

**DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO APLICANDO RADIO  
DEFINIDO POR SOFTWARE PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES  
ANÁLOGAS Y DIGITALES**



Miguel David Avalo Zuluaga

Código: 2100012

**Universidad Santo Tomás**

Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones

Bogotá, D.C. noviembre de 2015

**DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO APLICANDO RADIO  
DEFINIDO POR SOFTWARE PARA SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES  
ANÁLOGAS Y DIGITALES**



Miguel David Avalo Zuluaga

Código: 2100012

Directora: Ingeniera

Mónica Espinosa

**Universidad Santo Tomás**

Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones

Bogotá, D.C. noviembre de 2015

## Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
3. OBJETIVO GENERAL .....	5
3.1    Objetivos específicos .....	5
4. JUSTIFICACIÓN .....	6
5. DESARROLLO DE LAS RADIOCOMUNICACIONES.....	8
6. SISTEMAS DE COMUNICACIONES .....	11
6.1    Modulaciones análogas .....	14
6.1.1    Modulación de amplitud (AM – Amplitude Modulation) .....	14
6.1.2    Modulación de frecuencia (FM – Frequency Modulation).....	16
6.1.3    Modulación de Fase (PM – Phase Modulation).....	17
6.2    Modulaciones Pulsadas .....	17
6.2.1    Modulación por amplitud de pulsos (PAM) .....	18
6.2.2    Modulación por impulsos codificados (PCM) .....	18
6.3    Modulaciones digitales.....	19
7.    CARACTERIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SOFTWARE Y HARDWARE .....	20
7.1    Radio definido por software USRP N210.....	20
7.2    GNU Radio .....	24
7.3    Matlab – Simulink .....	25
8. INTRODUCCIÓN A GNU RADIO.....	26
8.1    Instalación de Ubuntu (14.04 o 16.04).....	26

8.1.1	Requerimientos del Sistema Recomendados .....	29
8.2	Instalación GNU RADIO .....	30
8.3	Introducción a GNU Radio .....	35
8.3.1	Señales Banda base .....	39
9.	DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE MODULACIONES ANALOGAS Y DIGITALES EN GNU RADIO .....	48
9.1	Modulaciones análogas .....	48
9.1.1	Modulación de Amplitud .....	48
9.1.2	Modulación de Frecuencia .....	54
9.2	Modulaciones digitales.....	62
9.2.1	Modulación por desplazamiento de fase (PSK – Phase Shift Keying).....	63
9.2.2	Modulación de amplitud en cuadratura (QAM – Quadrature Amplitude Modulation).....	75
10.	CONCLUSIONES.....	82
11.	BIBLIOGRAFÍA .....	83

## Lista de Figuras

Figura 1 Experimento de Hertz en 1887 .....	8
Figura 2 Modelo simplificado de bloques de un sistema electrónico de comunicaciones .....	11
Figura 3 Modulaciones análogas y digitales según la propiedad de la onda que varían.....	13
Figura 4 Señales de entrada y onda modulada AM .....	15
Figura 5 USRP N210 de Ettus Research.....	20
Figura 6 Herramienta rufus en ejecución .....	28
Figura 7 Terminal de Ubuntu .....	30
Figura 8 Ejemplo uso de comandos cd y ls .....	32
Figura 9 solicitud de clave para ejecutar comando súper usuario .....	33
Figura 10 UI (User Interface) de la aplicación GNU RADIO .....	35
Figura 11 Ventana de configuración bloque de opciones .....	36
Figura 12 Ventana de configuración bloque Variable .....	38
Figura 13 Diagrama de bloques programa 'Hola Mundo' .....	40
Figura 14 Diagrama de bloques programa 'Hola Mundo' conectado .....	41
Figura 15 Tipos de datos usados en GNU-Radio .....	41
Figura 16 Ventana de configuración bloque Signal Source .....	42
Figura 17 Ventana de configuración bloque Noise Source .....	43
Figura 18 Ventana de configuración bloque WX GUI FFT SINK .....	44
Figura 19 Ventana de configuración bloque WC GUI SLIDER .....	45
Figura 20 Respuesta en frecuencia del programa 'Hola Mundo' .....	47
Figura 21 Diagrama de bloques modulación AM .....	50

