

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y
Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



**MODULO DIDÁCTICO PARA PRÁCTICAS EN UN LABORATORIO DE
TELECOMUNICACIONES BASADO EN UN TRANSECTOR DE RADIO
DEFINIDO POR SOFTWARE**

Tesis presentada por los Bachilleres:

Tamo Achire, Sidney Leonel

Panduro Vargas, Roger Andres

Para optar el Título Profesional de:

**Ingeniero Electrónico con Especialidad
en Telecomunicaciones**

Asesor:

Ing. Urrutia Espinoza, Mario William

Arequipa-Perú

2020

DICTAMEN APROBATORIO DEL BORRADOR DE TESIS

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA ELECTRONICA
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS

Arequipa, 22 de Octubre del 2020

Dictamen: 001350-C-EPIE-2020

Visto el borrador de tesis del expediente 001350, presentado por:

2010242761 - PANDURO VARGAS ROGER ANDRES

2010203731 - TAMO ACHIRE SIDNEY LEONEL

Titulado:

**MODULO DIDÁCTICO PARA PRÁCTICAS EN UN LABORATORIO DE
TELECOMUNICACIONES BASADO EN UN TRANSECTOR DE RADIO DEFINIDO
POR SOFTWARE**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

1475 - MALAGA CHAVEZ CESAR EDUARDO
DICTAMINADOR



1692 - VALDIVIESO HERRERA DIANA ISABEL
DICTAMINADOR



1843 - URRUTIA ESPINOZA MARIO WILLIAM
DICTAMINADOR



DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi madre Elizabeth, quien, con su esfuerzo y sacrificio pudo costearme una educación, además de amor y apoyo incondicional.

A mi padre Walter, quien, con su paciencia y buen ejemplo, supo darme los valores que tengo hoy en día.

Roger Andrés Panduro Vargas

Dedico con todo mi corazón esta tesis a mi padre Ciney Tamo, que con su sabiduría y enseñanza pude alcanzar una de las cosas que más anhelábamos juntos. Donde quiera que estés papi querido te hago llegar todo mi trabajo, te lo debo todo, por eso y mucho más, cada uno de mis pasos te los envió al cielo. Te amo

Es para mí una fortuna poder regalarle a mi madre Rosa Achire esta tesis, que en su comienzo amenazaba ser titánicamente imposible. Gracias, por confiar en mi hasta el último.

A mis hermanos Karelia, Betzabet, Rosenya y Antony es un triunfo en conjunto, porque todo lo que tengo, tendré y seré, es de ustedes y para ustedes.

Sidney Leonel Tamo Achire

AGRADECIMIENTOS

A mi compañero de tesis Leonel, que con su esfuerzo y dedicación este proyecto pudo realizarse de la mejor manera.

Roger Andrés Panduro Vargas

Señor te doy gracias por darme la oportunidad de llegar a conseguir este logro y por permitirme conocer grandes personas en esta casa de estudios.

Quiero agradecer a un maestro en particular, el Ing. Pedro Rodríguez. Quien me dio la mano cuando más lo necesitaba.

Al Ing. Mario Urrutia gracias a sus ideas y el apoyo para poder realizar esta tesis.

A mis compañeros de estudio Andrés, Javier, Bruno y Ángel por apoyarnos siempre hasta el último.

Sidney Leonel Tamo Achire

RESUMEN

El proyecto de estudio centra la investigación en el desarrollo de un módulo didáctico de prácticas orientado a los estudios de telecomunicación, en la aplicación de Radio Definido por Software (SDR), de esta forma se busca la integración del módulo a las asignaturas de telecomunicaciones contribuyendo con el conocimiento, orientación y desarrollo de las habilidades de los estudiantes de pregrado a través de los conceptos y una metodología propuesta.

Dentro de las múltiples aplicaciones de este dispositivo (SDR), se encuentran las comunicaciones inalámbricas, la radiofrecuencia, el tratamiento digital de señales y los sistemas digitales de telecomunicación.

En este proyecto, se utilizó las plataformas Open BTS y GNU radio, en esta última se encuentran librerías con bloques desarrollados por código C++, siendo familiarizadas con el USRP (Programador Periférico Universal de Radio), las cuales tienen comunicación por USB o IP con el dispositivo.

Estas plataformas tienen una interfaz de fácil manejo comunicándose con el computador por drivers UHD (Controlador del Hardware USRP) diseñados exclusivamente para los diferentes dispositivos USRP, comercializados por Ettus Research¹ y National Instruments², siendo reconfigurable en su procesador de señales mediante un dispositivo de alta potencia FPGA.

El proyecto se ha estructurado en cuatro capítulos:

En el capítulo I se encuentra el planteamiento de la investigación a través de la identificación del problema y delimitación de objetivos.

En el capítulo II se ha desarrollado el planteamiento teórico sobre la tecnología SDR, GSM y las aplicaciones del dispositivo USRP.

¹ Ettus Research. Es una marca de National Instruments (NI) desde 2010, proveedor mundial de plataformas SDR, incluidos los USRP

² National Instruments: Empresa fundada en 1976 en Austin, Texas.

En el capítulo III se ha desarrollado la propuesta del sistema identificando el hardware y software que se aplica en el desarrollo de las guías de prácticas del módulo didáctico, teniendo conocimiento de las características, funcionalidades y aplicaciones que permiten la integración de H + S.

En el capítulo IV se ha desarrollado el módulo didáctico SDR, donde se ha elaborado la guía de practica de Transmisión de frecuencia modulada FM, Recepción de frecuencia modulada FM y Red GSM Open BTS.

En este sentido al utilizar el dispositivo USRP B210 y al realizar la programación del Open BTS en el sistema operativo Ubuntu se demostró la versatilidad, eficiencia y bajo coste de inversión para contar con una red GSM. Asimismo, se desarrolló una transmisión y recepción de frecuencia modulada FM aplicándolo a la programación digital, desestimando la complejidad de utilizar hardware especializado, demostrando que el uso de software disminuye costes operativos y de inversión en el uso de tecnología en telecomunicaciones.

Palabras Claves, *SDR, GSM, Red GSM, Open BTS, USRP, Ubuntu, GNU Radio, Antena VERT900, Tecnología de Comunicaciones, Telecomunicaciones, Programación, Desarrollo de Software, Radio FM.*

ABSTRACT

The study project focuses the research on the development of a didactic practical module oriented to telecommunication studies, in the application of Radio Defined by Software (SDR), in this way the integration of the module to the telecommunication subjects is sought, contributing with the knowledge, orientation and development of the skills of undergraduate students through the concepts and a proposed methodology.

Among the multiple applications of this device (SDR) are wireless communications, radio frequency, digital signal processing and digital telecommunication systems.

In this project, the Open BTS and GNU radio platforms were used, in the latter there are libraries with blocks developed by C ++ code, being familiar with the USRP (Universal Software Radio Peripheral), which have USB or IP communication with the device.

These platforms have a user-friendly interface communicating with the computer by UHD drivers (USRP Hardware Driver) designed exclusively for the different USRP devices, marketed by Ettus Research and National Instruments, being reconfigurable in their signal processor using a high-power FPGA device.

The project has been structured in four chapters:

Chapter I contains the research approach through the identification of the problem and the delimitation of objectives.

Chapter II has developed the theoretical approach to SDR, GSM technology and applications of the USRP device.

In Chapter III the proposal of the system has been developed identifying the hardware and software that is applied in the development of the practice guides of the didactic module, having knowledge of the characteristics, functions and applications that allow the integration of H + S.

In chapter IV the SDR didactic module has been developed, where the practice guide for FM modulated frequency transmission, FM modulated frequency reception and GSM Open BTS network has been developed.

In this sense, when using the USRP B210 device and when programming Open BTS in the Ubuntu operating system, the versatility, efficiency and low investment cost to have a GSM network were demonstrated. Likewise, an FM modulated transmission and reception was developed applying it to digital programming, disregarding the complexity of using specialized hardware, demonstrating that the use of software reduces operating and investment costs in the use of telecommunications technology.

Keywords, *SDR, GSM, GSM Network, Open BTS, USRP, Ubuntu, GNU Radio, VERT900 Antenna, Communications Technology, Telecommunications, Programming, Software Development, FM Radio.*

INTRODUCCION

El proyecto de investigación determinó, la funcionalidad y operatividad del sistema de Radio Definido por Software (SDR), que es un sistema integrado por hardware y software, teniendo como característica física contar con circuito integrado y ejecutado a través de un programa en un ordenador u otro dispositivo de este tipo.

El término “*Software Radio*” fue nombrado por Joe Mitola en 1991, describió una técnica de radio configurable o re – programable, siendo un sistema de radiocomunicación, donde los componentes típicos implementados en hardware son implementados en el software.

El SDR, en su forma más básica tiene la capacidad de formalizar y desarrollar cualquier tipo de hardware por medio del software programado, teniendo un procesamiento de alta velocidad y baja latencia en un FPGA, es de código abierto y puede modificarse para conseguir la operación requerida por el usuario.

En este contexto, el proyecto de investigación busca desarrollar la tecnología SDR, a través de la elaboración y diseño de un módulo de prácticas basado en un transceptor de SDR, que podrá ser aplicado en el laboratorio de telecomunicaciones donde el participante podrá conocer paso a paso la funcionalidad, integración y aplicación del SDR, adquiriendo conocimiento y habilidades que contribuirán con el desarrollo académico de los estudiantes de pregrado de Ingeniería Electrónica.

Con la aplicación del módulo de prácticas SDR, se espera utilizar las ventajas de esta nueva tecnología, siendo una de sus virtudes remplazar hardware de coste elevado, que muestran como desventaja el ser dispositivos que requieren de una digitalización entre la antena y los dispositivos de entrada/salida. Estos tipos de dispositivos no son considerados radio

software – SDR, porque aun haciendo uso de procesamiento de señales, si este no es reconfigurable o adaptable no será considerado un sistema SDR.



ÍNDICE

DICTAMEN APROBATORIO DEL BORRADOR DE TESIS	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
INTRODUCCION	ix
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE INVESTIGACIÓN	001
1. Problema de investigación	001
1.1. Determinación del problema	001
1.1.1. <i>Enunciado</i>	002
1.1.2. <i>Descripción del problema</i>	002
1.1.3. <i>Justificación del problema</i>	004
1.2. Objetivos de la investigación	005
1.2.1. <i>Objetivo general</i>	005
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	005
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	006
2. Fundamentos	006
2.1. Concepto de SDR	006
2.1.1. <i>Sección RF</i>	007
2.1.1.1. RF Front end	008
2.1.2. <i>Sección de Frecuencia Intermedia</i>	008
2.1.2.1. DDC.	010
2.1.2.2. DUC.	011
2.1.3. <i>Sección banda base</i>	013
2.1.4. <i>Arquitectura de SDR</i>	013
2.2. GSM	017
2.2.1. <i>GSM y el vínculo con un sistema SDR</i>	019
2.2.2. <i>Infraestructura de una red GSM</i>	020
2.2.2.1. Subsistema de conmutación de red, NSS.	021
2.2.2.2. Subsistema de estación base	026
2.2.2.3. Subsistema de operación y mantenimiento OSS.	029
2.2.3. <i>Identificadores y direcciones GSM</i>	033
2.2.3.1. Identificador para la identidad del equipo IMEI.	033
2.2.3.2. Identificador para la identidad de suscriptor SIM.	035

2.2.3.3.	Identificador del servicio MSISDN.	036
2.2.3.4.	Identificadores temporales.	037
2.2.4.	<i>Principios y descripción del sistema de radio de GSM</i>	039
2.2.5.	<i>Estructura básica del canal</i>	042
2.2.5.1.	Asignación de bandas de frecuencia en GSM.	044
2.2.6.	<i>Asignación del espectro radioeléctrico en Perú</i>	045
2.3.	Aplicaciones y dispositivos USRP	046
2.3.1.	<i>Aplicaciones</i>	046
2.3.2.	<i>Dispositivos USRP</i>	048
2.3.2.1.	Características de USRP.	052
2.3.2.2.	Ventajas de SDR.	053
2.3.2.2.1.	<i>Potabilidad.</i>	053
2.3.2.2.2.	<i>Integración tecnológica.</i>	054
2.3.2.2.3.	<i>Costos.</i>	054
2.3.2.3.	Arquitectura USRP	056
2.3.2.3.1.	<i>Half dúplex.</i>	060
2.3.2.3.2.	<i>Full dúplex.</i>	061
2.3.2.3.3.	<i>MIMO.</i>	063
2.3.2.3.4.	<i>FPGA (Field Programable Gate Array).</i>	064
2.3.2.3.5.	<i>Tarjeta Madre (motherboard).</i>	066
2.3.2.3.6.	<i>Tarjetas hijas (daughboards).</i>	066
2.3.2.3.7.	<i>USB 3.0.</i>	067
CAPITULO III: EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PROYECTO		068
3.	Hardware y Software	068
3.1.	Hardware	068
3.1.1.	<i>La tarjeta USRP B210 e indicadores LED</i>	068
3.1.2.	<i>Antena VERT900</i>	069
3.1.3.	<i>Fuente de alimentación</i>	070
3.1.4.	<i>Drivers UHD</i>	071
3.2.	Software	071
3.2.1.	<i>LINUX</i>	071
3.2.2.	<i>GNU Radio</i>	072
3.2.2.1.	GNU Radio Companion (GRC).	074
3.2.2.2.	Bloques de GRC.	077
3.2.2.2.1.	<i>Fuentes (sources).</i>	077
3.2.2.2.2.	<i>Bloques de procesamiento de señal.</i>	077
3.2.2.2.3.	<i>Sumideros (sinks).</i>	077
3.2.2.2.4.	<i>Variables.</i>	078
3.2.2.2.5.	<i>Cuadros de texto (boxes).</i>	078

3.2.2.2.6. <i>Agendas (notebooks).</i>	078
3.2.2.3. Propiedades de archivo “GRC”.	079
3.3. Open BTS	081
3.3.1. <i>Arquitectura Open BTS</i>	083
3.3.1.1. Componentes de Open BTS.	085
3.3.1.1.1. <i>Open BTS.</i>	085
3.3.1.1.2. <i>Asterisk.</i>	086
3.3.1.1.3. <i>SMQueue (SIP MESSAGE Queue).</i>	087
3.3.1.1.4. <i>SIP AuthServer (SIP Authorization Server).</i>	088
3.3.1.1.5. <i>Base de datos.</i>	088
3.4. Especificaciones y Recomendaciones Técnicas	090
3.4.1 <i>Consideraciones Fuente de Alimentación</i>	090
3.4.2 <i>Bandas de frecuencia</i>	090
3.4.3 <i>Aplicaciones y Modulaciones con USRP B210</i>	092
CAPITULO IV: MODULO DIDACTICO SDR	095
4. Metodología del módulo de guía de prácticas	095
4.1. Propuesta de módulo de prácticas en Telecomunicaciones	098
4.1.1. <i>Módulo de practica 1^a</i>	099
4.1.2. <i>Módulo de practica 1^b</i>	120
4.1.3. <i>Módulo de practica 2</i>	131
CONCLUSIONES	149
RECOMENDACIONES	150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
ANEXOS	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Elementos de un SDR ideal	015
Tabla 2: Elementos del Subsistema digital	016
Tabla 3: Funciones de HRL	023
Tabla 4: Datos almacenados en una SIM	029
Tabla 5: Descripción de interfaces (Eberspaaeche, Voegel and Bettstetter 2001)	032
Tabla 6: Bandas de frecuencia estandarizadas para GSM	044
Tabla 7: Aplicaciones compatibles USRP	047
Tabla 8: Mapeo entre Ettus Research USRP y los productos de National Instruments USRP	049
Tabla 9: Serie Embebida, igualdad de productos entre ER y NI	049
Tabla 10: Serie de Red, igualdad de productos entre ER y NI	050
Tabla 11: Serie X, igualdad de productos entre ER y NI	051
Tabla 12: Características de dispositivos ER y NI	053
Tabla 13: Rango de precios de los dispositivos vendidos por ER y NI	055
Tabla 14: Indicadores Led	069
Tabla 15. Bandas de frecuencia de Radioaficionados	090
Tabla 16. Ejemplo de Aplicaciones	093

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de bloques funcionales de SDR.....	007
Figura 2 Diagrama de bloques de DDC	010
Figura 3 Diagrama de bloques de DUC	013
Figura 4 Arquitectura de un sistema SDR ideal.....	014
Figura 5 Arquitectura GSM (Eberspaeche, Voegel y Bettstetter 2001).....	021
Figura 6 Estructura del MSC (Perez Rojas, Vega Vera and Hurtado Torres n.d.)	026
Figura 7 Esquema de handover entre dos celdas y sus BTS en el centro de cada celda.....	027
Figura 8 Tipos de MS (Perez Rojas, Vega Vera and Hurtado Torres n.d.)	028
Figura 9 Intervención de centros de control y mantenimiento en una red GSM	030
Figura 10 Interfaces GSM (Perez Rojas, Vega Vera and Hurtado Torres n.d.).....	031
Figura 11 Base de datos e identificadores GSM	033
Figura 12 Estructura IMEI	034
Figura 13 Tageta SIM	035
Figura 14 Estructura IMSI	036
Figura 15 Estructura de MSISDN	037
Figura 16 Estructura de LAI	038
Figura 17 Canales del sistema FDMA	040
Figura 18 Canales del sistema TDMA	041
Figura 19 Esquema de acceso al medio GSM.....	042
Figura 20 Asignación del ancho de banda para la banda de frecuencia de los 900 MHz	043
Figura 21 Distribucion de bandas en Perú	045
Figura 22 Placa USRP B210 (Ettus Research) (MEJIA 2017)	057
Figura 23 Arquitectura genérica de USRP de Ettus.....	059
Figura 24 Half-duplex	061
Figura 25 Full duplex.....	062
Figura 26 MIMO 2X2	064
Figura 27 Partes de un FPGA.....	065
Figura 28 Antena VERT900	070
Figura 29 Interfaz de GNU Radio (GRC)	073

Figura 30 Diagrama de bloques de GNU Radio	074
Figura 31 Mapa de datos enviados por bloques	075
Figura 32 Propiedad de fuente de señal	076
Figura 33 Error de conexión entre bloques	076
Figura 34 Conexión exitosa entre bloques.....	076
Figura 35 Interfaz de GNU Radio (GRC).....	079
Figura 36 Ventana de propiedades del bloque "Options"	081
Figura 37 Arquitectura GSM y Arquitectura Open BTS	083
Figura 38 Arquitectura de Open BTS	084
Figura 39 Arquitectura híbrida IP	086
Figura 40. Diagrama de componentes de Open BTS y sus bases de datos.....	089
Figura 41. Estructura de una competencia (Pimienta, 2012).....	091
Figura 42. Dimensiones de una competencia (Pimienta, 2012).....	092

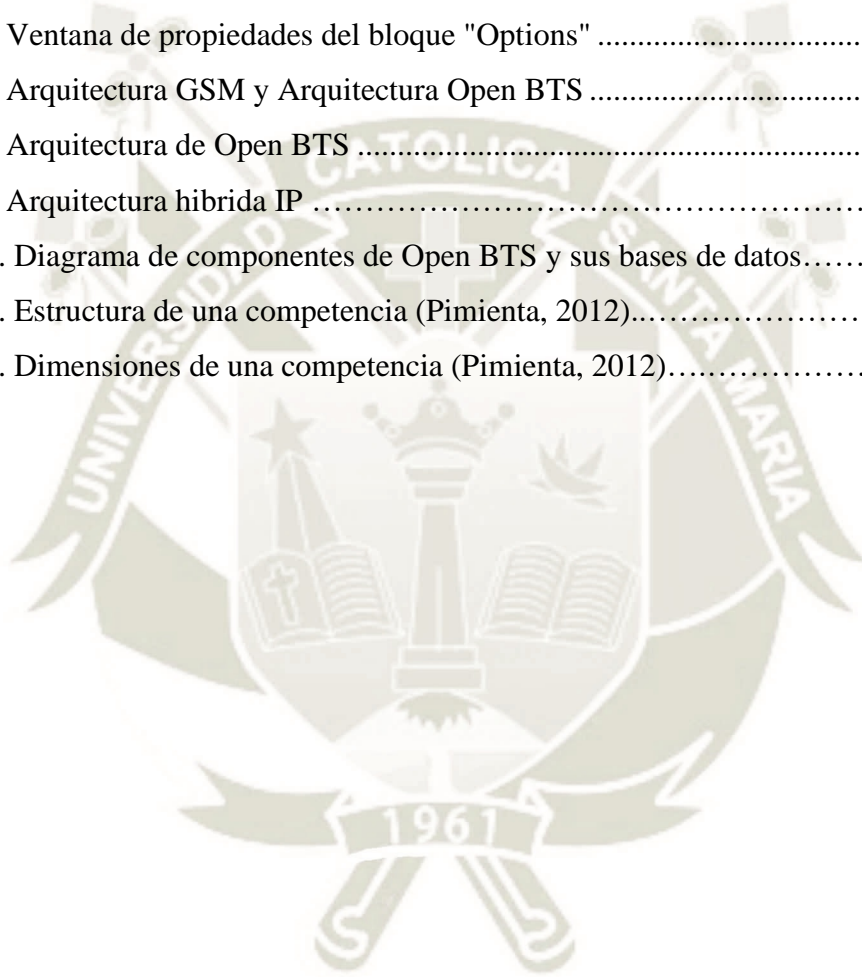
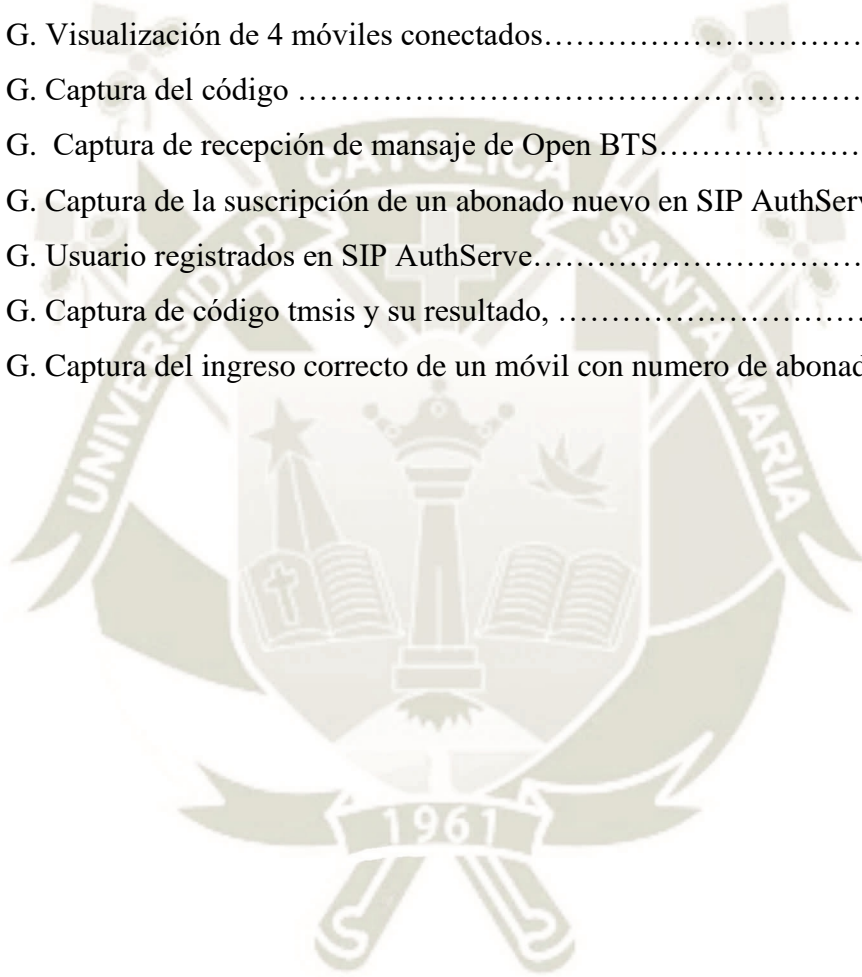


Figura 1 G. Diagrama de bloques funcional del prototipo FM, transmisor.....	096
Figura 2 G. Diagrama de bloques de transmisor.....	096
Figura 3 G. Transmisor FM	098
Figura 4 G. Interfaz de GNU Radio Companion	099
Figura 5 G. Propiedades del bloque Options	099
Figura 6 G. Propiedades del bloque Variable "samp_rate"	100
Figura 7 G. Propiedades del bloque variable "max_desv"	101
Figura 8 G. Propiedades del bloque Wav File Source	102
Figura 9 G. Propiedades del bloque Multiply Const	103
Figura 10 G. Propiedades del bloque WX GUI Slider.....	104
Figura 11 G. Propiedades del bloque de Low Pass Filter.....	105
Figura 12 G. Propiedades del bloque WX GUI FFT Sink	107
Figura 13 G. Propiedades de WX GUI Notebook	108
Figura 14 G. Propiedades del bloque FM Preemphasis	109
Figura 15 G. Propiedades del bloque WX GUI Slider.....	110
Figura 16 G. Propiedades del bloque WX GUI FFT Sink.....	112
Figura 17 G. Propiedades del bloque UHD: USRP Sink "rf options".....	113
Figura 18 G. Espectro de transmisión FM	114
Figura 19 G. Diagrama de bloques funcional del prototipo FM, receptor.....	116
Figura 20 G. Diagrama de bloques del receptor.....	117
Figura 21 G. Receptor FM.....	118
Figura 22 G. Propiedades del bloque variable	119
Figura 23 G. Propiedades del Bloque WX GUI Chooser.....	120
Figura 24 G. Propiedades de bloque WX GUI Notebook.....	120
Figura 25 G. Propiedades del bloque UHD: USRP Source.....	121
Figura 26 G. Propiedades del bloque UHD: USRP Source "pestaña RF Options"	122
Figura 27 G. Propiedades del bloque WX GUI Scope Sink.....	123
Figura 28 G. Propiedades de bloque WX GUI FFT Sink.....	123
Figura 29 G. Propiedades del bloque WBFM Receive.....	124
Figura 30 G. Propiedades del bloque Audio Sink.....	124
Figura 31 G. Espectro de Recepción de FM.....	125

Figura 32 G. Práctica - Arquitectura de OpenBTS.....	128
Figura 33 G. Diagrama de bloques de pasos a seguir.....	129
Figura 34 G. Consola de Ubuntu.....	130
Figura 35 G. Captura del comando Power.....	134
Figura 36 G Captura del mensaje de bienvenida.....	136
Figura 37 G. Captura del código tmsis	137
Figura 38 G. Visualización de 4 móviles conectados.....	137
Figura 39 G. Captura del código	138
Figura 40 G. Captura de recepción de mansaje de Open BTS.....	139
Figura 41 G. Captura de la suscripción de un abonado nuevo en SIP AuthServe...139	
Figura 42 G. Usuario registrados en SIP AuthServe.....	140
Figura 43 G. Captura de código tmsis y su resultado,	142
Figura 44 G. Captura del ingreso correcto de un móvil con numero de abonado.	143



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ADC:	Convertor Análogo-Digital (Analog to Digital Converter)
AGLP:	Licencia Pública General Aferro (Aferro General Public License)
API:	Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface)
ARFCN:	Número Absoluto de Canal de Radiofrecuencia (Absolute Radio-Frequency Channel Number)
ASIC:	Circuitos Integrados para Aplicaciones Específicas (Application Specific Integrated Circuit)
AuC:	Centro de Autenticación (Authentication Unit Center)
BPSK:	Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (Binary Phase Shift Keying)
BSC:	Controlador de Estación Base (Base Control Station)
BSS:	Subsistema de Estación Base (Base Station Subsystem)
BTS:	Estación Base Transceptora (Base Transceiver Station)
CA:	Corriente Alterna
CC:	Control de la Llamada (Call Control)
CC:	Código del País (Country Code)
CC:	Corriente Continua
CEPT:	Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones
CLB:	Bloque Lógico Configurable (Configurable Logic Block)
COFDM:	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales Codificado (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
DAC:	Convertor Digital-Análogo (Digital to Analog Converter)
DDC:	Convertor Digital Descendente (Digital Down Converter)
DSP:	Procesador Digital de Señales (Digital Signal Process)
DTMF:	Tono Dual de Múltiples Frecuencias (Dual Tone Multi Frequency)
DUC:	Convertor Digital Ascendente (Digital Up Converter)
DVB-T:	Difusión de Video Digital – Terrestre (Digital Video Broadcasting – Terrestrial)

EEPROM:	Memoria Programable y Borrable Eléctricamente (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)
EIR:	Registro de Identidad de Equipo (Equipment Identity Register)
ER:	Ettus Research
ETSI:	Instituto de Estandarización de Telecomunicaciones Europeas (European Telecommunications Standards Institute)
FAC:	Código de Ensamblaje Final (Final Assembly Code)
FCC:	Comisión Federal de Comunicaciones (Federal Communications Commission)
FDMA:	Acceso Multiple por Division de Frecuencia (Frequency Division Multiplex Access)
FIR:	Respuesta Finita al Impulso (Finite Impulse Response)
FM:	Frecuencia Modulada
FPGA:	Arreglo de Compuertas Programables en el Campo (Field Programable Gate Array)
FS:	Frecuencia de Muestreo
GCR:	Registro de Llamadas Locales (Group Call Register)
GMSC:	Puerta de Enlace de la Central de Conmutación Móvil (Gateway Mobile Switching Center)
GMSK:	Modulación por Desplazamiento Mínimo Gaussiano (Gaussian Minimum Shift Keying)
GPIO:	Entrada/Salida de Propósito General (GENERAL PURPOSE INPUT/OUTPUT)
GPP:	Procesador de Propósito General (General Purpose Processors)
GPS:	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
GPSDO:	Oscilador Disciplinado GPS (GPS Oscillator disciplined)
GRC:	GNU Radio Companion
GSM:	Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (Global System For Mobile)
GUI:	Interfaz Gráfica de Usuario (Graphical User Interface)
HLR:	Registro de Ubicación Local (Home Location Register)
ICC-ID:	Identificador del Circuito Integrado de la tarjeta (International Circuit Card – ID)
IF:	Frecuencia Intermedia

IMEI:	Identidad Internacional del Equipo Móvil (International Mobile Equipment Identity)
IMSI:	Identidad Internacional del Suscriptor Móvil (International Mobile Subscriber Identity)
IMT:	Telecomunicaciones Móviles Internacionales (International Mobile Telecommunications)
IP:	Protocolo de Internet (Internet Protocol)
ISDB-T:	Radiodifusión Digital de Servicios Integrados – Terrestre (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial)
ISDN:	Red Digital de Servicios Integrados (Integrated Services Digital Network)
ISM:	Bandas de Radio Industriales, Científicas y Médicas (Industrial, Scientific and Medical)
ITSP:	Proveedor de Servicios de Telefonía por Internet (Internet Telephony Service Provider)
LA:	Área de Localización (Location Area)
LMSI:	Identidad Local de Estación Móvil (Local Mobile Station Identity)
LNA:	Amplificador de bajo ruido (Low Noise Amplifier)
LO:	Oscilador Local
LTE:	Evolución a Largo Plazo (Long Term Evolution)
LUT:	Tabla de Consulta (Lookup Table)
MCC:	Código Móvil de País (Mobile Country Code)
MIMO:	Múltiple Entrada Múltiple Salida (Multiple Input Multiple Output)
MM:	Gestión de Movilidad (Mobility Management)
MNC:	Código Móvil de red (Mobile Network Code)
MS:	Estación Móvil (Mobile Station)
MSC:	Central de Conmutación Móvil (Mobile Switching Center)
MSIN:	Número de Identificación de la Estación Móvil (Mobile Subscriber Identification Number)
MSISDN:	Estación Móvil de la Red Digital de Servicios (Mobile Station Integrated Services Digital Network).
MSRN:	Número de la Estación Base en Modo Viajero (Mobile Station Roaming Number)

MTC:	Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones
NDC:	Código de destino Nacional (National Destination Code)
NI:	National Instruments
NMC:	Centro de Gestión de Red (Network Management Center)
NPA:	Número de Planificación de área
NSS:	Subsistema de Conmutación de red (Network and Switching Subsystem)
OFDM:	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
OMC:	Centro de Operación y Mantenimiento (Operation and Maintenance Center)
OMSS:	Subsistema de operación y mantenimiento (Operation and Maintenance Subsystem)
PCI Express:	Interconexión de Componentes Periféricos Express (Peripheral Component Interconnect Express)
PLMN:	Red Móvil Pública Terrestre (Public Land Mobile Network)
PNAF:	Plan Nacional de Atribución de Frecuencias
PSTN:	Red Telefónica Pública Conmutada (Public Switched Telephone Network)
QAM:	Modulación de Amplitud en Cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation)
QPSK:	Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (Quadrature Phase-Shift Keying)
RAM:	Memoria de Acceso Aleatorio (Random Access Memory)
RF:	Radiofrecuencia
RFPA:	Amplificador de Potencia de Radiofrecuencia (Radio Frequency Power Amplifier)
RTP:	Protocolo de Transporte en Tiempo Real (Real-Time Transport Protocol)
SDR:	Radio definido por software (Software Defined Radio)
SIM:	Módulo de Identidad del Suscriptor (Subscriber Identity Module)
SIP:	Protocolo de Inicio de Sesión (Session Initiation Protocol)
SMSC:	Central de Servicio de Mensajes Cortos (Short Message Service Center)
SN:	Número de suscriptor (Subscriber Number)
SNR:	Número de Serie (Serial Number)

SVN:	Número de versión de software (Software Version Number)
SWIG:	Generador de envoltura e Interfaz Simplificada (Simplified Wrapper and Interface Generator)
TAC:	Tipo de Código de Asignación (Type Allocation Code)
TDMA:	Acceso Múltiple por División de Tiempo (Time Division Multiple Access)
TMSI:	Identidad Temporal del Suscriptor Móvil (Temporary Mobile Subscriber Identity)
TPM:	Modulo de Plataforma Confiable (Trusted Platform Module)
TRAU:	Unidad de Transcodificación y Adaptación de Tasa Transcoder and Rate Adaptation Unit)
TS:	Intervalo de Tiempo (Time Slots)
TSC:	Central de Conmutación Conjunto (Tandem Switching Center)
UHD:	Controlador del Hardware USRP (USRP Hardware Driver)
USB:	Bus Universal de Serie (Universal Bus Series)
USRP:	Programador Periférico Universal de Radio (Universal Software Radio Peripheral)
VLR:	Registro de Ubicación de Visitante (Visitor Location Register)
VoIP:	Voz sobre IP (Voice over IP)
WiMAX:	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access)
WLAN:	Red de Área local Inalámbrica (Wireless Local Area Network)

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE INVESTIGACIÓN

1. Problema de investigación

1.1. Determinación del problema

La aparición en el mercado de computadoras con tarjetas de sonido que cuentan con la capacidad de procesar una señal a varios KHz, la existencia de microprocesadores y la accesibilidad a software de código abierto para la programación, abre una ventana para la innovación y aplicación de nuevas tecnologías de comunicación; siendo el core de SDR la programación de un software en un hardware básico adaptado y que logra satisfacer la necesidad del usuario que aplica al uso de este sistema SDR.

Bajo este contexto, se debe entender que la calidad de la tecnología SDR tiene como finalidad el desarrollo de un sistema que sea capaz de controlar casi todas las funciones de un dispositivo de telecomunicaciones diseñado con un software.

Dentro de las principales herramientas de desarrollo y procesamiento, se ha considerado a GNU Radio, Matlab, LabVIEW, juntamente con la plataforma USRP (*Universal Software Radio Peripheral*). A través de ellos se obtiene como producto el alcance no solo de dispositivos hardware, también el conocimiento, la práctica y el entendimiento de ciertos parámetros conceptualizados llevados al desarrollo, teniendo aplicaciones para la investigación y la obtención de un producto final.

Existen equipos y sistemas digitales que son dispositivos con un valor comercial elevado, siendo imposible su aplicación, análisis y en la práctica no se puede acceder a visualizarlos, estudiarlos o configurarlos. Pero ocurre todo lo contrario con el sistema SDR, es una posibilidad real y accesible que se encuentra al alcance de aquellos usuarios que se

encuentren estudiando telecomunicaciones, encontrando como principal ventaja la de no requerir usar un hardware de un sistema de radio normal, especializado o sofisticado. Estos sistemas concentran su valor en el hardware y la configuración del software, y para lograr mejores expectativas se debiera realizar mayor inversión de dinero, mano de obra y otros complementos propios del up grade del producto.

Por tal motivo, el poder acceder al uso, aplicación, conocimiento de esta tecnología, es encontrarse en la vanguardia de las radiocomunicaciones de la industria inalámbrica, siendo el nuevo futuro y remplazo de la tecnología hecha en función del hardware.

1.1.1. Enunciado

Módulo didáctico para prácticas en un laboratorio de telecomunicaciones basado en un transceptor de radio definido por software.

1.1.2. Descripción del problema

En la actualidad las comunicaciones inalámbricas han ido avanzando y desarrollándose, en función del hardware actualizando las partes físicas, lo cual genera un costo e inversión no contemplada para el cambio tecnológico.

La posibilidad de generar o crear digitalmente una radio y transmitirla se hizo posible mediante SDR, el uso de las tarjetas madre e hijas de un dispositivo USRP hacen robusto el sistema de transmisión y recepción, en el caso de la radio se crea digitalmente por medio de programación en MATLAB, GNU Radio u otros programas similares. Las partes físicas de este equipo hardware, se transmiten digitalmente en cualquier rango de frecuencia.

La tecnología de Radio Definido por Software SDR (*Software Defined Radio*), surgió para dar la flexibilidad, eficiencia de costes y potencia a los sistemas de comunicaciones inalámbricas, habiendo un crecimiento exponencial en todas las formas y medios por los cuales las personas necesitan comunicarse como, por ejemplo:

- Comunicación de voz.
- Comunicación de video.
- Mensajes de difusión.
- Comunicaciones de comando y control.
- Comunicaciones de respuesta de emergencia.
- Comunicación de datos.

SDR es un radio en la que sus funciones de capa física están definidas por software y el radio es un medio por el cual se puede transmitir o recibir una señal inalámbrica por su RF del espectro electromagnético facilitando la transferencia de información.

En comparación con su semejante un dispositivo de radio tradicional (hardware), se limita la funcionabilidad cruzada y su fabricación hace que sean específicas para un solo medio de uso. En el caso de querer modificar, actualizar o mejorar de alguna manera su hardware, tendrían que modificarse a través de la intervención física, esto da como resultado mayores costos de inversión, de actualización, reparación entre otros.

También hay que resaltar que el hardware tiene una flexibilidad mínima para adquirir múltiples estándares en forma de onda. Siendo todo lo contrario la tecnología de SDR donde se

proporciona una solución muy eficiente modificable desde su capa física que cuenta con un FPGA.

Según EcuRed (2010), los modernos equipos de radio con chips de Procesadores Digitales de Señal (DSP), permiten mediante técnicas digitales realizar filtros de paso de banda y de supresión de ruidos entre otras posibilidades, son muy eficaces en comparación con circuitos analógicos. Ahora bien, la mayoría de los transceptores existentes en el mercado que incorporan DSP, solo pueden operar en banda lateral única, CW, AM o FM. El DSP solo se utiliza para filtrado y eliminación de ruido. Si pudiéramos utilizar el DSP para demodular la señal, entonces obtenemos lo que se llama SD, que es un sistema conveniente y modificable.

Es por ello que, al identificar las limitaciones del laboratorio de Telecomunicaciones, presentamos como una alternativa, la técnica SDR la cual combina una serie de actividades de asignaturas tales como: Comunicaciones Digitales, Procesamiento Digital de Señales, Radiofrecuencia I y II teniendo la posibilidad de desarrollar, interactuar, investigar y aprender sobre el software reprogramable para la tecnología SDR.

1.1.3. Justificación del problema

El proyecto de investigación demuestra originalidad, debido a que no se ha realizado un trabajo de investigación con las mismas características en nuestro medio, teniendo una relevancia social, al permitir la accesibilidad al conocimiento y aplicación de una nueva tecnología que antes no se podía acceder por los costos de inversión que significaba el uso de equipos con similares características.

El estudio muestra actualidad y pertinencia, debido a que el conocimiento dejará de ser teórico pudiendo desarrollarse en la práctica con el hardware y programándolo para conocer su funcionalidad.

Finalmente, el estudio es viable y de interés personal de los investigadores por la contribución que se logrará en favor de los futuros profesionales en telecomunicaciones al desarrollar la aplicación del uso de dispositivos USRP en laboratorio.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Elaborar, diseñar y modelar un módulo de prácticas basado en un transceptor de radio definido por software SDR para el laboratorio de telecomunicaciones.

1.2.2. Objetivos específicos

- Implementar un módulo de prácticas a través de una metodología de enseñanza – aprendizaje aplicando tecnología de información empleando un código abierto GNU radio y Open BTS, que permita al estudiante utilizar una plataforma de diseño y modelamiento en SDR.
- Elaborar guías de prácticas para el módulo de SDR, que permita el conocimiento del estudiante sobre el sistema desarrollado en el laboratorio de telecomunicaciones.
- Desarrollar en cada guía de prácticas autoevaluaciones y un caso de estudio sobre SDR que permita alcanzar las metas y objetivos del módulo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2. Fundamentos

2.1. Concepto de SDR

Según Domínguez, Murillo (2011), los conceptos existentes sobre SDR difieren mucho con relación a su verdadera función, debido fundamentalmente a que la conceptualización se desarrolla en el campo de estudio donde se aplique.

En la actualidad el SDR ha evolucionado tecnológicamente y se encuentran más sistemas que puedan procesar software mediante DSP. Tradicionalmente el SDR se basa en un esquema conceptual elemental, el cual ha sido propuesto por tres bloques básicos, teniendo una primera sección de RF, seguida de una segunda sección de IF y una tercera sección de banda base, mostrada en la figura 1. Diagrama de bloques funcionales de SDR en el cual se exponen los tres bloques (sección RF, sección IF y sección de banda base).

Según Mitola (2001), en la práctica al verificar los SDR observamos las limitaciones de los procesadores actuales, que se definen como un radio multibanda capaz de soportar múltiples interfaces aire y protocolos utilizando una mezcla apropiada de circuitos especializados como son: ASICs, (Application Specific Integrated Circuit), arreglos de compuertas programadas en campo FPGAs, (Field Programmable Gate Arrays), Procesadores Digitales de Señales DSPs, (Digital Signal Processors) y microprocesadores de propósito general GPPs, (General Purpose Processors) .

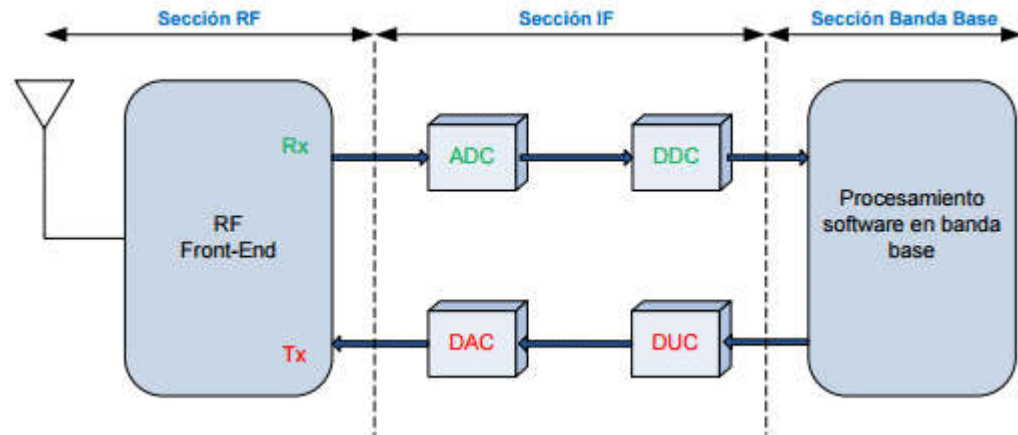


Figura 1. Diagrama de bloques funcionales de SDR

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Diagrama-de-bloques-funcionales-de-SDR-Dominguez_fig1_328346185, (2017).

2.1.1. Sección RF

Según Domínguez, Murillo (2011), la sección de RF del dispositivo USRP, es la encargada de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia, para luego acentuarlas y convertirlas en frecuencia intermedia en la recepción o amplificar y modular las señales de IF en el caso de trasmisión.

En el estudio de investigación se consideró utilizar el USRP B210 que cuenta con un transceptor; que es un dispositivo con componentes electrónicos de estado sólido, los cuales tienen la capacidad de procesar todos los niveles de las señales, permitiendo que sean adecuados los procesos subyacentes y se pueda enviar o recibir la información en los procesos que se requieran.

Por lo tanto, los procesos para adecuar los niveles de radiofrecuencia se dan en el bloque de la sección de RF.

