
- Tinajero Terán, N. E. (2015). *Implementación de un Enodeb LTE Release 9 utilizando SDR*. Tesis de Grado, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Sangolquí - Ecuador.

- Torres Vega, M. D., & Vaca Gallardo, C. S. (2014). *Sistema Embebido de Comunicación Digital de Voz utilizando Periféricos de Radio Universal USRP-E110*. Tesis de Grado, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Departamento de Eléctrica y Electrónica, Sangolquí-Ecuador.
- Tplink. (2015). *U300*. Recuperado el 03 de diciembre de 2017, de Portal Tplink: http://www.tp-link.es/products/details/cat-5688_UE300.html
- Valdivieso, S. J. (2017). *Implementación de un sistema de transmisión-recepción inalámbrico OFDM utilizando dispositivos NI USRP-2920*. Trabajo de titulación, Universidad San Francisco de Quito USFQ, Departamento de Ingeniería Electrónica, Quito. Recuperado el 22 de noviembre de 2017, de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/6407>
- Weinstein, S., & Ebert, P. (October de 1971). Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform. *Transactions on Communications*, 628-634.