Figura 22 Señal de información $v_m$ en GNU RADIO .....	51
Figura 23 Ausencia de modulación AM .....	52
Figura 24 Modulación coherente AM .....	53
Figura 25 Máximo nivel de modulación AM .....	53
Figura 26 Sobremodulación AM.....	54
Figura 27 Diagrama de bloques TX FM .....	57
Figura 28 Señal de ruido transmitida en FM sobre la frecuencia $f = 435MHz$ .....	58
Figura 29 Señal de información (tono) transmitida en FM sobre la frecuencia $f = 435MHz$ .....	58
Figura 30 Diagrama de bloques RX FM.....	59
Figura 31 Señal recibida emisora comercial en frecuencia $f = 90.9MHz$ .....	60
Figura 32 Espectro en frecuencia recibido emisora comercial en frecuencia $f = 90.9MHz$ .....	60
Figura 33 Señal recibida de tono interfiriendo emisora comercial en frecuencia $f = 90.9MHz$ .....	61
Figura 34 Espectro en frecuencia recibido de tono interfiriendo emisora comercial en frecuencia $f = 90.9MHz$ .....	61
Figura 35 Diagrama de constelación BPSK.....	64
Figura 36 Relación de fase de salida en función del tiempo para un modulador BPSK. ....	64
Figura 37 Diagrama modulador QPSK. ....	66
Figura 38 Diagrama de constelación QPSK .....	67
Figura 39 Diagrama modulador 8-PSK.....	68
Figura 40 Diagrama de constelación 8-PSK .....	70

Figura 41 Información modulada sobre un modelo de canal simulado .....	71
Figura 42 Diagrama de bloques modulación PSK .....	72
Figura 43 Diagrama de constelación Q-PSK práctico.....	72
Figura 44 Diagrama de constelación 8-PSK práctico.....	73
Figura 45 Configuración bloque para Q-PSK práctico .....	73
Figura 46 Configuración bloque para 8-PSK práctico .....	74
Figura 47 Diagrama modulador 8-QAM .....	76
Figura 48 Diagrama constelación 8-QAM .....	77
Figura 49 Diagrama modulador 16-QAM .....	79
Figura 50 Diagrama constelación 16-QAM .....	80
Figura 51 Diagrama de bloques modulación 16-QAM .....	81
Figura 52 Diagrama de constelación 16-QAM práctico.....	81

## Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Ecuación de una onda senoidal .....	12
Ecuación 2 Ecuación senoidal de una señal portadora .....	49
Ecuación 3 Ecuación senoidal de una señal de información .....	49
Ecuación 4 Ecuación inicial para una señal AM.....	49
Ecuación 5 Ecuación de índice de modulación AM .....	49
Ecuación 6 Ecuación para una señal AM en todo tiempo t.....	50
Ecuación 7 Consideración inicial para una onda senoidal modulada en FM .....	54
Ecuación 8 Coeficientes de Bessel para la sumatoria coseno.....	55
Ecuación 9 Coeficientes de Bessel para la sumatoria seno .....	55
Ecuación 10 Ecuación para una señal modulada en FM teniendo en cuenta los coeficientes de Bessel .....	55
Ecuación 11 Identidades trigonométricas de producto para seno y coseno .....	55
Ecuación 12 Ecuación para una señal modulada en FM desarrollando las identidades trigonométricas de producto .....	55
Ecuación 13 Ecuación para una señal modulada en FM evaluando algunos componentes de la sumatoria.....	56
Ecuación 14 Ecuación para una señal modulada en FM organizando los elementos obtenidos .....	56
Ecuación 15 Ecuación final para una señal modulada en FM en todo tiempo t.....	56
Ecuación 16 Ecuación de cantidad de bits codificados.....	63
Ecuación 17 Ecuación de cantidad de condiciones posibles de salida con N bits. .....	63
Ecuación 18 Ecuación fasorial general 8-PSK.....	68



## Lista de Tablas

Tabla 1 Tipos de señales y de modulaciones .....	13
Tabla 2 Modulaciones M-PSK y M-QAM a tratar.....	14
Tabla 3 Comparación de dispositivos para SDR.....	22
Tabla 4 Valores para el índice de modulación AM.....	52
Tabla 5 Cantidad de condiciones de salida M según la cantidad de bits codificados N. ....	65
Tabla 6 Tabla de verdad modulación QPSK.....	67
Tabla 7 Tablas de verdad canales IC y QC.....	69
Tabla 8 Tabla de verdad modulación 8-PSK .....	69
Tabla 9 Tabla de verdad salida convertidores de 2 a 4 niveles .....	76
Tabla 10 Tabla de verdad modulación 8-QAM.....	77
Tabla 11 Tablas de verdad canales I y Q. ....	78
Tabla 12 Tabla de verdad modulación 16-QAM.....	80