Para el caso de la transmisión; se produce una amplificación de señal entregada por las etapas anteriores hasta el nivel de tener potencia suficiente para su transmisión por el medio de propagación.

Y en el caso de la recepción; la señal que es recibida trae consigo atenuación, interferencia que desgastan la señal y esta sección se encargará de aumentarla, sin llenarla de ruido, para que sea lo más similar a la original.

2.1.1.1. RF Front end.

Según Domínguez, Murillo (2011), en el SDR el RF Front end³ es una etapa en la entrada de Tx/Rx, donde se encuentran todos los circuitos que procesan la señal RF, antes de convertirla en frecuencia intermedia, este se encarga de trasladar adecuadamente y amplificar el centro de un rango de frecuencias a otro rango de frecuencias.

2.1.2. Sección de Frecuencia Intermedia

La sección de frecuencia intermedia es la parte del sistema SDR que se encarga de digitalizar una señal, para el caso de una transmisión la convierte de digital a analógica, para el caso de recepción todo lo contrario, en los dos casos se debe realizar el cambio de frecuencia al rango adecuado.

La sección de frecuencia intermedia cumple el principio superheterodino, que es un receptor de ondas de radio, este es un principio usado en todos los receptores de radio y televisión, incluyendo las telecomunicaciones en general. El receptor de ondas de radio

³ RF Front end: Extremo frontal de radiofrecuencia.

(superheterodino) utiliza un proceso de mezcla de frecuencias o heterodinación para convertir la señal recibida en una frecuencia intermedia fija.

Según RF Wireless World (2019), esta etapa es donde se realiza la mayor parte de la amplificación de la recepción. En una segunda etapa la transmisión se procesa en una frecuencia inferior para luego convertirla al valor final y amplificarla hasta el nivel requerido en la antena, se sigue con el proceso de la señal, para luego pasarla de IF a banda base con la finalidad de digitalizarla en la recepción o pasar la señal de banda base a IF para su transmisión. Esta etapa contiene módulos para ADC/DAC (*Analogue to Digital Converter, Digital to Analogue Converter*) que se encargan de la conversión analógica/digital, digital/analógica y módulos DDC/DUC⁴ (*Digital Down Converter, Digital Up Converter*) que se encarga de aumentar o disminuir la tasa de muestreo en la transmisión o recepción, como se observa en la figura 2. Conversión digital descendente de las muestras digitales de IF (frecuencia intermedia) en muestras digitales de banda base.

⁴ DDC/DUC: Compiladores diseñados para sistemas basados en SDR

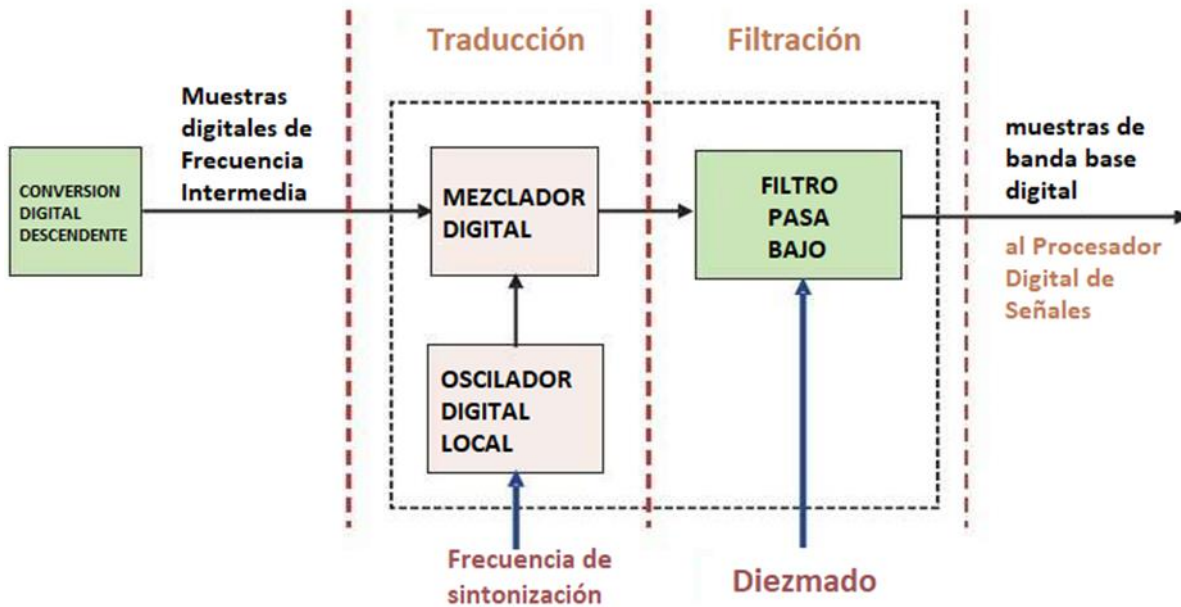


Figura 2. Diagrama de bloques de DDC

Fuente: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/DUC-vs-DDC.html>

RF Wireless World,(2019).

2.1.2.1. DDC.

Según RF Wireless World (2019) el DCC es un compilador encargado de la conversión digital descendente donde la función de este bloque es convertir muestras digitales de IF en muestras digitales de banda base como se mostró en la figura 2, este compilador cuenta con:

- Mezclador digital.
- Oscilador digital local.
- Filtro de paso bajo.

En el proceso de filtrado, una muestra N se mantiene fuera de cada muestra digital, si la frecuencia de muestreo de salida filtrada es más del doble del ancho de banda de salida, entonces no se perderá ninguna información.

Las señales filtradas tendrán una velocidad más baja, por lo tanto, también se pueden almacenar utilizando menor memoria, esto reducirá en gran medida el costo de inversión del sistema.

El DDC en su estructura realiza las siguientes tareas de procesamiento de señales:

- Frecuencia traducida con la ayuda de un dispositivo LO variable.
- Filtro de paso bajo con ancho de banda controlado por proceso de diezmado.

El ancho de banda de la señal DDC se establece utilizando el factor de (N) y el filtro FIR (Finite Impulse Response) de paso bajo:

- Frecuencia de muestra de banda base $F_b = F_s / N$
- Ancho de banda de banda base $= 0.8 * F_b$

2.1.2.2. DUC.

Según RF Wireless World (2019), este compilador es el encargado de la conversión digital ascendente, la función de este bloque es convertir muestras digitales de banda base en muestras digitales IF, el cual se muestra en la figura 3, este compilador cuenta con:

- Filtro de interpolación.
- Mezclador.
- Oscilador digital local.

Para la transmisión de una señal que necesita ser convertida de analógica a digital, tiene que ser procesada por este compilador, por lo tanto, el convertidor RF que vemos en la figura 3, nos indica que lo que sigue en la etapa de transmisión es un DAC para convertir las muestras IF digitales en señales de IF analógicas.

En la figura 1 se mostró luego del bloque DAC, se identifica un convertidor ascendente RF, el cual convierte la señal IF en señal RF y luego es transmitida por la antena donde la frecuencia de IF se encuentra determinada por un oscilador local.

Luego de la mezcla del convertidor se genera una muestra de salida que cuenta con dos muestras de entrada.

- Frecuencia de muestreo de la salida del mezclador –
DAC frecuencia de muestreo – F_s
- Frecuencia de muestreo LO – Frecuencia de muestreo de banda base – F_b
- Frecuencia de muestreo de banda base es mucho menor en comparación con la frecuencia de muestreo LO de F_s , se utiliza el filtro de interpolación

Según RF Wireless World (2019), el filtro de interpolación se usa para aumentar la frecuencia de muestra de la señal de banda base por el factor N, esto se conoce como factor de interpolación (N).

- Ancho de banda de banda base = $0.8 * F_b$
- Frecuencia de muestra de salida $F_s = F_b * N$

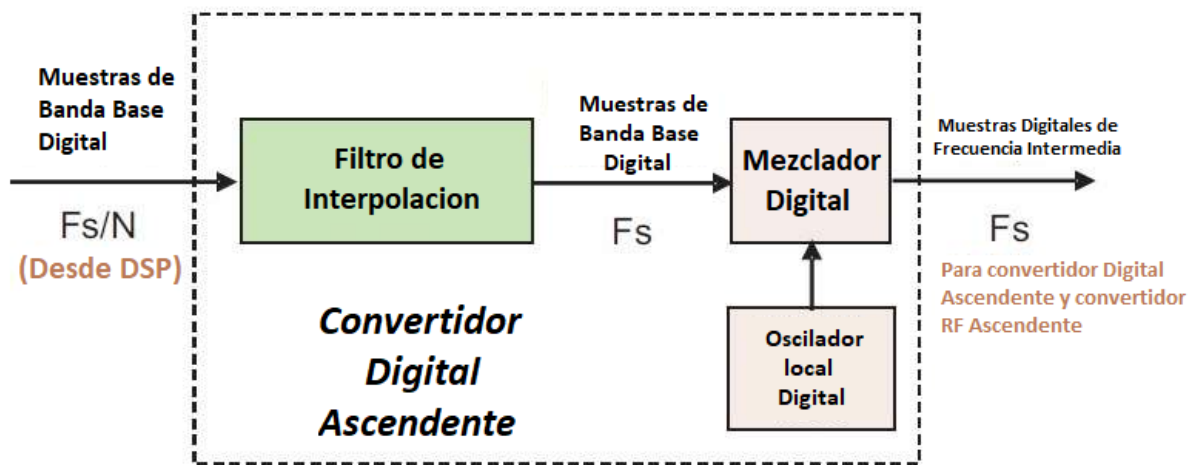


Figura 3. Diagrama de bloques de DUC

Fuente: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/DUC-vs-DDC.html>
RF Wireless World, (2019).

2.1.3. Sección banda base

Como en los sistemas de radio, la sección de banda base se encarga del filtrado, la modulación/demodulación y el análisis de software.

2.1.4. Arquitectura de SDR

Para entender la arquitectura de SDR debemos subdividir sus sistemas en la parte analógica y la parte digital basándonos en el diagrama de bloques funcionales.

La arquitectura es funcional dependiendo de lo que se quiera hacer, en sus inicios el SDR era visto como un sistema ideal o pragmático, donde realizaba las acciones con el sistema diseñándolo para pasar de manera directa a la funcionalidad, sin dedicarse a la teoría o la especulación, lo que nos lleva a entender que es más práctico y rentable diseñar por software cualquier dispositivo que establecer el diseño de cualquier dispositivo en hardware.

Según Tuttlebbe (2002), a partir de la década del 90 el SDR se definió de una manera más ideal y mucho más pragmática, con la evolución de la tecnología se hizo más flexible y dinámico. En la figura 4, se observa una arquitectura de un sistema SDR ideal que consiste en un subsistema analógico y un subsistema digital.



Figura 4. Arquitectura de un sistema SDR ideal.

Fuente: Tuttlebbe, (2002).

https://www.google.com/search?q=Arquitectura+de+un+sistema+SDR+ideal.&sxsrf=ALeKk01HuAfCMJkV78Faea3GmwvFKpoDA:1592840273399&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiP4Le14JXqAhWQGbKGHUuYCC8Q_AUoAXoECAsQAw&biw=1366&bih=608#imgrc=RCVudwwS1PTztM

Según Tuttlebbe (2002), tradicionalmente esta subdivisión conduce a considerar al hardware como elemento dominante del *front-end* y la dupla hardware-software como elementos dominantes del *back-end*. Estas asignaciones ciertamente cambiaron con el tiempo, en donde el software se ha convertido en el componente dominante y el hardware pasando a un rol de soporte.

a) Subsistema analógico

Según Tuttlebbe (2002), las funciones analógicas son aquellas que no pueden realizarse digitalmente, las cuales comprenden: el filtrado de RF, combinación de RF, pre - amplificación (recepción), amplificación de potencia (transmisión) y generación de la frecuencia de referencia.

La arquitectura empuja a la etapa de conversión analógica lo más cerca posible de la antena, en este caso, antes del amplificador de potencia RFPA (*Radio Frequency Power Amplifier*) en el trasmisor y después del amplificador de bajo ruido LNA (*Low Noise Amplifier*) en el receptor.

En la Tabla 1, Subsistema analógico se muestran los elementos de un subsistema analógico de una arquitectura SDR ideal.

Tabla 1. Elementos de un SDR ideal

Subsistema analógico	
Elementos	Función
Antena	Es responsable de la transmisión y recepción de las señales de radio frecuencia.
Circulador	El circulador (ideal) proporciona aislamiento básico de las señales de transmisión y recepción.
RF PA	EL RF PA se encarga de la amplificación de potencia de una señal (transmisor).
LNA	Ofrece una disminución de la relación señal/ruido; normalmente es el primer amplificador que encuentra la señal en el receptor.
DAC	Convierte una señal digital a una señal analógica.
ADC	Convierte una señal analógica a una señal digital.

Fuente: Tuttlebbe, (2002).

b) Subsistema digital

Según Tuttlebbe (2002), el subsistema digital consta de los siguientes elementos: los bloques DUC/DDC, las fuentes de procesamiento digital y la infraestructura software, este último constituye un punto de inflexión en el desarrollo de la SDR.

Este subsistema utiliza recursos de procesamiento digital para realizar funciones como la codificación y la modulación. En la Tabla 2 se detallan los elementos del subsistema digital de una arquitectura SDR ideal.

Tabla 2. Elementos del Subsistema digital

Componentes	Función
DUC	Traduce una señal desde banda base a una señal IF.
DDC	Convierte una señal de radio frecuencia en bruto o una IF en una señal banda base.
Fuentes de procesamiento digital	<p>GPP: dispositivos diseñados para propósitos generales como una PC o una estación de trabajo.</p> <p>DSP: es una de las tecnologías habilitantes de SDR, es un microprocesador (o un bloque) especializado para las necesidades operativas menos intensas para el procesamiento digital de una señal.</p> <p>FPGA: dispositivo semiconductor programable que permite programar funciones simples y complejas.</p> <p>ASICs: dispositivo hecho a medida para un uso en particular, son más rápidos que los FPGAs, pero su principal problema es la falta de flexibilidad. Por lo general, el ASIC no se considera parte del conjunto de soluciones dentro de una SDR.</p>

<p>Aplicaciones software</p>	<p>Framework: generalmente se denomina así a la combinación del hardware y el <i>middleware</i>.</p> <p>Middleware: ofrece una funcionalidad de abstracción envolviendo los elementos del hardware en objetos y proporcionando servicios que permitan a dichos objetos comunicarse entre sí a través de una interfaz estándar. Forman parte del <i>middleware</i>: sistema operativo, controladores de hardware, administración de recursos y software no especificado de la aplicación.</p> <p>CORBA: es un estándar que posibilita la interoperabilidad entre objetos distribuidos. Es un <i>middleware</i> que permite el intercambio de información independiente de las plataformas, del hardware, de lenguajes de programación y de sistemas operativos.</p> <p>API: herramienta que permite acceder a parámetros medibles y controlables de un sistema para configurarlos y controlarlos.</p>
<p>Manejo y control</p>	<p>Software que permite el control y la gestión de los datos.</p>
<p>Datos digitales del usuario en banda base</p>	<p>Dispositivo capaz de generar datos de usuario en banda base a través de un software, de una forma dinámica, automática y eficiente.</p>

Fuente: Tuttlebbe, (2002).

2.2. GSM

Según el Centro de Estudios de Telecomunicaciones de América Latina (2004), la tecnología GSM tiene la posibilidad de brindar al usuario el poder comunicarse en cualquier momento y desde el lugar que se necesite o desee, independientemente si se está quieto o en movimiento siendo desde siempre, uno de los objetivos de cualquier sistema de telecomunicaciones. Este tipo de tecnología se ha convertido en realidad en diferentes

prototipos, que en la antigüedad parecían imposibles, incluso algunos vistos en la ficción algunas veces han sido superados con la realidad.

Según el Centro de Estudios de Telecomunicaciones de América Latina (2004), por un lado, está el propio desarrollo de las comunicaciones de radio, iniciado por Marconi, DeForest, Tesla y otros a principios del siglo pasado, pero cuyos fundamentos teóricos fueron establecidos por Maxwell y Hertz en el siglo diecinueve.

Las primeras comunicaciones vía radio fueron las del servicio telegráfico realizado por Marconi en 1896 y la primera transmisión de voz vía radio también la realizó el inventor italiano en 1916.

Según Velazco (s.f.) la tecnología conocida como Group Special Mobile (GSM) también llamada *Global System For Mobile Communications*, (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles), es un estándar mundial para teléfonos móviles digitales, creado por la CEPT y posteriormente desarrollado por ETSI como un estándar para los teléfonos móviles europeos, con la intención de desarrollar una nueva normativa que fuera adoptada mundialmente.

GSM tiene cuatro versiones principales, basadas en las bandas: GSM-850, GSM-900, GSM-1800 y GSM-1900. GSM-900 (900MHz) y GSM-1800 (1,8 GHz) son utilizadas en la mayor parte del mundo, salvo Estados Unidos, Canadá y el resto de América Latina, lugares en los que se utilizan las bandas de GSM-850 y GSM-1900(1,9 GHz), ya que en EE. UU las bandas de 900 y 1800 MHz son de uso militar.

Inicialmente, GSM ha utilizado frecuencias de 900 MHz, pero tras su expansión acelerada, pronto se saturó el espacio radioeléctrico entorno a esa frecuencia por lo que, las

redes de telecomunicación pública empezaron a utilizar las frecuencias de 1800 y 1900 MHz, con lo cual es habitual que los equipos móviles de hoy en día sean tribandas.

2.2.1. GSM y el vínculo con un sistema SDR

GSM es la red mundial más grande del mundo, que engloba a la mayor parte del grupo de telecomunicaciones, encontrando dentro de ella a las operadoras, grupos móviles, celulares, comunicación militar, comunicación empresarial entre otros. La aplicación de esta tecnología se encuentra en el ámbito urbano donde la tecnología avanza día a día, pero donde aún existen lugares y personas que no acceden y cuentan con los beneficios de la tecnología GSM.

Según Hassan (2014), cientos de millones de personas en todo el mundo viven fuera del área de cobertura de los operadores celulares existentes; estas personas viven en gran parte en zonas rurales, donde las empresas de telecomunicaciones tradicionales no operan de manera rentable, debido a los altos costes y la baja densidad de suscriptores. Por otro lado, la innovación de tecnología actual de Radio Definido por Software (SDR), son tecnologías de bajo coste asociado a un software de código abierto como Open BTS, desafiando el estatus quo⁵ y ahora una comunidad rural puede construir y operar su propia red celular.

Según Riva, Kunst, Zerbini, Emanuel, Gonzales (2016), dentro de la arquitectura GSM, las estaciones transceptoras base (*Base Transceiver Station*) son las encargadas de comunicarse con las estaciones móviles *MS* (*Mobile Station*), a través de la modulación por desplazamiento mínimo Gaussiano *GMSK* (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Este tipo de modulación no contiene discontinuidades abruptas de fase como es el caso de otros tipos de modulación digital,

⁵ Estatus quo: Estado de agitación o conmoción.

lo que requiere un menor uso de ancho de banda, por lo que es muy utilizado en comunicaciones inalámbricas para servicios de telefonía móvil con múltiples usuarios.

En la actualidad un sistema SDR no solo implica tener facilidad de implementar cualquier sistema en software, más allá de este proceso se encuentra un factor determinante, el cual es experimentar de forma práctica Open BTS que será el factor determinante de forma experimental para la creación de una red de celular.

2.2.2. *Infraestructura de una red GSM*

Según Pérez (2012), una Red GSM consta de subsistemas.

- El subsistema de radio NSS (*Network Switching Subsystem*), se utiliza para el procesamiento de llamadas en el establecimiento de la comunicación, así como para el roaming⁶ y gestión de movilidad (MM). El NSS consta de conmutadores telefónicos MSC (Central de conmutación de servicios móviles), GMSC (*Gateway MSC*), TSC (*Tandem Switching Center*) y las bases de datos HLR (*Home Location Registrarse*), VLR (Registro de ubicación de visitantes), AuC (Centro de autenticación) y EIR (Registro de identidad del equipo)
- El subsistema de radio BSS (*Base Station Subsystem*), garantiza la transmisión de radio, gestiona los recursos de radio y permite la movilidad del móvil o teléfono celular. Este consta de estaciones de radio BTS (*Base Tranceiver Station*), todas las estaciones base (BTS) están conectadas a un controlador de estaciones base o BSC (*Base Control*

⁶ Roaming: La itinerancia es un concepto utilizado en telecomunicaciones que define la capacidad de un dispositivo inalámbrico para poder utilizar una cobertura de red distinta de la principal.

Station) y TRAU (*Transcoder and Rate Adaptation Unit*) que es un transcodificador o adaptador de velocidad y finalmente la estación móvil MS (*Mobile Station*).

- El subsistema de Operación y Mantenimiento OMC (*Operation and Maintenance Subsystem*).

La Figura 5, muestra la arquitectura de la red GSM; Estación Móvil MS: Terminal de Usuario que se comunica a través del interfaz aire.

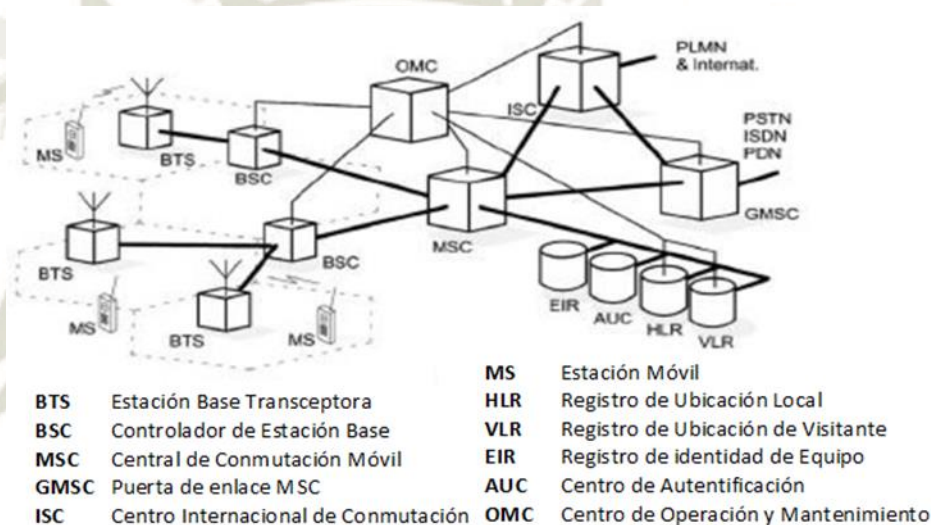


Figura 5. Arquitectura GSM

Fuente: Eberspaeche, Voegel, Bettstetter, (2001)

2.2.2.1. Subsistema de conmutación de red, NSS.

Según Eberspaeche, Voegel, Bettstetter (2001), el subsistema de red y conmutación (*Network and Switching System o NSS*), también llamado núcleo de red (*core network*), es la capa lógica de enrutamiento de llamadas y almacenamiento de datos realizando funciones de mucha importancia como: llamadas de extremo-extremo, manejo de la movilidad, gestión de

los suscriptores, la conmutación y la comunicación con otras redes como la ISDN (*Integrated Services Digital Network*).

Hasta el momento, sólo existía una conexión entre el terminal, las estaciones base BTS y su controlador BSC, y no se indicaba manera de establecer conexión entre terminales o entre usuarios de otras redes. Cada BSC se conecta al NSS y este se encargará de las siguientes funciones:

- Enrutar las transmisiones al BSC en que se encuentra el usuario llamado (central de conmutación móvil o MSC).
- Dar interconexión con las redes de otros operadores.
- Dar conexión con el subsistema de identificación de abonado y las bases de datos del operador, que dan permisos al usuario para poder usar los servicios de la red según su tipo de abono y estado de pagos (registros de ubicación base y visitante, HLR y VLR).

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), los elementos del subsistema NSS son: Centro de Conmutación Móvil (*MSC, Mobile Switching Center*), las bases de datos: de Registro de Ubicación Local (*HLR, Home Location Register*), de Registro de Ubicación de Visitante (*VLR, Visitor Location Register*), el Centro de Autenticación (*AuC, Authentication Unit Center*) y el Registro de Identidad del Equipo (*EIR, Equipment Identity Register*).

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), este sistema dispone de seis bases de datos, de las cuales dos se encargan de la gestión de ubicación y los datos del usuario. Estas son consultadas por la red, para ser registradas y para localizar al usuario.

Según Harte, Bramley, Davis (2012), Home Location Register (HLR), es una base de datos de suscriptores que contiene la identidad de suscriptor móvil internacional de cada

cliente - IMSI y el identificador internacional de equipo móvil - IMEI para identificar de manera única a cada cliente. El HLR contiene el perfil de usuario de cada cliente, que incluye el operador de larga distancia seleccionado, restricciones de llamadas, tarifas de cargos por servicio y otras opciones de red seleccionadas. En la tabla 3, podemos observar las funciones de HLR, en resumen.

Tabla 3. Funciones de HRL

Función	Procedimiento
Seguridad de los datos del usuario	Interfuncionamiento con AuC y VLR
Gestión de los datos del usuario	Interfuncionamiento con OMC y VLR
Gestión de estadísticos	Proviene de las BSS, se reenvían al OMC
Localización	Interfuncionamiento con VLR
Facturación	Interfuncionamiento con MSC

Fuente: Harte, Bramley, Davis , (2012).

Según Eberspaeche, Voegel, Bettstetter (2001), el registro de ubicación de visitantes (VLR), contiene un subconjunto de información HLR de un suscriptor para usar, mientras un teléfono móvil está activo en un MSC particular; el cual almacena datos temporales y atiende a los suscriptores que visitan la red diariamente. El VLR contiene información tanto de los visitantes como de los clientes domésticos.

Según Harte, Bramley, Davis (2012), la información HLR requerida por el usuario se almacena temporalmente en la memoria VLR y luego se borra, ya sea cuando el teléfono inalámbrico se registra con otro MSC o en otro sistema, o después de un período específico de inactividad.

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), también es responsable de la localización y del almacenamiento de todos los datos de los usuarios que se encuentran en un área determinada, siendo relevante que VLR guarda los perfiles de los suscriptores para la facturación de los recursos consumidos.

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), el registro de identidad del equipo (EIR), es una base de datos que contiene la identidad de los dispositivos de telecomunicaciones (como los teléfonos inalámbricos) y el estado de estos dispositivos en la red (como autorizada o no autorizada). El EIR se usa principalmente para identificar teléfonos inalámbricos que pueden haber sido robados o tienen patrones de uso cuestionables que pueden indicar un uso fraudulento.

Según Del Valle (2011), la base de datos se divide en tres secciones que procesa EIR.

- White List – contiene los IMEI de todos los usuarios de los operadores de los países con los que se tienen acuerdos de roaming internacional.
- Black List – contiene los IMEI que se consideran bloqueados.
- Grey List – contiene los IMEI marcados como faulty (no homologados o defectuosos).

Los terminales de esta lista generan una alarma a los operadores cuando se solicita el acceso, permitiendo la identificación del abonado que utiliza el terminal y del área donde se encuentra.

Según Harte, Bramley, Davis (2012), el centro de autenticación (AuC), es el centro AuC donde se almacena y procesa la información que se requiere para validar la identidad de un teléfono inalámbrico antes de la prestación del servicio.

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), este proceso de seguridad almacena datos y claves confidenciales utilizadas para la autenticación y el cifrado.

Según Harte, Bramley, Davis (2012), el SMS Center - SMSC - recibe, almacena, entrega y confirma la recepción de mensajes cortos.

Según Harte, Bramley, Davis (2012), el Group Call Register - GCR - es una base de datos de red que contiene una lista de los miembros del grupo y los atributos que permiten la configuración y el procesamiento de llamadas hacia y desde los miembros del grupo. El GCR contiene las listas de miembros, las características de la cuenta, la autorización de prioridad y la ubicación actual de los miembros del grupo.

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), la Central de Conmutación Móvil- MSC es la unidad central del NSS y cumple funciones como: configuración de llamadas, enrutamiento, conmutación, transferencias, traspaso de conexión (en el caso de cambiar de una celda a otra), registro de ubicación de usuarios, entre otras funciones.

Según Harte, Bramley, Davis (2012), el MSC procesa solicitudes de conexiones de servicio desde dispositivos móviles y personas que llaman por línea terrestre, y enruta las llamadas entre las estaciones base y la red telefónica pública conmutada (PSTN). El MSC recibe los dígitos marcados, crea e interpreta tonos de procesamiento de llamadas y enruta las rutas de llamadas.

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), una red celular puede tener varios MSCs, cada uno de los cuales son responsables de una parte de la red, las llamadas que se

originan o terminan en una red fija son manejadas por una puerta de enlace (gateway⁷) llamada GMSC (Gateway Mobile Switching Center), la figura 6, muestra la estructura de MCS.

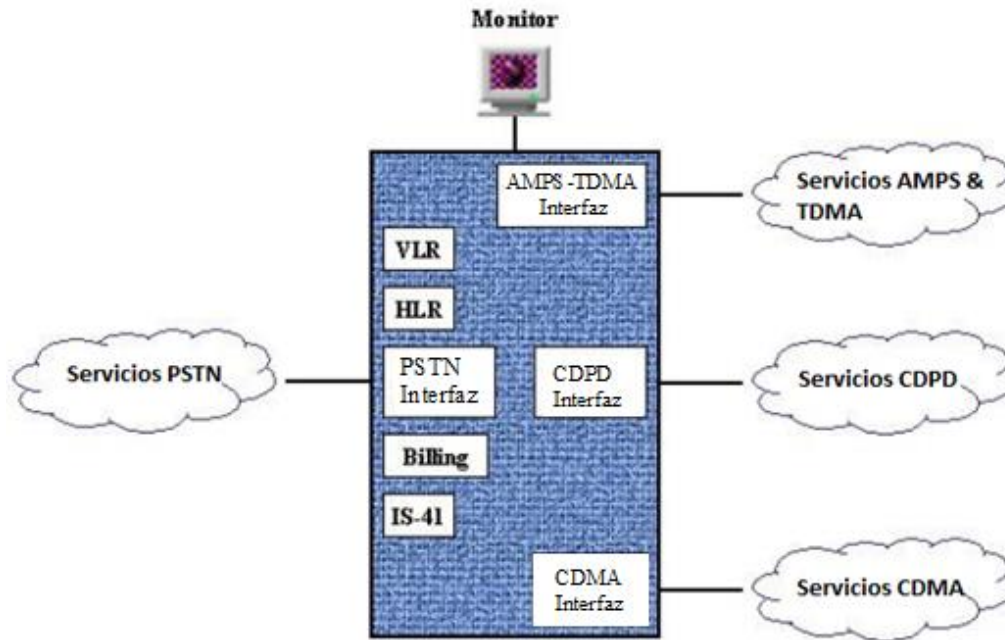


Figura 6. Estructura del MSC

Fuente: Pérez, Vega, Hurtado, (2010).

2.2.2.2. Subsistema de estación base.

Según Heine (1998), el subsistema BSS también denominado como red de acceso a través de la interfaz aérea, es un subsistema que proporciona una conexión entre las MS de un límite área y el subsistema de conmutación de red (NSS) y realiza funciones relacionadas a las técnicas de acceso radio como gestión del canal y control de los enlaces de radio.

Según Gu, Peng (2012), el BSS contiene varios BSCs, donde cada uno controla varias BTSs, entre las funciones que cumple un BSC que se han identificado: controlar el recurso de

⁷ Gateway: O puerta de enlace es un dispositivo, que permite interconectar redes con protocolos y arquitecturas diferentes a todos los niveles de comunicación. Su propósito es traducir la información del protocolo utilizado en una red al protocolo usado en la red de destino.

acceso radio de GSM, el traspaso conocido como handover⁸, la inter-celda y el controlador de la potencia, como se muestra en la figura 7. Mientras tanto, las tareas más importantes de una BTS son: codificación de canal, cifrado y descifrado de la interfaz de radio y transcodificación y adaptación.



Figura 7. Esquema de handover entre dos celdas y sus BTS en el centro de cada celda
Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Handover>

Según Gu, Peng (2012), el BSS contiene los siguientes elementos:

- Uno o más BTS (estación transceptora).
- Un BSC (controlador de estación base).
- Una TRAU (velocidad de transcodificación y unidad de adaptación).

⁸ Handover: Es un sistema utilizado en comunicaciones móviles celulares que tiene como objetivo transferir el servicio de una estación base a otra cuando la calidad del enlace es insuficiente en una de las estaciones. Este mecanismo garantiza la realización del servicio cuando un móvil se traslada a lo largo de su zona de cobertura.

Según Heine (1998), la estación Móvil MS es un equipo igual de complejo que una BTS, la diferencia entre las dos es que una se mueve y la otra es estacionaria, toda función conocida de una BTS la tiene una MS, donde resaltan sistema de marcación por tonos, también llamado sistema multifrecuencia DTMF (*Dual Tone Multi Frequency*).

El MS no solo es un compañero del BTS, ya que se comunica directamente con el MSC y el VLR, a través de la movilidad de gestión (MM) y el control de llamadas (CC).

Todo esto es utilizado por el suscriptor para acceder a los servicios proporcionados por la red GSM; tradicionalmente se consideraba parte del BSS siendo la función principal del MS la de transmitir y recibir voz y datos a través de la interfaz aire, encontrado como una parte esencial de un MS, al SIM (*Subscriber Identity Module*) que es el módulo de identidad del suscriptor y el Equipo Móvil (*Mobile Equipment*), en la figura 8. se observan los tipos de estaciones móviles.

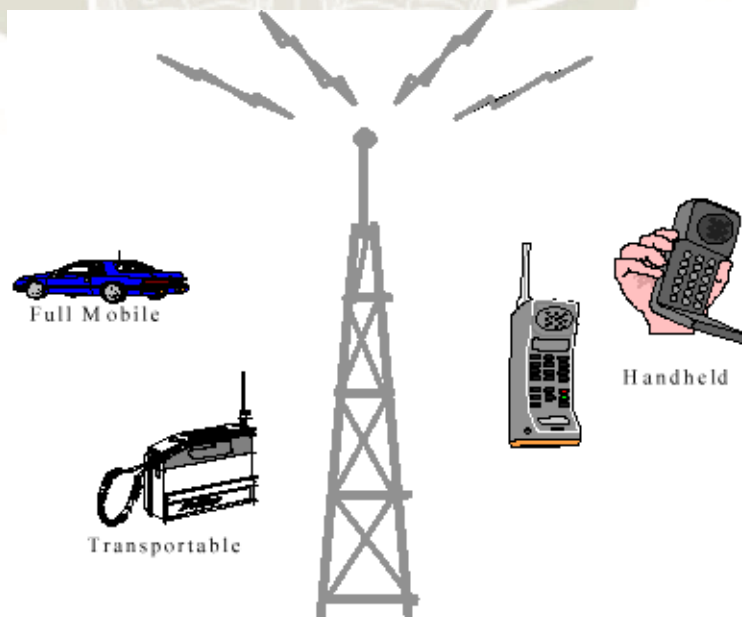


Figura 8. Tipos de MS

Fuente: Pérez, Vega, Hurtado, (2010).

Según Heine (1998), el Módulo de Identidad del Suscriptor (SIM), tiene como tarea principal la de almacenar datos, eso no significa que los datos son solo datos de suscriptor, se debe diferenciar entre tipos de datos para varias tareas, los parámetros más importantes que posee una SIM se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos almacenados en una SIM

Parámetro	Observaciones
Datos administrativos	
PIN / PIN2 (m / v)	Número de identificación personal; solicitado en cada encendido (PIN o PIN2)
PUK / PUK2 (m / f)	Clave de desbloqueo de PIN; requerido para desbloquear una SIM
Tabla de servicio SIM (m / f)	Lista de la funcionalidad opcional de la SIM
Medidor de carga (o / v)	Se pueden establecer cargos e incrementos de tiempo
Lengua (m / v)	Determina el idioma para las indicaciones de la estación móvil
IMSI	El numero internacional del abonado
MSISDN	El número telefónico del abonado

Fuente: Heine, (1998).

Según Heine (1998), el Equipo Móvil (ME) es el equipo como tal y es independiente del MS, la identidad del ME es otorgada por los fabricantes de los dispositivos móviles.

2.2.2.3. Subsistema de operación y mantenimiento OMSS.

La unidad principal de OMSS será la entidad funcional a través de la cual el operador monitoriza y controla la red; su objetivo será ofrecer al cliente el correcto funcionamiento de la red, así como su mantenimiento eficiente, tanto regional como local, la supervisión constante del estado de la red será vital a la hora de dar este tipo de servicios, debido a que la satisfacción

del usuario es determinante para el éxito comercial, en ese sentido es necesario considerar contar con los centros de:

- **Centro de Operación y Mantenimiento- OMC.** (*Operation and Maintenance Center*) estará conectado a todos los equipos del NSS y también a la BSC.
- **Centro de Gestión de Red- NMC.** (*Network Management Center*), junto con el OMC controla y gestiona el funcionamiento de la red, es un sistema de operación que constituye la máxima jerarquía dentro del sistema de explotación; de este centro dependen todos los demás centros de operación y mantenimiento.

En la figura 9., se observa como interviene el OMC y el NMC en la arquitectura de una red GSM.

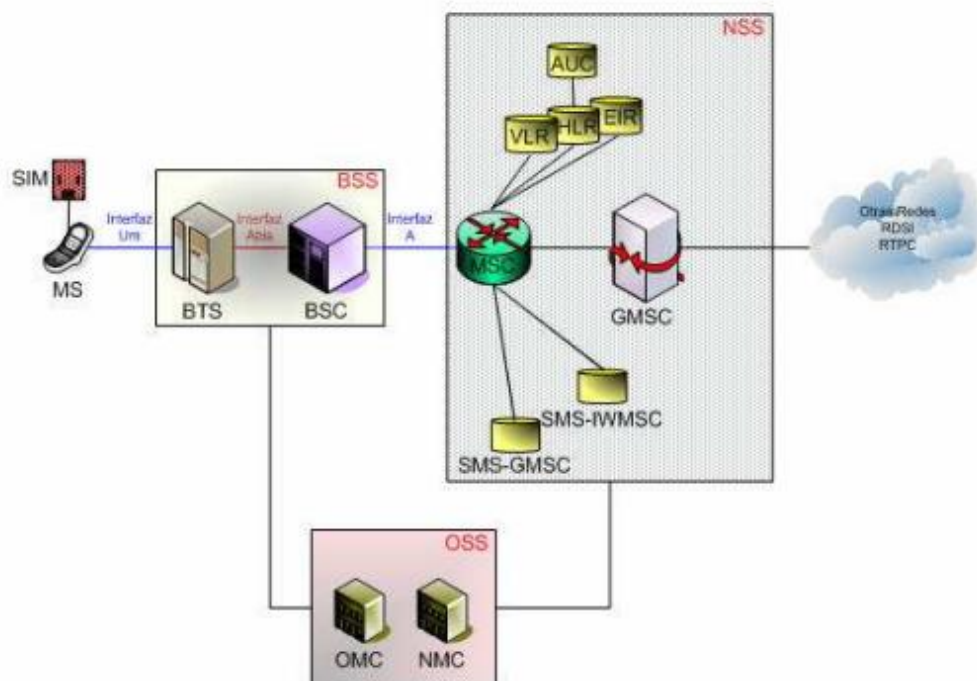


Figura 9. Intervención de centros de control y mantenimiento en una red GSM

Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11980/fichero/CAP%C3%8DTULO+3+-+FUNDAMENTOS+GSM+Y+UMTS%252F3.3+GSM.pdf>

Según Pérez, Vega, Hurtado (2010), las interfaces de una red GSM, permiten la interacción a los diferentes componentes dentro de la red, como se observa en la figura 10., la conexión entre dos distintos Hardware. Estas conexiones servirán para dar soporte a los mensajes intercambiados entre cada sistema para que cada protocolo escriba un código interoperable.

El Instituto de Estandarización de Telecomunicaciones Europeas (ETSI), produjo unas normas donde se especifican protocolos GSM. Entonces las especificaciones describen interfaces normalizadas entre protocolos, lo cual permite que diferentes protocolos interoperen.

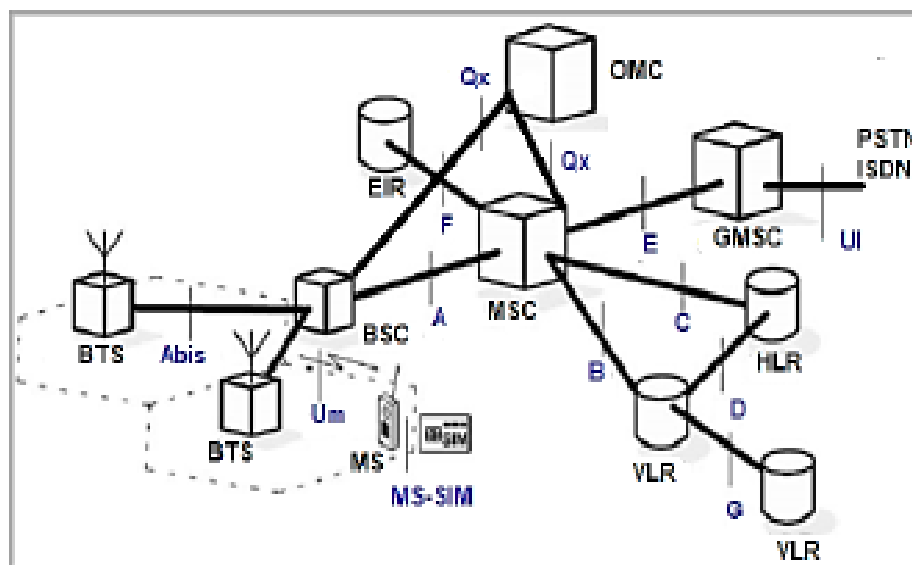


Figura 10. Interfaces GSM

Fuente: Pérez, Vega, Hurtado, (2010).

En la tabla 5., se describe las funciones de las interfaces GSM.

Tabla 5. Descripción de interfaces

Interfaz	Ubicación	Funciones
A	BSS-MSC	Se usa para la transferencia de datos para la gestión del BSS, para control de la conexión y gestión de la movilidad.
Abis	BTS-BSC	Utilizada para la comunicación entre las BTSs y el BSC.
B	MSC-VLR	Utilizada cuando un MSC solicita datos a un VLR sobre un MS.
C	MSC-HLR	El MSC solicita información al HLR durante la configuración de llamadas y envía información de carga.
D	HLR-VLR	Utilizada para cuando el VLR informa al HLR sobre la ubicación actual de un suscriptor.
E	MSC-MSC	Utilizada para realizar un traspaso entre MSCs, cuando un abonado cambia de un MSC a otro durante una conversación.
G	VLR-VLR	Utilizada cuando un nuevo VLR solicita datos a un antiguo VLR para la actualización de la ubicación.
F	MSC-EIR	Utilizada para solicitar y verificar la actualización de la ubicación de un equipo o abonado.
MS-SIM	MS- SIM	Define los requerimientos de las características físicas del SIM y la transmisión de protocolos de comunicación entre el SIM y el MS.
Um	BTS-MS	Utilizada para la comunicación entre el MS y la red.
UI	GMSC-Red externa	Proporciona comunicación entre el GMSC y las redes como la PSTN e ISDN.
Qx	OMC-BSS OMC-NSS	Proporciona comunicación entre el OMC y los demás subsistemas.

Fuente: Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter, (2001).

2.2.3. Identificadores y direcciones GSM

GSM define y brinda servicios de diferentes maneras, los números de teléfono, suscriptores e identificadores de equipos son algunos de los conocidos, existen otros identificadores que han sido bien definidos que son necesarios para la gestión de movilidad del abonado y para abordar los elementos de red restantes, las direcciones e identificadores vitales que se usan en GSM se observan en la figura 11.

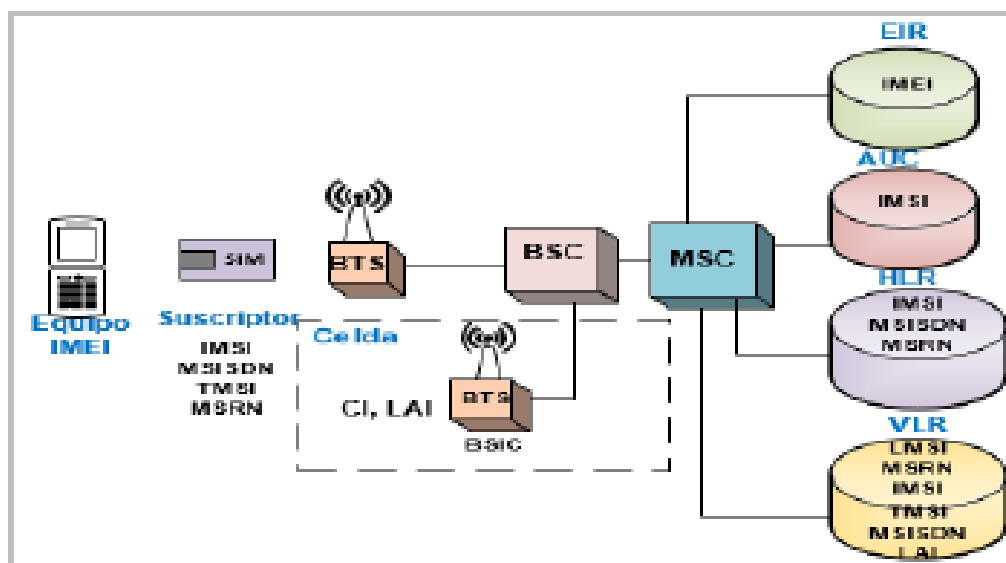


Figura 11. Base de datos e identificadores GSM

Fuente: <https://docplayer.es/113164395-Escuela-politecnica-nacional.html>

2.2.3.1. Identificador para la identidad del equipo IMEI.

La identidad internacional del equipo de la estación móvil (IMEI) se parece más a un número de serie que identifica distintivamente una estación móvil a nivel internacional, esto lo asigna el fabricante del equipo y lo registra el operador de red, que lo almacena en el Registro

de identidad del equipo (EIR); por medio de IMEI, uno reconoce equipos obsoletos, robados o no funcionales.

El IMEI consta de cinco partes:

- Tipo de Código de Asignación TAC (*Type Allocation Code*): 6 dígitos, asignados centralmente.
- Código de ensamblaje final FAC (*Final Assembly Code*): 2 dígitos, asignados por el fabricante.
- Número de serie (SNR): 6 dígitos asignados por el fabricante.
- Repuesto (SP): 1 dígito.
- Número de versión de software SVN (*Software Versión Number*): permite al fabricante identificar diferentes versiones de un tipo dado de móvil aprobado.

Por lo tanto, $IMEI = TAC + FAC + SNR + SP$, se caracteriza de manera única una estación móvil que ofrece pistas sobre el fabricante y la fecha de fabricación.

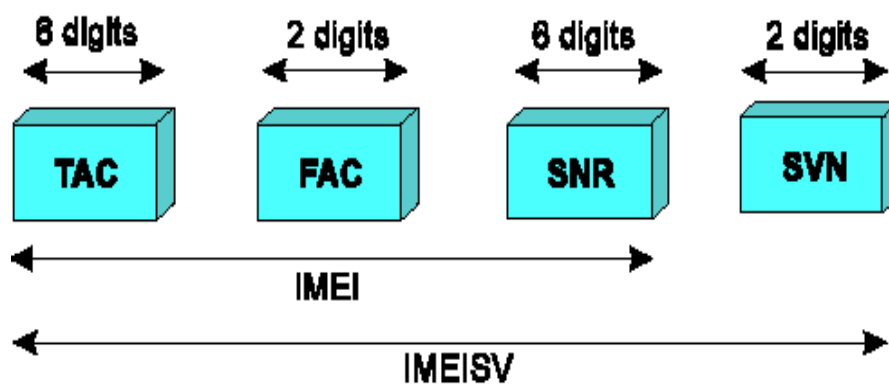


Figura 12. Estructura IMEI

Fuente: <http://ijrect.com/issues/vol2issue1/aparna1.pdf>

2.2.3.2. Identificador para la identidad de suscriptor SIM.

Esta es una pequeña tarjeta inteligente, que se incorpora de manera obligatoria para las terminales que quieran conectarse a una red GSM, esta tarjeta es la que identifica al suscriptor.

En la figura 13., podemos observar una tarjeta SIM.

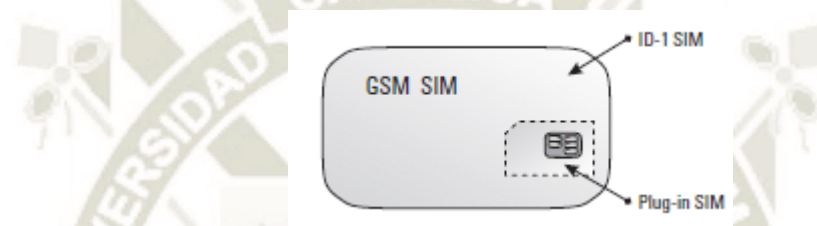


Figura 13. Tarjeta SIM

Fuente: GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation Gunnar, Heine.

- ICC-ID (Internacional Circuit Card - ID) – la tarjeta de memoria o ID memorizados en la tarjeta se encuentra impreso sobre esta e identifica internacionalmente una tarjeta SIM.
- El IMSI consta de tres partes:
 - Código móvil del País MCC (*Mobile Country Code*) – Identifica el país con una numeración de 2 ó 3 dígitos internacionalmente estandarizados que identifican el país de domicilio del suscriptor móvil.
 - Código de la red del móvil MNC (*Mobile Network Code*) – Identifica el operador de red con 2 dígitos que identifican de manera única las redes móviles dentro de

un país y cuya función es identificar la red móvil local de un suscriptor conocida como PLMN (*Public Land Mobile Network*) Del Valle (2011).

- Número de identificación de la estación móvil MSIN (*Mobile Subscriber Identification Number*) – Identifica máximo 13 dígitos que representan la identificación de cuenta única del suscriptor dentro de la red del operador (PLMN) Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001).

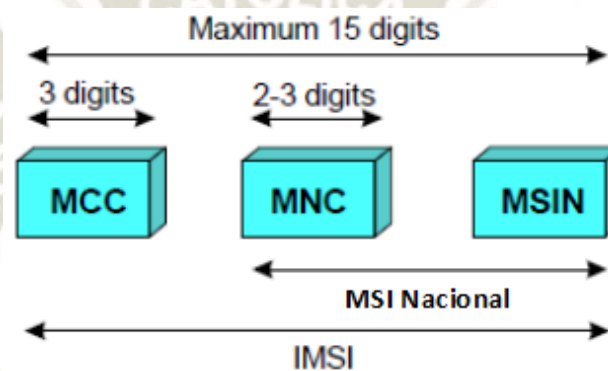


Figura 14. Estructura IMSI

Fuente: <http://ijrect.com/issues/vol2issue1/aparna1.pdf>

2.2.3.3. Identificador del servicio MSISDN.

Según Gu, Peng (2012), el MSISDN (*Mobile Station Integrated Services Digital Network*) es el número del teléfono de un usuario móvil, el cual únicamente identifica la suscripción del teléfono móvil en el plan de numeración de la PSTN, contiene un máximo de 15 dígitos, este MSISDN es la identidad del servicio, donde el usuario tiene varios MSISDNs, cada uno de los servicios tiene una función en particular como son la llamada de voz, fax, otros. GSM destaca en este aspecto por ser el primer sistema en distinguir entre la identidad del suscriptor y la identidad del servicio.

Según Gu, Peng (2012), el MSISDN está basado en el plan de numeración de la ISDN y fue asignado para que los abonados de la ISDN o PSTN puedan llamar a cualquier suscriptor de una red móvil.

El MSDISDN consta de tres partes:

- Código del país CC (*Country Code*) – Tiene de 1 a 3 dígitos.
- Código de destino nacional NDC (*National Destination Code*) – Tiene de 2 a 3 dígitos.
- Número de suscriptor SN (*Subscriber Number*) – Tiene un máximo de 10 dígitos.

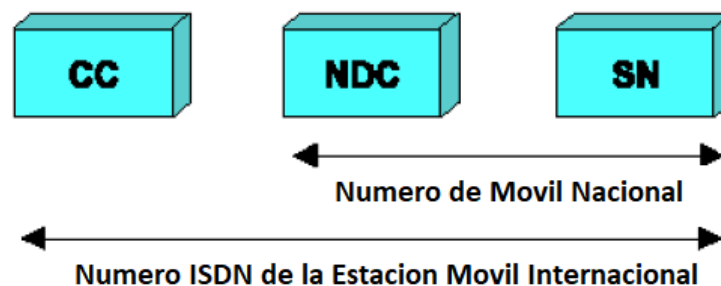


Figura 15. Estructura de MSISDN

Fuente: <http://ijrect.com/issues/vol2issue1/aparna1.pdf>

2.2.3.4. Identificadores temporales.

Según Del Valle (2011), el Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI), es usado para proteger la privacidad del suscriptor en la interfaz aérea, el TMSI tiene simplemente importancia local, esto es dentro del área del MSC/VLR y desde aquí su estructura puede ser determinada por cada operador; el TMSI podría no ser más grande de cuatro octetos y su codificación es establecida mediante un acuerdo entre el operador de red y el fabricante del equipo.

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), Location Area Identity (LAI) es usado para la localización en un área una red GSM, le indica al MSC en qué área de localización (LA) está localizado el MS; también es usado para actualizar la localización del suscriptor móvil; si el LAI cambia la MS detecta el cambio y solicita actualizar la ubicación en el HLR y en el VLR, el LAI consta de tres partes:

- MCC Código móvil del país, el mismo del IMSI.
- MNC Código móvil de Red, el mismo del IMSI.
- LAC Código del área de localización – la longitud máxima del LAC es de 16 bits, permitiendo 65,536 áreas de localización diferentes para ser definidas en una PLMN.

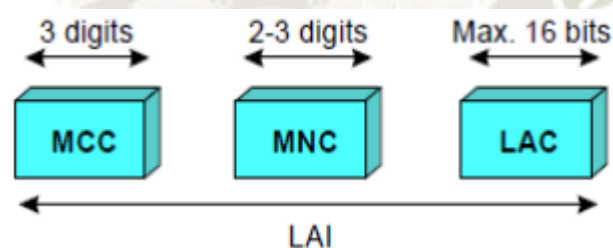


Figura 16. Estructura de LAI

Fuente: <http://ijrect.com/issues/vol2issue1/aparna1.pdf>

Según Del Valle (2011), Mobile Station Roaming Number (MSRN), el HLR sabe en qué área de servicio MSC/VLR se encuentra localizado un suscriptor, cuando un suscriptor móvil tiene una llamada entrante, el HLR solicita al actual MSC/VLR le proporcione un MSRN como un número temporal de ruteo para que el suscriptor obtenga la llamada; a la recepción del MSRN, el HLR lo envía al GMSC que esté disponible para usar ese número para enrutar la llamada al MSC/VLR para intercambiar donde está registrado el suscriptor que tomó la llamada.

El MSRN consta de cuatro partes:

- CC Código del País.
- NDC Código de destino nacional.
- NPA Número de planificación de área.
- SN Número de suscriptor.

Nota: En este caso, el SN es la dirección de intercambio del MSC.

Según Eberspaaeche, Voegel, Bettstetter (2001), Local Mobile Station Identity (LMSI) el VLR utiliza el LMSI para optimizar las búsquedas de un MS en su base de datos, cada vez que se envían mensajes al VLR con respecto a un MS este identificador es agregado. El LMSI consta de 4 octetos y es asignado por el operador.

2.2.4. Principios y descripción del sistema de radio de GSM

Según Halonen, Romero, Melero, Wiley, Sons (2003), el funcionamiento de una red GSM está relacionada a las redes móviles digitales, que actualmente se basan en las propiedades de radio GSM; es necesario comprender el funcionamiento de los conceptos básicos, para relacionarlos con la estructura de la red Open BTS, en principio GSM es un sistema *multicarrier*⁹ que utiliza una combinación de una estructura TDMA (*Time Division Multiple Access*) y FDMA (*Frequency Division Multiplex Access*).

El espacio entre portadoras es de 200 KHz, permitiendo 124 canales de radio para el caso GSM-900 por cada enlace (ascendente y descendente) y una banda de guarda de 200 KHz en los extremos de la banda.

⁹ Multicarrier: Multiportadora para acceder a un medio.

- Según Eberspaeche, Voegel, Bettstetter (2001), TDMA (*Time Division Multiple Access*), es el acceso múltiple por división de frecuencia, es uno de los procedimientos más comunes de acceso múltiple, la banda de frecuencia se divide en canales de cierto ancho de banda, de modo que cada conversación se lleva a cabo en una frecuencia diferente, en la figura 17., se observa un esquema FDMA.



Figura 17. Canales del sistema FDMA

Fuente: <https://docplayer.es/113164395-Escuela-politecnica-nacional.html>

Según Nardis (2017), cada usuario transmite sin limitaciones de tiempo, pero utilizando solo una porción de todo el ancho de banda de frecuencia disponible. Diferentes usuarios están separados en el dominio de frecuencia

- Según Eberspaeche, Voegel, Bettstetter (2001), TDMA (*Time Division Multiple Access*), es el acceso múltiple por división de tiempo se utiliza en los sistemas de radio móviles digitales, a las estaciones móviles se les asigna cíclicamente una frecuencia para uso exclusivo, solo durante un intervalo de tiempo, es decir el rango de frecuencias

del sistema se subdivide en sub – bandas y para el acceso múltiple a cada una de estas se utiliza TDMA. Las sub – bandas se conocen como frecuencias portadoras y los sistemas móviles que utilizan esta técnica se conocen como sistemas multicarrier, en la figura 18., se observa un esquema FDMA.

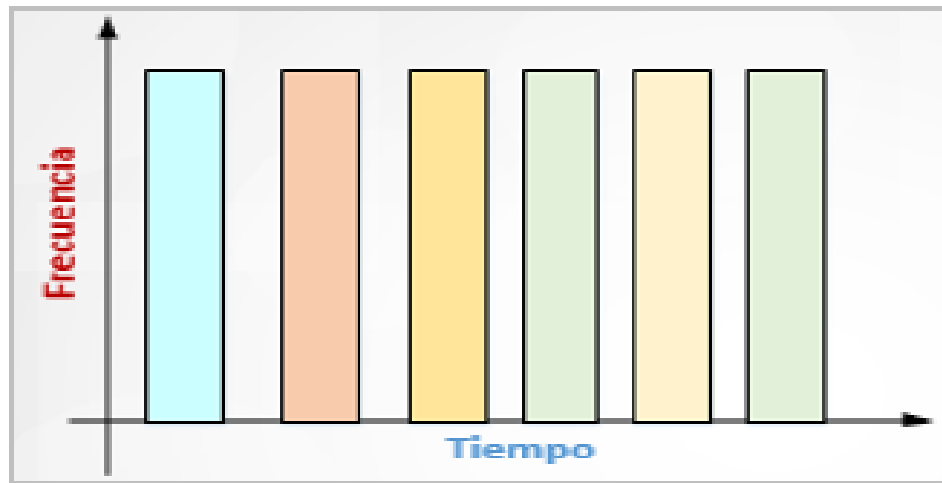


Figura 18. Canales del sistema TDMA

Fuente: <https://docplayer.es/113164395-Escuela-politecnica-nacional.html>

Según Sapienza (2008), cada usuario puede transmitir solo dentro de un intervalo de tiempo específico y diferentes usuarios transmiten en diferentes intervalos de tiempo; cuando los usuarios transmiten ocupan todo el ancho de banda de la frecuencia, pero la separación entre usuarios se realiza en el dominio del tiempo.

- En la diferenciación entre FDMA vs TDMA se ha determinado que la división de frecuencia es muy simple, todos los transmisores que comparten los medios tienen espectros de potencia de salida en bandas no superpuestas; muchos de los problemas experimentados en TDMA debido a diferentes retrasos de propagación se eliminan en FDMA; la principal desventaja de FDMA es que es relativamente caro y se requieren filtros de paso de banda complicados mientras que TDMA se desarrolla principalmente

con funciones lógicas mucho más baratas, otra desventaja de FDMA es la linealidad bastante estricta.

2.2.5. Estructura básica del canal

Según Halonen, Romero, Melero, Wiley, Sons (2003), el espacio de banda transportadora es de 200 KHz, permitiendo 124 canales radio para el caso GSM-900 por cada enlace (ascendente y descendente) y una banda de guarda de 200 KHz en los extremos de la banda, cada canal de radio está dividido en 8 ranuras en el tiempo (slots), denominadas time slots (TS) y con una duración de 0.577 ms, como se observa en la figura 19.

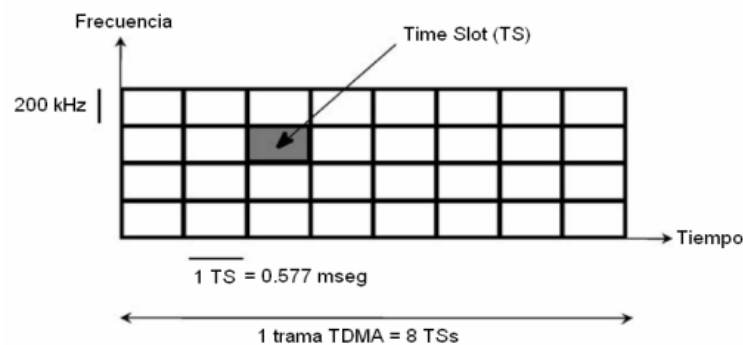


Figura 19. Esquema de acceso al medio GSM

Fuente: T. Halonen, J. Romero, y J. Melero, "GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS", 2nd. Edition, England: John Wiley & Sons Ltd, (2003)

Los datos transmitidos en un TS (Time Slot) se denominan ráfaga, existen cinco tipos distintos de ráfagas:

- Normal.
- Ráfaga de acceso.

- Ráfaga de corrección.
- Ráfaga de sincronización.
- Ráfaga dummy.

El formato y la información de cada una, depende del tipo de canal al que pertenezca, en cada ráfaga se transmiten 156.25 bits, conociendo que esto ocurre en 0.577 milisegundos, las tasas que se alcanzan en esta interfaz son:

- 33.9 kbps por time-slot.
- 270.8 kbps por portadora.

Según Eberspaeche, Voegel, Bettstetter (2001), la modulación usada en GSM es GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*), como se observa en la figura 20., GSM asigna un ancho de banda de 25 MHz para la banda de 900 MHz, dos bandas emparejadas: una para el enlace ascendente o el enlace inverso desde 890 a 915 MHz, donde el móvil transmite a la estación base y otra para el enlace descendente o enlace directo desde 935 a 960 MHz donde la estación base transmite, la separación entre las bandas ascendente y descendente es de 45 MHz.

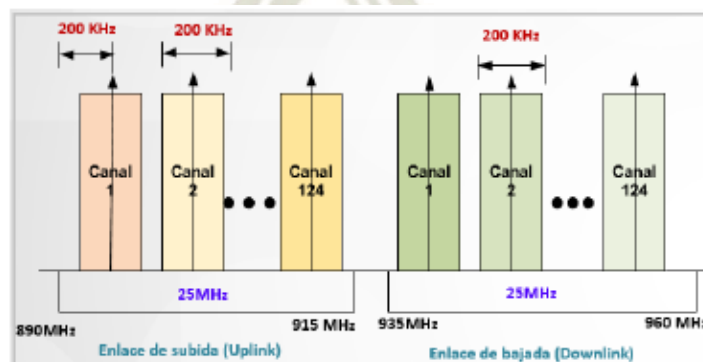


Figura 20. Asignación del ancho de banda para la banda de frecuencia de los 900 MHz
Fuente: G. Gu and G. Peng, "The survey of GSM wireless communication system," *International Conference on Computer and Information Application*, pp. 121–124, Gu, Peng (2010).

2.2.5.1. Asignación de bandas de frecuencia en GSM.

Según el Proyecto Asociación de Tercera Generación - 3rd Generation Partnership Project - 3GPP, Project (2010), en la Tabla 6 se observa la distribución de las bandas de frecuencia estandarizadas para GSM, el ARFCN (*Absolute Radio-Frequency Channel Number*) es un código que especifica un par de portadoras de radiofrecuencia usado para la transmisión y recepción, uno para enlace ascendente y otro para el descendente

Tabla 6. Bandas de frecuencia estandarizadas para GSM

Banda de frecuencia	Enlace ascendente	Enlace descendente	ARFCN	Región/País
GSM 400	450.4-457.6 MHz ó 478.8-486 MHz	460.4-476.6 o 478.8-486 MHz	259-293	Europa
GSM 800	824-849 MHz	869-894 MHz	128-251	América
P-GSM 900 <i>Primary GSM</i>	890-915 MHz	935-960 MHz	1-124	Europa, Asia del Pacífico, África
E-GSM 900 <i>Extended GSM</i>	880-915 MHz	925-960 MHz	0-124 975-1023	Europa, Asia del Pacífico, África
GSM-R 900 <i>GSM Rail</i>	876-915 MHz	921-960 MHz	0-124 955-1023	Europa, China, India Arabia Saudí
DCS 1800	1710-1785 MHz	1805-1880 MHz	512-885	Europa, Asia del Pacífico, África

Fuente: 3GPP, Project (2010).

2.2.6. Asignación del espectro radioeléctrico en Perú

Según el MTC, el espectro radioeléctrico es un recurso natural conformado por el conjunto de ondas electromagnéticas cuyas frecuencias se fijan convencionalmente desde 9 kHz hasta 300 GHz y que forma parte del patrimonio de la nación, el Estado a través del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), es soberano en su espectro radioeléctrico, teniendo como funciones gestionar, administrar y controlar el espectro de ondas electromagnéticas.

En febrero el MTC modificó el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF), dichas modificaciones al PNAF tuvieron por objeto:

- Declarar en reserva algunas bandas de frecuencias, para su reordenamiento y modificación a fin de que sean consideradas para las Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT) que permitan servicios 3G, 4G y superiores.
- Determinar la forma de asignación de estas bandas.

En la figura 21., se muestra la distribución de bandas.

MTC propuso topes por bloques de bandas por grupo económico: Claro y Entel estarían por encima de los topes en bandas medias

Tipos de banda	Banda	Rangos de frecuencias	Tope vigente	Topes propuestos	Situación actual por grupo económico (Lima)
Bandas bajas <= 2.2 GHz	450 MHz	452,5 – 457,5 / 462,5 – 467,5 MHz	-	140 MHz	Claro: 90 MHz Telefónica: 137.5 MHz Entel: 127.4 MHz Bitel: 57 MHz
	700 MHz	703 – 748 / 758 – 803 MHz	30 MHz		
	850 MHz	824 – 849 / 869 – 894 MHz	25 MHz		
	800 MHz	807 – 824 / 852 – 869 MHz	60 MHz		
	900 MHz	894 – 915 / 939 – 960 MHz			
	1 900 MHz	1 850 – 1 910 / 1 930 – 1 990 MHz			
2.2 GHz < Bandas medias <= 6 GHz	1.7 / 2.1 GHz	1 710 – 1 780 / 2 110 – 2 180 MHz	40 MHz	120 MHz	Claro*: 188 MHz Telefónica: 50 MHz (3.5 GHz) Entel**: 214 MHz Bitel: 0 MHz
	2.3 GHz	2 300 – 2 400 MHz	-		
	2.5 GHz FDD	2 500 – 2 570 / 2 620 – 2 690 MHz	-		
	2.5 GHz TDD	2 570 – 2 620 MHz	-		
	3.5 GHz	3 400 – 3 600 MHz	50 MHz		

Grupo Claro: **América Móvil** (50 MHz en 3.5 GHz), **Olo** (24 MHz en 2.5 GHz), **TVS** (114 MHz en 2.5 GHz)

Grupo Entel: **Entel** (50 MHz en 3.5 GHz y 54 MHz en 2.5 GHz), **Americatel** (30 MHz en 2.3 GHz y 50 MHz en 3.5 GHz), **Direcnet** (30 MHz en 2.3 GHz)

Fuente. Elaboración propia basado en MTC

Figura 21. Distribución de bandas en Perú

Fuente: <https://www.ecosistemadigital.pe/2019/01/01/mtc-propone-topes-de-espectro-asignaciones-vigentes-por-operador-y-calculo-de-topes-propuestos/>

2.3. Aplicaciones y dispositivos USRP

2.3.1. Aplicaciones

Para estandarizar el uso de un sistema SDR, existen diferentes dispositivos, modelos, diseños y fabricantes, siendo SDR un sistema donde la mayor parte de aplicaciones eran para uso militar (2000-2005), por el alto costo de su implementación y por la estandarización, lo que implicaba tener un equipo capaz de interferir o descifrar datos, no cifrados y poder decodificar su información.

Según la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos FCC (2001), considera a SDR aquellos radios que incluyen un transmisor cuyos parámetros de operación como banda de frecuencias tipo de modulación o potencia máxima de salida pueden ser alteradas mediante cambios en software sin realizar cambios a los componentes de hardware que se relacionan con la emisión de radiofrecuencias.

El proyecto busca demostrar que SDR es un sistema donde la tecnología puede ser utilizada para la investigación o la simulación de equipos hardware sin dañar, alterar a otras frecuencias, tomando como base el concepto de SDR Fórum, el cual es un ente regulador de discusiones, ayuda y proyectos de visión, donde un radio en el cual las funciones de la capa física son definidas por software según el Wireless Innovation Forum (2019).

Las aplicaciones en las cuales se puede emplear la tecnología SDR siendo una solución a muchos dispositivos de nivel hardware, son:

- Seguridad pública.
- Uso militar.

- Recepción de imágenes satelitales.
- Monitoreo del espectro.
- Radar (GPSDO).
- Telefonía móvil (2G,3G,4G).

La Tabla 7., muestra las combinaciones de USRP / placa secundaria comúnmente utilizadas en diversas áreas de aplicación. Según Ettus Research (2016) recomienda que los nuevos usuarios evalúen los requisitos de su aplicación en comparación con las especificaciones de los dispositivos USRP.

Tabla 7. Aplicaciones compatibles de USRP

Área de aplicación	Modelo de USRP común	Hija Común
Investigación PHY / MAC	N200 / N210 X300 / X310 N300 / N310 ¹	WBX / SBX / UBX / CBX
Investigación de radar	X300 / X310	SBX / UBX
Open BTS	B200 / B210 ¹ X300 / X310 E310 / E312 ¹ N200 / N210 N300 / N310 ¹ E320 ¹	WBX / SBX / UBX / CBX
Amarisoft LTE	N200 / N210 X300 / X310 B210 ¹ E320 ¹ N300 / N310 ¹	WBX / SBX / UBX / CBX
Educación	B200 / B210 ¹ X300 / X310 E310 / E312 ¹ N200 / N210 N300 / N310 ¹ E320 ¹	WBX / SBX / CBX / UBX
Comunicaciones de alta frecuencia	N200 / N210 X300 / X310	LFRX / LFTX
Inteligencia de señales	X300 / X310 N300 / N310 ¹ E320 ¹	SBX / UBX
Sensores de RF distribuidos	E310 / E312 N300 / N310 E320	N / A
Radios móviles	E310 / E312 E320	N / A
MIMO	X300 / X310 N310 ¹	SBX / UBX

Matriz por fases	X300 / X310	SBX / UBX
Computación FPGA	X310 N310 ¹ E320 ¹	WBX / SBX / UBX / CBX
Computación Embebida	E310 / E312 E320	N / A
Factor de forma pequeño (SWaP)	B200mini / B205mini E310 / E312 E320	N / A

Fuente Ettus Research, (2016).

2.3.2. *Dispositivos USRP*

Las aplicaciones de un SDR dependen del dispositivo a utilizar, entre las marcas conocidas tenemos a Ettus Research desarrollada por Matt Ettus¹⁰, para el proyecto se ha considerado utilizar el dispositivo USRP, que posee como ventaja complementaria ser un dispositivo de precio accesible, dentro de los dispositivos de esta empresa encontramos una gran variedad de USRP y de muy buena calidad.

La empresa de National Instruments (NI) patenta a Ettus Research, por lo expuesto, se ha desarrollado la comparación de dispositivos que se puede observar en la tabla 8., donde se ha considerado entre los 2 últimos productos de Ettus Research, por ser de precios accesibles y son los más vendidos por NI, la tabla también muestra que los productos que tienen igualdad de características son el B200 similar al NI-2900 y el B210 similar al NI2901, estos productos son los que se conectan por un bus, que viene a ser el USB.

¹⁰Matt Ettus: Miembro del equipo de GNU radio y creador del USRP.

Tabla 8. Mapeo entre Ettus Research USRP y los productos de National Instruments USRP¹¹

ER-USRP	NI-USRP
B200mini	N / A
B200mini-i	N / A
B205mini-i	N / A
B200	NI-2900
B210	NI-2901

Fuente Ettus Research, (2016).

Hay que considerar, que los modelos están marcados por series de autobuses, serie Embebida, serie de Red, serie X, también se realizó una comparación de estos productos, en la tabla 9., Serie Embebida, igualdad de productos entre ER y NI.

En la tabla 9., encontramos los productos de serie embebida, la característica de estos productos es que tiene un TPM (Trusted Platform Module), este es un módulo de plataforma confiable, que habilita funciones de seguridad como el cifrado de archivos, el precio del E320 es de \$ 5,750.00 USD, el cual no incluye gastos de envío, aduana y otros.

Tabla 9. Serie Embebida, igualdad de productos entre ER y NI

ER-USRP	NI-USRP
E310	N / A
E312	N / A
E313	N / A

¹¹ Mapeo extraído de la página de Ettus Research el 19/11/2019, puede ser consultado en: https://kb.ettus.com/Mapping_Between_ER-USRP_and_NI-USRP_Product_Numbers

E320	N / A
------	-------

Fuente Ettus Research, (2016).

En la tabla 10., tenemos los productos de serie de Red, en la actualidad, Ettus Research impuso el N320, el cual viene a ser el USRP más completo diseñado por tal, es una radio definida por software en red que proporciona confiabilidad y tolerancia a fallas para su implementación en sistemas inalámbricos distribuidos y a gran escala. Este dispositivo simplifica el control y la gestión de una red de radios al introducir la capacidad única de realizar tareas de forma remota, como la actualización de software, reinicio, restablecimiento de fábrica, autocomprobación, depuración de PC/ARM host y monitoreo del estado del sistema.

Tabla 10. Serie de Red, igualdad de productos entre ER y NI ¹²

ER-USRP	NI-USRP
N210 + WBX	NI-2920
N210 + XCVR2450	NI-2921
N210 + SBX	NI-2922
N210 + WBX + GPSDO	NI-2930
N210 + SBX + GPSDO	NI-2932
N300	N / A
N310	N / A

Fuente Ettus Research, (2016).

¹² Consultado en la página de Ettus Research, el 19/11/2019, puede ser consultado en <https://www.ettus.com/product-categories/usrp-networked-series/>

La tabla 11 muestra la serie X, la cual puede ser repotenciada, con placas SBX, CBX, UBX o WBX, estas placas, mencionadas anteriormente son RF Daughterboards, las placas son llamadas así, porque además de tener ya un diseño de placa, se puede acoplar, según la necesidad del usuario.

Tabla 11. Serie X, igualdad de productos entre ER y NI

ER-USRP	NI-USRP
X310 + WBX (x2)	NI-2940R
X310 + SBX (x2)	NI-2942R
X310 + CBX (x2)	NI-2943R
X310 + UBX (x2)	NI-2944R
X310 + TwinRX (x2)	NI-2945R
X310 + WBX (x2) + GPSDO	NI-2950R
X310 + SBX (x2) + GPSDO	NI-2952R
X310 + CBX (x2) + GPSDO	NI-2953R
X310 + UBX (x2) + GPSDO	NI-2954R
X310 + TwinRX (x2) + GPSDO	NI-2955R

Fuente Ettus Research, (2016).

Otro punto considerable es que en NI los dispositivos USRP vienen diseñados en placas, donde estos no pueden ser modificados, la ventaja de Ettus Research es que se puede repotenciar algunos de los USRP, para esto hacemos mención de que en cada dispositivo en la placa de circuito impreso se dividen en tres secciones, una placa madre y dos placas hijas, también llamadas placas secundarias.

2.3.2.1. Características de USRP.

El proyecto hace uso del USRP B210, en ese sentido se realizó la descripción en forma amplia de tal dispositivo, el criterio de selección del dispositivo para este proyecto se fue dando en función de la compatibilidad con el mayor número de aplicaciones posible, teniendo en cuenta el precio del dispositivo. Es por ello que USRP B210 destacaba en características, compatibilidad y es apta para desarrollarla con Matlab, Simulink, GNURadio, OpenAirInterface, SORA, Open BTS, srsLTE, entre otros softwares.

La arquitectura de la tecnología SDR tiene buena flexibilidad de procesamiento de datos a nivel software, contando con un nivel de energía consumida reducida a comparación de otros dispositivos de radiofrecuencia, otro punto de consideración y muy exigible en los países es el de aceptar o regular el uso de este tipo de tecnología.

En Perú, el sistema de regulación es el MTC, existiendo diversos tipos de internamiento al país, los cuales se pueden regular en los equipos y aparatos de telecomunicaciones que ingresen al territorio nacional.

En este caso el B210 fue enviado desde Hungría, pasando por aduanas y en la declaración de la orden de envío se describe que el dispositivo de radiotelecomunicaciones es con fines educativos y productivos de investigación, por ello el dispositivo será utilizado para la formación académica.

Otra característica muy importante es que el dispositivo puede realizar múltiples tareas a la vez, un claro ejemplo de esto es usar el transceptor de este dispositivo en el caso del USRP B210 que cuenta con dos transceptores.

Tabla 12. Características de dispositivos ER y NI

	Modelo	Precio	Rango de frecuencia	Ancho de banda de transceptor	FPGA	Nro de canales
ER USRP	B200	\$885.00	70 MHz a 6Ghz	56 Mhz	Spartan 6 XC6SLX75	1
ER USRP	B210	\$1,450.00	70 MHz a 6Ghz	56 Mhz	Spartan 6 XC6SLX150	2
NI- USRP	NI-2900	\$1,200.65	70 MHz a 6Ghz	56 Mhz	Spartan 6 XC6SLX75	1
NI- USRP	NI-2901	\$1,850.00	70 MHz a 6Ghz	56 Mhz	Spartan 6 XC6SLX150	2

Fuente Elaboración propia

2.3.2.2. Ventajas de SDR.

2.3.2.2.1. Portabilidad.

La portabilidad es una ventaja de SDR ya que para rediseñar un sistema por medio de software implica tener un equipo que pueda ser la base de cualquier sistema SDR, en este sentido existe una comunidad denominada Wireless Innovation Forum¹³ que es un foro en el cual conviven un mix de desarrolladores de software de código abierto desde 1996.

Los miembros de este fórum se basan en el uso de tecnologías de código abierto, es por este motivo que SDR es portable y manipulable en toda su arquitectura de software usando para ello dos sistemas operativos como Windows o Linux, lo cual hace posible llevar la plataforma diseñada en cualquier sistema operativo siendo escalable y no conllevaría alguna variación de gran escala en el diseño completo.

¹³Forum SDR: Puede ser consultado en <https://www.wirelessinnovation.org>, visitado el 20/11/2019

2.3.2.2.2. *Integración tecnológica.*

En la actualidad vivimos en una evolución e innovación tecnológica que viene avanzando a pasos agigantados, por ejemplo: la actualización de una estación base de red 4G a 5G conllevaría un inmensurable gasto a cualquier compañía, la escalabilidad de SDR viene siendo probada en la actualidad en Alemania.

Según T – Systems en su web site explica como Alemania pretende adoptar el papel de líder en 5G teniendo como eje de inicio a la ciudad de Berlín, en el 5G – Testfeld, puesto en marcha por el senado berlinés y el Instituto Fraunhofer para telecomunicaciones ofrece a los operadores de red y a las empresas la oportunidad de probar las redes y los servicios 5G.

Para poner a prueba 5G en vivo, los investigadores están utilizando transceptores SDR, teniendo como hardware SDR un transmisor, un receptor y convertidores analógicos/digitales. El procesamiento de la señal está controlado por un software para que un módulo inalámbrico pueda dar servicio a frecuencias diferentes y cambiar entre LTE, WLAN o 5G sin necesidad de cambiar el hardware.

La escalabilidad de SDR siendo un sistema actualizable, según las variaciones del hardware, puede ser repotenciado y actualizado, para ir a la par con la tecnología hardware.

2.3.2.2.3. *Costos.*

El costo del dispositivo USRP depende de la aplicación para la que se vaya a emplear, siendo importante identificar el cifrado de datos. En el mercado de Ettus Research, existen dispositivos de serie embebida, los cuales traen TPM estos por lo tanto tienen precios elevados.

El proyecto de investigación utiliza el USRP B210, el cual fue elegido por ser un dispositivo que cumple con los requerimientos necesarios para experimentar diseños por computadora de equipos hardware, el cual es el sucesor del B200, cabe recalcar que B200 de ER es igual al NI2900 de National Instruments en diseño, arquitectura y características entregadas.

Se puede apreciar en la tabla 13., el rango de precios donde se observa dispositivos de iguales características como el B200 y NI 2900 y en lo único que difieren es en el precio de ambos.

Todos los dispositivos NI vienen encapsulados, con una carcasa protectora, mientras que en ER los productos vienen en placa y la carcasa protectora se compra por separado, de igual manera el B210 con el NI 2901 lo único que difiere es el rango del precio.

Tabla 13. Rango de precios de los dispositivos vendidos por ER y NI.

	Modelo	Precio
ER USRP	B200	\$885.00
ER USRP	B210	\$1,450.00
NI-USRP	NI-2900	\$1,200.65
NI-USRP	NI-2901	\$1,850.00

Fuente Ettus Research, (2016).

2.3.2.3. Arquitectura USRP

Según Mejía (2017), se ha considerado identificar al dispositivo USRP B210 de Ettus, que tiene como características:

- Frecuencia de funcionamiento entre 70 MHz y 6GHz.
- Ancho de banda analógico configurable entre 200 KHz y 56 MHz.
- MIMO (*Multiple-input Multiple-output*)2x2 con ancho de banda máximo de 30,72 MHz.
- ADC/DAC de 12 bits de resolución.
- 61,44 MS/s (Millones de muestras por segundo).
- FPGA programable.
- Permite el uso de relojes para las señales de referencia externos.
- Frecuencia de reloj interna configurable.
- En la mayoría de los casos, es suficiente la alimentación ofrecida por el USB.

Como se observa en la figura 22., este USRP cuenta con dos tarjetas integradas, dos de transmisión y dos de recepción, (2TX y 2TR Half o full dúplex).

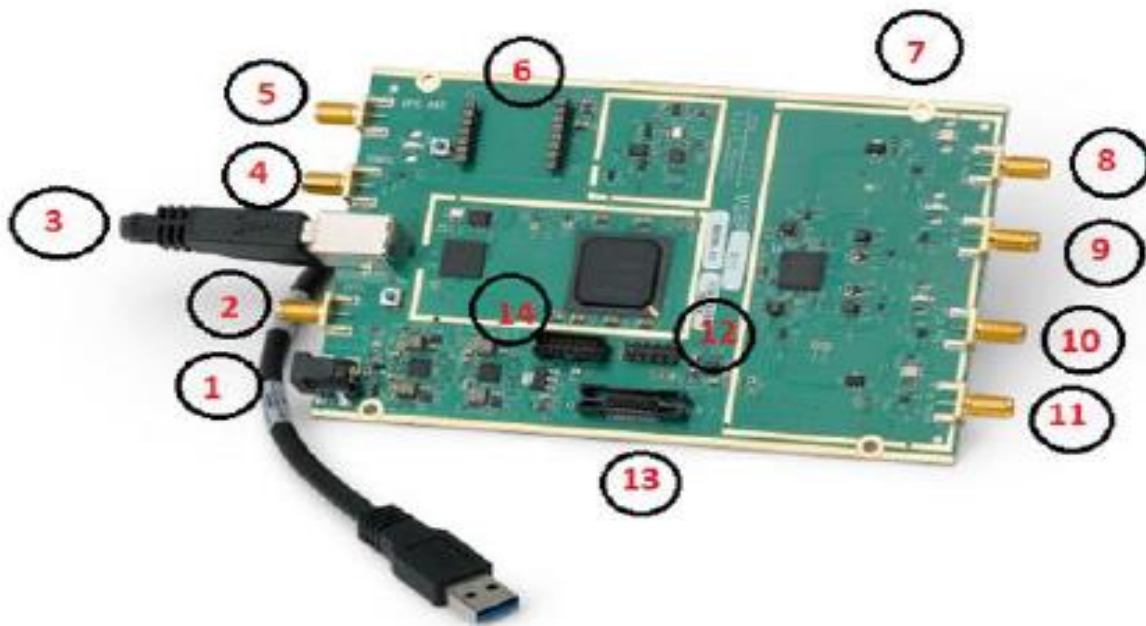


Figura 22. Placa USRP B210 (Ettus Research).

Fuente: Mejia, (2017).

- 1 Alimentación externa para 6v o 3v.
- 2 Entrada externa PPS.
- 3 Puerto USB 3.0.
- 4 Entrada externa 10 MHz .
- 5 Antena GPS .
- 6 Socket GPSDO .
- 7 Ranura para sujetar la tarjeta .
- 8 TX/RX canal 2.
- 9 RX2 canal 2 .
- 10 RX2 canal 1 .
- 11 TX/RX canal 1 .
- 12 GPIO Header.

- 13 Conector Mictor .
- 14 JTAG Header.

Según Bozich (2005), si bien algunas características y especificaciones varían de un modelo a otro, todos los dispositivos USRP usan la misma arquitectura general, en muchos casos la interfaz de RF, los mezcladores, filtros, osciladores y amplificadores necesarios para traducir una señal del dominio de RF y la banda base compleja o señales IF, pueden ser similares.

Los ADC muestrean la banda base de las señales IF y las muestras digitales se sincronizan en un FPGA, la imagen FPGA de serie proporciona una conversión digital descendente, funcional que incluye sintonización de frecuencia fina y varios filtros para su decimación.

Después de la decimación, se transmiten muestras sin procesar u otros datos a una computadora host a través de la interfaz del host, el proceso inverso se aplica a la cadena de transmisión.

El ancho de banda del dispositivo USRP varía en cada punto de la cadena de señal, existen tres tipos de especificaciones de ancho de banda:

- El ancho de banda analógico.
- El ancho de banda de procesamiento FPGA.
- El ancho de banda del host.

Según Ettus Research (2016), el ancho de banda del sistema es generalmente el mínimo de la placa secundaria de RF, el procesamiento de FPGA y el ancho de banda del host, también

se debe tener cuidado para evitar un ancho de banda analógico que sea mayor que la frecuencia de muestreo ADC / DAC de cualquier dispositivo.

En la siguiente figura 23., podremos apreciar una arquitectura genérica de USRP.

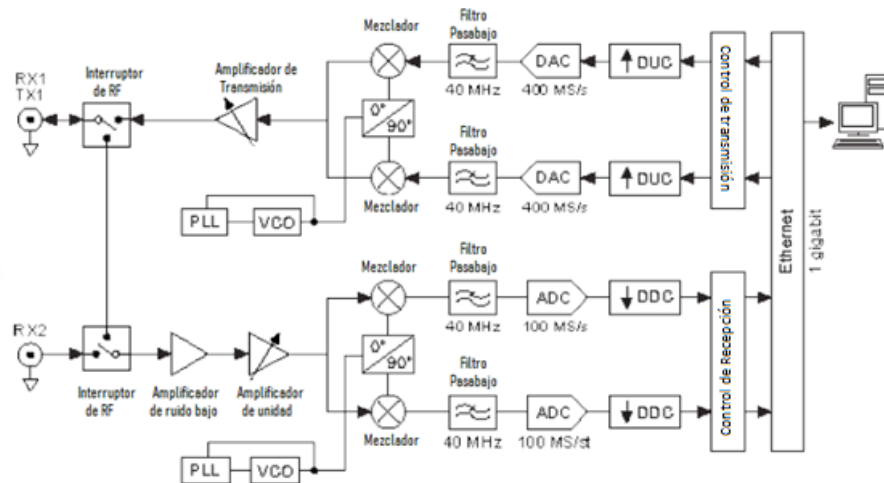


Figura 23. Arquitectura genérica de USRP de Ettus.

Fuente: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/46577/TFG%20-%20Esteve%20Moreno%2C%20Laura.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (diseño y montaje de una estación de seguimiento de satélite en órbita baja “LAURA ESTEVE MORENO”)

Las características técnicas del USRP B210 son:

- 2 TX y 2 RX, Half o Full Duplex.
- Capacidad MIMO 2x2 totalmente coherente.
- Xilinx Spartan 6 XC6SLX150 FPGA.
- Hasta 56 MHz de ancho de banda instantáneo en 1x1.
- Hasta 30.72 MHz de ancho de banda instantáneo en 2x2.
- Incluye fuente de alimentación de CC.
- Capacidad GPIO.

El hardware B210 cubre frecuencias de RF de 70 MHz a 6 GHz, tiene un Spartan 6 FPGA y conectividad USB 3.0, esta plataforma permite experimentar con una amplia gama de señales incluyendo transmisión de FM y TV, celular, Wi-Fi, entre otros.