## 1. INTRODUCCIÓN

Es preciso definir la importancia de los medios de radiodifusión en la sociedad actual que permiten el constante desarrollo y progreso de la misma a nivel de tecnologías de la información y comunicaciones (TIC). El aprovisionamiento y soporte de la red de transmisión de los medios masivos de información tanto en emisión análoga (actual) como digital (en proceso de desarrollo) resalta el grado de influencia asociado a la distribución y acercamiento de los distintos proveedores del servicio con los usuarios finales. De forma introductoria, encontramos que al transmitir de forma inalámbrica cualquier tipo de información es necesario hacer uso del espectro radioeléctrico, el cual se define como cualquier onda de carácter electromagnético que estén asociadas en frecuencia, normalmente, por debajo de los 3000 GHz( $\times 10^9$ ), las cuales se propagan en el espacio sin guía artificial [1]. Por lo tanto, se debe tener en cuenta la reglamentación vigente que se encarga de asignar los distintos segmentos de frecuencia, los cuales hacen parte del espectro radioeléctrico (ERE) asociados a distintos servicios según corresponda. En primera instancia la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés) se encarga de expedir recomendaciones para la asignación de las distintas secciones de frecuencias. Partiendo de la reglamentación expedida por la ITU-R (International Telecommunications Union - Radiocommunications), dispuesta mediante el Reglamento de Radiocomunicaciones, cada país está en la obligación de generar un organismo gubernamental que se encargue de la gestión del ERE en la extensión territorial de la nación, por ejemplo, para Colombia está establecida la ANE (Agencia Nacional del Espectro) y para Estados Unidos la FCC (Comisión de Comunicaciones Federal).

Las radiocomunicaciones se han desarrollado a gran velocidad en el último siglo, partiendo de las transmisiones alámbricas de pulsos (mediante el telégrafo) y continuando con la transmisión inalámbrica de datos debido al descubrimiento de James C. Maxwell de las ondas electromagnéticas hacia 1880. Las primeras

transmisiones que no usaron cables para transmitir la información, lograban comunicación a unos cuantos metros de distancia. Por medio de la adaptación de varios inventos de finales del siglo XIX fue posible hacer un mecanismo inalámbrico que permitió irradiar en su primera versión a una distancia de 2.400 metros (2,4 Km) a lo cual se llamó el primer telégrafo inalámbrico, desarrollado por Guillermo Marconi en Inglaterra [2]. Desde que Marconi logro hacer transmisiones sin necesidad de tener una conexión alámbrica, se ha buscado mejorar la calidad de la información que se transmite sobre el ERE y la capacidad de la misma mediante bloques de modificación de la señal que permitían hacer modificaciones sobre la misma para optimizar el ancho de banda de transmisión.

Hoy en día las comunicaciones inalámbricas se han convertido en parte importante del desarrollo cotidiano de la sociedad mundial por medio de comunicaciones satelitales, acceso a la red de internet por wi-fi y demás aplicaciones. La transmisión de información está ligada a las características físicas a las que puede acceder el dispositivo transmisor en el ERE, es decir, las características de transmisión de un emisor le permiten trabajar en una banda específica de frecuencia y explotar las aplicaciones que se desarrollan sobre las frecuencias que la misma comprende; es aquí donde se encuentra la necesidad de implementar radio cognitiva o radio definido por software para, por medio de modificaciones a nivel de programación en software, modificar las características de las bandas de transmisión de los dispositivos de transmisión y explotar distintas aplicaciones que se encuentran repartidas sobre las bandas de frecuencia del espectro.

Los sistemas de radio definido por software surgen dadas las necesidades del sector TIC para sistemas de radiodifusión en donde los bloques de modulación, codificación, decodificación y multiplexación para los sistemas de telecomunicaciones realizan el procesamiento de señal necesario para lograr una transmisión óptima. Este procesamiento de señal debe ser versátil y reconfigurable dependiendo de los requerimientos del sistema, esto se logra con el desarrollo de software en su diseño. Dado el cambio tecnológico a nivel de las

radiocomunicaciones, los estudiantes de la Facultad de ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad Santo Tomas deberán generar estas nuevas competencias que permitan la innovación y desarrollo tecnológico en estas áreas de diseño.

Para la implementación del proyecto se tiene planeado utilizar las herramientas disponibles en la facultad de ingeniería de telecomunicaciones de la universidad Santo Tomas en el área de SDR (Software Defined Radio), donde se implementen las configuraciones de distintos mecanismos de modulación análoga, pulsada y digital.