Según Ettus Research (2016), el USRP B210 cuenta con una recepción y un canal de transmisión en un diseño alimentado por bus, el USRP B210 extiende las capacidades del B200 al ofrecer un total de dos canales de recepción y dos de transmisión, incorpora un FPGA más grande, GPIO e incluye una fuente de alimentación externa, ambos utilizan una RFIC ¹⁴ AD9361 de dispositivos analógicos para entregar una RF rentable de plataforma de experimentación y puede transmitir hasta 56 MHz de ancho de banda instantáneo, en un bus de ancho de banda USB, también tiene compatibilidad con USB 2.0.

Porque los B200 y B210 están habilitados con USRP Hardware Drive (UHD), los usuarios pueden desarrollar sus aplicaciones y portar sus diseños a USRP integrados o de alto rendimiento.

UHD es un controlador multiplataforma de código abierto que puede ejecutarse en Windows, Linux y MacOS, proporciona una API común, que es utilizada por varios marcos de software, como Radio GNU, con este soporte de software, los usuarios pueden colaborar con una comunidad de estudiantes y profesionales que han adoptado productos USRP para su desarrollo.

2.3.2.3.1. Half dúplex.

Según Bharadia, McMillin, Sachin (2004), para enviar información *half-dúplex* o semi dúplex se necesitan dos antenas: una para transmitir y otro para recibir prioritariamente.

¹⁴ RFIC: transceptor de conversión directa

En el caso del B210 de Ettus Research tiene dos TX/RX y dos RX, la transmisión de datos semi dúplex significa que los datos se pueden transmitir en ambas direcciones en un portador de señal pero no al mismo tiempo, por ejemplo en una red de área local que utiliza una tecnología que tiene transmisión Half - dúplex o semi dúplex, donde una estación de trabajo puede enviar datos en la línea y luego recibir datos inmediatamente en la línea desde la misma dirección en la que se transmitieron los datos, al igual que la transmisión de full dúplex, la transmisión half - dúplex implica una línea bidireccional en la que puede transportar datos en ambas direcciones.

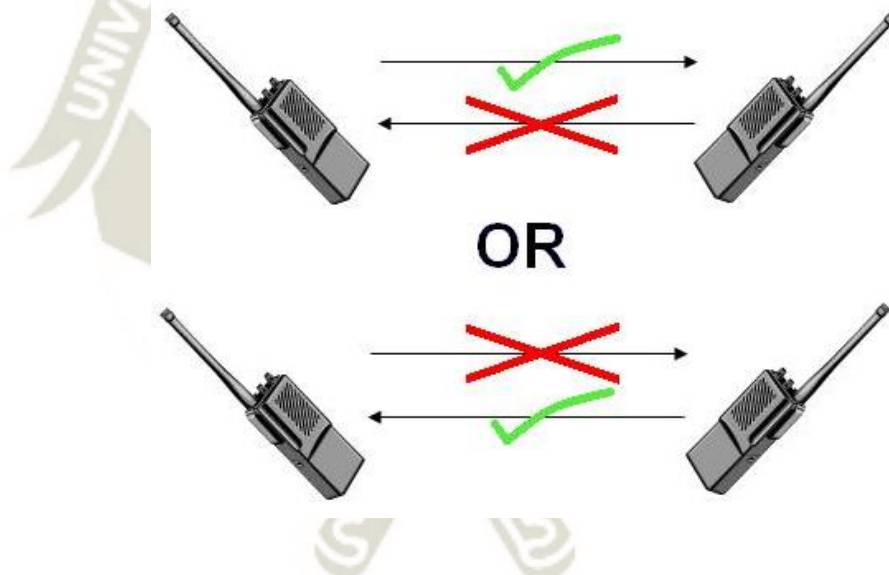


Figura 24. Half – dúplex

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/D%C3%BAplex_\(telecomunicaciones\)](https://es.wikipedia.org/wiki/D%C3%BAplex_(telecomunicaciones))

2.3.2.3.2. Full dúplex.

Las comunicaciones full dúplex, que admiten la transmisión y recepción concurrentes en un solo canal de tiempo / frecuencia, tienen el potencial de mejorar la eficiencia espectral, el rendimiento alcanzable y reducir la latencia.

Para lograr dúplex completo, una radio debe cancelar por completo la señal de auto interferencia significativa que resulta de su propia transmisión.

Los avances recientes en las comunicaciones Full dúplex, han aumentado tanto que el rendimiento es alcanzable como las órdenes de diversidad de los sistemas que se comunican a través de canales inalámbricos.

Según Zhang (2016), la principal fuerza impulsora detrás de los avances en las comunicaciones Full dúplex son la promesa de una capacidad de canal casi duplicada en comparación con las comunicaciones Half- dúplex convencionales, al tiempo que cumple con una gama de desafíos de diseño contradictorios, por ejemplo es posible mejorar la cancelación de su auto interferencia y al mismo tiempo reducir el Bit Error Ratio (BER), siempre que se tolere una mayor complejidad para facilitar un procesamiento de señal más sofisticado, de manera similar, la relación de pérdida de paquetes (PLR) también puede reducirse aún más, si los dispositivos Full dúplex pueden proporcionar un tamaño de memoria intermedia mayor, en síntesis el modo Full dúplex exhibe ventajas sobre el modo Half - dúplex en términos de tener un mayor rendimiento o una menor probabilidad de interrupción.



Figura 25. Full duplex.

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/D%C3%BAplex_\(telecomunicaciones\)](https://es.wikipedia.org/wiki/D%C3%BAplex_(telecomunicaciones))

2.3.2.3.3. *MIMO.*

En las comunicaciones inalámbricas convencionales se usa una sola antena en la fuente y otra antena en el destino, en algunos casos esto da lugar a problemas con efectos de multi trayectoria, cuando un campo electromagnético (campo EM) se encuentra con obstáculos como colinas, cañones, edificios y cables de servicios públicos; los frentes de onda se dispersan y por lo tanto, toman muchos caminos para llegar al destino, la llegada tardía de porciones dispersas de la señal causa problemas tales como desvanecimiento, corte (efecto acantilado) y recepción intermitente (cercado).

En sistemas de comunicaciones digitales como internet inalámbrico, pueden causar una reducción en la velocidad de datos y un aumento en el número de errores, el uso de dos o más antenas, junto con la transmisión de múltiples señales una para cada antena en la fuente y el destino.

MIMO (entrada múltiple, salida múltiple) es una nueva tecnología de antena para comunicaciones inalámbricas en la que se utilizan múltiples antenas tanto en la fuente (transmisor), como en el destino (receptor).

Según National Instruments (2012), las antenas en cada extremo del circuito de comunicaciones se combinan para minimizar los errores y optimizar la velocidad de los datos, MIMO es una de varias formas de tecnología de antena inteligente

Según National Instruments (2012), con MIMO, puede aumentar el rendimiento del sistema inalámbrico sin aumentar el consumo de energía, cuando se usan múltiples antenas, la señal transmitida progresa a través de diferentes canales inalámbricos desde las antenas

transmisoras hasta las antenas receptoras y crea una ganancia de capacidad al explotar la diversidad de canales.

Para el proyecto, USRP B210 tenemos dos TX/RX (transceptores) y dos receptores, por lo tanto, tendremos un mimo 2X2, como se muestra en la figura 26.

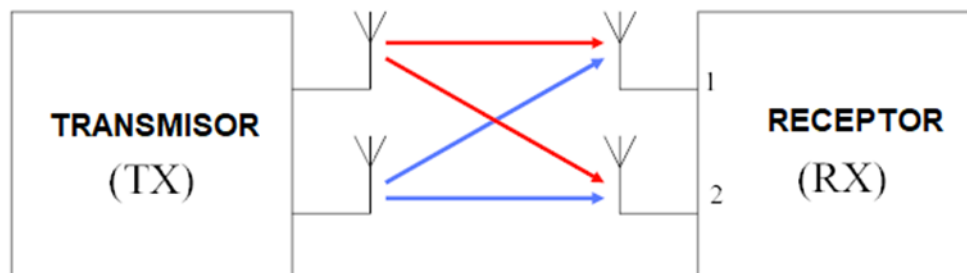


Figura 26. MIMO 2X2

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/MIMO-2x2-system-graphical-representation_fig1_272406858

2.3.2.3.4. **FPGA (Field Programmable Gate Array).**

Según Vera, Jiménez, Gonzales (1995), los arreglos de compuertas programables en el campo (FPGA) son circuitos integrados reprogramables que contienen una matriz de bloques lógicos programables, la adopción del chip FPGA está impulsada por su flexibilidad, velocidad y confiabilidad temporizadas por hardware y paralelismo.

Según Vera, Jiménez, Gonzales (1995), a diferencia de los procesadores, los FPGA son de naturaleza verdaderamente paralela, por lo que las diferentes operaciones de procesamiento no tienen que competir por los mismos recursos, cada tarea de procesamiento independiente se asigna a una sección dedicada del chip y puede funcionar de forma autónoma, sin ninguna

influencia de otros bloques lógicos, como resultado, el rendimiento de una parte de la aplicación no se ve afectado cuando agrega más procesamiento.

Cada chip FPGA está compuesto por un número finito de recursos predefinidos con interconexiones programables para implementar un circuito digital reconfigurable y bloques de E / S para permitir que el circuito acceda al mundo exterior, como se observa en la figura 27.

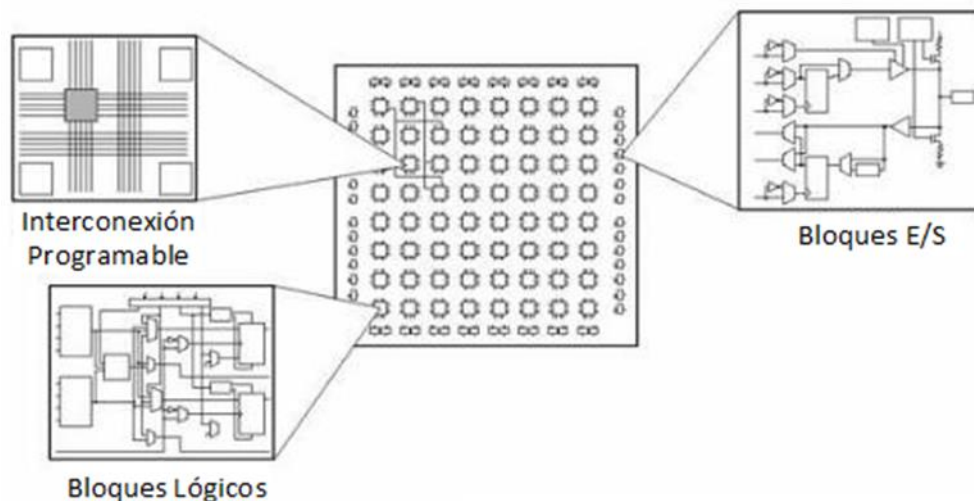


Figura 27. Partes de un FPGA

Fuente: <http://soloelectronicos.com/tag/ejemplo-de-fpga/>

Las especificaciones de recursos de FPGA a menudo incluyen la cantidad de bloques lógicos configurables, la cantidad de bloques lógicos de función fija como multiplicadores y el tamaño de los recursos de memoria como la RAM de bloque integrado; dentro de las muchas especificaciones de FPGA estas suelen ser las más importantes al seleccionar y comparar FPGA para una aplicación en particular.

Los bloques lógicos configurables (CLB) son la unidad lógica básica de un FPGA, algunas veces denominadas divisiones o celdas lógicas, los CLB disponen de dos componentes

básicos: flip-flops¹⁵ y tablas de búsqueda (LUT). Varias familias de FPGA difieren en la forma en que los flip-flops y los LUT se empaquetan juntos, por lo que es importante comprender los flip-flops y los LUT.

2.3.2.3.5. Tarjeta Madre (motherboard).

Según Ettus Research (2020) La tarjeta madre implementa a la sección de banda base del receptor, esta sección transforma las señales IF a señales digitales, a continuación, las desplaza a banda base y sus muestras son diezmadadas, los datos de salida serán enviados a un computador a través de una interfaz USB.

Esta tarjeta está completamente integrada en el USRP B210, en otros modelos distintos al B210 se puede añadir otras placas que son las encargadas del interfaz RF llamadas Doughboards, estas son de diferente tipo siendo elegida de acuerdo a la compatibilidad del dispositivo y el proceso para el cual será utilizada.

La tarjeta madre contiene los siguientes componentes: un FPGA, convertidores ADC y DAC, la fuente DC de alimentación, una interfaz USB o Gigabit *Ethernet* y una serie de interfaces seriales de alta velocidad para la comunicación con otras placas.

2.3.2.3.6. Tarjetas hijas (daughboards).

Según Ettus Research (2020) Las tarjetas hijas, están diseñadas para repotenciar a las tarjetas madre, todas cumplen con la interfaz de RF, estas tienen la capacidad de ser reconocidas por una memoria EEPROM, siendo limitada para el dispositivo B210.

¹⁵ Flip-flop: Dispositivo que se caracteriza por tener una entrada de reloj que define el instante exacto en que pueden cambiar de estado.

En el mercado de Ettus Research podemos encontrar sus tres funciones básicas, pudiendo ser transmisores, receptores y las de mayor desenvolvimiento los transeptores.

- Módulo Tx. Pueden modular la señal de salida a frecuencias más altas.
- Módulo Rx. Pueden adquirir una señal RF y convertirla en banda base para su procesamiento en el bloque de IF.
- Módulo transeptor. Pueden combinar la funcionabilidad de un transmisor y un receptor, en el caso de USRP B210 tenemos dos transeptores.

2.3.2.3.7. **USB 3.0.**

Según Ajay Bhatt (2008) Este bus de datos se conecta directamente al puente norte (*north bridge*) del procesador de propósito general. Si el maestro es un dispositivo como una computadora; el llamado *north bridge* es un subsistema que se encarga de las comunicaciones entre los buses de datos, como la memoria RAM, USB o PCI express y el núcleo del procesador.

El régimen binario en modo *SuperSpeed*¹⁶ puede llegar a ser de 5Gbps sin embargo, se trata de un bus de comunicaciones asíncrono, por lo que la velocidad máxima dependerá de las capacidades de los dispositivos maestros y esclavo.

En el contexto del proyecto, las radios definidas por software superan las capacidades de un maestro con procesador estándar, como puede ser un Intel Core i5 y sistema operativo Windows y Ubuntu, no obstante la velocidad de transferencia depende en gran medida de la carga de trabajo a la que se encuentre y no una limitación de hardware, ya que el sistema

¹⁶ SuperSpeed: USB 3.0 también conocido como SuperSpeed es un protocolo de comunicación en capas que está comprometido con una interconexión de Host, Dispositivo y SuperSpeed. El USB 3.0 permite la interoperación de dispositivos de diferentes proveedores, a la vez que mantiene la compatibilidad con versiones anteriores y aprovecha la infraestructura USB existente (controladores de dispositivo, interfaces de software, etc.)

operativo puede encontrarse realizando operaciones que ralenticen dicho envío asíncrono de información, lo que se traduce en tiempos de llegada dispares, que provoquen pérdidas de muestras.

Por ejemplo, en la hoja de características de la radio Ettus B210 que cuenta con las mismas características que la radio National Instruments USRP-2901, se indica claramente que la cantidad máxima de muestras I/Q, depende del chipset USB 3.0 del ordenador y de su rendimiento. Además, la longitud del cable utilizado para la interconexión no puede superar los diez metros, y la velocidad de transferencia disminuye progresivamente según aumenta la distancia.

CAPITULO III: EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL PROYECTO

3. Hardware y Software

3.1. Hardware

El USRP que se utilizó en el proyecto es el USRP B210 de Ettus Research que tiene a nivel hardware elementos que deben identificarse antes de conectarlo a una fuente de alimentación, siendo necesario para poder tener una instalación optima del USRP sin riesgo de daño al dispositivo.

3.1.1. La tarjeta USRP B210 e indicadores LED

Los leds del USRP B210 se encuentran enumerados indistintamente, cuentan con un indicativo que muestra: el error, la trasmisión o recepción, aplicación de energía, encendido con alimentación o por USB, en la tabla 14., se puede apreciar el funcionamiento de los leds.

Tabla 14. Indicadores led.

ID de componente	Descripción	Detalles
LED600	Indicador de encendido	apagado = no se aplica energía y aún no inicializada azul = energía USB aplicada / energía suministrada (USB) O energía suministrada (externa) rojo = alimentación externa aplicada / alimentación externa aplicada y dispositivo inicializado
LED800	Actividad del canal 2 RX2	apagado = no se aplica energía verde = recepción
LED801	Actividad del canal 2 TX / RX	apagado = sin actividad verde = recepción rojo = transmisión naranja = cambio entre transmisión y recepción
LED802	Actividad del canal 1 TX / RX	apagado = sin actividad verde = recepción rojo = transmisión naranja = cambio entre transmisión y recepción
LED803	Actividad del canal 1 RX2	apagado = no se aplica energía verde = recepción
LED100	Indicador de bloqueo de GPS	apagado = sin bloqueo verde = bloqueo

Fuente Ettus Research, (2016)

3.1.2. Antena VERT900

El USRP B210 cuenta con cuatro puertos de antena, dos son Tx/Rx y dos Rx, se utilizarán de acuerdo al proyecto que se desea implementar. Para el proyecto de investigación se usó un máximo de dos entradas, un transceptor (Tx/Rx) y un receptor (Rx).

La antena se encarga de transmitir y recibir las señales, donde el uso de los cuatro puertos puede ser operada para una conexión MIMO 2X2, la cual es el máximo soporte del USRP B210.

En la figura 28., se observa la antena VERT900, la cual provee Ettus Research, tiene una banda de operación en el rango de 824-960 MHz y 1710-1990 MHz (*dualband*), la cual es omnidireccional y usa la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*).



Figura 28. Antena VERT900

Fuente: <https://www.ettus.com/all-products/vert900/>

3.1.3. Fuente de alimentación

El USRP B210 cuentan con un convertidor de corriente CA/CC (Corriente Alterna/Corriente Continua) de 6V, 4A estándar de 50/60 Hz, esta solo será utilizada para estabilizar el GPSDO, para el proyecto no se contó con GPSDO por ser un circuito GPS de alto rendimiento y un coste fuera de los alcances de este proyecto.

La alimentación del dispositivo será por USB 3.0 desde un ordenador y brinda 5V y 2A, que fueron suficiente para el dispositivo.

Al conectar el USRP al ordenador se debe visualizar un LED de color azul como se determinó en la tabla 14., esto indicará que el procesador está listo para ser configurado, el cual

se encontraba en modo ahorro de energía y una vez que se cuente con un diseño y esté se encuentre listo para ser cargado al FPGA el led azul va a parpadear lentamente.

3.1.4. Drivers UHD

La interfaz de API (*Application Programming Interface*) para USRP UHD, posee también soporte para todos los dispositivos USRP SDR de Ettus Research y de National Instruments.

Este Driver instalado en la computadora viene con soporte multiplataforma para compatibilidad de programas como son: Matlab, GNU Radio, LabVIEW, RFNoC y por lo tanto pueden ser instalados en sistemas operativos como Windows, Linux y Mac OS.

3.2. Software

Los sistemas operativos compatibles con UHD mencionados anteriormente tienen distintas maneras de instalación, a través del proyecto se procedió a hacer el desarrollo de dos programas usados para los módulos de prácticas.

3.2.1. LINUX

Linux es el primer requisito para establecer una red GSM por ser un sistema operativo libre, el cual cuenta con una plataforma Ubuntu. La versión usada en el proyecto fue Ubuntu 14.04, la instalación y los pasos a seguir se podrán visualizar en la sección anexo C. Una vez instalado Ubuntu se podrá instalar Open BTS debido a que Open BTS solo puede ser instalado en un sistema operativo de Linux.

3.2.2. GNU Radio

GNU radio es un Software que tiene la ventaja frente a otros programas de ser de código abierto, tiene diseñado herramientas y bibliotecas que permiten la interacción directa con el usuario para el diseño de cualquier aplicación de procesamiento de señales en tiempo real.

Este programa no tiene un lenguaje de programación, su estructura se encuentra diseñada en bloques que serían interpretados para los distintos tipos de hardware.

Estos están diseñados en lenguajes de programación Python y C++, donde el usuario puede modificar y diseñar sus prototipos mediante los bloques que facilita GNU Radio, haciéndolo amigable estructuralmente, con una interfaz gráfica para los usuarios la cual tiene una similitud con Simulink de Matlab, que incluye una biblioteca de bloques que sirven para desarrollar cualquier etapa de radiofrecuencia para proyectos de SDR

El programa fue diseñado para sistemas operativos como Windows y Linux, para el estudio se utilizará GNU Radio para Windows, en la figura 29., se observa la interfaz de GNU Radio.

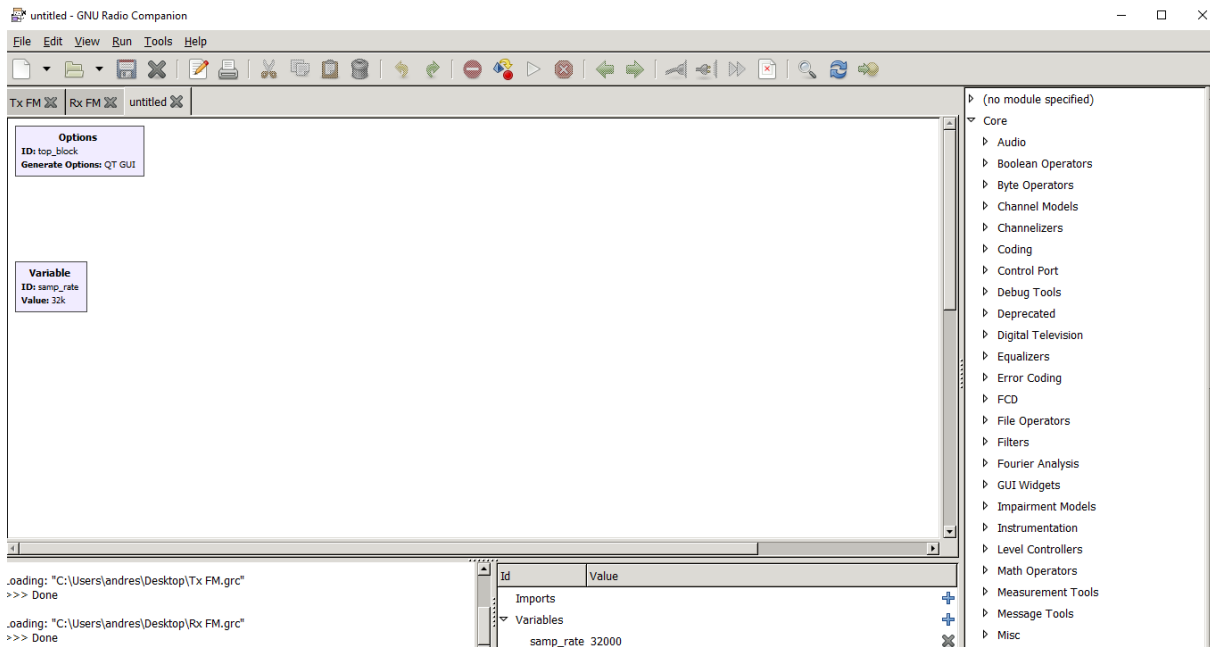


Figura 29. Interfaz de GNU Radio (GRC)

Fuente: Sánchez, (2015).

Para que Python pueda acceder a los bloques que se implementan en la interfaz GRC, las cuales son implementadas en C++, utilizan una herramienta software SWIG (*Simplified Wrapper and Interface Generator*).

Según Sánchez (2015), la interfaz de GRC (GNU Radio Companion) es amigable gracias a la interfaz gráfica donde se colocan los bloques para el diseño. GUI (Graphical User Interface) permite el despliegue de ventanas (osciloscopios, medidores de frecuencia, etc.) es por este diseño que se evita programar en Python y C++ los cuales tendrían una dificultad y un nivel de programación avanzado para poder diseñar de forma rápida y segura.

En la figura 30. se observa la arquitectura de software de GNU Radio.

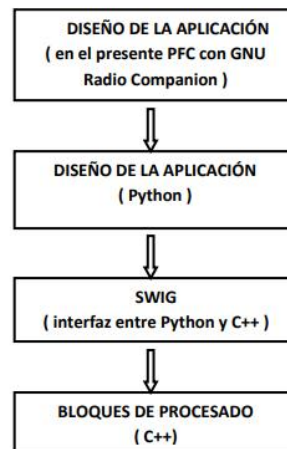


Figura 30. Diagrama de bloques de GNU Radio.

Fuente: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/83161/Resum.pdf> (La Radio Definida por Software: Diseño de un receptor de banda aeronáutica VHF “ALEJANDRO SÁNCHEZ LAKEHAL”)

3.2.2.1. GNU Radio Companion (GRC).

La interfaz GNU Radio Companion tiene una sección de herramientas que se usa para diseñar sistemas de radio en software, esta herramienta gráfica se basa en añadir bloques que están intercalados de manera esquemática similar a un diagrama de flujo, estos bloques son los que procesan las señales y tiene indistintamente puertos de salida o entrada, a veces más de un puerto de salida y el tipo de datos fluye por este puerto el cual podrá ser reconocido.

Estos datos son byte, short, float, int y complex, estos tipos de datos podemos observarlos abriendo la ventana ayuda. La figura 31., muestra el mapa de colores de datos.

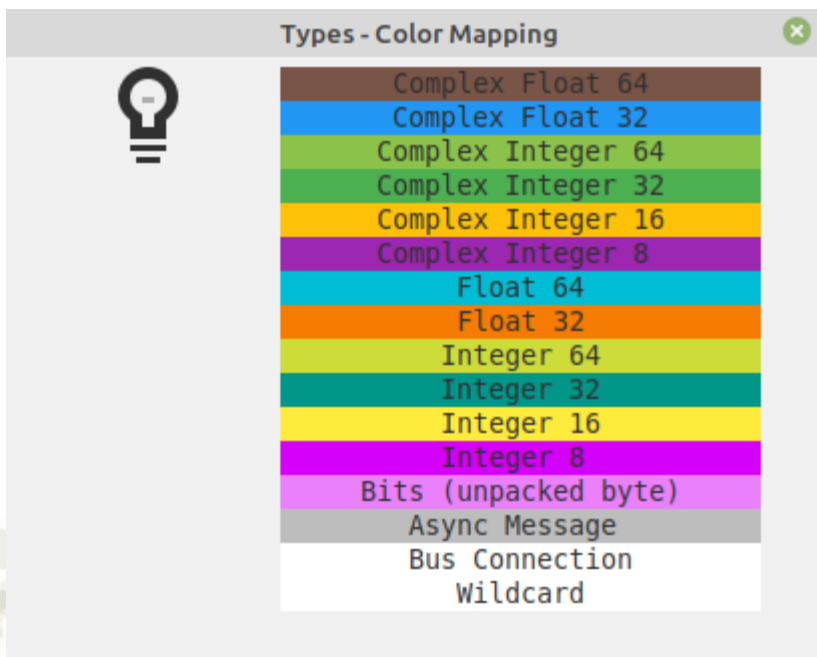


Figura 31. Mapa de datos enviados por bloques

Fuente: https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_GRC

Según GNU Radio Attribution – ShareAlike (2019), estos datos son comunes en los lenguajes de programación, en este caso podemos diferenciarlos al momento de hacer una conexión entre bloques, como una conexión OUT naranja y una conexión In azul la cual es de tipo Float 32 complejo. En lenguajes de programación esto significa que tiene una parte real y virtual, esto se da para los dos tipos Float.

En esta interfaz tenemos dos bloques interconectados, Time Sink el cual toma datos complejos generando una parte real y una parte virtual en canales separados, por ejemplo, podemos cambiar la Signal Source a flotante en sus propiedades y lo escogemos del tipo de salida Output Type como se muestra en la figura 33., Ahora se observa que para que los bloques sean compatibles las líneas que los interconectan deben de estar en color negro y sus bloques de datos deben ser de color naranja, como se observa en la figura 34.

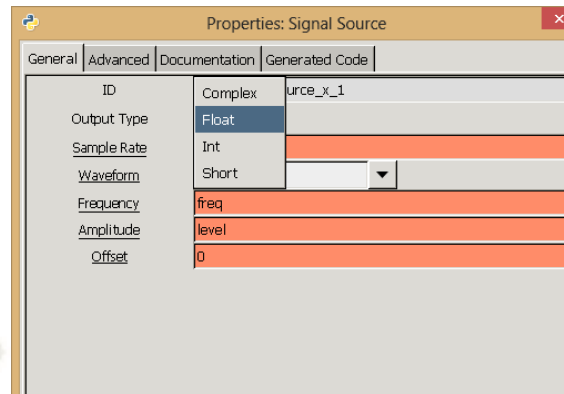


Figura 32. Propiedad de fuente de señal
Fuente: GNU Radio Attribution – ShareAlike, (2019)

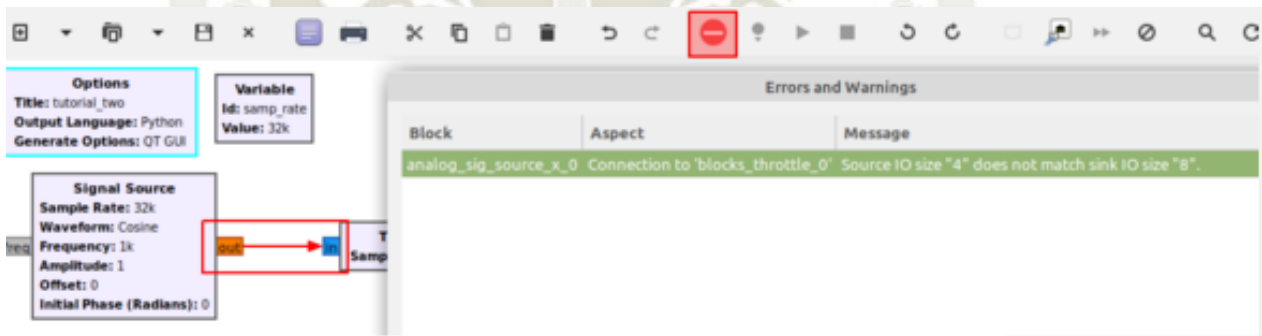


Figura 33 Error de conexión entre bloques
Fuente: GNU Radio Attribution – ShareAlike, (2019)

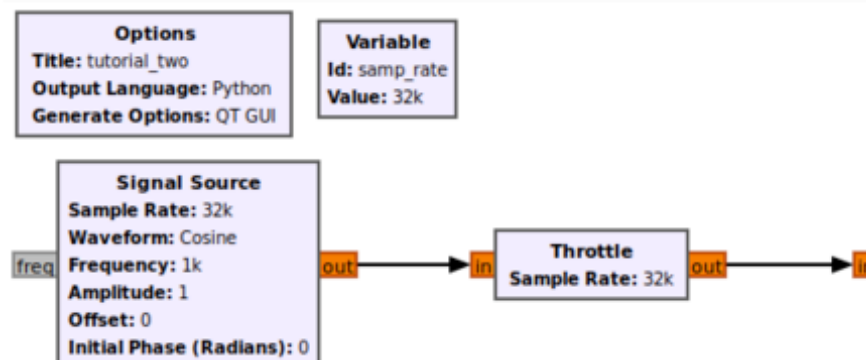



Figura 34. Conexión exitosa entre bloques
Fuente: GNU Radio Attribution – ShareAlike, (2019)

Por último para unir los bloques en la interfaz GRC se hace clic en el bloque de salida OUT del bloque usado y uniéndolo con la entrada del bloque que le sigue, para editar las

propiedades del bloque, debemos hacerle doble clic donde podemos editar parámetros; luego de tener el diseño completo de cualquier sistema, se debe crear el fichero “GRC” haciendo clic en el icono  o pulsando F5 como en los programas de compilación, la instalación de GNU Radio podemos observarla en el anexo E.

3.2.2.2. Bloques de GRC.

3.2.2.2.1. Fuentes (sources).

Según Sánchez (2015), estos bloques especifican y leen datos de cualquier tipo de fuente como por ejemplo un archivo de audio WAV, un generador de señales, un micrófono, la FPGA del USRP.

3.2.2.2.2. Bloques de procesado de señal.

Según Sánchez (2015), los bloques realizan un procesamiento de la señal de cualquier tipo, dentro de este tipo encontramos, por ejemplo, demoduladores, filtros, multiplicadores, amplificadores.

3.2.2.2.3. Sumideros (sinks).

Según Sánchez (2015), estos bloques especifican el destino final de la señal, como bien puede ser un fichero de cualquier formato, tarjeta de sonido, un display gráfico o la FPGA del USRP.

Dentro de este tipo de bloques se encuentran los de visualización de señales (*Graphical sinks*), entre los que conviene destacar el WX GUI FFT Sink para visualizar las FFT de las señales y el WX GUI Scope Sink para visualizar las formas de onda de las mismas.

3.2.2.2.4. *Variables.*

Según Sánchez (2015), las variables permiten modificar los valores de los parámetros de los bloques, si queremos alterarlos mientras la aplicación se está ejecutando tendremos que usar una variable del tipo Slider.

3.2.2.2.5. *Cuadros de texto (boxes).*

Permiten crear una variable con un cuadro de texto visible mientras el Grafo se ejecuta y que permite modificar el valor de este.

Según Sánchez (2015), los selectores (Choosers) permiten crear una variable con un menú de opciones en cuanto al valor de la misma.

3.2.2.2.6. *Agendas (notebooks).*

Según Sánchez (2015), las agendas permiten organizar los resultados de los diferentes bloques GUI (WX GUI Scope Sinks, WX GUI FFTs) existentes en el Grafo en un formato de agenda con lengüetas; una vez vistos los bloques más empleados en el diseño de los Grafos, es necesario conocer como poder programar en GNU Radio utilizando el GRC.

En la figura 35., se muestra la pantalla dónde se realizan los diseños de los Grafos y como se observa en la pantalla consta de cinco partes o zonas que son: Library, Toolbar, Workspace, variables y terminal.

- En Library, se tiene un listado de los bloques instalados y disponibles en el GRC ordenados por categorías.
- En Terminal, es donde aparecen los avisos de error que existen en el Grafo.

- El Workspace, es la zona de diseño donde se construye el Grafo y por defecto contiene los bloques Options y Variable.

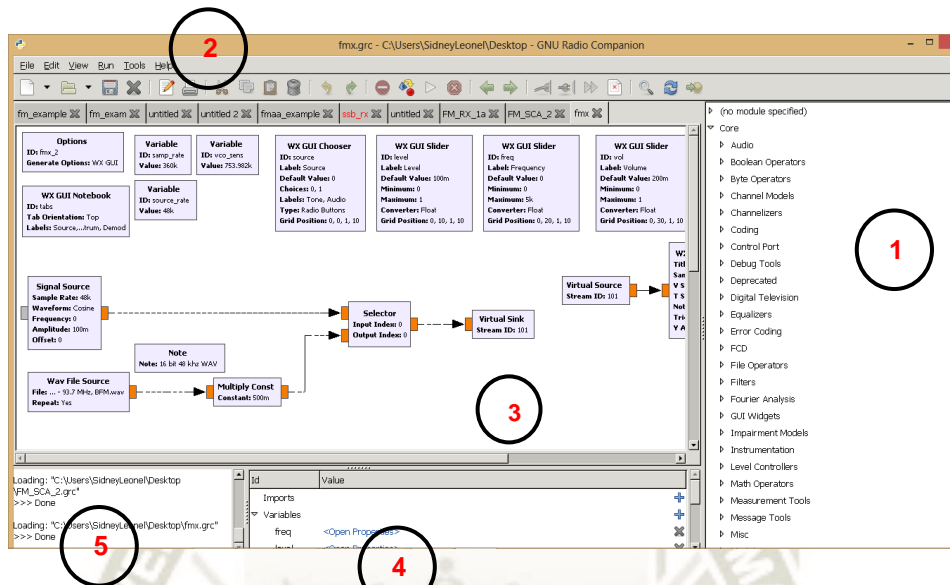


Figura 35. Interfaz de GNU Radio (GRC)
Fuente: GNU Radio Attribution – ShareAlike (2019)

- Library (1)
- Toolbar (2)
- Wokspace (3)
- Variables (4)
- Terminal (5)

Según Sánchez (2015), el primero se utiliza para ajustar algunos parámetros generales del diagrama de flujo y el segundo se utiliza para ajustar la frecuencia de muestreo.

3.2.2.3. Propiedades de archivo “GRC”.

Para poder diferenciar el diseño del proyecto, lo primero que se debe hacer es darle un nombre o denominación, un título al proyecto e identificar los siguientes datos:

- ID – nos permite dar un nombre al archivo que se generará en Python, este proceso será automático si el diseño es correcto, para poder ingresar el texto, hay que considerar que no puede tener espacio por lo que se usara un guion bajo en lugar de espacio.
- Title – es un indicador para describir el diseño por ejemplo si se va a diseñar una estación FM, podemos nombrarla FM estacion.
- Autor – en este caso le asignamos el nombre de la persona que está diseñando.
- Generate Options – esta opción para seleccionar la herramienta gráfica en función a la versión de GNU Radio instalada, en este caso las versiones son compatibles con WX GUI.
- Window Size - para intercalar el tamaño del Workspace.
- Run – al dar play o detener el Grafo, automáticamente se encuentra en Autostart.
- Realtime Scheduling – esta ajustado en OFF, para usar los recursos necesarios del sistema operativo, en este caso conviene tenerlo en off porque podría darle prioridad al programa y detener el sistema operativo.

En la figura 36., se observa la configuración opcional.

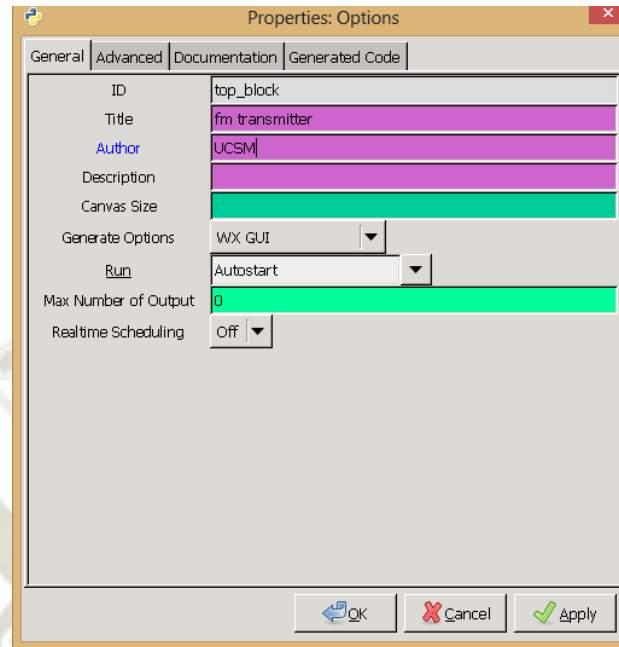


Figura 36. Ventana de propiedades del bloque "Options"
Fuente: GNU Radio Attribution – ShareAlike, (2019)

3.3. Open BTS

Según Michael Ledema (2015). La Organización Open BTS.Org, el software Open BTS es un código abierto hecho en C++ desarrollado para revolucionar las redes móviles, mediante la sustitución de protocolos de telecomunicaciones antiguos y sistemas complejos de hardware patentados tradicionalmente; por Protocolos de Internet IP y una arquitectura de software flexible.

Esta arquitectura está abierta a la innovación por cualquier programador bajo la licencia de AGLP (*Affero General Public License*) lo que permite el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios que simplifica drásticamente la configuración y operación de una red móvil.

La aplicación de Open BTS está diseñada bajo estándares *Unix*¹⁷ (*Software libre*) el cual puede ser estudiado, modificado, copiado, redistribuido sin restricciones y a su vez es gratuito.

El hardware que utiliza Open BTS para establecer la comunicación por la interfaz de aire GSM (Um¹⁸) al teléfono móvil es el USRP, el cual utiliza mediante software un PBX VoIP (*Private Branch Exchange*), que es una red telefónica privada y un VoIP (Voice over IP), que es el punto de las llamadas telefónicas entregadas utilizando para ello, el protocolo de internet como tecnología de transporte; el PBX VoIP se desarrolla en un programa de Open BTS, llamado Asterisk, el cual se encarga de la conmutación de llamadas.

Según Quiñones, Tene, Rohoden, Carrión (2014), definen una red GSM como un sistema complejo compuesto por varios componentes, en donde el último tramo de este sistema es la antena BTS (Base Station Transceiver).

La BTS es la responsable de transmitir y recibir las señales de radio frecuencia (RF) al terminal del usuario (teléfono celular, PDA, módem, entre otros.), es controlada por una BSC (*Base Station Controller*) que está conectada a un MSC (*Mobile Switching Center*) y a un VLR (*Mobile Visitor Location Register*).

El MSC y VLR son los responsables de autenticar al usuario en la base de datos HLR (*Home Location Register*) y el AUC (Centro de Autenticación de usuarios) de la red del operador en la figura 37., se presenta un esquema de la arquitectura GSM comparado con el proyecto Open BTS.

¹⁷ Unix: Sistema operativo portable, multitarea y multiusuario.

¹⁸ Um: Interfaz aérea para el estándar de telefonía móvil GSM.

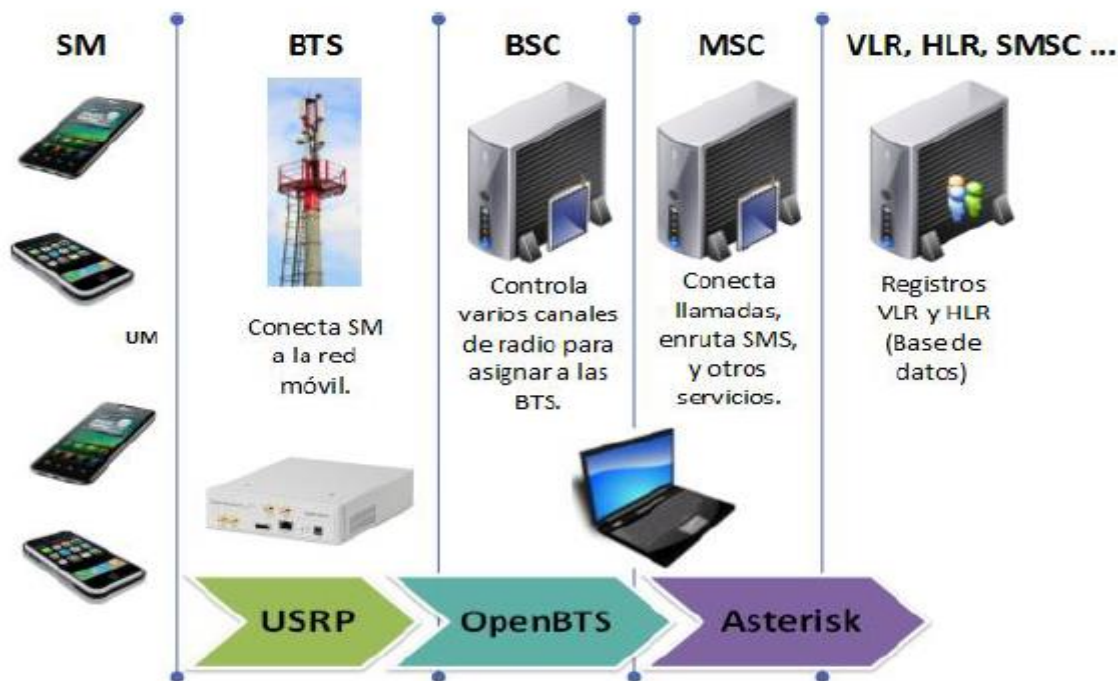


Figura 37. Arquitectura GSM y Arquitectura Open BTS

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Arquitectura-GSM-comparado-con-OpenBTS_fig1_286439561 (Sistema de conmutación y control de llamadas basado en OpenBTS y Asterisk "MANUEL QUIÑONES")

La ventaja de una red Open BTS radica en que su estructura, funcionamiento y la configuración estructural es de bajo coste comparada con una red GSM convencional; Open BTS está a disposición de cualquier persona.

3.3.1. Arquitectura Open BTS

Los módulos diseñados para Open BTS que se usan para la aplicación de una Red GSM están basados en software por medio de Open BTS que permite una comunicación con el USRP, a través de una interfaz Radio Um, establece la comunicación entre el móvil y la BTS, toda esta comunicación se da por protocolos de telefonía móvil por internet, como se observa en la figura 38. Arquitectura Open BTS.

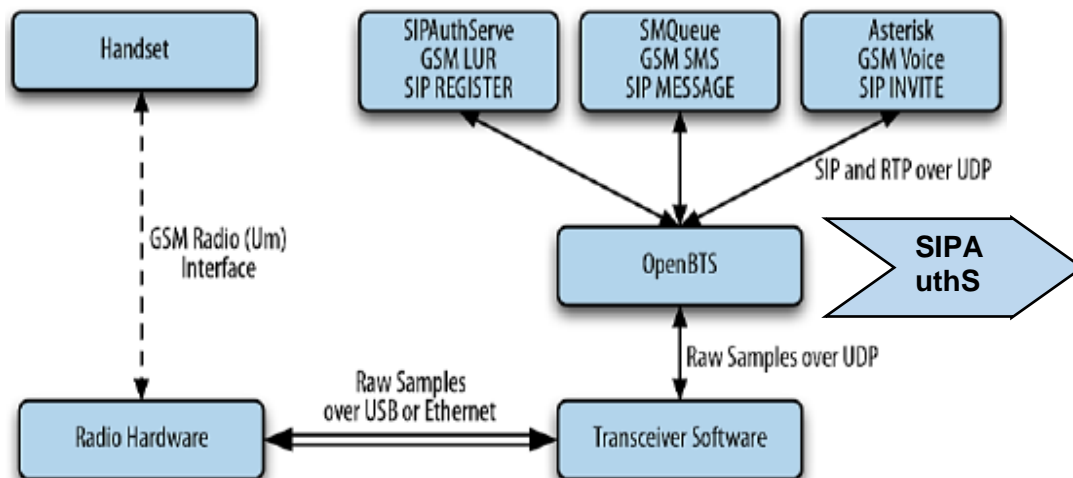


Figura 38. Arquitectura de Open BTS

Fuente: http://openbts.org/site/wp-content/uploads/ebook/Getting_Started_with_OpenBTS_Range_Networks.pdf

M.Iedema,H.Samra,Getting Started with OpenBTS, January, (2015)

Se puede observar en la figura los módulos necesarios para que Open BTS pueda funcionar y poder realizar una red GSM, la instalación de Open BTS se podrá visualizar en el anexo D de este proyecto. Es necesario aclarar que Open BTS, es un programa que solo funciona en el sistema operativo Ubuntu.

Open BTS tiene que correr necesariamente en el mismo punto de acceso GSM/SIP (*Asterisk SipAuthServe* y *Sip Message*) y que se comunican a través del sistema de ficheros teniendo que procesarse en el mismo ordenador, pero puede ser distinto al del punto de acceso.

Open BTS utiliza el protocolo SIP (*Session Initiation Protocol*) y el RTP (*Real-time Transport Protocol*) para convertir el tráfico GSM en tráfico RTP (en VoIP), este se comunica al Transceiver Software, el cual esta con comunicación directa al USRP por medio de USB 3.0 y este creará una BTS que comunicará a través de Um al dispositivo celular.

Componentes de Open BTS.

3.3.1.1.1. *Open BTS.*

El maestro de toda la red GSM es operada por Open BTS, este es el que tiene toda la organización de la red. Los protocolos IP (*Internet Protocol*), SIP (*Session Initiation Protocol*) y RTP (*Real-time Transport Protocol*), dan la comunicación de móviles con los módulos de Open BTS.

Según Iedema (2015), el protocolo SIP o de inicio de sesión, es el encargado de la señalización siendo el responsable de la inicialización, modificación y terminación de sesiones interactivas. En Open BTS SIP interviene en procesos como el registro de los terminales móviles, la realización de la llamada, la culminación de una llamada telefónica y en el envío de un mensaje de texto. Los terminales móviles en una red de acceso de radio GSM compatible y la red central define a los terminales móviles como puntos finales SIP (o clientes SIP), para el efecto, SIP se utiliza las siguientes transacciones SIP Register, SIP Invite y SIP Message, y para la transmisión de VoIP, Open BTS utiliza el protocolo de transporte en tiempo real RTP. La figura 39., muestra la arquitectura híbrida IP.

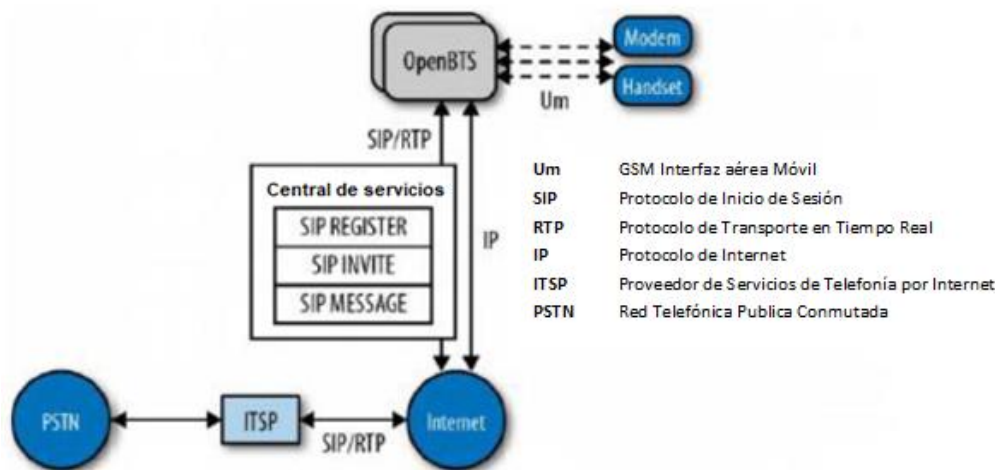


Figura 39. Arquitectura híbrida IP

Fuente: http://openbts.org/site/wp-content/uploads/ebook/Getting_Started_with_OpenBTS_Range_Networks.pdf

M.Iedema,H.Samra,Getting Started with OpenBTS, January, (2015)

3.3.1.1.2. Asterisk.

Según Michael Ladema (2015). Asterisk es un marco de código abierto para crear aplicaciones de comunicaciones, convierte una computadora ordinaria en un servidor de comunicaciones y actúa como sistemas IP PBX, puertas de enlace VoIP, servidores de conferencia y otras soluciones personalizadas; es utilizado por pequeñas empresas, grandes empresas, centros de llamadas, operadores y agencias gubernamentales de todo el mundo.

Según Digium (2019), hoy en día hay más de un millón de sistemas de comunicaciones basados en Asterisk en uso, en más de 170 países.

La mayoría de las veces implementada por integradores de sistemas y desarrolladores, Asterisk puede convertirse en: la base de un sistema telefónico comercial completo, usarse para mejorar o ampliar un sistema existente y para cerrar una brecha entre sistemas.

Este módulo en Open BTS se encarga de enrutar las llamadas de un extremo a otro, el cual se convierten en el enlace de comunicación entre los servicios VoIP y PSTN.

Según Canet (2016), Asterisk también se encarga de manejar las solicitudes de SIP Invite, estableciendo cada una de las ramas de la llamada y conectándolas entre ellas siendo el SIP Proxy que utiliza Open BTS, para enrutar las llamadas.

Asterisk hace uso del IMSI de los suscriptores y los graba como nombres de usuario SIP, luego inscribe a cada teléfono GSM como un cliente SIP, estas transacciones de conexión de las llamadas son asignadas por el protocolo SIP Invite, la cual es la que se encarga de gestionar el establecimiento de una llamada entre dos terminales móviles.

Según Parra (2018), para compararlo con una red GSM, Asterisk provee la funcionalidad equivalente al MSC, al realizar las funciones de administración de usuarios y conmutación de llamadas.

3.3.1.1.3. *SMQueue (SIP MESSAGE Queue).*

Al igual que una red GSM, en Open BTS se necesita el envío y almacenamiento de mensajes de texto, SMQueue es el módulo que procesa todas las solicitudes de SIP Message que OpenBTS genera al momento que un usuario envía un mensaje de texto, a su vez actúa como un almacenador de los mensajes enviados, programa el envío y en el caso de no ser enviados por problemas del teléfono no disponible, los reprograma para cuando haya una conexión.

3.3.1.1.4. *SIP AuthServer (SIP Authorization Server).*

Este módulo es muy importante porque se encarga de aceptar los teléfonos móviles que se quieran unir a la red, el cual procesa las solicitudes SIP Register que Open BTS genera; cuando un teléfono es autenticado y aceptado por la red, SIP AuthServe se encarga de actualizar la base de datos de registro del nuevo suscriptor.

3.3.1.1.5. *Base de datos.*

Al igual que una red GSM, Open BTS cuenta con una base de datos, diseñado en SQLite¹⁹ el cual almacena los parámetros recibidos y enviados por Open BTS; todos los datos pueden ser visualizados o editados utilizando la sintaxis SQL.

- **Sqlite.db** – Según Parra (2018), es la base de datos de registro de suscriptores utilizada por Asterisk para el registro SIP y el plan de marcado; además gestiona el servicio SIP AuthServe y SMQueue; Sqlite.db cumple en esencia las funciones de las bases de datos HLR y VLR de GSM.
- **Open BTS.db** – Según Parra (2018), es la base de datos que contiene los parámetros que controlan la aplicación Open BTS, es decir los parámetros estáticos, dinámicos y otros correspondientes al hardware; asimismo gestiona la información del estado de las transacciones de las llamadas en curso y el envío de mensajes y en general, almacena información acerca del estado de los canales activos.
- **Smqueue.db** – Según Parra (2018), es la base de datos que almacena parámetros relacionados con la aplicación SMQueue, entre los parámetros almacenados se han

¹⁹ SQLite: SQLite es una biblioteca en lenguaje C que implementa un motor de base de datos SQL. Está integrado en todos los teléfonos móviles y la mayoría de las computadoras.

identificado la dirección IP, el socket (dirección IP y puerto) de la máquina donde se ejecuta SMQueue, mensajes de error para cuando los mensajes de texto no puedan ser entregados, entre otros.

- **Sipauthserve.db** – Según Parra (2018), es la base de datos que almacena los parámetros de la aplicación SIP AuthServe y realiza la autenticación SIP del registro de suscriptores; además, SIP AuthServe lleva a cabo ciertas funciones similares a la base de datos VLR de GSM.

En la figura 40., se muestran los servicios centrales de Open BTS: SIP AuthServe, SMQueue, Asterisk y Open BTS, sus respectivas bases de datos y la señalización SIP.

Los enlaces en color negro corresponden a las conexiones de red (SIP), los enlaces rojos son las conexiones de los sistemas de archivos (búsquedas SQLite) y los enlaces azules representan las conexiones ODBC24 (Open Database Connectivity) para las búsquedas locales y generales en la red.

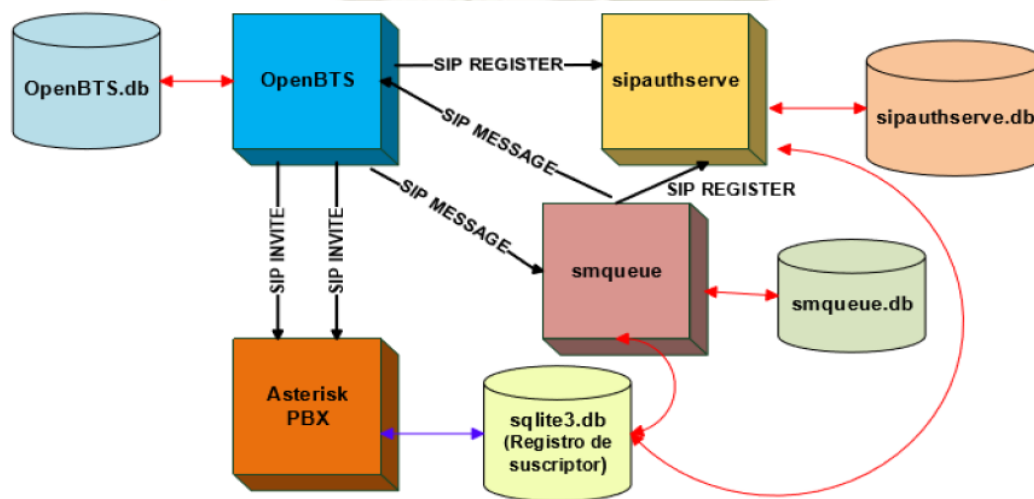


Figura 40. Diagrama de componentes de Open BTS y sus bases de datos

Fuente: <https://docplayer.es/113164395-Escuela-politecnica-nacional.html> (prototipo de red gsm basada en sdr (software defined radio) Parra, (2018).

3.4 Especificaciones y Recomendaciones Técnicas

3.4.1 Consideraciones Fuente de Alimentación

Según National Instruments con relación a la fuente de alimentación del USRP-2901, se ha determinado que la potencia típica de la fuente de alimentación externa se encuentra en el rango de 3W a 3,5W, pudiendo en algunos casos contar con una potencia máxima de 4,5W.

Es recomendable para el usuario que solo utilice la fuente de alimentación propia del equipo y que no utilice una fuente alternativa, debido a que esta última podría generar un daño al equipo.

La alimentación que se conecta al ordenador a través del dispositivo de USB 3,0 teniendo como características 5V, 900 mA y 4,5W.

3.4.2 Bandas de frecuencia

En la tabla 15, se observa las bandas de frecuencia de radioaficionados que el USRP B210, utiliza para operar de manera libre y sin restricción en el Perú.

Tabla 15. Bandas de frecuencia de Radioaficionados

Banda	Atribución
144 – 146 (MHz)	Radioaficionados Radioaficionados por satélite
220 – 225 (MHz)	Radioaficionados
430 – 432 (MHz)	Radiolocalización Radioaficionados
432 – 438 (MHz)	Radiolocalización

	Radioaficionados Exploración de la Tierra por satélite (activo)
438 – 440 (MHz)	Radiolocalización Radioaficionados
902 – 928 (MHz)	Fijo Radioaficionados Móvil salvo móvil aeronáutico Radiolocalización
1240 – 1300 (MHz)	Radiolocalización Radionavegación por satélite Radioaficionados
2400 – 2450 (MHz)	Fijo Móvil Radiolocalización Radioaficionados
3300 – 3400 (MHz)	Radiolocalización Radioaficionados Fijo Móvil
3400 – 3500 (MHz)	Fijo Fijo por Satélite (espacio - Tierra) Radioaficionados Móvil

	Radiolocalización
5650 – 5725 (MHz)	Radiolocalización Móvil salvo móvil aeronáutico Radioaficionados Investigación espacial (espacio lejano)
5725 – 5830 (MHz)	Radiolocalización Radioaficionados
5830 – 5850 (MHz)	Radiolocalización Radioaficionados Radioaficionados por satélite (espacio – Tierra)
5850 – 5925 (MHz)	Fijo Fijo por Satélite (Tierra – espacio) Móvil Radioaficionados Radiolocalización

Fuente: MTC, Plan Nacional de Atribución de Frecuencia (2008).

3.4.3 Aplicaciones y Modulaciones con USRP B210

Los dispositivos USRP B210, cuentan con una mesa de ayuda y soporte como se ha identificado en Communications Toolbox, por lo que este dispositivo muestra diversas aplicaciones como: LTE, TV, Celular, GPS, WiFi, ISM y Matlab.

Se observa en la tabla 16, aplicaciones con las que trabaja el dispositivo USRP B210 y su modulación de cada aplicación.

Tabla 16. Ejemplo de Aplicaciones

Aplicaciones	Modulación
DVB-T	<p>COFDM</p> <p>QPSK, 16QAM y 64QAM, modulación jerárquica multi-resolucion.</p> <p>Intervalo de guarda: $1/32$, $1/16$ y $1/4$ de SIMBOLO OFDM</p> <p>2 modos: 2k y 8k FFT</p>
ISDB-T	<p>BST-OFDM con 13 segmentos</p> <p>QPSK, 16QAM y 64QAM, modulación jerárquica: se puede aplicar diferente modulación para cada segmento.</p> <p>Intervalo de guarda: $1/32$, $1/16$, $1/8$ y $1/4$ de SIMNOLO OFDM</p> <p>3 modos: 2k, 4k y 8k FFT</p>
WLAN	<p>La capa física de HiperLan/2 en WLAN usa las siguientes modulaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • BPSK TASA TX (MBPS) = 6 TASA CODIFICACIÓN R = $1/2$ • BPSK TASA TX (MBPS) = 9 TASA CODIFICACIÓN R = $3/4$ • QPSK TASA TX (MBPS) = 12 TASA CODIFICACIÓN R = $1/2$ • QPSK TASA TX (MBPS) = 18 TASA CODIFICACIÓN R = $3/4$ • 16QAM TASA TX (MBPS) = 27 TASA CODIFICACIÓN R = $9/16$

	<ul style="list-style-type: none"> • 16QAM TASA TX (MBPS) = 36 TASA CODIFICACIÓN R = 3/4 • 64QAM TASA TX (MBPS) = 54 TASA CODIFICACIÓN R = 3/4
<p>WiMAX 802.16a (2GHz-11GHz)</p>	<p>OFDM con 256 subportadoras QPSK,16QAM,64QAM</p>
<p>LTE</p>	<p>En la interfaz de radio LTE se usan las modulaciones: OFDMA (versión de múltiple acceso de OFDM) QPSK 16QAM 64QAM</p>

Fuente: Elaboración Propia (recopilado de website)

<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/7339/1/20T00894.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761/fichero/Volumen1%252F7-Cap%C3%ADtulo3+-+Redes+inal%C3%A1mbricas+de+%C3%A1rea+local+%28WLAN%29.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11677/fichero/Volumen+1%252F3.-WiMAX.pdf>
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12081/fichero/OFDMA+y+SC-FDMA+en+la+Interfaz+Radio+de+LTE%252F5.+Long+Term+Evolution+for+UMTS+%28LTE%29.pdf>

CAPITULO IV: MODULO DIDACTICO SDR

El desarrollo del módulo didáctico de guía de prácticas busca ser objetivo para la implementación del sistema SDR en un laboratorio de telecomunicaciones, lo expuesto anteriormente son las bases de la tecnología SDR, puesto que este sistema no tiene una definición estandarizada, se puede afirmar que el usuario al desarrollar un sistema, al darle una estructura SDR propia del diseño, podrá formular un concepto desde una perspectiva desarrollada y aplicada en función de la tecnología SDR. Después de comprender la eficiencia de esta técnica el usuario podrá avanzar a un siguiente nivel, desarrollando sistemas hardware en software donde estos pueden ser más complejos, permitiéndole innovar tecnológicamente.

4. Metodología del módulo de guía de prácticas

Para la Universidad Católica de Santa María (UCSM), la enseñanza está centrada en el estudiante, buscando fortalecer su personalidad, la construcción de su ciudadanía desarrollando las competencias, a través del uso de la tecnología de información y comunicación. Incita a la investigación, creando estrategias pedagógicas de enseñanza – aprendizaje a través de módulos prácticos que permitan experimentar, comprender, aplicar y adquirir nuevos conocimientos de una manera vivencial, que es denominada como investigación formativa básica y/o aplicada. Un futuro profesional debe ser consciente de la responsabilidad social de la universidad y de su participación en la sociedad, por qué se hace necesario que en su formación se encuentren identificados los compromisos de desarrollo social, proyección social, responsabilidad social e impacto ambiental.

Para lograrlo, es necesario que el estudiante logre desarrollar sus competencias durante su formación profesional, por lo que se hace necesario que se integre el conocimiento, las habilidades y las actitudes, la figura 41., muestra la composición de las competencias formativas.

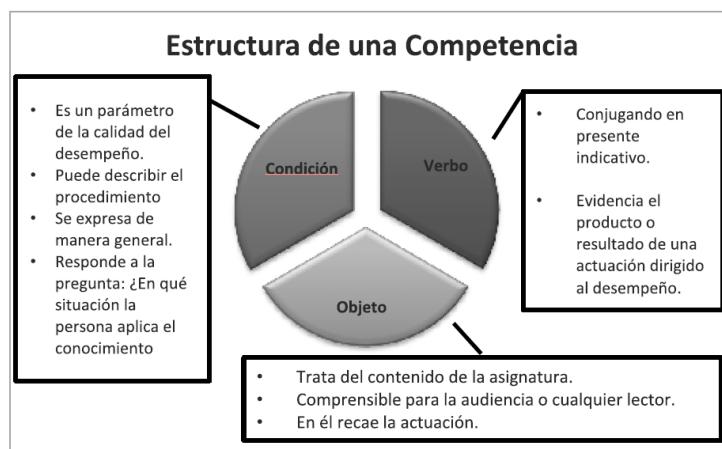


Figura 41. Estructura de una competencia
Fuente: Pimienta, (2012)

Los componentes de una competencia se centran en tres saberes y los definimos como:

- Saber conocer – se refiere al conocimiento significativo de un hecho comprobado, un principio, una ley, un concepto que ha sido estudiado y validado que permite tomar una posición relevante con la finalidad de mejorar una capacidad de acción.
- Saber hacer – muestra la capacidad, destreza, expertis de una habilidad que se desea lograr, a través de la aplicación práctica de una metodología, técnica, protocolo, procedimiento establecido.
- Saber ser – demuestra la mejor actitud, disposición, compromiso, empatía, esfuerzo que se espera del estudiante ante las dificultades, problemas, integración, fracasos, desarrollando las fortalezas necesarias para que se reincorpore y logre los objetivos.

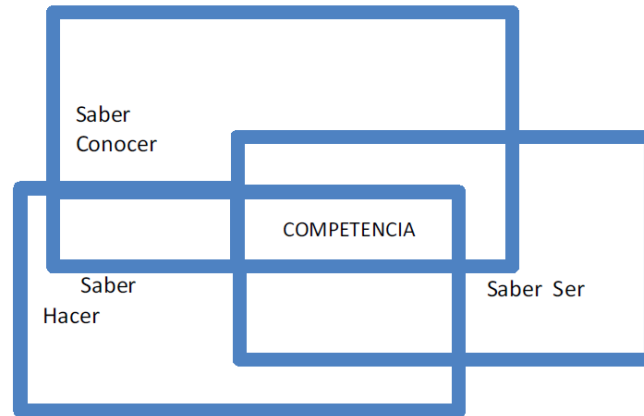


Figura 42. Dimensiones de una competencia

Fuente: Pimienta, (2012)

Se entiende como módulo de práctica en laboratorio, taller o campo, a la actividad didáctica basada en una experiencia en la que se cuestiona los conocimientos y habilidades de una o más disciplinas.

En un módulo de práctica se analizan los conceptos, procedimientos, métodos y tecnología que se aplicará en una actividad experimental, buscando desarrollar el proceso enseñanza – aprendizaje en un contexto teórico y práctico, por lo que el diseño o elaboración de la guía de práctica debe considerar una metodología pedagógica que busque integrar las competencias en cada actividad propuesta, desarrollando las capacidades de los estudiantes en resolver problemas prácticos, observando las habilidades para planificar, organizarse y formar equipos de alto rendimiento que logren los objetivos planteados en un tiempo estimado.

Los elementos de un módulo didáctico de guía de prácticas son:

- **Título de la práctica** – El tema que va a ser desarrollado
- **Introducción** – Una breve descripción fundamentada.

- **Objetivos generales** – La meta a conseguir.
- **Objetivos específicos** – El desarrollo y cumplimiento de los objetivos de la práctica.
- **Metodología** – Es la técnica que se aplicara para desarrollar la práctica.
- **Materiales** – Los materiales necesarios para la implementación de la práctica.
- **Antecedentes (Trabajo previo)** – Contiene fundamentos prácticos que se investigarán antes de desarrollar la práctica.
- **Tiempo estimado** – Es una estimación del tiempo que tomará desarrollar la práctica
- **Procedimiento** – Es el desarrollo de las prácticas, vienen con imágenes referenciadas y pasos a seguir, para conseguir los objetivos planteados.
- **Evaluación** – Se desarrollará un cuestionario de preguntas que permitirá identificar el grado de conocimiento asimilado en la práctica.
- **Referencias** – Se cita libros o páginas web que fueron consultadas para el desarrollo de las prácticas, esto facilitara la comprensión de la guía.

4.1. Propuesta de módulo de prácticas en Telecomunicaciones

El proyecto busca proponer un módulo didáctico para prácticas en un laboratorio de telecomunicaciones basado en un transceptor de radio definido SDR por software, en ese contexto se puso mayor énfasis de desarrollo a la operación de una red GSM, la cual está diseñada para experimentar y obtener conocimientos, tanto teóricos como prácticos introduciendo al participante en esta tecnología, con la finalidad de asimilar y entender las bases expuestas, poder diseñar en un futuro un nuevo sistema complejo, sólido, estable y confiable.

4.1.1. Módulo de práctica 1ª

A continuación, se muestra el formato estructurado del módulo de práctica 1 desarrollado para el laboratorio de telecomunicaciones.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA	
Título de la Práctica	TRANSMISIÓN DE FRECUENCIA MODULADA FM
Identificación Académica	
Facultad de: Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales Escuela Profesional: Ingeniería Electrónica Especialidad: Telecomunicaciones Semestre: VII Semestre Año: 2021 - I Asignatura: Telecomunicaciones II Código de Asignatura:	
Identificación Operativa	
Horas de Práctica Semestre: 36 horas Horas de Practica Semana: 2 horas Laboratorio de Telecomunicaciones: L – 304	
Identificación de Práctica	
Introducción	
A través de la práctica se identificará las características de GNU Radio, para la transmisión de una frecuencia digital.	
Objetivos	
Objetivo General	Objetivos Específicos
Realizar un transmisor en GNU Radio Companion	<ul style="list-style-type: none"> • Simular y experimentar con el dispositivo USRP y GNU Radio. • Crear una radio a través de un Software en su totalidad. • Observar las características de las señales con los osciloscopios facilitados por la interfaz de GRC. • Estudiar conceptos y entender modelos de frecuencia modulada. • Adquirir las Competencias Técnicas, para desarrollarse en campo de telecomunicaciones.

	<ul style="list-style-type: none"> • Adquirir Versatilidad y Adaptabilidad, capaces de trabajar interactuar en los diferentes niveles de un proyecto. • Contar con una Comunicación y Trabajo en Equipo de alto rendimiento, asumiendo un rol proactivo.
Metodología	
<p>La metodología del módulo es</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Interactiva • Analítica • Aplicada 	
Materiales	
<ul style="list-style-type: none"> • Laptop • USRP b210 • Antena de banda completa ADS-B UHF, VHF 	
Antecedentes	
<p>Para desarrollar la práctica es necesario realizar los siguientes pasos previos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo del cuestionario Guía N°1 del Anexo B del CD o USB. • Imprimir el cuestionario resuelto y anexarlo al Informe Final. • Estudiar los conceptos de radio FM. • Reconocer la estructura de GNU Radio Companion. • Conocer la interfaz de trabajo de GNU Radio. 	

Diagrama de bloques funcional del prototipo FM, Trasmisor.

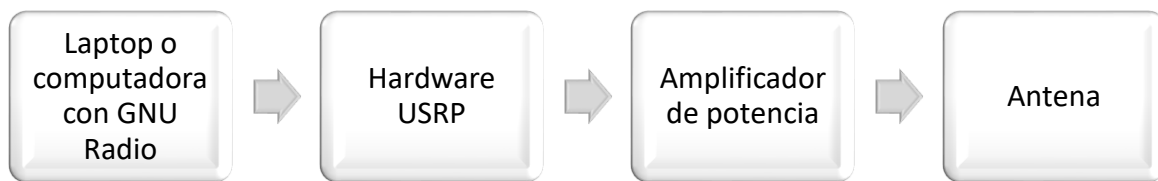


Figura 1 G. Diagrama de bloques funcional del prototipo FM, Trasmisor.

Una computadora será la que ejecutara el programa GNU Radio en donde se diseñara el transmisor FM, la cual enviara las señales digitales al hardware USRP y por medio de sus amplificadores de potencia, que serán transmitidas a través de una antena.

Diagrama de bloques del transmisor

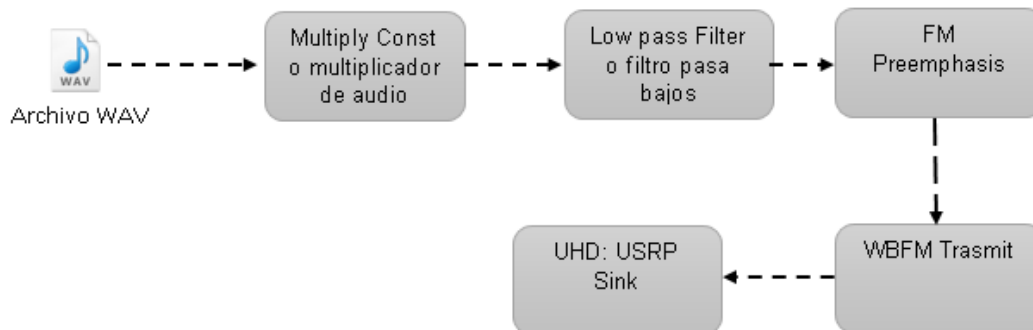


Figura 2 G. Diagrama de bloques de transmisor

- **Archivo WAV** - En este bloque se inserta un archivo de audio de tipo WAV, el cual según el diseño de este transmisor FM, debe estar a una resolución de 16 bit y una tasa de muestreo de 44.100 Hz, la página que usamos para poder modificar cualquiera archivo MP3 a WAV es la siguiente <https://audio.online-convert.com/es/convertir-a-wav>. Este será el audio que podrá ser escuchado en el receptor FM en este caso será una radio.

- **Multiplicador de audio** - Este bloque se utiliza para multiplicar la señal de audio, la señal de entrada en este caso el archivo WAV será multiplicada por una constante específica, la cual será asignada en la práctica, este bloque puede tomarse como la variable del volumen audio que tendrá el transmisor.
- **Filtro pasa bajos** - Este bloque es un filtro necesario antes de aplicar el filtro FIR, el cual sirve para atenuar armónicos y evitar el aliasing de datos.
- **FM Preemphasis** - Este es un filtro FIR que realiza la tarea de multiplicar la entrada por una función de transferencia, este filtro FIR es de primer orden el cual tendrá valores que varían según la frecuencia de la señal que llega al bloque, los valores serán bajos si la frecuencia es baja y más altos si la frecuencia es alta.

Uno de los datos que resaltan de este bloque es el valor **tau**, el cual es una constante de tiempo de un circuito RC que es utilizado para implementar a nivel hardware. Por lo general se utiliza valores estándar de 75 microfaradios o 50 microfaradios, este bloque es necesario para amplificar manualmente los componentes de alta frecuencia de la señal a transmitir.

- **WBFM transmit** - La función de este bloque es tomar la señal de entrada y entregar la misma señal modulada en frecuencia como salida.
- **UHD: USRP sink** - Es el bloque que se comunica con el dispositivo USRP a través de los drivers UHD, este bloque será el encargado de procesar la señal y enviárselas al USRP para que esta pueda transmitir el audio WAV.

Tiempo Estimado	6 Horas
------------------------	---------

El tiempo estimado para realizar esta práctica es de tres sesiones, cada sesión es de dos horas cada una.

El resultado de la práctica será lograr una transmisión de frecuencia modulada FM.

Procedimiento

TRANSMISOR FM

El resultado que se desea lograr se presenta en el diagrama de flujo o infografía, con la finalidad de poder compararlo con el proceso que se desarrollará en la práctica.

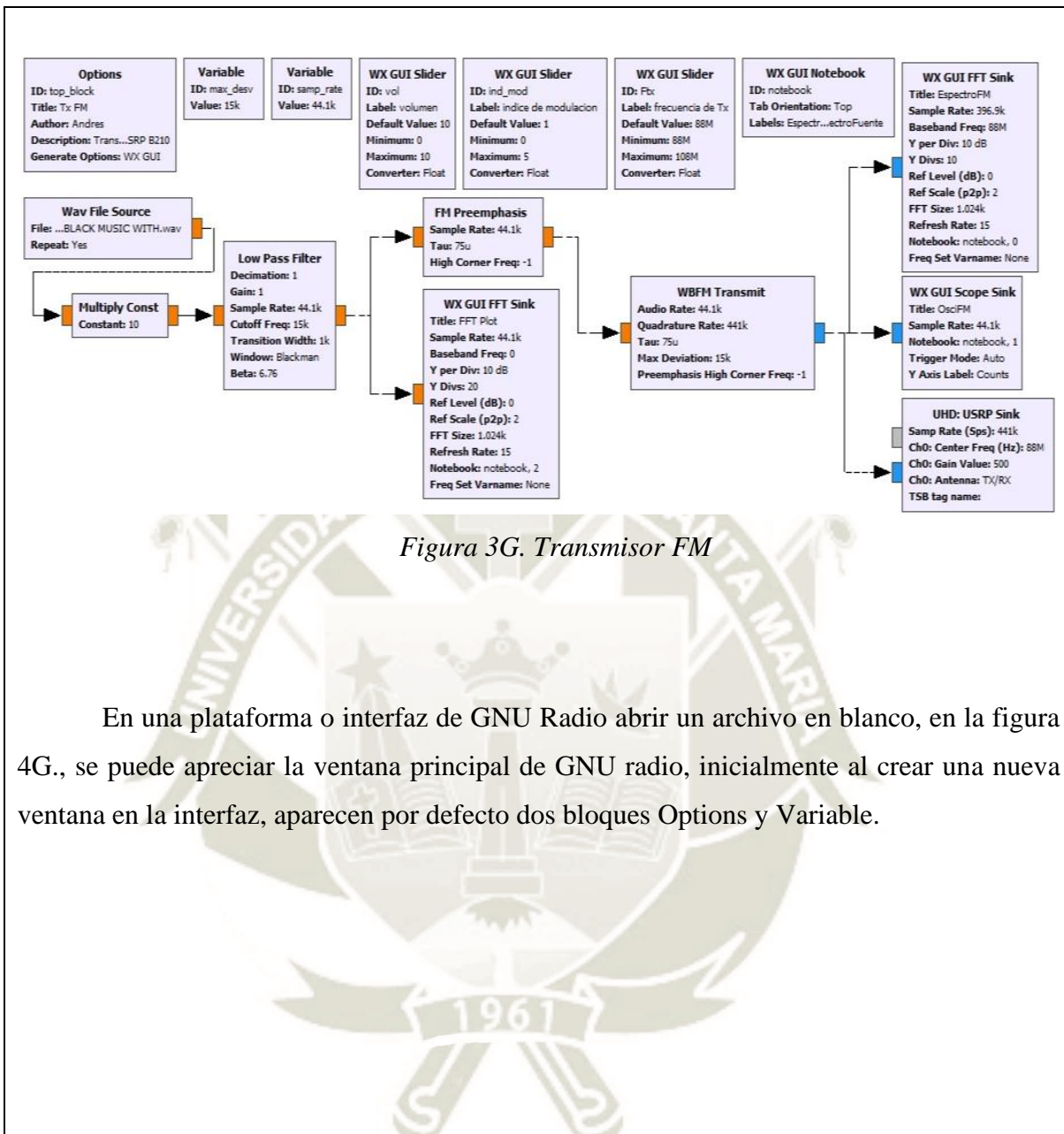


Figura 3G. Transmisor FM

En una plataforma o interfaz de GNU Radio abrir un archivo en blanco, en la figura 4G., se puede apreciar la ventana principal de GNU radio, inicialmente al crear una nueva ventana en la interfaz, aparecen por defecto dos bloques Options y Variable.

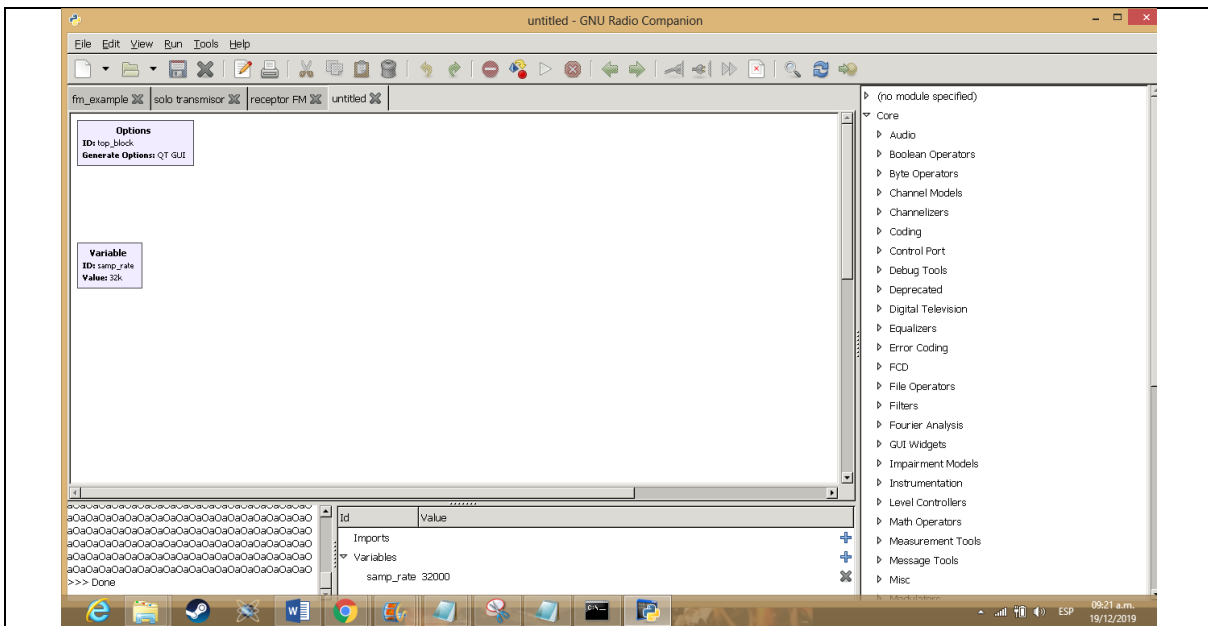


Figura 4 G. Interfaz de GNU Radio Companion

- **Bloque options** - Haciendo doble clic en options, se podrá modificar los parámetros básicos del proyecto, en la figura 5 G., podemos observar los detalles a configurar del bloque options.

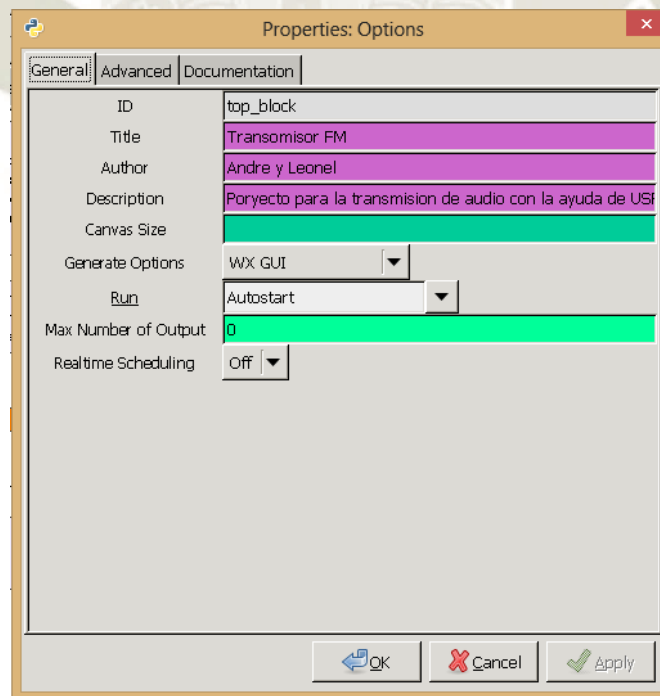


Figura 5G. Propiedades de bloque Options

- La propiedad principal de este bloque es para configurar en **Generate Options** donde se deberá realizar la selección del tipo de interfaz de usuario que se va a utilizar en el diagrama, los osciloscopios están en la interfaz de usuario WX GUI, es por esto que se usa esta interfaz.
- **Bloque variables** - Tenemos dos bloques variables, estas etiquetas son para abreviar, remplazar o para ser llamadas en los bloques, en este caso por defecto viene el bloque con la variable `samp_rate`, para ingresar otro bloque de variable, se busca en la biblioteca de bloques, **Variables-Variable**.
- En la figura 6 G., se muestra las ediciones para esta aplicación.
 - Value “`samp_rate`”.
 - La etiqueta de `samp_rate` se le asigna un valor de 44100

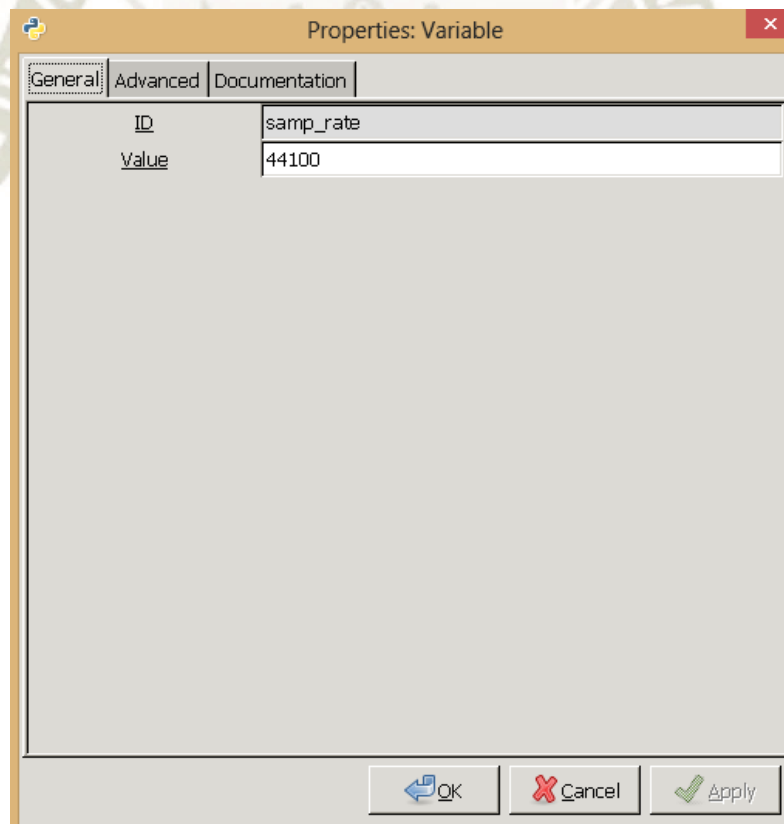


Figura 6 G. Propiedades del bloque Variable "samp_rate"

- En la figura 7 G., se muestra las ediciones para esta aplicación.
 - Value “max_desv”.
 - La etiqueta max_desv se le asigna un valor de $15k \cdot \text{ind_mod}$ “ind_mod es el índice de modulación la cual se explicará después”

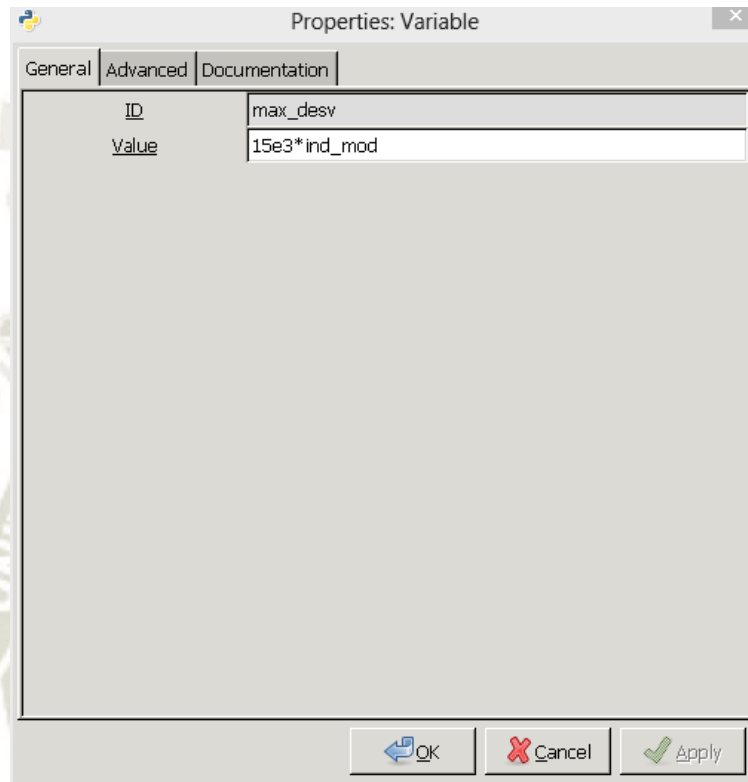


Figura 7 G. Propiedades del bloque variable "max_desv"

- **Bloque Wav File Source** - Este bloque es el que se encarga de escoger el archivo de audio a transmitir, el cual debe estar en formato wav.
 - **Repeat.** Para repetir el audio cuando termine.
 - **N Channels.** Número de canales, en este caso se está diseñando una transmisión monofónica, en el caso de querer una transmisión estéreo se selecciona 2, lo cual modificaría toda nuestra plantilla.