El dispositivo con el cual se van a desarrollar las prácticas de laboratorio es el Ettus USRP (Universal Software Radio Peripheral) referencia N210 [3], el cual posee una gran capacidad de procesamiento y opera en un amplio rango del espectro. De igual forma se dispondrá de un ordenador para hacer la conexión con el USRP por medio del puerto GigaEthernet además de herramientas complementarias de software y hardware.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente en la facultad de ingeniería de telecomunicaciones en la asignatura sistemas de telecomunicaciones, existen temáticas que comprenden la fundamentación de los sistemas de comunicaciones y todos los aspectos que estos involucran. El programa semestral del curso cuenta con actividades de desarrollo magistral y práctico, siendo esto último la capacidad del alumno para generar a partir del conocimiento teórico un escenario real en donde se puedan apreciar las distintas variables de un sistema de telecomunicaciones.

Planteamos entonces una necesidad de ajustar los mecanismos prácticos mediante los cuales los estudiantes de la facultad asocian el conocimiento en sistemas de telecomunicaciones, esto con el fin de estar actualizados en el sector TIC utilizando herramientas novedosas para ello. Realizando prácticas de modulaciones sobre SDR los alumnos serán capaces de asociar la información teórica con el uso novedoso del espectro, haciendo variable la forma de aplicación de los elementos involucrados en el desarrollo de un sistema de comunicación.

Con respecto a lo anterior, surge la siguiente pregunta problema:

¿Cómo desarrollar prácticas de laboratorio, dirigidas a la facultad de ingeniería de telecomunicaciones, haciendo uso de radio definido por software (SDR por sus siglas en inglés) con el fin de implementar modulaciones análogas, pulsadas y digitales?

### **3. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar prácticas de laboratorio en la asignatura sistemas de telecomunicaciones haciendo uso del dispositivo USRP N210, en modulaciones análogas, pulsadas y digitales dirigidas a los estudiantes de ingeniería de telecomunicaciones de la universidad Santo Tomas.

#### **3.1 Objetivos específicos**

- Identificar los conceptos más relevantes a nivel de SDR para el desarrollo de modulaciones análogas, pulsadas y digitales.
- Configurar el sistema de SDR de acuerdo con las especificaciones requeridas para modulaciones análogas, pulsadas y digitales.
- Apreciar las principales características de las modulaciones análogas, pulsadas y digitales sobre plataformas SDR.
- Documentar las guías de laboratorio según los resultados obtenidos que permitan al estudiante relacionar sus conocimientos aplicados.

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

La innovación en tecnologías inalámbricas ha permitido el desarrollo de la sociedad en general, desde la radiodifusión hasta la capacidad de poder comunicarse desde un terminal móvil. Por lo tanto, la facultad de ingeniería de telecomunicaciones de la universidad Santo Tomas en su labor educativa debe interesarse en la adaptación de su plan de estudios de forma constante con el fin de dar a los estudiantes una base estable donde soportar sus conocimientos. El SDR aplicado a las tecnologías de modulaciones (enfocadas al desarrollo de las materias de sistemas de telecomunicaciones) establecerá nuevos escenarios de estudio práctico, en donde los estudiantes podrán interactuar de forma dinámica con una estructura física. La cual podrán manipular para apreciar las variables de un sistema de telecomunicaciones, tanto en la transmisión como en la recepción y así mismo serán capaces de verificar las características de las modulaciones a tratar en el proyecto.

La justificación de este proyecto está en aprovechar al máximo la capacidad de los equipos de radio definido por software adquiridos por la facultad, mediante la inclusión de prácticas que integren el desarrollo tradicional de la asignatura con laboratorios novedosos que desarrollan habilidades de implementación en los estudiantes. La configuración de canales de comunicación que permitan apreciar modulaciones sobre los mensajes enviados en el sistema, serán causales de una comprensión orientada hacia los temas desarrollados a lo largo de la carrera profesional. Con un buen proceder del recurso se abre la posibilidad para plantear la implementación de una sección paralela que permita desarrollar actividades prácticas para la línea de sistemas de telecomunicaciones, utilizando el USRP N210 para tal fin.

El factor que se hace más evidente en el uso del equipo de radio definido por software, es la capacidad que tiene para desarrollar diferentes escenarios que se contemplan sobre el espectro radioeléctrico. Es decir, haciendo uso del USRP N210 podemos generar varios escenarios sobre distintas bandas de frecuencia. Recrear estos escenarios con hardware tradicional, requeriría sumas de dinero

considerables además de solo aplicar para un fin específico, sobre una banda determinada y sin posibilidad de variación.