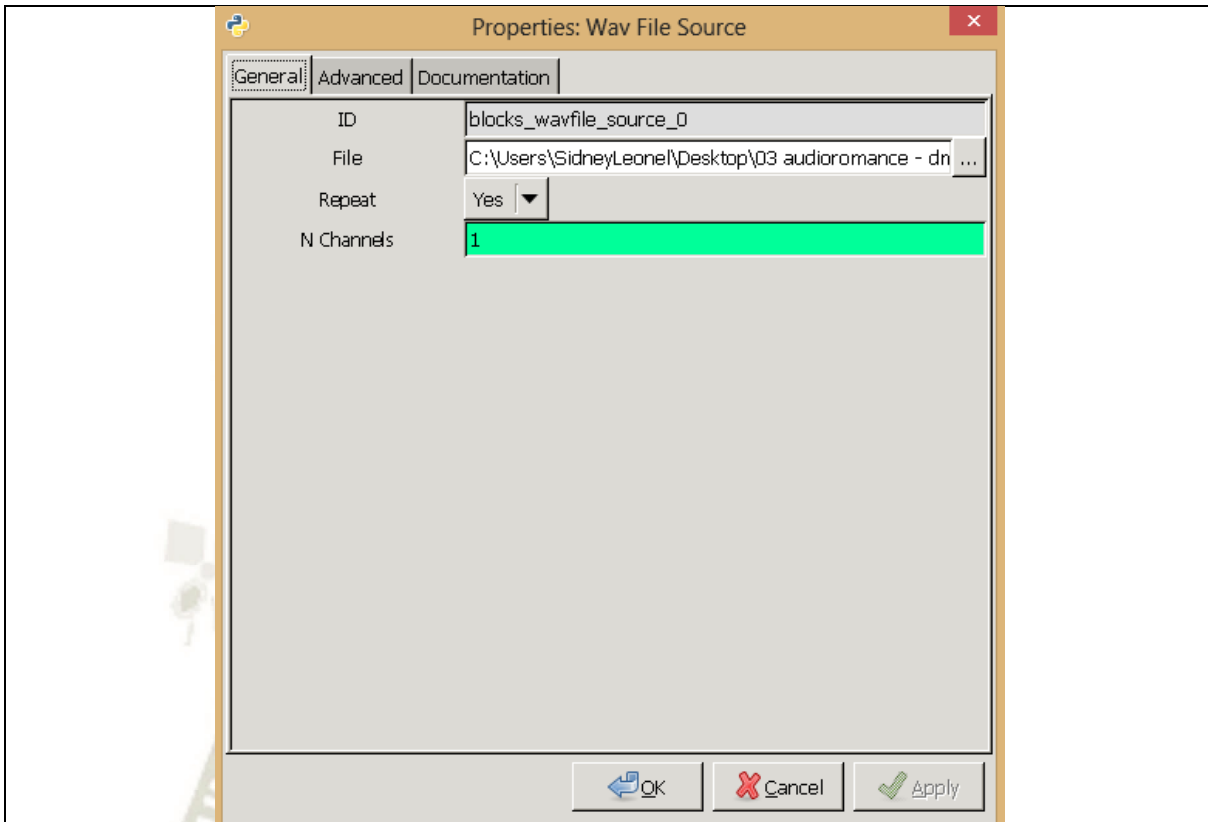


Figura 8 G. Propiedades del bloque Wav File Source

- **Bloque Multilply Const** - Este bloque es un multiplicador de constante.
 - **IO Type** - Tiene un valor float, este valor de los colores indica el tipo de variable, si el float está en naranja el bloque que le sigue tiene que estar en variable flotante para que puedan conectarse.
Al comprobar el cambio de variable a Complex, la entrada y salida cambiaran a azul y la conexión se verá afectada mostrándose en rojo, lo que indica que no será posible correr el programa
 - **Constant**. Tiene una etiqueta llamada Vol, esta etiqueta se basa en el bloque WX GUI Slider que será explicada a continuación.
Se hace un llamado al bloque WX GUI Slider, lo que hará es modificar el volumen de nuestra transmisión
 - **Vec Length**. Esta es una variable adimensional, se hace un llamado de vector de longitud de 1.

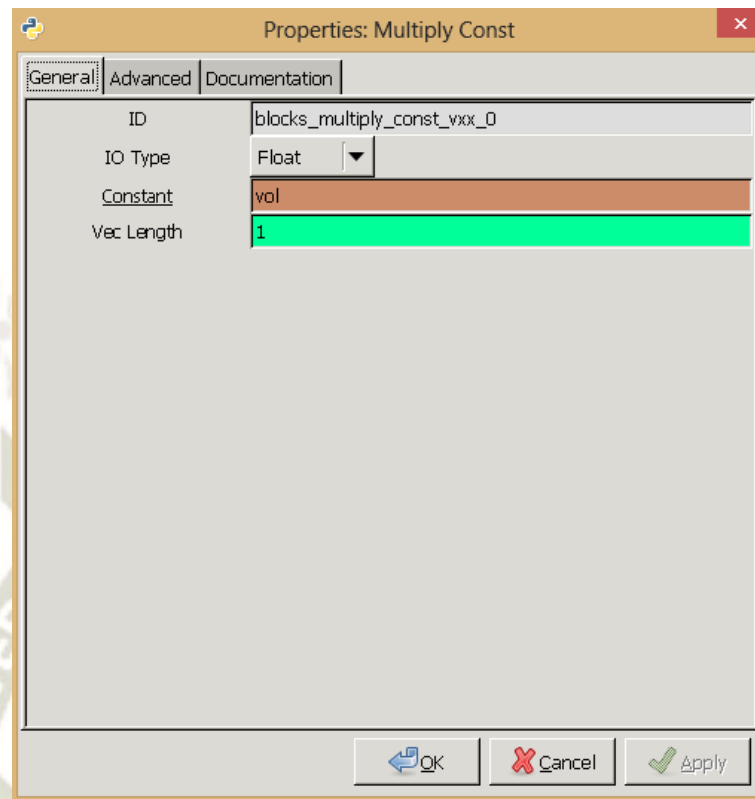


Figura 9 G. Propiedades del bloque Multilply Const

- **Bloque WX GUI Slider** - Lo que proporciona este bloque es una barra la cual será de volumen y está asociada al bloque Multipli Const, esta barra se apreciará al momento de correr el programa, permitiendo el aumentar o bajar el volumen de la transmisión.
 - **ID.** La etiqueta, llamada Vol, con esta se hará el llamado en Multipli Const
 - **Default Value.** Valor por defecto que siempre empieza en 10.
 - **Minimum.** El mínimo valor del volumen será 0.
 - **Maximum.** El máximo será 10.
 - **Num Steps. Nmero** de pasos, para saber de cuanto en cuanto va a aumentar la barra.
 - **Style.** Donde aparezca la barra, en este caso aparecerá horizontalmente
 - **Converter.** El tipo flotante.

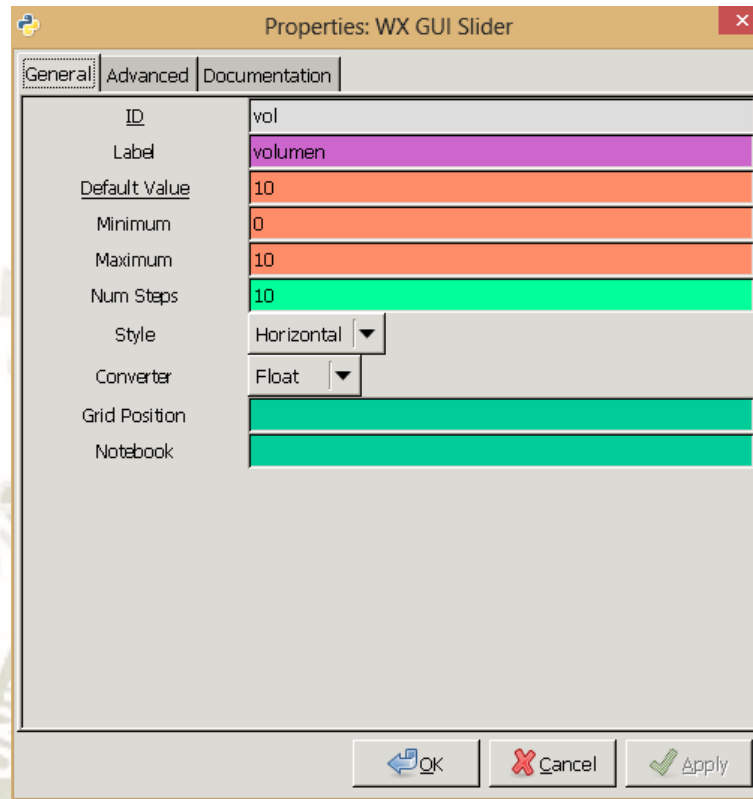


Figura 10 G. Propiedades del bloque WX GUI Slider.

- **Bloque Low Pass Filter** - Primero se tiene el archivo de sonido que será la señal modulante en el bloque Wav File Souce, luego de tener la señal moduladora, se tiene el filtro para bajos.

- **FIR Type** - El tipo de filtro es flotante- flotante, porque la salida es un número flotante.
- **Decimation** - La decimación tiene un valor de 1, porque la frecuencia del audio es de 44.1k y si se desea que cambie en el caso de ponerle dos se debe utilizar la ecuación.

$$Fy = \frac{Fx}{D} = \frac{44.1k}{1} = 44.1k$$

- En la ecuación se observa que la decimación no cambia, pero si le asignamos un valor de 2 tendríamos lo siguiente.

$$Fy = \frac{Fx}{D} = \frac{44.1k}{2} = 22050k$$

NOTA: "Fy" frecuencia de salida, "Fx" frecuencia de entrada, "D" decimación

- **Gain.** El bloque de ganancia permite amplificar el audio y si se desea un efecto amplificador para que el audio se escuche bien.
- **Sample Rate.** Se inicia el llamado al bloque variable creado al inicio con la etiqueta `samp_rate` o si no se desea hacer las variables de inicio, se coloca de manera normal, en este caso el `samp_rate` tiene que ver con la frecuencia de entrada del bloque anterior, como el bloque anterior es el de audio y el audio está a una frecuencia de 44.1k, entonces se coloca lo mismo.
- **Cutoff Freq.** El filtro para bajos tiene una frecuencia de corte, según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC, esta tiene que ser de 15Khz para un canal monofónico, la máxima frecuencia modulante es de 15Khz
- **Transition Width.** Tiene que ver con la ventana que se usa en Windows, la cual está en Blackman, se utiliza esta porque las bandas laterales se ven mejor en estos tipos de ventanas Window. Blackman
- **Beta.** Se crea automáticamente con la ventana creada.

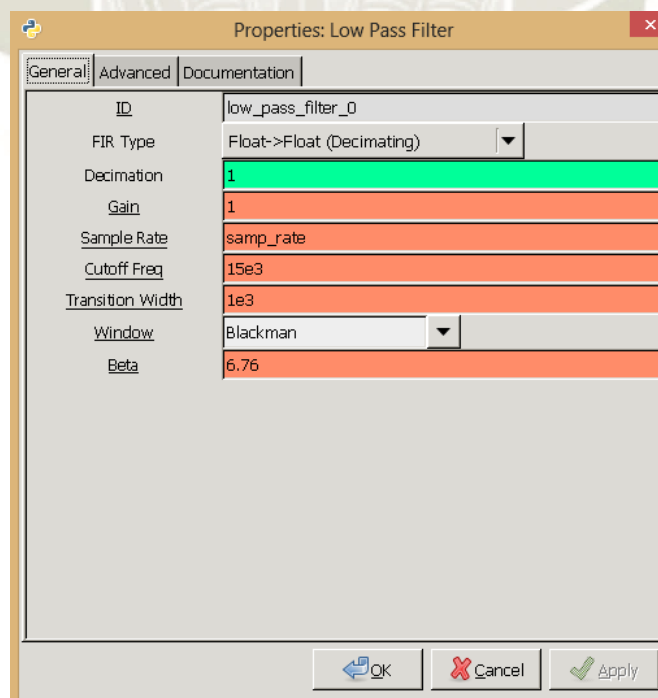


Figura 11 G. Propiedades del Bloque de Low Pass Filter

- **Bloque WX GUI FFT Sink** - Este bloque servirá como osciloscopio, muestra la frecuencia fuente el cual es el audio.
 - **Type** - La salida del bloque anterior es flotante, por lo tanto, para que sean compatibles la entrada también tendrá que ser flotante.
 - **Title** - El título que tendrá nuestro osciloscopio.
 - **Sample Rate** - Usamos la variable creada con `samp_rate`
 - **Baseband Freq** - La banda base de frecuencia será 0.
 - **Y per Div.** - Estas son las escalas, la escala será de 10 dB
 - **Y Divs.** - Escala a 20 para que se vea mejor
 - **Ref Level (db)** - 0 por defecto
 - **Ref Scale (p2p)** - 2.0 por defecto
 - **FFT Size** - 1024 por defecto, es el número de contenedores, que se utiliza para dividir la ventana, en este caso nuestro espectro fuente, en zonas de igual espacio.
 - **Refresh Rate** - Por defecto
 - **Peak Hold** - Off por defecto
 - **Average** – Off Por defecto
 - **Window** – Automatic Por defecto
 - **Notebook** - Se hace un llamado a una variable **Notebook-2**, la cual explicaremos a continuación.

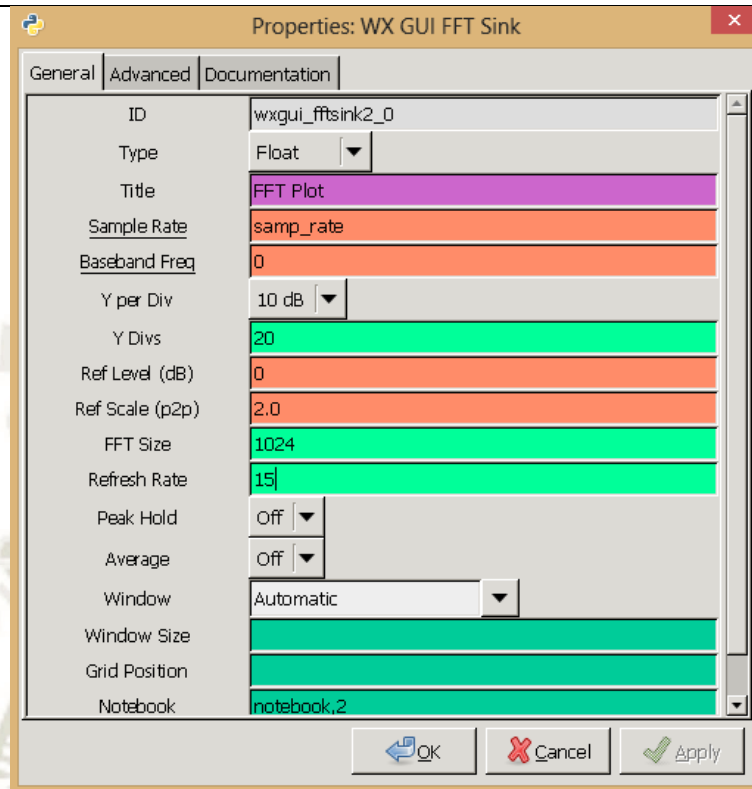


Figura 12 G. Propiedades del bloque WX GUI FFT Sink

- **Bloque WX GUI Notebook** - Este bloque sirve para la ventana que se procesara con los datos del proyecto, sirve para añadir etiquetas a la ventana con funciones de otros bloques.

En este caso se tendrá un espectro FM, un; OsciFM y un EspectroFuente, en este caso el barrido empieza desde 0, 1, 2.

Para el caso de Espectro fuente, el llamado en WX GUI FF Sink en la parte de Notebook, seria notebook,2, lo mismo se aplica para los otros

- **ID** - El nombre es notebook
- **Tab Orientation** - La orientación de donde estarán las etiquetas,
- **Labels** - Las etiquetas que tendrán las funciones de los bloques de osciloscopio, el espectro de fuente y el espectro FM

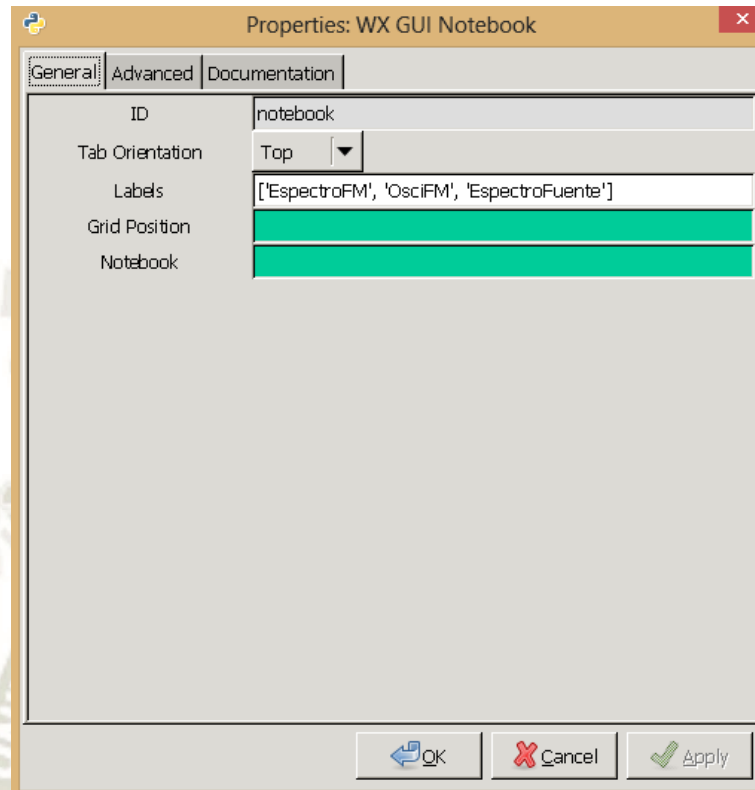


Figura 13 G. Propiedades del bloque WX GUI Notebook

- **Bloque FM Preemphasis** - Este es un amplificador, lo que hace es mantener la relación señal ruido constante luego que se dé la modulación.
 - **Sample Rate** - El bloque anterior, tiene $44.1e3$, tiene que ser igual al anterior bloque
 - **Tau. Para redes Preemphasis** - dice que el tiempo de carga para un RL o un RC es de 75μ , ya que se tiene un circuito que es RL.
 - **High Corner Freq.** - Por defecto -1.0 .

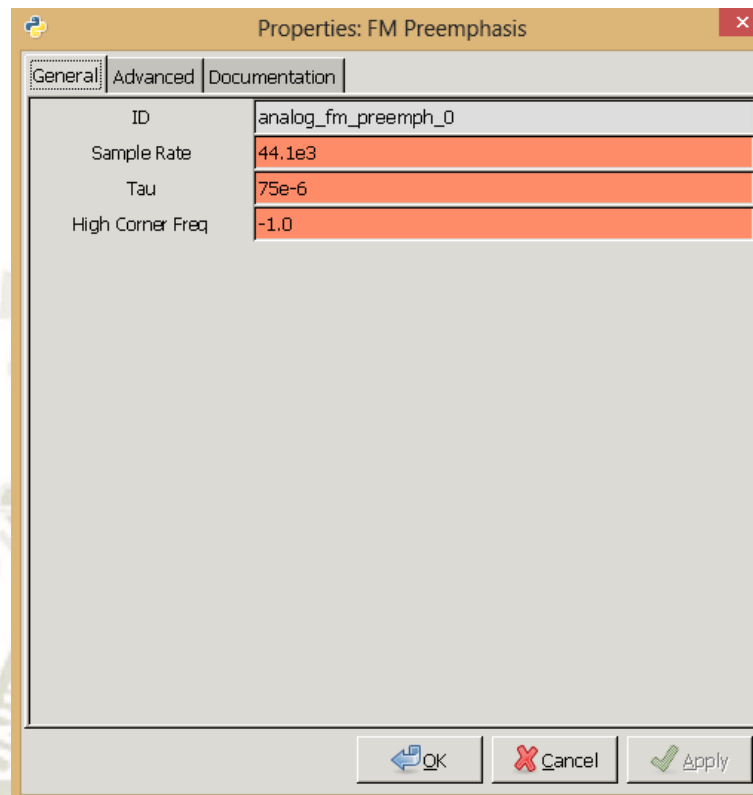


Figura 14 G. Propiedades del bloque FM Preemphasis

- **Bloque WBFM Transmit** - Cuando el valor de la desviación máxima de la frecuencia es grande, la onda FM es llamada FM de banda ancha, este bloque es un transmisor de ancho de banda.

- **Audio Rate** - Nuestro audio es de 44100k por lo tanto el audio rate será lo mismo.
- **Quadrature Rate** - El ancho de banda de una señal FM es de 240Khz, entonces la frecuencia de muestreo tiene que ser dos veces la frecuencia teórica.

$$F_m = 2 * 240Khz = 480Khz$$

- Para el audio se tiene una frecuencia de muestra 44.1k, entonces se debe multiplicar un valor que de un valor cercano a 480k

$$44.1Khz * 9 = 396900hz$$

- **Tau** - 75u

- **Max Deviation** - La máxima desviación, se hace un llamado a la máxima desviación del bloque variable “max_desv” creada en el inicio.
La máxima desviación, es la desviación máxima de la frecuencia de la señal modulada, mediante la desviación máxima, se puede cambiar el índice de modulación, donde usamos otro Slider, llamada ind_mod el cual veremos a continuación.
- **Preemphasis High Corner Fre.** - Por defecto -1.0.
- **Bloque WX Slider “ind_mod”** - Es una barra que da la posibilidad de variar el índice de modulación, también variara la máxima desviación.
 - **ID** - La etiqueta que se usara el para la variable “max_desv
 - **Default Value** - Empieza desde 1
 - **Minimum** - El valor mínimo será 0
 - **Maximum** - El valor máximo será 5
 - **Num Steps** - Esta barra dará 20 saltos.
 - **Style** - La barra será horizontal
 - **Converte** - El tipo de datos será flotante.

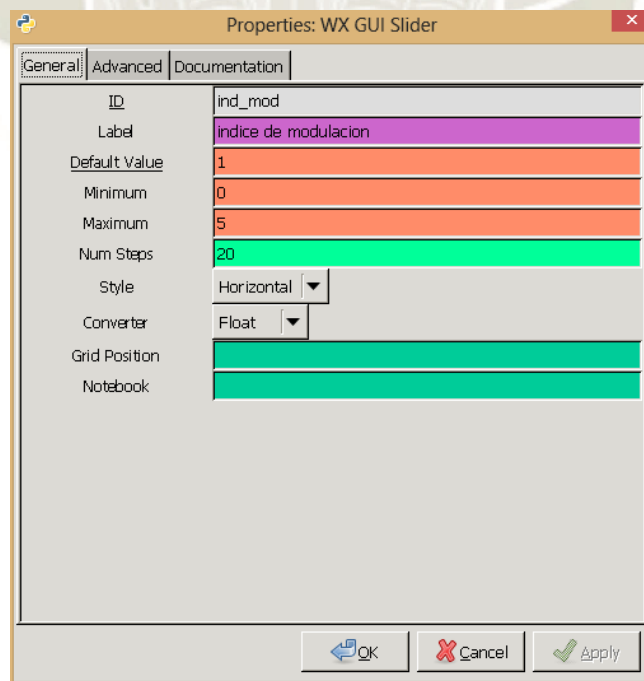


Figura 15 G. Propiedades del bloque WX GUI Slider

NOTA. Al llamar a la variable “max_desv” se da lo siguiente.

Recordar que el valor de esta es $15e3 * ind_mod$.

$$\Delta F = ind_{mod} * Fm$$

ΔF Variación de frecuencia.

ind_{mod} Índice de modulación que es igual a m.

Fm frecuencia modulante

$$\Delta F = ind_{mod} * Fm$$

$$\Delta F = 1 * 15Khz = 15Khz$$

Entonces si el índice de modulación es variado con el slider, la variación de frecuencia cambiaría.

- **Bloque WX GUI FFT Sink** - Es para analizar el espectro en la salida, lo que se está transmitiendo.
 - **Type** - La salida de WBFM Transmit es de tipo complex, por lo tanto la entrada de WX GUI FFT Sink, tendrá que ser de tipo complex o compleja
 - **Sample Rate** - La cuadratura 396.9e3
 - **Baseband Freq** - Ftx se crea una barra para modificar sus datos en tiempo real, la cual se explicará a continuación.
 - **Y per Div** - Por defecto
 - **Y Divs** - Por defecto
 - **Ref Level (db)** - Por defecto
 - **Ref Scale (p2p)** - Por defecto
 - **FFT size Refresh Rate** - Por defecto
 - **Window** - Por defecto
 - **Notebook** - Notebook, 0 para hacer un llamado a en el WX GUI Notebook.

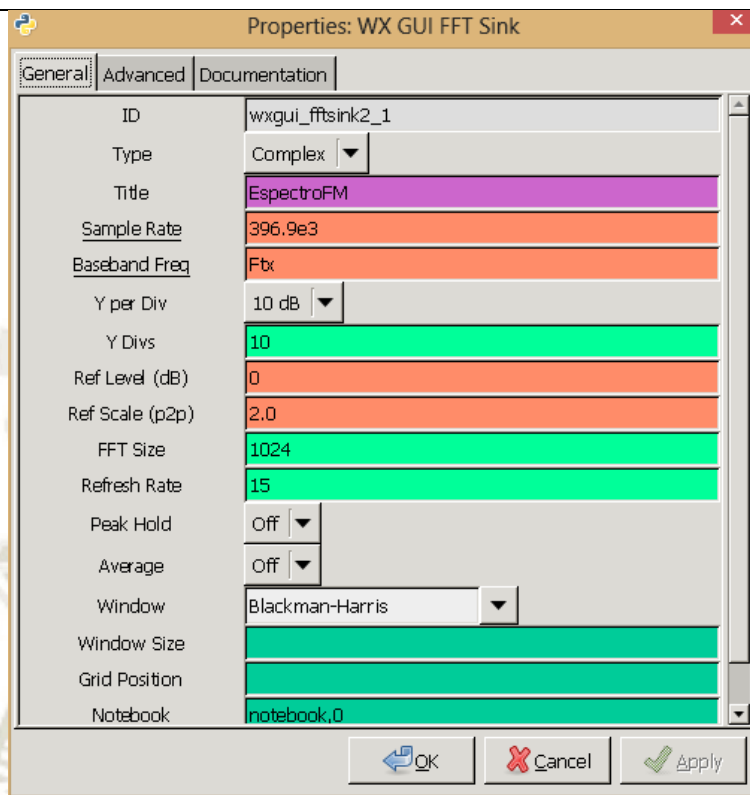


Figura 16 G. Propiedades del bloque WX GUI FFT Sink

- **Bloque WTX GUI Slider “Ftx”.** Este bloque es para cambiar la frecuencia a la que se transmite.
 - **ID** - La etiqueta que se usara en el bloque WX GUI FF Sink
 - **Label** - El nombre de la barra
 - **Default Value** - El valor por el cual se empezará a transmitir, en este caso 88e6
 - **Minimum** - El valor mínimo al cual se pueda transmitir en este caso en Perú la frecuencia FM va desde 88Mhz hasta 108Mhz.
 - **Maximum** - El valor máximo al cual se puede transmitir
 - **Converter** - De tipo flotante

- **Bloque UHD USRP Sink.** Este es el bloque de transmisión que se comunica con el USRP, atreves de los drivers UHD.
 - **Input Type** - De tipo compleja o complex.

- **Device Address** - Es donde se coloca el dispositivo a usar, en este caso lo dejamos en blanco, para que la maquina lo busque al momento de compilar de manera automática.
 - **Samp Rate(Sps)** - Igual que la cuadratura anterior $396.9e3$
- Luego pasamos a la frecuencia central de transmisión, en el mismo bloque tenemos la pestaña General, que es la descripción anterior y RF Options. En Rf options configuramos los parámetros de transmisión.

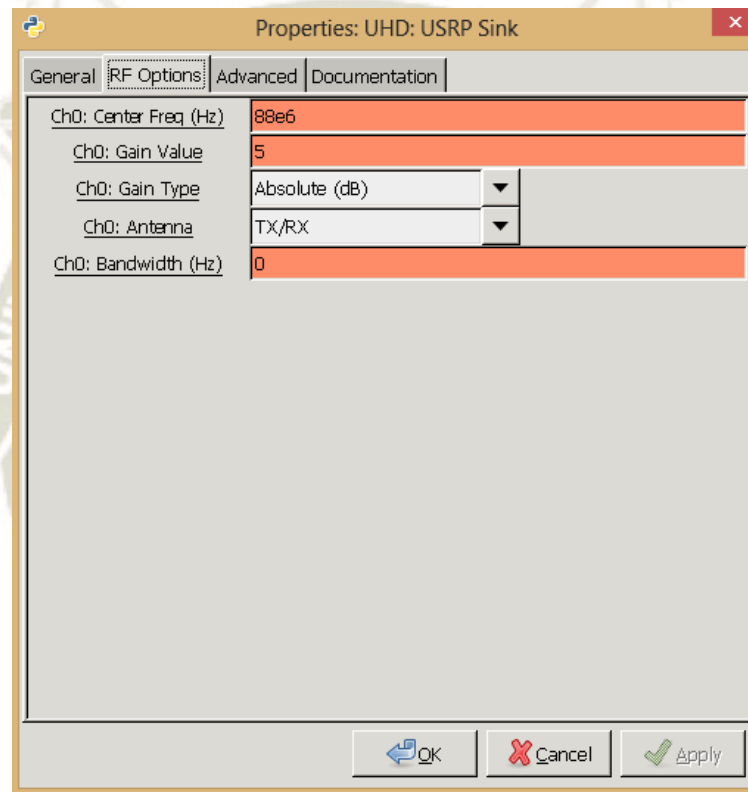


Figura 17 G. Propiedades de bloque UHD: USRP Sink "rf options"

- **Ch0: Center Frreq (Hz)** - La frecuencia central en la cual se transmite a $88e6$
- **Cha0: Gain Value** - La ganancia de la antena es de $500e3$
- **Cha0: Gain Type** - Guanacia es absoluta
- **Ch0: Antena** - Funciona el transceptor, pero en este caso solo se usa el lado de transmisor
- **Ch0: Bandwidth (Hz)** - El ancho de banda es 0.

- **WX GUI Scope Sink** - Este bloque es el oscilo de la frecuencia modulada.
 - **Title** - El título que llevara el osciloscopio.
 - **Sample Rate** - El valor de la cuadratura 396.9k.
 - **Notebook** - La etiqueta para la notebook “notebook,1”.

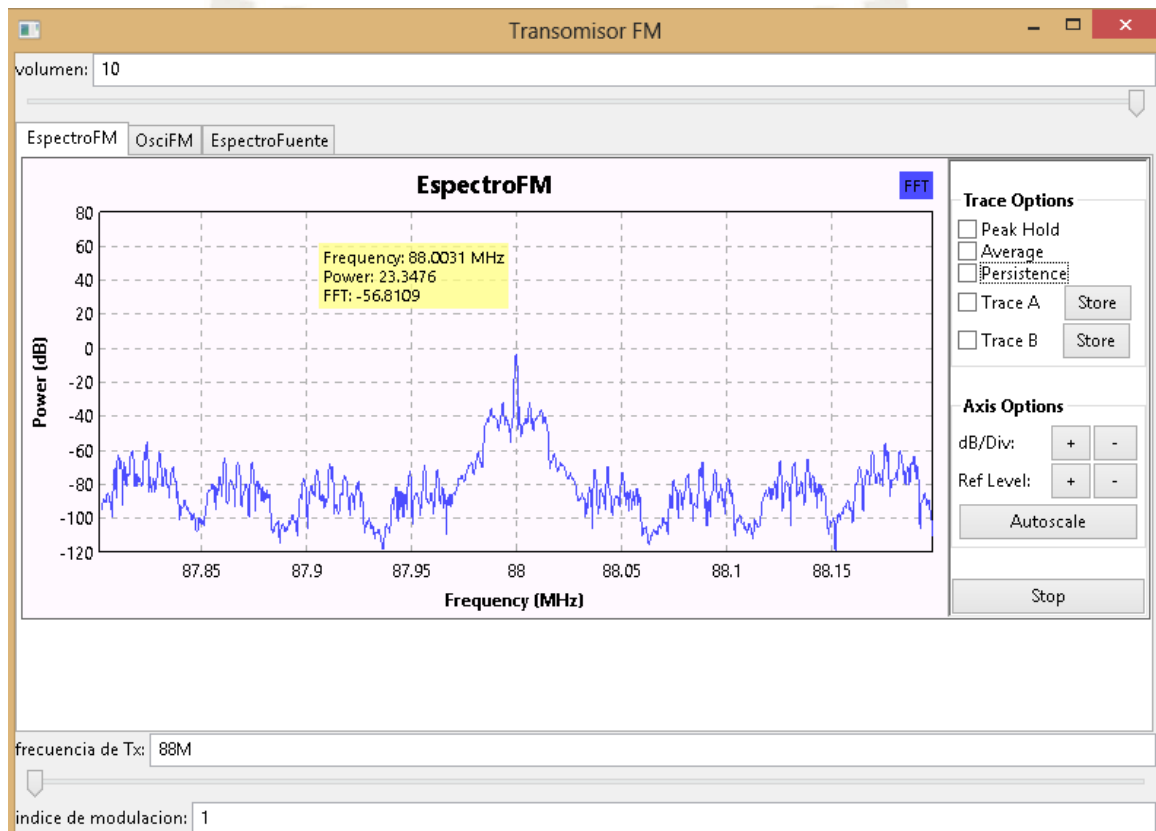


Figura 18 G. Espectro de transmisor FM

Evaluación

- i. Defina que es un Transmisor de frecuencia modulada FM
- ii. Identifique al menos 03 aplicaciones que se le puede dar a la transmisión FM
- iii. Realice un flujo de proceso comparativo con el planteado
- iv. Desarrolle una infografía sobre la normativa de telecomunicaciones en el Perú.

Participación Activa	15 %	Cumplimiento de Objetivos	20 %
Desarrollo de Actividad	20 %	Resultados	20 %
Evaluación	15 %	Informe Final	10 %

Referencia Bibliográfica

Felix Pinedo Quezada. Transmisión y Recepción FM con USRP N200 y GNURadio
 Iván Domínguez, Juan Murillo. Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software

4.1.2. *Módulo de practica 1^b*

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA	
Título de la Práctica	RECEPCIÓN DE FRECUENCIA MODULADA FM
Identificación Académica	
Facultad de: Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales Escuela Profesional: Ingeniería Electrónica Especialidad: Telecomunicaciones Semestre: VII Semestre Año: 2020 - I Asignatura: Telecomunicaciones II Código de Asignatura:	
Identificación Operativa	
Horas de Práctica Semestre: 36 horas Horas de Practica Semana: 2 horas Laboratorio de Telecomunicaciones: L – 304	
Identificación de Práctica	
Introducción	
El eje central de la práctica es poder recepcionar una frecuencia digital, cuando se recepciona la señal se podrá escuchar las diferentes estaciones de radio transmitidas de las diferentes emisoras de radio.	
Objetivos	
Objetivo General	Objetivos Específicos
Realizar un receptor en GNU Radio Companion	<ul style="list-style-type: none"> • Simular y experimentar con el dispositivo USRP y GNU Radio. • Crear una radio a través de un Software en su totalidad. • Observar las características de las señales con los osciloscopios facilitados por la interfaz de GRC. • Estudiar conceptos y entender modelos de frecuencia modulada. • Adquirir las Competencias Técnicas, para desarrollarse en campo de telecomunicaciones. • Adquirir Versatilidad y Adaptabilidad, capaces de trabajar interactuar en los diferentes niveles de un proyecto.

	<ul style="list-style-type: none"> • Contar con una Comunicación y Trabajo en Equipo de alto rendimiento, asumiendo un rol proactivo.
Metodología	
<p>La metodología del módulo es</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Interactiva • Analítica • Aplicada 	
Materiales	
<ul style="list-style-type: none"> • Laptop • USRP B210 • Antena de banda completa ADS-B UHF, VHF 	
Antecedentes	
<p>Para desarrollar la práctica es necesario realizar los siguientes pasos previos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar el cuestionario Guía N°2 del Anexo B, ubicado en el CD o USB. • Imprimir el cuestionario resuelto y anexarlo al Informe Final. • Estudiar los conceptos de radio FM. • Reconocer la estructura de GNU Radio Companion. • Conocer la interfaz de trabajo de GNU Radio. 	
<p>Diagrama de bloques funcional del prototipo FM, Receptor.</p>	
<pre> graph LR A[Antena] --> B[Amplificador de potencia] B --> C[Hardware USRP] C --> D[Laptop o computadora con GNU Radio] D --> E[Audio] </pre>	
<p style="text-align: center;"><i>Figura 19 G. Diagrama de bloques funcional del prototipo FM, receptor</i></p>	
<p>Recibimos la señal de cualquier estación de radio y por medio de los amplificadores de potencia, se pueden demodular en el hardware para así poder ser procesados y luego enviados a nuestro receptor, en este caso la computadora será la que nos proporciona el parlante y poder escuchar la estación sintonizada.</p>	

Diagrama de bloques del receptor

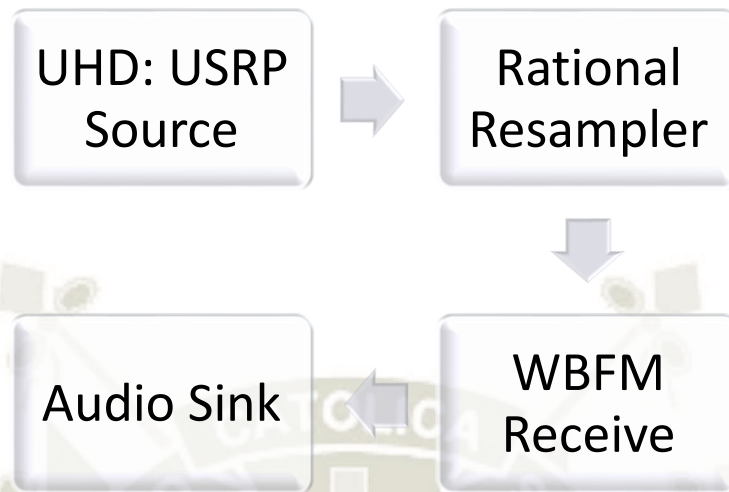


Figura 20 G. Diagrama de bloques del receptor

- **UHD - USRP Source o Señal Fuente** - Es la señal modulada que contiene la información que deseamos recuperar.
- **Rational Resampler** - Es un filtro del tipo FIR polifásico de re-muestreo, se utiliza para reducir la complejidad de trabajo en la memoria y el computador.
- **WBFM Receive o Demodulador FM** - Engloba el conjunto de técnicas utilizadas para recuperar la información transportada por una onda portadora, que en el extremo transmisor fue modulada con dicha información.
- **Salida de audio** - En este caso se utiliza la fuente de audio del computador.

Tiempo Estimado

6 Horas

El tiempo estimado para realizar esta práctica es de tres sesiones, cada sesión es de dos horas cada una.

El resultado de la práctica será lograr un receptor FM.

Procedimiento

RECEPTOR FM

El resultado que se desea lograr se presenta en el diagrama de flujo o infografía, con la finalidad de poder compararlo con el proceso que desarrollará en la práctica.

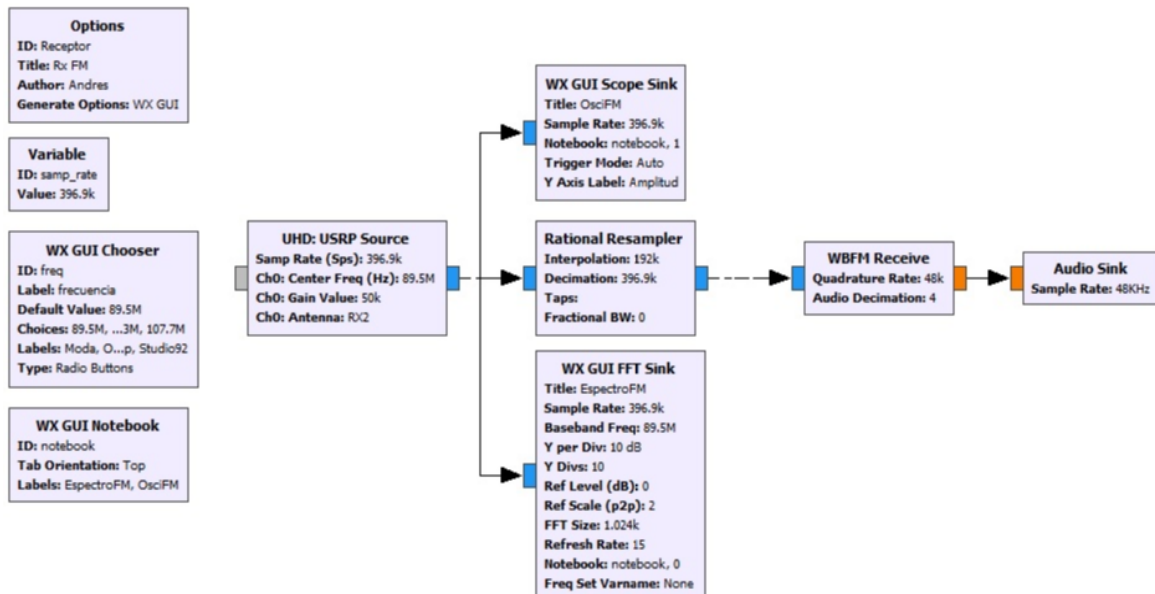


Figura 21 G. Receptor FM

- **Bloque Options** - Configurar de igual manera del bloque de transmisor.
- **Bloque Variables** - Solo tendremos un bloque de variable con un valor de 396.9 Khz, el cual es la frecuencia de muestrea del audio.

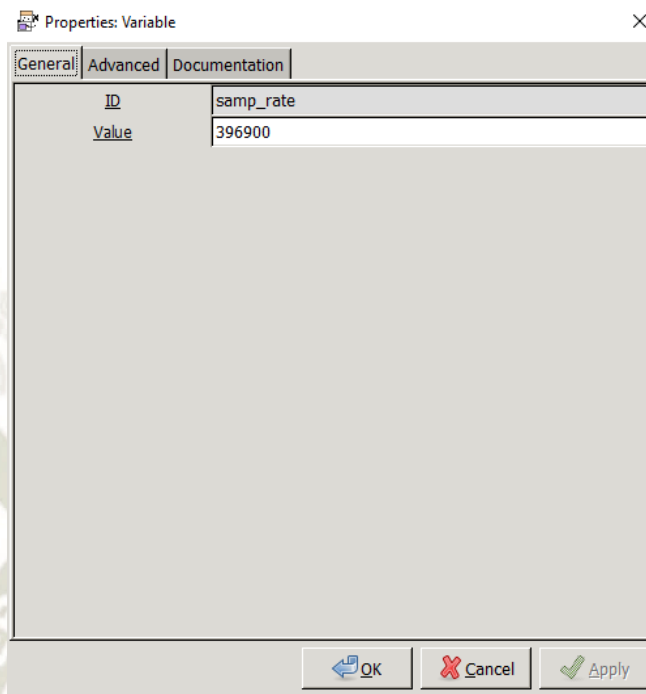


Figura 22 G. Propiedades de bloque variable

- **Bloque WX GUI Chooser**
 - **ID** - Usamos “freq” para llamarlo.
 - **Default Value** - El valor con el que comenzara a recepcionar.
 - **Choices** – Valores de emisoras de radio comercial FM.
 - **Labels** - Son los nombres que llevaran las estaciones.
 - **Type** - El tipo de botones que tendrá la ventana al momento de compilar.
 - **Style** - Los botones estarán de lado horizontal.

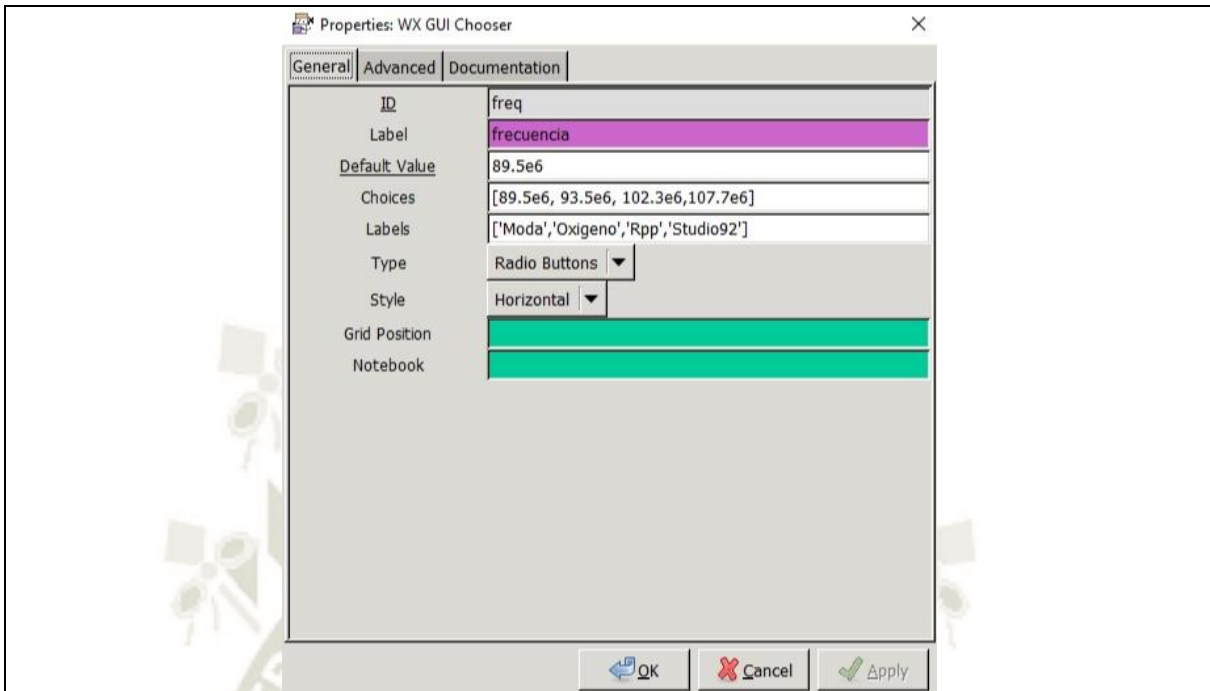


Figura 23 G. Propiedades del bloque WX GUI Chooser

- **Bloque WXGUI Notebook** - Se configura de igual manera que en el trasmisor.

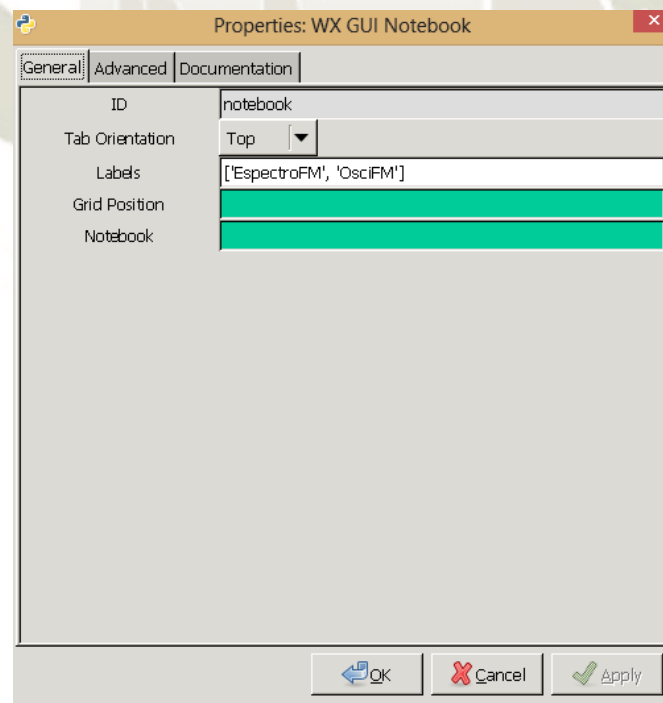


Figura 24 G. Propiedades del bloque WX GUI Notebook.

- **Bloque UHD: USRP Source** - Este bloque es para recepcionar las frecuencias de radio FM.

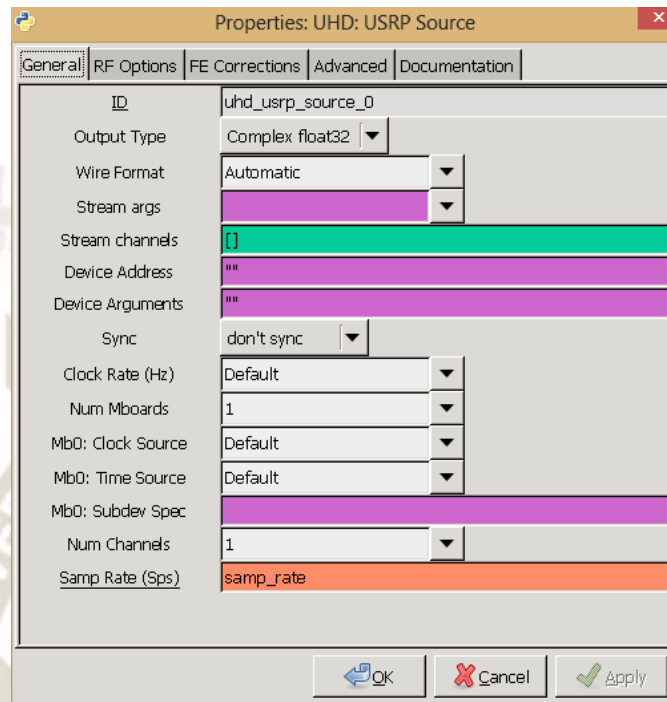


Figura 25 G. Propiedades del bloque UHD: USRP Source

- Se ingresa a la pestaña RF Options para configurar, utiliza la pestaña de la etiqueta que se creó en WX GUI Chooser y se configura.
 - **Ch0 : Center Freq (Hz)** – Se usa la etiqueta freq, del bloque WX GUI Chooser, para utilizar las estaciones de radio que incluimos en el bloque Chooser, las cuales aparecerán como botones, en el caso que solo se desea sintonizar una banda en específico, eliminamos el bloque WX GUI Chooser, y en **CH0: Center Freq (Hz)** se crea un bloque WX GUI Slider, le asigna una etiqueta, se le pone valor inicial en este caso 89.5e6 y la última banda FM 107.7e6.
 - **Ch0: Gain Value** - 50k
 - **Ch0: Gain Type** - De tipo absoluto
 - **Ch0: Antenna** – RX2

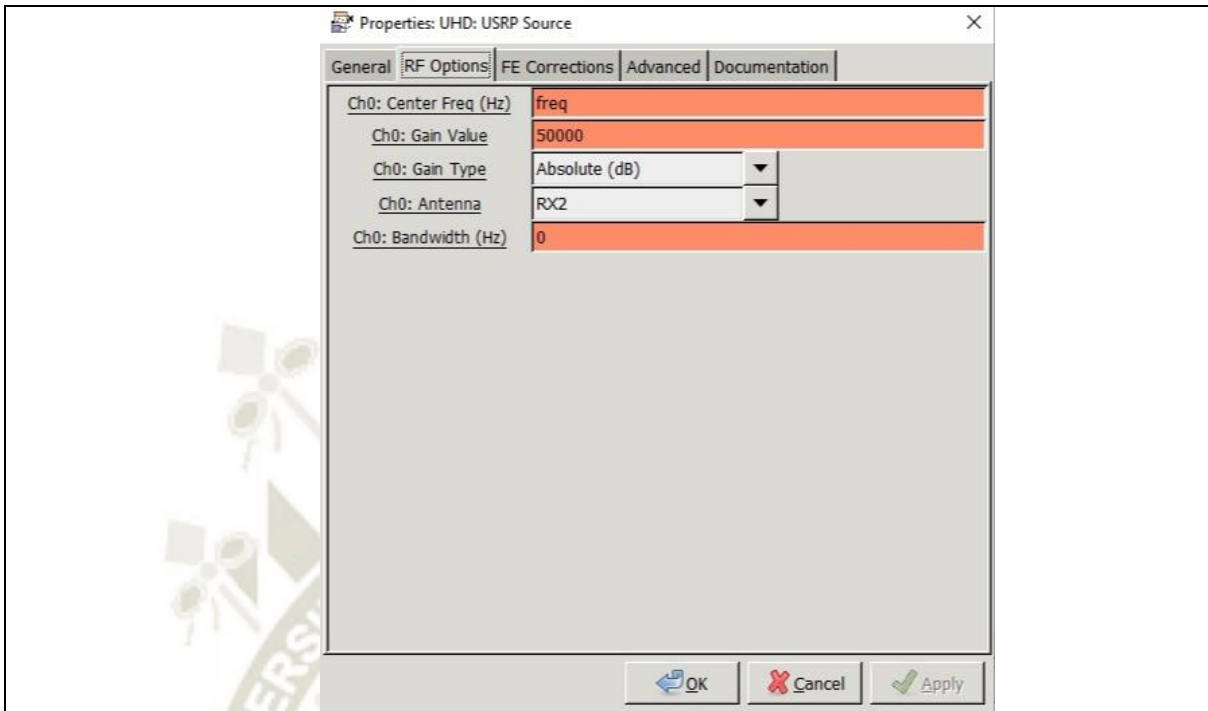


Figura 26 G. Propiedades del bloque UHD: USRP Source "pestaña RF Options"

- **Bloque Rational Resampler** - Este bloque es un re-muestreador, que nos pide la interpolación.

$$int = Audisink * Fint$$

La interpolación tiene que ver con el tipo de audio que va a resamplar, *int* interpolación, *Audisink* el audio que se va a escuchar que es a 48Khz, ahora el factor de interpolación esta entre 4 – 8 escogemos el menor valor y procedemos a multiplicar.

$$int = Audisink * Fint$$

$$int = 48000 * 4 = 192000$$

- **Interpolation** - 192000
- **Decimation** - tiene que ser igual a samp_rate que es 369.9 k

$$Fy = \frac{Fx}{D} = \frac{396.9Khz}{396.9Khz} = 1$$

Si el *samp_rate* es 396.9Khz y la decimación es la misma, tenemos una frecuencia de muestreo de salida de 1.

- **Bloque WX GUI Scope Sink** - Configurar de igual manera que el transmisor.

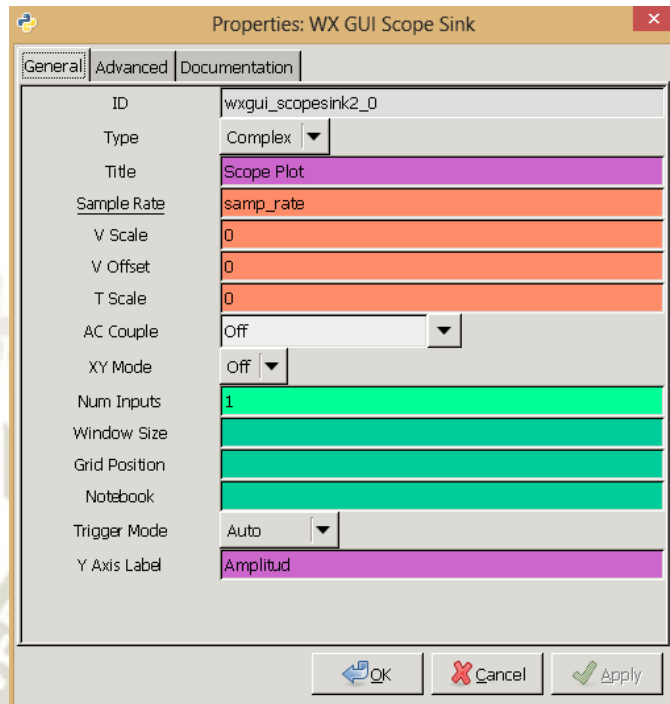


Figura 27 G. Propiedades del bloque WX GUI Scope Sink

- **Bloque WX GUI FFT Sink** - Configurar de igual manera que el transmisor

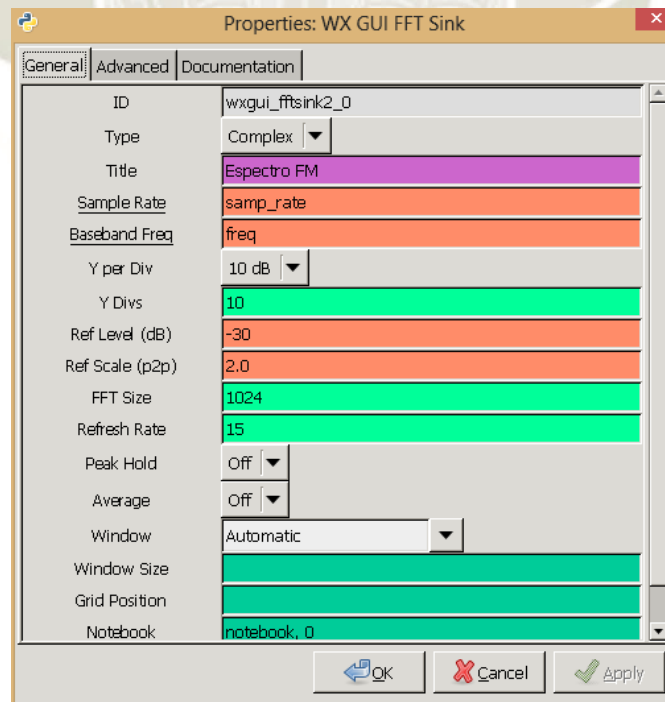


Figura 28 G. Propiedades del bloque WX GUI FFT Sink

- **Bloque WBFM Receive** - Este bloque pide una tasa de cuadratura la cual es 48khz.

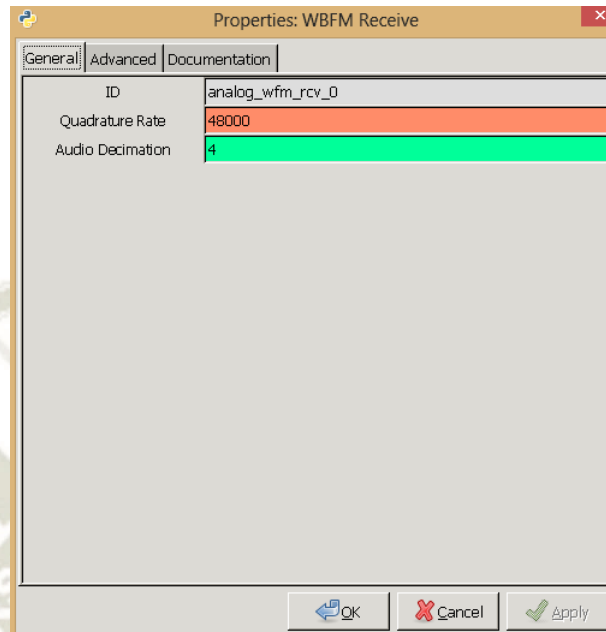


Figura 29 G. Propiedades del bloque WBFM Receive

- **Bloque Audio Sink** - Es el bloque que permite usar el parlante de nuestra computadora, tiene diferentes **sample rate**, escogemos el de 48Khz.

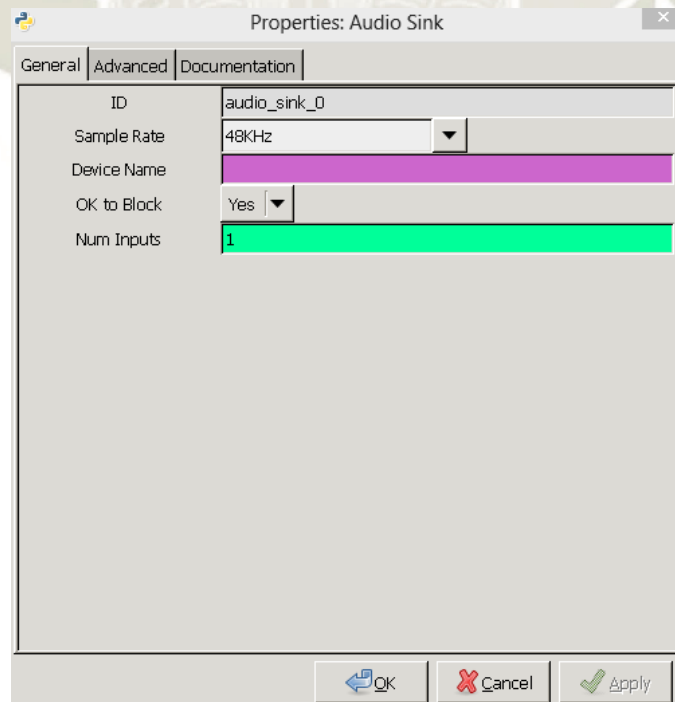


Figura 30 G. Propiedades del bloque Audio Sink

- Finalmente compilamos y obtenemos la ventana con la recepción.

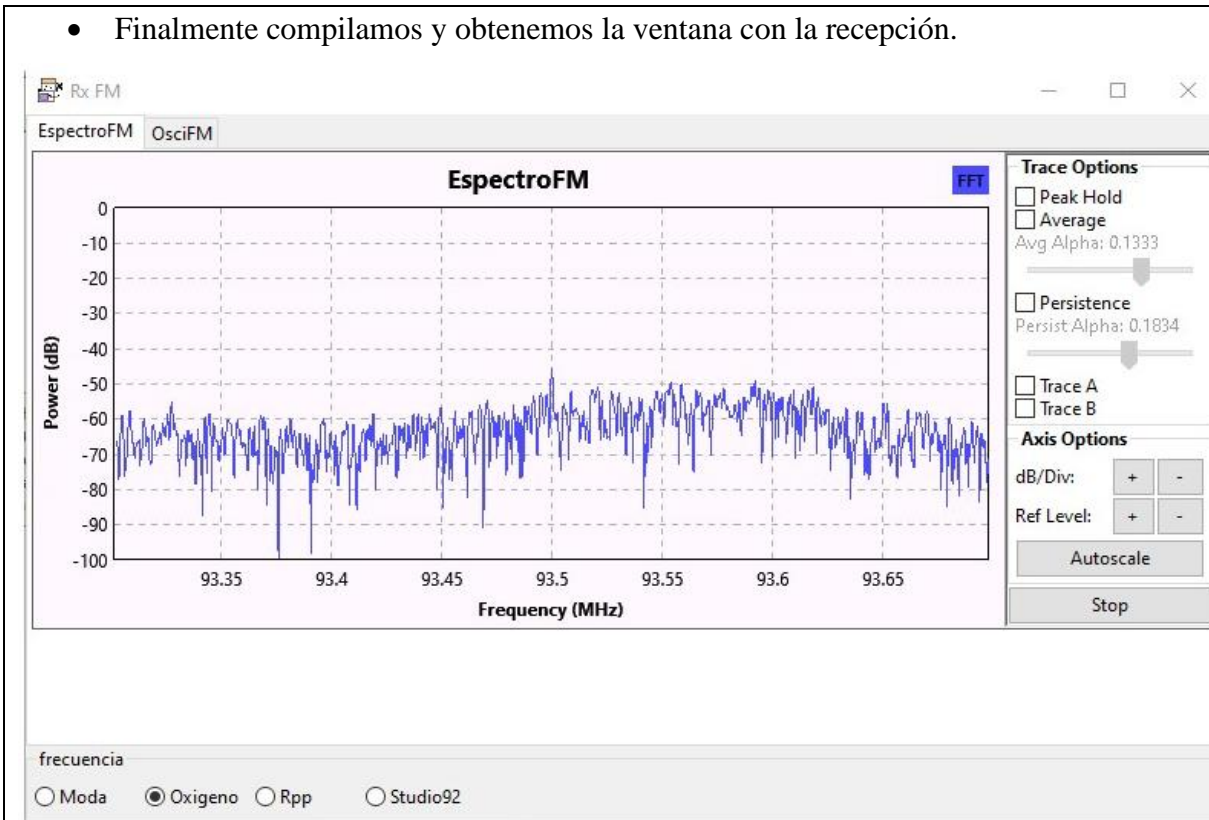


Figura 31 G. Espectro de Receptor FM

Evaluación

- v. Defina que es un Receptor de frecuencia modulada FM
- vi. Identifique al menos 03 aplicaciones que se le puede dar a un receptor de FM
- vii. Realice un flujo de proceso comparativo con el planteado
- viii. Desarrolle una infografía sobre la normativa de telecomunicaciones en Latinoamérica.

Participación Activa	15 %	Cumplimiento de Objetivos	20 %
Desarrollo de Actividad	20 %	Resultados	20 %
Evaluación	15 %	Informe Final	10 %

Referencia Bibliográfica

Felix Pinedo Quezada. Transmisión y Recepción FM con USRP N200 y GNURadio
Iván Domínguez, Juan Murillo. Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software

4.1.3. *Módulo de practica 2*

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA	
Título de la Práctica	RED GSM OPEN BTS
Identificación Académica	
Facultad de: Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales Escuela Profesional: Ingeniería Electrónica Especialidad: Telecomunicaciones Semestre: VII Semestre Año: 2020 - I Asignatura: Telecomunicaciones II Código de Asignatura:	
Identificación Operativa	
Horas de Práctica Semestre: 36 horas Horas de Practica Semana: 2 horas Laboratorio de Telecomunicaciones: L – 304	
Identificación de Práctica	
Introducción	
<p>Lo esencial de una red de telefonía móvil es el medio por donde viaja la información y los equipos terminales que receptionan la comunicación, OPEN BTS es un Software que genera una estación base basado en GSM, este software está diseñado para la innovación y el uso práctico que simplifica drásticamente la configuración y operación de una red móvil.</p>	
Objetivos	
Objetivo General	Objetivos Específicos
Adquirir los conocimientos necesarios para utilizar Open BTS utilizando un dispositivo USRP para implementar una red de telefonía móvil	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar y simular una red de telefonía móvil, modificando los parámetros y las características que estás nos posibilitan. • Crear una estación base con características puras de Software. • Observar cada característica de la señal en los móviles. • Estudiar conceptos y entender modelos de Telefonía. • Adquirir las Competencias Técnicas, para desarrollarse en campo de telecomunicaciones. • Adquirir Versatilidad y Adaptabilidad, capaces de trabajar interactuar en los diferentes niveles de un proyecto.

	<ul style="list-style-type: none"> • Contar con una Comunicación y Trabajo en Equipo de alto rendimiento, asumiendo un rol proactivo.
Metodología	
<p>La metodología del módulo es</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Interactiva • Analítica • Aplicada 	
Materiales	
<ul style="list-style-type: none"> • Laptop • Dispositivo USRP B210 • Equipo Móvil. 	
Antecedentes	
<p>Para desarrollar la práctica es necesario realizar los siguientes pasos previos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Revisar el CD o USB que contenga el software INSTALACION DE UBUNTU. <p>UBUNTU es un software de código abierto, diseñado por desarrolladores, sin cobro por la licencia y los programas desarrollados para este sistema operativo. De igual manera que Open BTS es un producto desarrollado de licencia libre.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resolver el cuestionario Guía N°2 del Anexo A, ubicado en el CD o USB. • Imprimir el cuestionario resuelto y anexarlo al Informe Final. • Instalar el sistema operativo Ubuntu en su ordenador. • Instalar el software Open BTS. 	

Diagrama de bloques

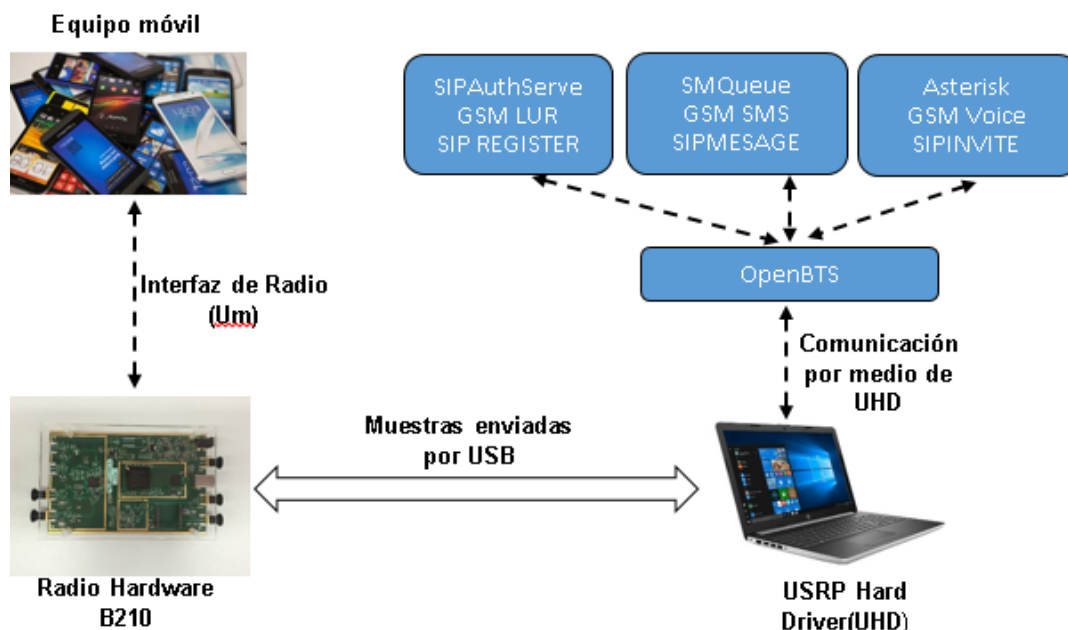


Figura 32 G. Práctica - Arquitectura de OpenBTS

- **Equipo móvil** - Los abonados que se conectarán a la red GSM, tienen que contar con un chip, sin discriminar al operador (Claro, Movistar, Bitel o Entel), este nos servirá para hacer llamadas o enviar mensajes, mediante su IMSI que está incorporado al chip.
- **Interfaz de Radio (Um)** - El interfaz radio de GSM (Um) es una interfaz entre estaciones móviles e infraestructuras fijas, en este caso el USRP seleccionado. Es uno de los interfaces más importantes en GSM.

Está dividido en varios canales:

- Canales de tráfico. Que transportan datos de usuario.
- Canales de señalización. Con información de administración y control.

- **Muestras enviadas por USB** - La conexión que utiliza el USRP para comunicarse con la computadora es por medio de USB 3.0.
- **USRP Hardware Driver (UHD)** - Los drivers que se instalan a la computadora son UHD API.
- **Open BTS** - Es un software, que se encarga de traducir GSM, la cual procesa dos subcapas de la pila de protocolos de GSM. Las capas son gestión de movilidad y control de llamadas.

- **Gestión de Movilidad** - Se encarga de autenticar a los usuarios y realizar seguimiento de los movimientos de estos, en este caso nuestro USRP creara solo una celda, la cual traduce las transacciones por medio de la centralita Asterisk.
- **Control de llamadas** - Se encarga de conectar las llamadas por medio de la centralita Asterisk.
- **SIP AuthServe** - Este módulo del programa Open BTS se encarga del registro de móviles.
- **SMQueue** - Este módulo del programa se encarga del envío y recepción de mensajes de texto, entre los abonados.
- **Asterisk** - Asterisk no forma parte de Open BTS, pero es un programa que se conecta con el software Open BTS y hace la función de centralita telefónica virtual.

Se podría comparar con la MSC de una red GSM, se encarga de encaminar las llamadas de los abonados mediante voz sobre IP.

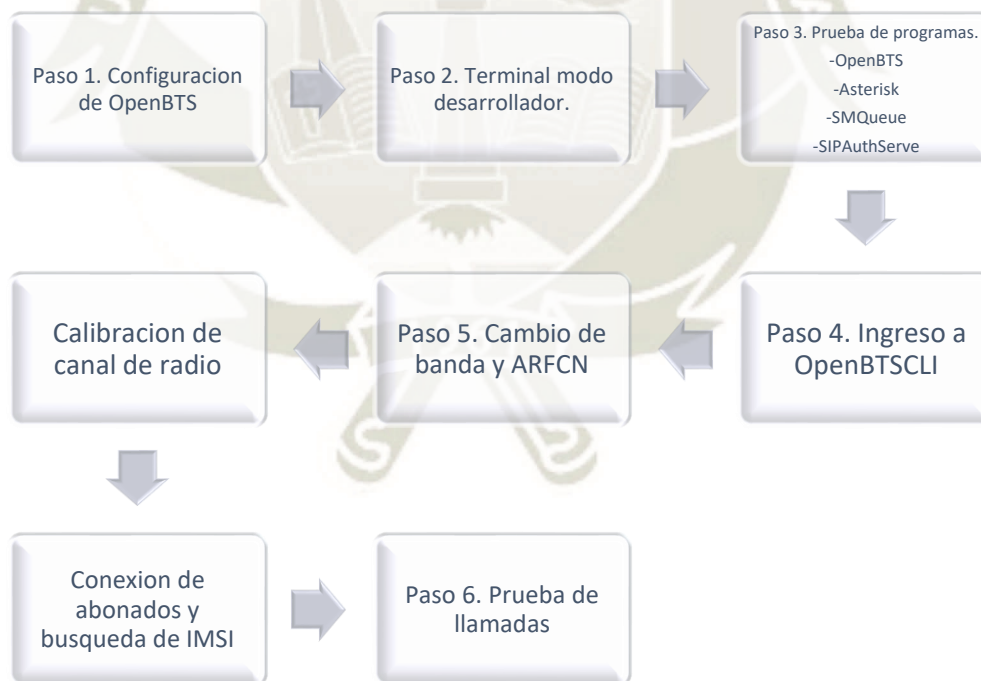
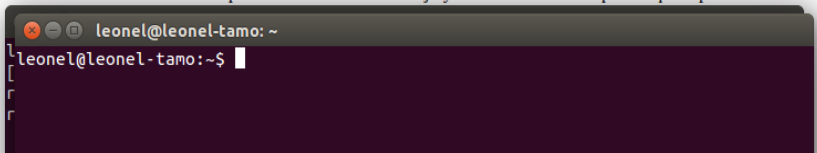


Figura 33G. Diagrama de bloques de pasos a seguir.

Tiempo Estimado	6 horas
<p>El tiempo estimado para realizar esta práctica es de tres sesiones, cada sesión es de dos horas cada una. El resultado de la práctica será lograr una Conexión de Open BTS con el dispositivo USRP B210</p>	
Procedimiento	
<p style="text-align: center;"><u>INSTALACION DE SISTEMA OPERATIVO Y SOFTWARE</u></p> <p>A continuación, se presenta el procedimiento que el participante debe cumplir.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cuando el participante haya culminado con los pasos previos, consistente en la instalación de Ubuntu y Open BTS se procederá a configurar el Open BTS en la consola de Ubuntu. • La consola se abre presionando simultáneamente CTRL+ALT+T. <div data-bbox="423 911 1235 1062" style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"><i>Figura 34 G. Consola de Ubuntu</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Se debe ingresar en modo desarrollador, podrá abrir programas y modificarlos desde la consola. • Para ingresar en modo desarrollador, digitamos: <ul style="list-style-type: none"> ○ <code>sudo su</code> • Se pedirá una contraseña, la cual será la que se colocó al instalar Ubuntu. • Se inicia con la prueba de los programas instalados de Open BTS, desde la consola digitaremos el inicio o la finalización de los programas principales. • Los Códigos para Inicio “digitar en la consola, para iniciar los módulos” son: <ul style="list-style-type: none"> ○ <code>Sudo start asterisk</code> 	

- Sudo start sipauthserve
- Sudo start smqueue
- Sudo start openbts
- Los Códigos para Finalizar “digitar en la consola, para finalizar los módulos” son:
 - Sudo stop asterisk
 - Sudo stop sipauthserve
 - Sudo stop smqueue
 - Sudo stop openbts

NOTA: Ud. Puede indagar, investigar sobre el sistema operativo y programas aplicados para la práctica a través del repositorio de la universidad o en buscadores de internet, considerando ahondar y consolidar sus conocimientos sobre la Arquitectura de Open BTS.

- Para lograr la creación de la red GSM, los cuatro programas tienen que estar iniciados, en Open BTS. Por ello después de comprobar el estado de instalación, se tiene que verificar y validar que los 4 módulos estén iniciados, si alguno no está iniciado la red será inutilizable.

INICIACION DE PROGRAMAS

- **Configuración de sistema y la CLI** - Para manipular la configuración de Open BTS se tiene que ingresar a una interfaz de línea (CLI) en la misma consola, de ahora en adelante los comandos que tengan el prefijo “\$” se ejecutan en la consola de Ubuntu a la que se denomina **consola 1** y los comandos para Open BTS en la **consola 2** una vez iniciado “OpenBTS>” esto significa que tendremos dos consolas iniciadas.
 - Ejecutamos el comando para iniciar el (CLI)
 - \$sudo /OpenBTS/OpenBTSCLI
 - Los comandos que se vean de ahora en adelante, anteponiendo el siguiente código, se usaran en la consola de Open BTS
 - OpenBTS>

- **Cambio de banda y ARFCN** - Para una red GSM, lo primero que se debe verificar es la banda de radio, existen muchas en el mercado mundial, pero se distribuyen diferente en cada País, para ello se debe verificar las bandas de radio de nuestro País y las ARFCN que trae consigo cada una.
 - Las bandas soportadas por Open BTS son: **850, 900, 1800 o 1900 MHz**, estas cuatro bandas están disponibles para todo el mundo.
 - Los ARFCN son frecuencias que se encuentran dentro de cada banda de radio, al seleccionar alguna de las cuatro, tendremos más de 100 diferentes ARFCN en cada una. Estas frecuencias se utilizarán para la transmisión y recepción de señales de radio.
- El código a continuación muestra la categoría **GSM.Radio** - Para observar todas las claves de configuración de esta categoría ingresar el siguiente comando, el código lo ingresamos en la consola 2
 - **OpenBTS> config GSM.Radio**

NOTA. Observar los resultados, a continuación, tenemos los parámetros en su forma predeterminada.

- **OpenBTS> config GSM.Radio**
- **GSM.Radio.ARFCNs 1 [default]**
- **GSM.Radio.Band 900 [default]**
- **GSM.Radio.C0 1**
- **SM.Radio.PowerManager.MaxAttenDB 10 [default]**
- **GSM.Radio.PowerManager.MinAttenDB 0 [default]**
- **GSM.Radio.RSSITarget -50 [default]**

- **GSM.Radio.SNRTarget 10 [default]**

NOTA. **GSM.Radio.Band 900** nos muestra que se está utilizando la banda predeterminada de 900 Mhz, podemos cambiar a las diferentes 4 bandas, en cada cambio de banda, comprobar que el cambio a surtido efecto, con el código

- **“OpenBTS> config GSM.Radio #debanda”.**
- Para cambiar parámetros se realiza con el siguiente comando.
 - Código para visualizar parámetros.
 - **OpenBTS> config GSM.Radio.Band**

NOTA. Con el numero #1800 estamos cambiando de banda de 900 Mhz a 1800 Mhz, cambiar entre las otras tres de 850, 900 o 1900 Mhz.

- **OpenBTS> config GSM.Radio.Band 1800**

NOTA. Todos los datos obtenidos, están en su forma predeterminada y pueden ser visualizados. Para ver los parámetros de cada una, por ejemplo, queremos observar el ARFCN de nuestra señal de radio, actualmente en **GSM.Radio.C0 # 1**, ingresamos el código **config.GSM.Radio.C0** y obtenemos la información de ARFCN.

- **GSM.Radio.C0 1 Indica que la banda #1 está actualmente habilitada.**

NOTA. **GSM.Radio.ARFCNs 1** indica el número de ARFCNs utilizados

- Los demás parámetros de la capa física están asociados a la transmisión de la señal.
- **Calibrar el canal de radio** - Uno de los pasos más relevantes de la creación de una red GSM es que se debe averiguar la potencia de transmisión del enlace descendente, esto significa que debemos optimizar la atenuación de nuestra estación base para lo cual seguiremos los siguientes pasos.

- Ingresar en la consola 2 el código.
 - **OpenBTS> power**

```
OpenBTS> power
current downlink power -10 dB wrt full scale

OpenBTS> |
```

Figura 35 G. Captura del comando Power

NOTA. Se aconseja reducir la atenuación del valor disponible de 10 dB. El valor de atenuación de -10dB reduce el flujo de energía desde la antena de recepción a la antena de transmisión, con esto se evitará que la energía recibida pueda saturar el enlace ascendente. Disminuir la potencia de transmisión del enlace descendente permitirá despejar el enlace ascendente, al realizar la calibración el área de cobertura de la red GSM no se reducirá, por estar en un entorno de prueba, por consiguiente, se procede a reducir la atenuación a -10 dB ejecutando el siguiente comando

- **Conexión de abonados y búsqueda de IMSI.** Teniendo nuestra red GSM lista para recibir teléfonos móviles o abonados, procedemos a realizar los pasos de configuración en Open BTS y nuestros teléfonos móviles.

NOTA. El IMSI (Identidad Internacional del Abonado Móvil) es un código de identificación único para cada dispositivo de telefonía móvil, que está integrado a la tarjeta SIM, el cual permite la identificación a través de la red GSM, este código cuenta con 14-15 dígitos, el cual no es divulgado por los teléfonos, solo algunos modelos y métodos netamente sofisticados, pueden revelar el código IMSI. Teniendo en consideración lo anterior, con Open BTS tenemos dos maneras de saber el IMSI de las terminales con las cuales se ha interactuado, debido a que se tiene el control de la red, también se tiene acceso a la información de IMSI.

- Existen dos maneras de configurar la red GSM:
 - La primera es una red de acceso simple, donde cualquier usuario puede registrarse y con algunos pasos descritos a continuación podrás tener acceso a la red.

- La segunda es una red a la cual debemos permitir que solamente los IMSI que registremos en nuestro sistema de registros, puedan usar la red GSM.
- Un dato muy importante es que Open BTS cuenta con sistema de registro, la cual permite una solicitud de actualización de ubicación en la red (LUR, *location Update Request*). Estas LUR se procesan en SIP AuthServe; LUR permite el intercambio del IMSI por su TMSI con la finalidad de brindar privacidad al usuario.

RED DE ACCESO SIMPLE

- El nombre lo dice la red pública será una red, donde cualquier equipo móvil pueda acceder a nuestra red GSM para lo cual iniciaremos con el siguiente código, también tenemos que priorizar el uso de 3 terminales o consolas:
 - Uno para Open BTS CLI, llamada consola 1.
 - Uno para SIP AuthServer, consola 2
 - Uno para reiniciar el OpenBTS, consola 3.
- Los códigos se deben ingresar diferenciando la consola para cada módulo son:

Consola 1:

- **OpenBTS> config Control.LUR.SendTMSIs "1"**

Este comando habilita el intercambio de LUR que por defecto está deshabilitados.

- **OpenBTS> config Control.LUR.OpenRegistration ".*"**

NOTA. Este comando permite que cualquier teléfono de cualquier IMSI se conecte a la red GSM.

Procedemos a conectar la mayor cantidad de móviles que tengamos, en este caso tendremos 4. Para este paso tenemos que acceder en los teléfonos a las conexiones de red, y seleccionar la red que por defecto tendrá el nombre "00101", "001-01", "02-2" o en su defecto buscar alguna red que no se familiarice con las redes de nuestro país.

NOTA.

Para móviles Android los pasos son los siguientes.

- Ajustes/Conexiones inalámbricas y redes/ Redes móviles/Operador/.

- Deshabilitamos la selección automática y buscamos nuestra red GSM.

Para móviles Apple (iOs) los pasos son los siguientes.

- Configuración/ Datos celulares/ Selección de red/.
 - Deshabilitamos la selección automática y buscamos nuestra red GSM.
- En cada móvil que se conecte a la red GSM se tiene que verificar la conectividad que esta sea correcta, para esto verificamos la señal, otra manera de saber que el sistema Open BTS ha accedido a la información es que al momento de acceder a la red, al cabo de unos segundos, se recibira un mensaje del número 101 con la siguiente información “Welcome to the test network. Your IMSI is IMSI:71606089573XXX”. Este mensaje te da la bienvenida a la red GSM.

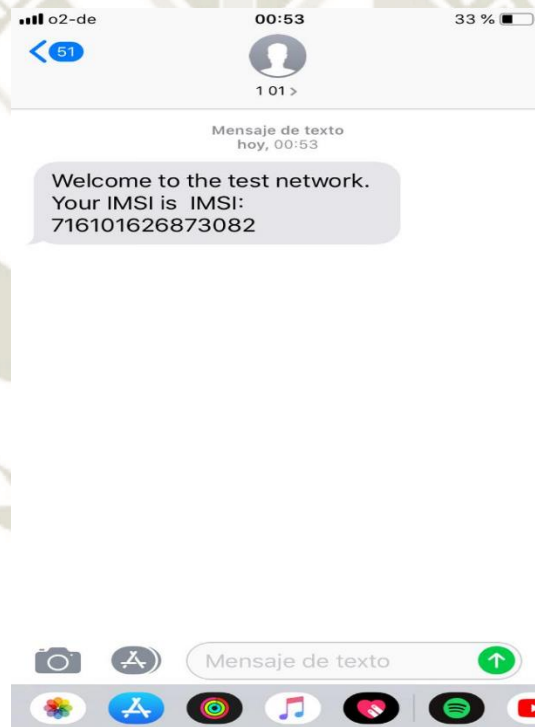


Figura 36 G Captura del mensaje de bienvenida.

- Verificamos que los teléfonos móviles estén conectados a la red GSM, este paso es muy importante validar.
- En la red GSM se tiene diversas bases de datos en las cuales se almacena la información de la red.

- Utilizando el código descrito a continuación se tendrá los móviles que están conectados a la red, observando de los que se ha obtenido los números IMSI e IMEI.

Consola 1

▪ OpenBTS> tmsis

```
OpenBTS> tmsis
IMSI          TMSI  IMEI          AUTH  CREATED  ACCESSED  TMSI_ASSIGNED
716101626873082 - 359232060083050 2    9m      9m        0
716060849912036 - 355325090658240 2    13m     13m       0
716060839018378 - 356210245862350 2    16m     16m       0
716060829573534 - 990003202699130 2    101m    101m      0

OpenBTS> █
```

Figura 37 G. Captura del código tmsis

```
OpenBTS> tmsis
IMSI          TMSI  IMEI          AUTH  CREATED  ACCESSED  TMSI_ASSIGNED
716101626873082 - 359232060083050 2    9m      9m        0
716060849912036 - 355325090658240 2    13m     13m       0
716060839018378 - 356210245862350 2    16m     16m       0
716060829573534 - 990003202699130 2    101m    101m      0

OpenBTS> █
```

Figura 38 G. Visualización de 4 móviles conectados

NOTA: En la cabecera de la captura, encontramos datos como:

IMSI, TMSI, IMEI AUTH, CREATED, ACCESSED, TMSI_ASSIGNED.

Estos datos indican: la hora que accedieron los teléfonos, el ISMI, el IMEI del teléfono móvil, uno de los datos de cabecera muy importante es el AUTH, esta variable esta provista por el comando **tmsis**, identifica el tipo de autenticación que nos ofrece Open BTS a los teléfonos que pretenden vincularse a la red; por lo tanto se tendrá tres tipos de autenticación AUTH.

- **AUTH=0** muestra que los suscriptores se han conectado a la red pero no han sido registrados por el servicio de registro y autenticación **SIP AuthServe**.
- **AUTH=1** indica que la operación LUR ha sido efectuada con éxito y el suscriptor ha sido registrado.
- **AUTH=2** representa la conexión de un usuario no autenticado a la red y que no consta en la base de datos de registro, esto quiere decir que no tiene un número de abonado.

- Desde el teléfono móvil, se puede verificar que estamos en la red enviando un mensaje de texto al número 101 con el número que se desea tener como abonado de red, este debe tener entre 7 y 10 números, el número que se envié a la estación base, será registrado en el servidor **SIP AuthServe**.

NOTA. Se podrá hacer pruebas de funcionamiento y comunicación con la estación base, marcando desde el móvil al número 2600.

Se podrá hacer un (tone) marcando desde el móvil al número 2602.

- Si se registra un número con un teléfono móvil, suponiendo “**1111111**” este quedará registrado en el servidor **SIP AuthServe** el cual será visualizado de la siguiente manera:
 - Primero se debe ingresar a las subcarpeta donde se encuentra **SIP AuthServe**, mediante la **consola 1**, la ruta para ingresar a tal librería es la siguiente:
 - `$ cd /home/"nombredeusuario"/dev/NodeManager/`
 - `./nmcli.py sipauthserve subscribers read`

```
leonel@leonel-tamo:~$ sudo su
[sudo] password for leonel:
root@leonel-tamo:/home/leonel# cd /home/leonel/dev/NodeManager
root@leonel-tamo:/home/leonel/dev/NodeManager# ./nmcli.py sipauthserve subscribers read
raw request: {"command":"subscribers","action":"read","key":"","value":""}
raw response: {
  "code" : 404
}
root@leonel-tamo:/home/leonel/dev/NodeManager#
```

Figura 39 G. Captura del código “./nmcli.py sipauthserve subscribers read”, en este caso no tenemos ningún abonado suscrito

- El segundo paso es visualizar la suscripción del abonado, en este paso usaremos el móvil con un **IMSI 71606083908378**, **IMEI 356210248562350**, **AUTH=2 “no autenticado”**, enviar un mensaje al 101 con el número que deseamos tener, en este caso “**1111111**”.

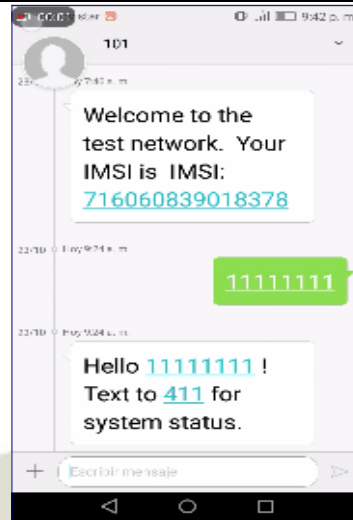


Figura 40 G. Captura de recepción de mensaje de Open BTS

NOTA. En la figura 36G podemos apreciar el mensaje de bienvenida al sistema, luego enviamos un mensaje con el número que deseamos portar y por último obtenemos un mensaje de confirmación.