## 5. DESARROLLO DE LAS RADIOCOMUNICACIONES

Las radiocomunicaciones han sido un desarrollo constante a lo largo de la historia reciente del mundo, iniciando desde finales del siglo XIX con la publicación del físico británico James Clerk Maxwell acerca de las ondas electromagnéticas. Después de una larga década, fue Heinrich Hertz quien comprobó la existencia de las ondas electromagnéticas (desarrolladas en la teoría de C. Maxwell) mediante un experimento que en su momento le permitió observar como mediante un dispositivo se generaba un flujo eléctrico que podía detectar un receptor situado a ciertos metros de distancia mediante chispas eléctricas, como podemos observar en la Figura 1. Después de haber comprobado que las ondas electromagnéticas efectivamente existían, también fue capaz de probar que tienen características similares al comportamiento de la luz, por lo tanto, son capaces de reflejarse, refractarse y viajan a la misma velocidad que la luz, como lo había predicho Maxwell. Las principales conclusiones que desarrollo Hertz en su experimento, fueron:

- i. Las ondas electromagnéticas se propagan a través del espacio libre.
- ii. Son reflejadas por muros metálicos.
- iii. Exhiben las propiedades de las ondas de luz [4].



Fuente: Huidobro, José Manuel and Luque, Javier.

Figura 1 Experimento de Hertz en 1887

Después de haberse comprobado la transmisión inalámbrica por medio de pulsos electrónicos, fueron varios los interesados en encontrar una aplicación para esta nueva tecnología. Hay una discusión generalizada sobre quien es el verdadero padre de la radio, los rusos dicen que es el científico Alexander Popov (quien lamentablemente nunca patentó su invención) mientras gran parte de la sociedad dice que fue Guillermo Marconi, quien desarrolló inicialmente mecanismos de transmisión inalámbrica (sin hilos) de las señales telegráficas de finales del siglo XIX. Inició la transmisión de información a distancias considerables (varios cientos de Kilómetros) para luego, en el inicio del siglo XX, demostrar la primera comunicación trasatlántica. Allí inició un recorrido histórico que le permitió desarrollar tecnología cada vez más avanzada y mediante la cual alcanzó la transmisión de señales de voz y por lo tanto la radiotelegrafía se convirtió en radiotelefonía. Sin embargo, se ha creado una discusión entre autores debido a que según hechos históricos Nikola Tesla desde Estados Unidos realizó la primera demostración pública de comunicación a distancia de forma inalámbrica un año antes que Guillermo Marconi, por lo tanto hoy en día es el dueño de la patente de la invención de la radio, después de que en 1943 la suprema corte de los Estados Unidos le asignara su propiedad legítima [2].

Una vez puesto sobre la mesa el mercado que podía desarrollar la transmisión inalámbrica, los padres de la radio (en especial Marconi) se ocuparon en el progreso y alcance que esta tecnología podía alcanzar. Marconi fue la primera persona que logró comunicar dos continentes mediante un radiotelégrafo que recibió en América una señal transmitida desde Europa. Los avances y distancias de transmisión que logró implementar en el auge de las comunicaciones sin hilos, son los responsables de que la mayoría de los autores lo consideren como el creador de la transmisión inalámbrica. Sin embargo, varios científicos detectaron antes que Marconi que la voz podía ser transmitida sobre las ondas hercianas y encontraron una aplicación para transmitir información legible para un público mayor, ya que para poder transmitir o recibir información mediante telégrafos (alámbricos o inalámbricos) era

necesario conocer el código morse mediante el cual se transmitía la información iniciando el siglo XX.