- Usamos el código nuevamente para corroborar la inscripción del teléfono con su número telefónico.
 - `$ cd /home/"nombredeusuario"/dev/NodeManager/`
 - `/nmcli.py sipauthserve subscribers read`

```
root@leonel-tamo:/home/leonel/dev/NodeManager# ./nmcli.py sipauthserve subscribers read
raw request: {"command":"subscribers","action":"read","key":"","value":""}
raw response: {
  "code": 200,
  "data": [
    {
      "imsi": "IMSI716060839018378",
      "msisdn": "11111111",
      "name": "IMSI716060839018378"
    }
  ]
}
```

Figura 41 G. Captura de la suscripción de un abonado nuevo en SIP AuthServe

NOTA. En esta imagen el dato “msisdn” es el número telefónico del abonado, “name” es el nombre del abonado en la red, el cual podrá ser editado más adelante. De igual manera, se envía un mensaje al número 411 y recibimos un mensaje de confirmación de SmQueue, la cual devolverá la información registrada en SIP AuthServe.

- **Agregar abonados manualmente** - Este paso consiste en agregar abonados manualmente, con el fin de tener el control de las personas que pueden usar los servicios de red con la finalidad de tener una red segura.

El proceso de esta requiere de tres terminales.

- Primero se debe eliminar los datos de los teléfonos que se han registrado a través del acceso simple. Se ingresa a **SIP AuthServe** en una consola y se lee el código `./nmcli.py sipauthserve subscribers read`, se observa los subscriptores actuales y se eliminan; para realizarlo deberá seguir los pasos a continuación.

Ingresamos a la ubicación de **SIP AuthServer**, como ejemplo se ha colocado el nombre **“leonel”** es el nombre del sistema demo, el nombre se varía según la asignación o designación del usuario que crea el sistema al momento de instalar Ubuntu.

Consola 2

- `root@leonel-tamo:/home/leonel# cd /home/leonel/dev/NodeManager`
- Una vez dentro de la ubicación de **SIP AuthServer** ingresamos con el código.

Consola 2

- `root@leonel-tamo:/home/leonel/dev/NodeManager# ./nmcli.py sipauthserve subscribers read`
- Si tenemos usuarios registrados obtendremos lo siguiente.

```
root@leonel-tamo:/home/leonel/dev/NodeManager# ./nmcli.py sipauthserve subscribers create "LUIS" IMSI716060849912036 11111111
raw request: {"command":"subscribers","action":"create","fields":{"name":"LUIS","imsi":"IMSI716060849912036","msisdn":"11111111","kl":""}}
raw response: {
  "code": 200,
  "data": "both ok"
}
root@leonel-tamo:/home/leonel/dev/NodeManager# ./nmcli.py sipauthserve subscribers read
raw request: {"command":"subscribers","action":"read","key":"","value":""}
raw response: {
  "code": 200,
  "data": [
    {
      "imsi": "IMSI716060849912036",
      "msisdn": "11111111",
      "name": "LUIS"
    }
  ]
}
```

Figura 42 G. Usuario registrados en SIP AuthServe

NOTA. Se observa que se tiene 1 usuario registrado, el cual tendrá que ser eliminado, para luego ingresar de manera manual los usuarios que deseen agregar, esto significa que la red GSM será una red segura, privada, en la cual solo los usuarios que estén en nuestro sistema de registro **SIP AuthServe** tendrán los beneficios que otorga la red.

- En este caso se eliminan los usuarios con la siguiente instrucción.

Consola 2

- `./nmcli.py sipauthserve subscribers delete imsi`

- Eliminamos el primer usuario.

Consola 2

- `./nmcli.py sipauthserve subscribers delete imsi
IMSI716060839018378`

- Obtendremos lo siguiente.

- `root@leonel-tamo:/home/leonel/dev/NodeManager# ./nmcli.py
sipauthserve subscribers delete imsi IMSI716060839018378`

- raw request:

```
{"command":"subscribers","action":"delete","match":{"imsi":  
:"IMSI716060839018378"}}
```

- raw response: {

- "code" : 200,

- "data" : "both ok"

- }

NOTA. Se indica que el **IMSI716060839018378** ha sido eliminado de la base de registros **SIP AuthServe**, cabe resaltar que se tiene que eliminar todos los usuarios, para poder ingresarlo manualmente.

- Deshabilitar la conexión automática de dispositivos a la red, con la siguiente instrucción.

Consola1

- **OpenBTS> unconfig Control.LUR.OpenRegistration**

- Intentamos hacer conexión con la red desde nuestro teléfono y no será exitosa.
- Capturamos los IMSI de las Tarjetas SIM, con el código **tmsis**

Consola 1

- **OpenBTS>tmsis**

```
OpenBTS> tmsis
IMSI          TMSI      IMEI          AUTH  CREATED  ACCESSED  TMSI_ASSIGNED
716060849912036 0xc7cc  355325090658240 0    80h     47h      1
716060829573534 0x2cac5  990003202699130 0    80h     47h      1
```

Figura 43 G. Captura de código tmsis y su resultado, en este caso tenemos dos móviles conectados a la red, pero sin registro alguno, es porque eso que AUTH nos indica 0 para los dos.

- Creamos para cada IMSI, un número telefónico desde la terminal 2 donde ya se encuentra en la carpeta **NodeManager**, ejecutamos el código.

Terminal 2

- **./nmcli.py sipauthserve subscribers create name imsi msisdn**

NOTA. Este paso es muy importante, el código antes mencionado, sirve para asignar un nombre a cada teléfono móvil que va a registrar, para asignar un número independiente y diferente para cada móvil.

Al asignar los valores, el código se quedaría de la siguiente manera.

Terminal 2

- **./nmcli.py sipauthserve subscribers create "LUIS"
IMSI716060849912036 1111111**

- El nombre de este móvil será LUIS
- El IMSI 716060849912036 es para el registro de SIPAuthServe
- 11111111 este es el número de abonado que asignamos a este móvil.

NOTA. Luego de ingresar correctamente los datos, se cuenta con un resultado positivo, lo cual si se vuelve a la terminal 1 de Open BTS y se ingresa el código para ver móviles conectados a la red, se observara que el teléfono ingresado está registrado y la pestaña AUTH será 1.

```
OpenBTS> tmsis
IMSI          TMSI      IMEI          AUTH  CREATED  ACCESSED  TMSI_ASSIGNED
716060849912036 0xc7cc  355325090658240 0    80h     47h      1
716060829573534 0x2cac5 990003202699130 0    80h     47h      1
```

Figura 44 G. Captura del ingreso correcto de un móvil con numero de abonado 11111111

NOTA. Para comprobar el registro a la red desde el móvil, enviar un mensaje cualquiera, al número 411 y se recibirá como respuesta de la red el IMSI, el número telefónico que se ingresó y el texto que se envió originalmente.

Finalmente podemos realizar llamadas entre los teléfonos móviles registrados por nuestra SIP AuthServe.

Evaluación

- i. Defina que es un Sistema Operativo, Software, Hardware y formule la posibilidad de que cada uno pueda tener funcionalidad sin el otro, plantee una propuesta de desarrollo autónomo.
- ii. Realice un diagrama de flujo de una red GSM integrado el Software – Hardware.
- iii. Establezca al menos 03 alternativas de uso, funcionabilidad de una red GSM, en qué sector lo aplicaría y cuáles son sus limitantes.

Participación Activa	15 %	Cumplimiento de Objetivos	20 %
Desarrollo de Actividad	20 %	Resultados	20 %
Evaluación	15 %	Informe Final	10 %

Referencia Bibliográfica

[1] Rangenetworks. *openbts*. 10 de 11 de 2019. <http://openbts.org/>
 [2] GitHub, luizener Inc. <https://github.com/luizener/Install-openbts/wiki/Configuracion-y-operatividad-de-red-OpenBTS#gnulinux>

CONCLUSIONES

- Como resultado del proyecto de investigación se logró el diseño y formulación de un módulo de prácticas integradas, experimentales que permitirá desarrollar las competencias profesionales de los estudiantes de pregrado de Ingeniería Electrónica en el campo de la Telecomunicaciones.
- Se implementó un módulo de prácticas, integrando una metodología de enseñanza-aprendizaje a través de la aplicación del software GNU radio y OPEN BTS, permitiendo a los estudiantes de Ingeniería Electrónica utilizar la plataforma en la práctica SDR.
- Se desarrolló tres guías de práctica para el módulo SDR, utilizando una estructura dinámica, de acompañamiento y de fácil accesibilidad para los estudiantes de Ingeniería Electrónica, que les permitirá conocer una nueva tecnología eficiente, económica y flexible.
- Cada guía de prácticas, contienen un cuestionario de autoevaluación y un caso de estudio sobre SDR, y se espera que los estudiantes de Ingeniería Electrónica desarrollen sus competencias profesionales, alcanzando las metas y objetivos planteados en los módulos de estudio y en futuras aplicaciones al acceder a una tecnología amigable SDR.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los estudiantes de Ingeniería Electrónica, a formar parte de comunidades de desarrollo de software de código abierto, como es el caso de SDR, o mejor aún ser impulsores en formar comunidades de innovación, diseño de nuevas formas de comunicación e integración, utilizando los recursos tecnológicos para generar nuevas oportunidades.
- El conocimiento, experiencia y habilidad en la aplicación de la tecnología GSM, permitirá a los estudiantes de Ingeniería Electrónica, acceder a nuevas oportunidades laborales en los principales operadores móviles, logrando una ventaja competitiva al ser una tecnología que difícilmente se puede acceder en el aprendizaje, por ello se recomienda aplicar los módulos desarrollados y formular nuevas oportunidades de innovación a partir de las guías.
- Se recomienda la investigación de nuevos proyectos basados ya sea en Matlab o GNU Radio, los cuales tienen una interfaz muy amigable como Modulación QAM, OFDM, QPSK entre otros, los cuales permitirían al usuario una mejor interacción con el dispositivo USRP.
- Para que la tarjeta USRP B210 sea utilizada en un mayor rango de cursos (por ejemplo comunicaciones satelitales, sistemas de radiocomunicación, entre otros), se recomienda adquirir los siguientes accesorios complementarios: GPSDO TXCO (GPS de 10 MHz que permite monitorear por frecuencia u ondas de choque distintos medios en movimiento como carros, aviones, buques, barcos), antena vertical omnidireccional VERT2450 (antena de doble banda 2.4-2.5 y 4.9-5.9 GHz), antena vertical

omnidireccional VERT400 (antena tirbanda de 144 MHz,400MHz,1200MHz), loop back cable kit (para crear un bucle transmisión – recepción en la misma placa, incluye 2 cables coaxiales y 2 atenuadores).Estos accesorios pueden ser adquiridos en la página de Ettus Research.

- Se recomienda que cuando se use el GPSDO, se conecte la fuente de alimentación externa que viene con la tarjeta USRP B210, y en los demás casos el puerto USB 3.0 alimenta la tarjeta.
- Por último, se recomienda motivar a los estudiantes de telecomunicaciones en el desarrollo, investigación e innovación de nuevas alternativas de telecomunicaciones, con la finalidad de incrementar sus competencias personales, logrando un efecto diferenciador en los egresados de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Attribution-ShareAlike, Creative Commons. <https://wiki.gnuradio.org/>. 8 de 12 de 2019.
https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_GRC (último acceso: 10 de 11 de 2019).
- Bharadia, Dinesh, Emily McMilin, y Katti Sachin. «Full Duplex Radios.» New York, 2004.
- Canet, Carlos. «Evaluación y Oportunidades de una Estación Base GSM definida por Software.» PROYECTO FINAL DE CARRERA, Catalunya, 2016.
- Del Valle, Antonio. «e-REDING.» 2011. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11980/> (último acceso: 05 de 12 de 2019).
- Desconocido. «cet.la.» 07 de 01 de 2004. <https://cet.la/estudios/cet-la/las-telecomunicaciones-y-la-movilidad-en-la-sociedad/>.
- Digium. «Asterisk.» 2019. <https://wiki.asterisk.org/wiki/display/AST/Getting+Started> (último acceso: 15 de 11 de 19).
- Dominguez, Ivan, y Juan Murillo. *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software*. Sevilla: ISBN, 2011.
- Eberspaaeche, Joerg, Hans Joerg Voegel, y Christian Bettstetter. *GSM: SWITCHING, SERVICES AND PROTOCOLS 3rd ed*. Torquay: Times by Sunrise Setting Ltd, 2001.
- FCC. *Authorization and Use of Software Defined Radios*. Washington: Federal Communications Commission, 2001.
- forum. «wireless innovation forum.» consultado el 18/11/2019.
https://www.wirelessinnovation.org/what_is_sdr.
- Forum, Universal Serial Bus. http://www.usb.org/developers/docs/documents_archive/.
Bogota, 2011.
- Garcia, Carlo. «<http://dspace.uclv.edu.cu>» 2011.
<http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/4729/Carlos%20Manuel%20Garc%C3%ADa%20Algora.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Gu, Guifen, y Guili Peng. «The survey of GSM wireless communication system.» *IEEE*, 2012.
- Halonon, Timo, Javier Romero, Juan Melero, y John Wiley & Sons. *GSM, GPRS and EDGE performance*. Vol. 2º Edition . 2003.
- Harte, Lawrence, Bruce Bramley, y Mike Davis. *Introduction to GSM*. 2012.
<https://www.althosbooks.com/intogsm.html> (último acceso: 05 de 12 de 2019).
- Hasan, Shaddi. «Performance Analysis of AOA-based Localization with Software Defined Radio.» *Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática Universidad de California, Berkeley*. California: IEEE, 4 de 1 de 2014. 1.
- Heine, Gunnar. *GSM Networks: Protocols, Terminology, and Implementation*. Boston: Library of Congress Cataloging in Publication Data , 1998.
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/DUC-vs-DDC.html>. *rfwireless-world*. 2010.
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/DUC-vs-DDC.html>.
- <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/7339/1/20T00894.pdf>
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761/fichero/Volumen1%252F7-Cap%C3%ADtulo3+-+Redes+inal%C3%A1mblicas+de+%C3%A1rea+local+%28WLAN%29.pdf>
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11677/fichero/Volumen+1%252F3.-WiMAX.pdf>
- <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12081/fichero/OFDMA+y+SC-FDMA+en+la+Interfaz+Radio+de+LTE%252F5.+Long+Term+Evolution+for+UMTS+%28LTE%29.pdf>
- https://www.mathworks.com/help/supportpkg/usrpradio/examples.html?category=index&stid=CRUX_lftnav_example_getting-started-with-communications-system-toolbox-support-package-for-usrp-radio
- https://portal.mtc.gob.pe/comunicaciones/autorizaciones/servicios_privados/documentos/pnaf_act_feb08.pdf

<https://www.ni.com/pdf/manuals/374925c.pdf>

Iedema, Michel. «Getting Started with OpenBTS.» 2015. http://openbts.org/site/wp-content/uploads/ebook/Getting_Started_with_OpenBTS_Range_Networks.pdf (último acceso: 15 de 10 de 11).

Instrumets, National. *National Instrumets*. 19 de 09 de 2012.
<http://www.ni.com/tutorial/13878/en/> (último acceso: 2019 de 10 de 10).

MEJIA, JULIO. «DESARROLLO DE UN ALGORITMO EN MATLAB PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA RESOLUCIÓN DE UNA TARJETA USRP B210 PARA APLICACIONES SDRADAR.» Ecuador, 2017.

Mitola, Joseph. *Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications*. III. Sweden, 2001.

Nardis, Luca De. «Maria-Gabriella DI BENEDETTO.» 17 de 12 de 2017.
<http://acts.ing.uniroma1.it/courses/comelet/Slides/> (último acceso: 10 de 11 de 2019).

Parra, Carla. «PROTOTIPO DE RED GSM BASADA EN SDR (SOFTWARE DEFINED RADIO).» TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN “ELECTRÓNICA Y REDES DE INFORMACIÓN”, Quito, 2018.

Perez, Andre. *Mobile Networks Architecture*. Hoboken: British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2012.

Perez, Guillermo, Jesus Vega, y Roberto Hurtado. «GSM Y GPRS UN PASO MAS EN LA TELEFONIA CELULAR.» Tesis Doctoral, Cordova, s.f.

Project, 3rd Generation Partnership. *3GPP TS 45.005 version 8.8.0 Release 8*. 2010.

Quezada, Felix Pinedo. «Tranmisión y Recepción FM con USRP N200 y GNURadio.» 27 de 06 de 2017.

Quiñones, Manuel, Juan Pablo Tene, Katty Rohoden, y Carlos Carrion. «Sistema de conmutacion y control de llamadas basado en OpenBTS y Asterisk.» Artículo, Campinas, 2014.

rangenetworks. *openbts*. 10 de 11 de 2019. <http://openbts.org/> (último acceso: 24 de 10 de 11).

Research, Ettus. *Ettus Research*. 16 de 05 de 2016.

https://kb.ettus.com/About_USRP_Bandwidths_and_Sampling_Rates (último acceso: 11 de 12 de 2019).

Riva, Guillermo, Jmaes Kunst, Carlos Zerbini, Airasca Emanuel , y Eduardo Gonzales.

«Analizando Comunicaciones GSM con Radios Definidas por Software(SDR).»
Cordoba, 10 de 2016.

Roca, Alejandro Gaitan. «Desarrollo de un sistema para la simulacion, generacion y recepcion de señales 4G y 5g.» s.f.

Sanches, Alejandro. «LA RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE: RECEPCIÓN DE LAS COMUNICACIONES TIERRA-AIRE DENTRO E LA BANDA AERONAUTICA.» tesis, CATALUNYA, 2015.

Sapienza, University of Rome La. «TDMA, FDMA, and CDMA.» Undergraduate course in Electrical Engineering, Italy, 2007-2008.

Tuttlebbe, Walter. *Software Defined Radio (Enabling): Enabling Technologies (Wiley Series in Software Radio) by Tuttlebee*. John Wiley & Sons, 2002.

Velazco, Nicolas. «bibing.» s.f.

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11141/fichero/PFC%252F4+Red+GSM.pdf>.

Zhang, Zhongshan. «Full-Duplex Wireless Communications:» *IEEE*, 2016.

ANEXOS

Anexo A

Módulo de practica 2 RED GSM OPEN BTS

Cuestionario

1. ¿Qué es una estación base?
2. ¿Qué es un subsistema de conmutación de red GSM cuales son las bandas de frecuencia, el nombre, los canales de cada una de las bandas, Uplink (Mhz) y Downlink (Mhz)?
3. ¿Cuántas partes tiene la arquitectura de una red gsm, nómbrelas y detállelas?
4. ¿Qué es Handover y cuales es su importancia, que es handoff y cuáles son las situaciones que esta herramienta puede darle a un sistema de telefonía? con un gráfico representativo, diseñar cuando se realiza el traspaso de señal en handover
5. ¿Qué es Asterisk?

Anexo B

Módulo de práctica 1ª TRANSMISIÓN DE FRECUENCIA MODULADA FM *Cuestionario*

1. ¿Se puede transmitir en Amplitud Modulada con el USRP?
2. ¿Hasta dónde se puede transmitir la estación de radio FM?
3. ¿Es posible calcular la potencia de transmisión?
4. ¿Existe disponibilidad de Frecuencias FM en tu localidad?
5. ¿Necesita equipos de estudio para una estación de radio?

Módulo de practica 1^b RECEPCIÓN DE FRECUENCIA MODULADA FM

Cuestionario

1. ¿La licencia de Radioaficionados autoriza a? ¿El ente encargado de regularlo es?
2. ¿Cuáles son las potencias máximas de operación en el rango FM?
3. ¿Qué es una onda portadora?
4. ¿Qué es la demodulación?
5. ¿Qué significa la desviación máxima de frecuencia en una señal de FM?

Anexo C

Guía de Instalación de Ubuntu

Requisitos de Ubuntu

Los requisitos para la instalación de Ubuntu son los siguientes, tener en cuenta que con un equipo básico (computadora o laptop) es suficiente. Ubuntu es un sistema operativo de grandes prestaciones y poco uso de recursos de hardware.

- 5GB de espacio en el disco duro
- Tarjeta de video VGA
- 512MB de memoria RAM
- Una unidad de CD/DVD o puerto USB para el proceso de instalación de Ubuntu
- Un USB de 2 GB

Instalación de Ubuntu

Descargar el instalador de ubuntu-14.04.6 este archivo debemos copiarlo a un USB o un DVD para lo cual usaremos el programa “RUFUS-3-6”.

PASO 1: Instalamos Rufus, el programa “RUFUS -3-6” lo iniciamos como administrador, le hacemos click derecho y en ejecutamos como administrador, en el caso tengamos una contraseña, nos la pedirá.

PASO 2: El programa Rufus se ve de la siguiente manera.

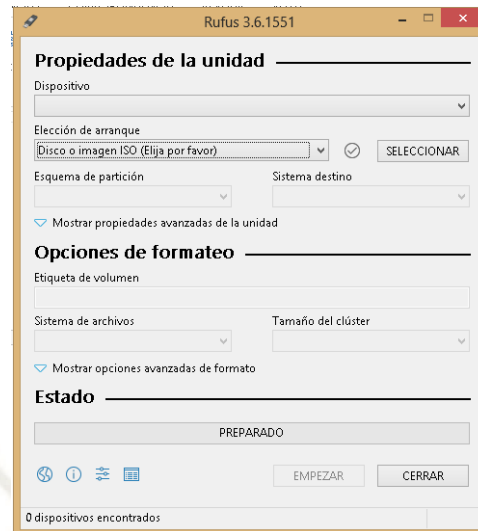


Figura 1: RUFUS -3-6

- Dispositivo: Seleccionamos el USB o DVD
- Elección de arranque: Disk o ISO IMAGEN
- Esquema de partición: MBR
- Sistema destino: BIOS o UEFI
- SELECCIONAR: Seleccionamos el archivo ISO con nombre “ubuntu-14.04.6-desktop-amd64”
- Sistema de archivos: FAT 32
- Tamaño de Clúster: 4090 bytes

En la Figura 2 tenemos como quedaría la configuración y solo esperamos que finalice el proceso.

NOTA: El USB a utilizar, va a ser formateado, para ponerlo en modo BOOTEABLE, por lo cual toda la información que se tenga en el USB va a ser borrada.

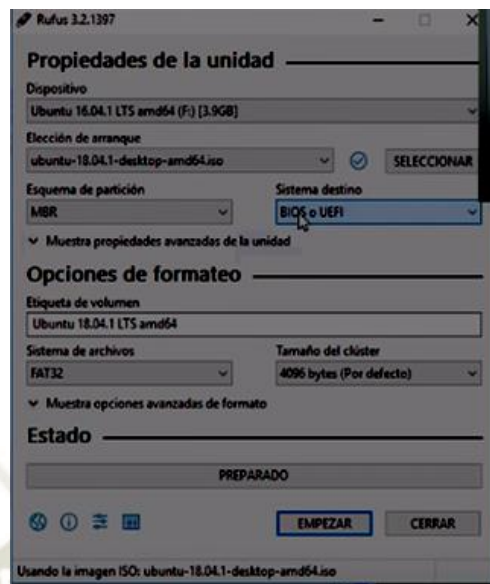


Figura 2

Teniendo la imagen ISO en nuestro USB Booteable hay que configurar el Bios para que como cualquier instalación de sistema operativo se haga un BOOT en el USB o DVD

PASO 3: reiniciar la PC o laptop para ingresar al BIOS.

Acceder a la BIOS de la PC es algo que se hace antes de que el sistema operativo se cargue, así que prácticamente Windows se mantiene al margen de todas las modificaciones que puedas hacer. Aunque es fácil acceder, es recomendable que no toques nada a menos que sepas exactamente qué estás haciendo.

- Apaga del ordenador a la vez que mantienes pulsada la tecla Mayúscula
- Enciéndelo y mantén pulsada la tecla F2 o Suprimir
- Listo, ya has entrado a la BIOS

NOTA: En WINDOWS 10 ingresar a la BIOS es diferente a otros sistemas operativos, por lo tanto, se tendrá que saber qué tipo de Windows se tiene, también se tienen en cuenta la marca de la computadora, TOSHIBA, SONY, MAC, entre otras, en tal caso se tendrá que

averiguar la manera de ingresar a BIOS

Una vez en BIOS, se tiene que buscar un apartado que tenga que ver con BOOT o BOOT SEQUENCE, en este apartado tenemos que poner como primer booteo a USB, normalmente está configurado, para que el booteo sea en el disco duro, DVD o disquetera, guardamos la configuración, aceptamos y se reiniciara nuestra PC.

PASO 4:

UBUNTU se inicia automáticamente:

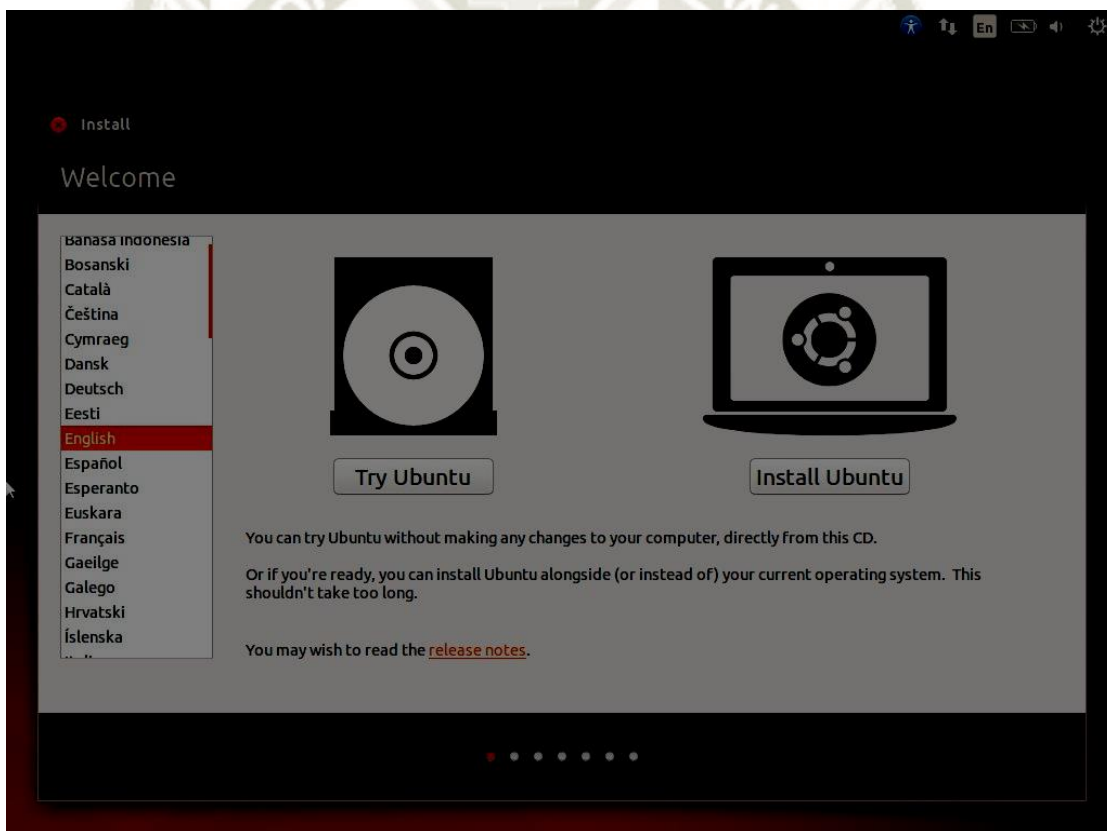


Figura 3: Cuando arranca el ordenador con la iso de Ubuntu lo primero que nos aparece es la pantalla de selección de idioma y seleccionar si queremos probarlo o instalarlo, seleccionamos instalarlo.



Figura 4: Seleccionamos el idioma, en nuestro caso el español y pulsamos instalar.

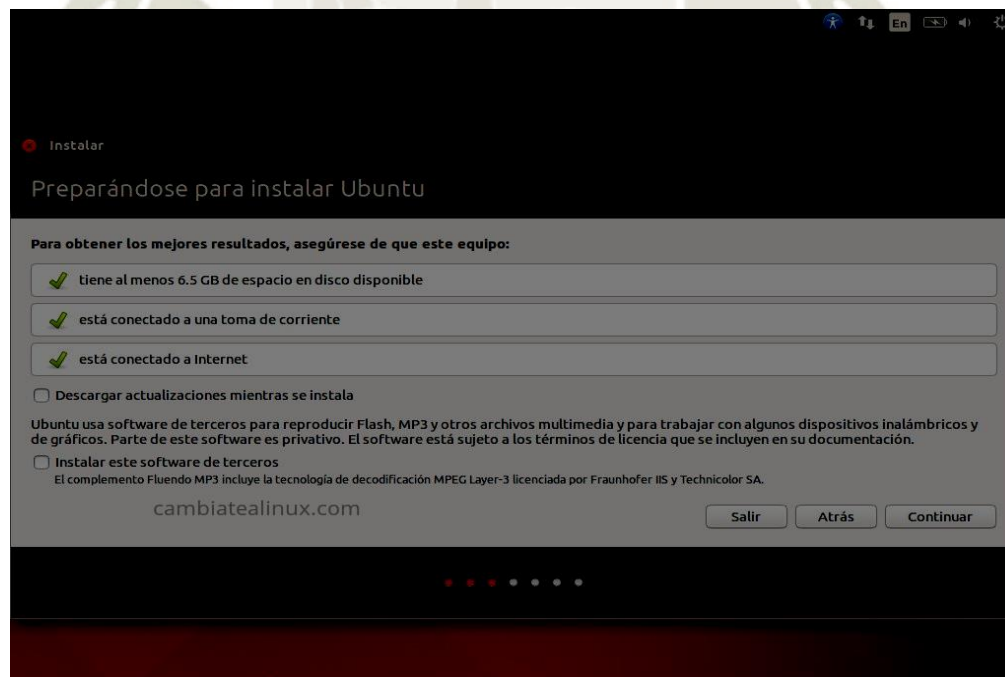


Figura 5: Verificación de prerequisites

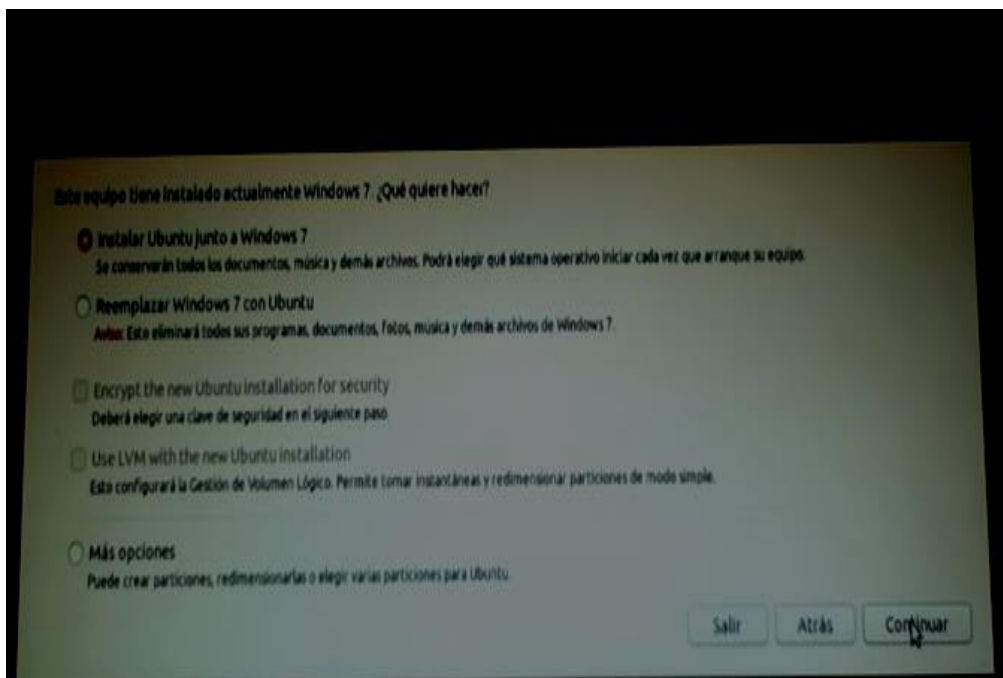


Figura 6

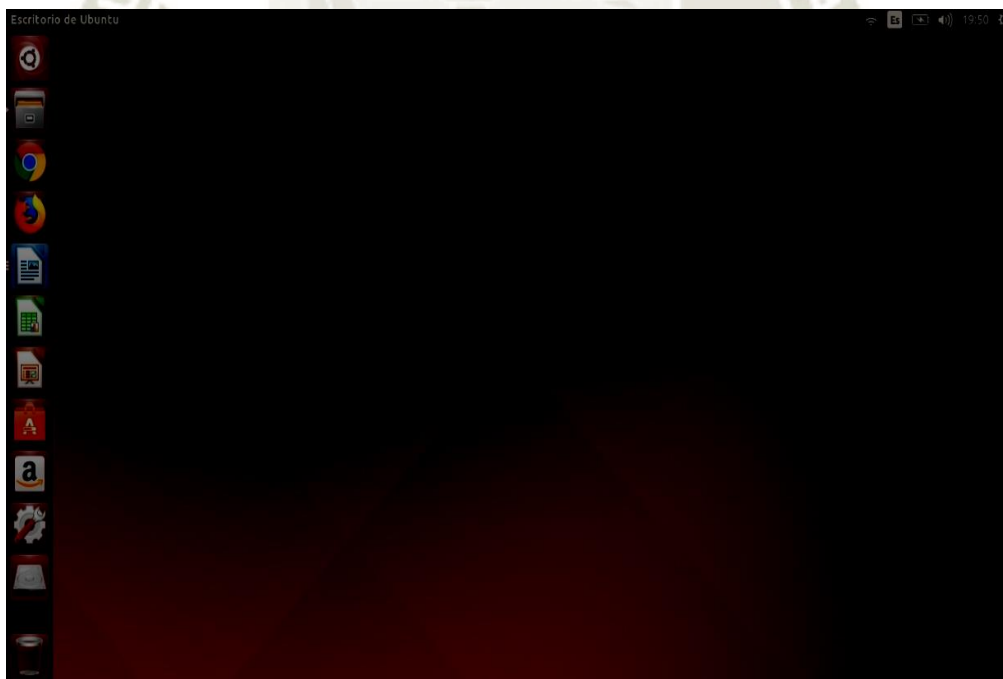


Figura 7: UBUNTU Luego de la instalación nos dará la siguiente interfaz.

Anexo D

Guía de Instalación de OpenBTS

Para la instalación de OpenBTS se requiere ejecutar paso a paso cada uno de los comandos que a continuación se mencionan. Se recomienda su ejecución siempre en el modo super usuario de Ubuntu, así como la digitación de forma manual de estos en la terminal.

Este primer paso se puede omitir, pero en algunos casos es necesaria su ejecución

sudo apt-get update

Con este comando se empiezan a instalar las dependencias necesarias para OpenBTS

sudo apt-get -y install git-core autoconf automake libtool g++ python-dev swig pkg-config libfftw3-dev libcppunit-dev libgsl0-dev vim ssh libusb-dev sdcc libsdl1.2-dev python-wxgtk2.8 python-numpy python-cheetah python-lxml doxygen python-qt4 python-qwt5-qt4 libxi-dev libqt4-opengl-dev libqwt5-qt4-dev libfontconfig1-dev libxrender-dev libusb-dev fort77 qt4-dev-tools libqwtplot3d-qt4-dev pyqt4-dev-tools libortp-dev libxml2-dev gawk libdbd-mysql

Seguidamente se instalan algunas dependencias adicionales. En caso de que aparezca un error al instalarlas de esta forma, se puede emplear un gestor de paquetes como “synaptic”, que posee una interfaz mucho más amigable con el usuario.

sudo apt-get Install libdbi-dev

sudo apt-get Install libdbd-pgsql sudo apt-get Install bind9

sudo apt-get Install ntp

A continuación, se descarga el libosip, para su posterior descompresión e instalación.

```
wget http://ftp.gnu.org/gnu/osip/libosip2-3.5.0.tar.gz gunzip libosip2-3.5.0.tar.gz
tar -xvf libosip2-3.5.0.tar cd libosip2-3.5.0
sudo ./configure sudo make
sudo make install
sudo apt-get install cmake
sudo apt-get install libusb-1.0-0-dev sudo apt-get install sdcc
sudo apt-get install libaudio-dev
sudo apt-get install libuhd-dev libuhd003 uhd-host
sudo apt-get install libboost-all-dev python-mako doxygen python-docutils build-essential
```

Por si el ultimo comando no funciona copiar los siguientes en orden, solo si no funciona

```
sudo add-apt-repository ppa:ettusresearch/uhd
sudo apt-get update
sudo apt-get install libuhd-dev libuhd003 uhd-host
sudo apt-get install libboost-all-dev python-mako doxygen python-docutils build-essential
```

Una vez ejecutados los pasos anteriores se debe descargar alguna de las versiones del UHD, la extensión “tar.gz”, es recomendable descargar versiones superiores o iguales a la 3.9 para tener mayor compatibilidad con la versión de Ubuntu empleada <http://files.ettus.com/binaries/uhd/>

Con la descarga del archivo anterior ya realizada, nos dirigimos al directorio descargas, y estando en este, lo descomprimos e instalamos como sigue a continuación:

```
cd $HOME/Descargas tar -xvf uhd-3.9.3.tar.gz sudo mkdir build
```

```
cd build
```

```
sudo cmake ../ sudo make
```

```
sudo make Install
```

```
sudo /usr/local/share/uhd/utils/uhd images downloader.py
```

Luego de los pasos anteriores, nos dirigimos a las rutas mostradas a continuación, y estando en estas se debe verificar que la carpeta *images* se encuentre en ambas rutas, de caso contrario se debe copiar y pegar dicha carpeta en el directorio donde no se encuentre por medio de la herramienta

Digitar *nautilus* en la terminal y verificar que la carpeta *images* estén en los dos directorios a continuación, si solo se encuentra en un directorio, copiar la carpeta *images* en la carpeta que falta.

“*nautilus*” de Ubuntu.

```
/usr/local/share/uhd
```

```
/usr/local/lib/uhd
```

Adicionalmente a los pasos anteriores, se debe copiar la carpeta UHD de alguno de los dos directorios anteriores, para pegarla en la siguiente ruta

```
/usr/share
```

Para un mayor soporte al momento de instalar OpenBTS y sus complementos, se recomienda leer el documento disponible en el siguiente enlace:

[http://openbts.org/site/wp-content/uploads/ebook/ Getting Started with OpenBTS Range Networks.pdf](http://openbts.org/site/wp-content/uploads/ebook/Getting_Started_with_OpenBTS_Range_Networks.pdf)

En el documento mencionado anteriormente se lista una serie de comandos a ejecutar en la terminal, de los cuales basta emplear solo los siguientes.

Se deben ejecutar en una nueva terminal

```
sudo apt-get install software-properties-common python-software-properties
```

```
sudo add-apt-repository ppa:git-core/ppa sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get install git
```

```
git clone https://github.com/RangeNetworks/dev.git cd dev
```

```
./clone.sh
```

Con los comandos anteriores ya ejecutados, se deben comentar las líneas

```
#installIfMissing libortp9
```

```
#installIfMissing libzmq5
```

Dentro del documento build.sh con el siguiente comando sudo gedit build.sh para abrirlo, luego buscar estas líneas y comentarlas con #.

Posteriormente se deben ejecutar los comandos mencionados a continuación

```
sudo add-apt-repository ppa:chris-lea/zeromq sudo apt-get update
```

Como en este caso se está trabajando con la USRP N210 se debe ejecutar el siguiente comando

```
sudo ./build.sh B210
```

Tras ejecutar los comandos anteriores, se requiere continuar con los comandos que se listan enseguida

```
cd dev/BUILDS/"fecha de descarga"/
```

Un ejemplo del anterior comando

```
cd dev/BUILDS/2014-07-29-20-44-51/
```

Algunas versiones de las librerías a instalar cambian al momento de descargarse o por el sistema operativo si es de 64 o 32 bits, por lo que en caso de que aparezca un error, se debe ir digitando los comandos y tecleando "tab" para autocompletarlos

```
sudo dpkg -i libcoredumper1 1.2.1-1 i386.deb sudo dpkg -i liba53 0.1 i386.deb
```

```
sudo dpkg -i range-configs 5.0 all.deb
```

```
sudo dpkg -i range-asterisk*.deb sudo apt-get install -f
```

```
sudo dpkg -i sipauthserve 5.0 i386.deb
```

```
sudo apt-get install -f
```

```
sudo dpkg -i smqueue 5.0 i386.deb
```

```
sudo apt-get install -f
```

```
sudo dpkg -i openbts 5.0 i386.deb
```

```
sudo apt-get install -f
```

A esta instancia de la instalación no se requieren realizar más descargas, por lo que el paso a seguir consiste en la configuración del OpenBTS.

Además, se debe ejecutar el comando *uhd find devices* el cual tendrá como salida la información de la usrp.

Anexo E

Instalación de GNU Radio

Ingresa al siguiente link: <http://www.gnudevelopment.com/gnuradio/downloads.htm>

Descarga la versión: v3.7.13.5/v1.6

<i>Complete GNURadio 3.7.9.2 64-bit Packages</i>			64-Bit Any CPU	64-bit HASWELL- (AVX2) CPU	64-Bit Any CPU (Debug)	Patch/Build Wrapper (if req'd)	Lic
Windows Installer			v3.8.1.0/v1.7 (py2.7) (pdb) v3.8.0.0/v1.7 BETA v3.7.13.5/v1.6 (pdb) v3.7.13.4/v1.5 (pdb) v3.7.12/v1.4 (pdb) v3.7.11.1/v1.3 (pdb) v3.7.11/v1.2 v3.7.10.1/v1.1.2 v3.7.9.2/v1.1.1	v3.7.13.5/v1.6 v3.7.13.4/v1.5 v3.7.12/v1.4 v3.7.11.1/v1.3 v3.7.11/v1.2 v3.7.10.1/v1.1.2 v3.7.9.2/v1.1.1	v3.7.13.5/v1.6 (pdb) v3.7.13.4/v1.5 (pdb) v3.7.12/v1.4 (pdb) v3.7.11.1/v1.3 (pdb)	NA	
Level 2 Build From Source (GNURadio source + all dependencies as binaries)			github repo (Choose Option 2 on run)			NA	
Level 1 Build From Source (100% source wrappers)			github repo (Choose Option 1 on run)			NA	
<i>Individual GNURadio dependencies</i> <i>64-bit binaries built with MSVC 2015</i>							
Name / Link to Source	Used By	Requires	64-Bit Any CPU	64-bit HASWELL- (AVX2) CPU	64-Bit Any CPU (Debug)		
zlib 1.2.8	GNURadio, cairo, openssl, libpng	NA	static dll	static dll	static dll	Not yet available	
openssl 1.0.2f	GNURadio, Qt, Python	zlib	static dll	< use these	static dll	openssl-vs14.zip	
Qt 4.8.7	GNURadio, Qwt, PyQt	openssl	static dll	static dll	static * dll *	NA	
Qwt 5.2.3	GNURadio, PyQt	Qt4	static dll	static dll	static * dll *	qwtconfig.7z	
FFTW 3.3.5	GNURadio	NA	static dll	static dll	static dll	fftw-3.3.5.7z	
Boost 1.60.0	GNURadio	python	static + dll dll	static + dll dll	static + dll *	NA	

Anexo F

Cuestionarios complementarios

Cuestionario Complementario 1

- ¿Por qué utilizar GNU Radio companion?
- ¿por qué utilizar Python?
- ¿por qué utilizar C++ como lenguaje core?

Cuestionario Complementario 2

- ¿Qué es USRP?
- ¿Qué tipos de antena existen para el USRP B210?
- ¿Son los sistemas SDR una alternativa económica y efectiva?
- ¿Cómo saber si mi tarjeta USRP B210 está conectada a la PC?

NOTA: Para poder usar la tarjeta USRP B210 se tiene que tener el driver UHD. Este driver lo pueden descargar desde el siguiente enlace:

https://files.ettus.com/manual/page_install.html#install_win

Escogiendo la siguiente opción:

Installation on Windows

We provide UHD software installers for Windows users who do not wish to install UHD from source.

LibUSBx

All Windows installers are built with LibUSBx to enable USB3 support.

Installer Packages

Installer packages are built from release tags of the maint branch.

Please find the latest installer here: http://files.ettus.com/binaries/uhd/latest_release

Older installers of all previous releases can be downloaded from: <http://files.ettus.com/binaries/uhd/> (browse to the desired release).

Una vez instalado el driver en el equipo, la tarjeta USRP B210 aparecerá conectada como se observa en la siguiente figura.