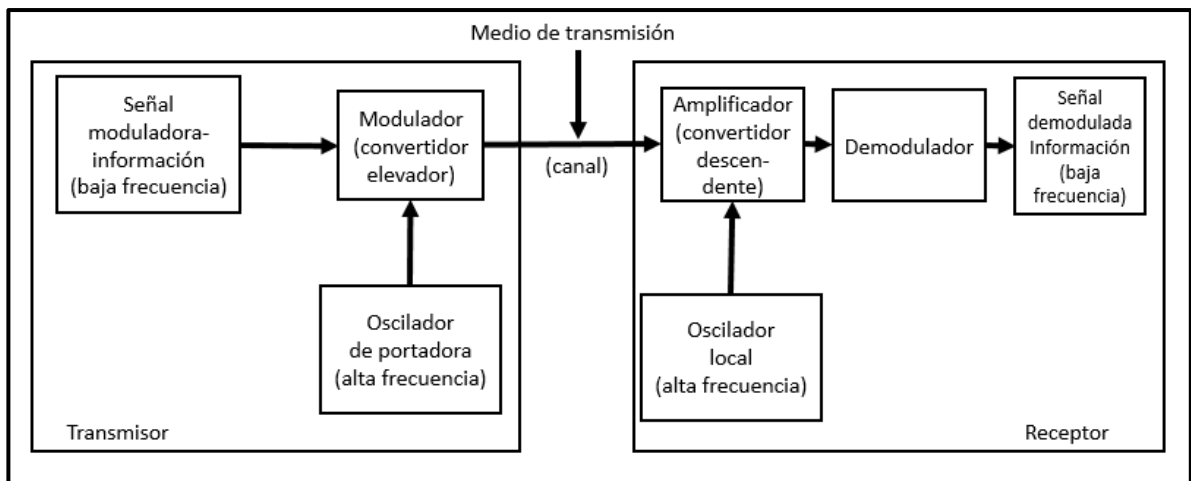
Reginald Aubrey Fessenden fue un científico que logro desarrollar la radiodifusión en la misma época en que Marconi implementaba la transmisión de señales trasatlánticas de telégrafo de forma inalámbrica, en 1905 logró transmitir a una distancia de 45 kilómetros; el 24 de diciembre de 1906 transmitió su primer programa radiofónico y antes de acabar ese año estableció una comunicación transatlántica entre Massachusetts y Escocia. Debido a la escasa atención que se prestó a sus adelantos tecnológicos la radiodifusión tuvo un retraso de más de una década, hasta 1920 [2].

A partir de la inclusión de la radiodifusión en el mercado se desarrollaron métodos de modulación, esta última se define como el proceso mediante el que alguna característica de la portadora se varía de acuerdo con una onda (señal) moduladora [5].

Inicialmente se desarrollaron procesos de modulación para señales análogas hasta la mitad del siglo XX, siendo primero desarrollado el modelo de AM (Amplitude Modulation) hasta el descubrimiento y composición de FM (Frequency Modulation) en 1933 por Edwin Aemstrong. Al pasar los años, se encontraron métodos más eficientes de transmitir la información por lo que las modulaciones análogas fueron relegadas. Después del descubrimiento del transistor en la década de los 50, las válvulas comenzaron a ser remplazadas con este nuevo elemento que permitía desarrollar un receptor lo suficientemente pequeño para ser transportado en un bolsillo. Desde los 60 hasta los 80 la radiodifusión perdió adeptos a causa de la inclusión de la televisión como medio de entretenimiento en los hogares. Posteriormente se desarrollaron mecanismos de comunicaciones móviles mediante métodos digitales y la capacidad de comunicarse se convirtió en una experiencia más personal y móvil [2].

## 6. SISTEMAS DE COMUNICACIONES

Las comunicaciones se pueden llevar a cabo mediante dos tipos, los cuales son analógico y digital. Un sistema de comunicaciones análogo es aquel mediante el cual la energía transmitida y recibida es analógica, lo que quiere decir que es una señal de variación continua, como por ejemplo una onda senoidal. En los sistemas de comunicaciones análogos, las señales (tanto la de información como la portadora) son de carácter analógico[6]. Los sistemas de comunicación digital tienen como principal característica las señales portadoras digitales verdaderas. Las señales de información pueden ser de forma digital o análoga, se debe tener en cuenta que si la onda es análoga se debe convertir en pulsos digitales antes de la transmisión y de igual forma debe volver de pulsos digitales a una señal continua después de la recepción. En la Figura 2 podemos apreciar el diagrama de bloques básico de un sistema de comunicaciones, hay que tener en cuenta que la modulación que se implementa en el sistema determina la característica modificada en la señal emitida.



Fuente: Wayne Tomasi [6]

Figura 2 Modelo simplificado de bloques de un sistema electrónico de comunicaciones

Una onda senoidal de voltaje variable en el tiempo, como puede ser una señal portadora de alta frecuencia, se puede representar matemáticamente como se describe en la Ecuación 1.

$$v(t) = V \sin(2\pi ft + \theta)$$

Fuente: Wayne Tomasi [6]

Ecuación 1 Ecuación de una onda senoidal

Donde:

$v(t)$  = *Voltaje variable senoidalmente en el tiempo*

$V$  = *Amplitud máxima (Voltios)*

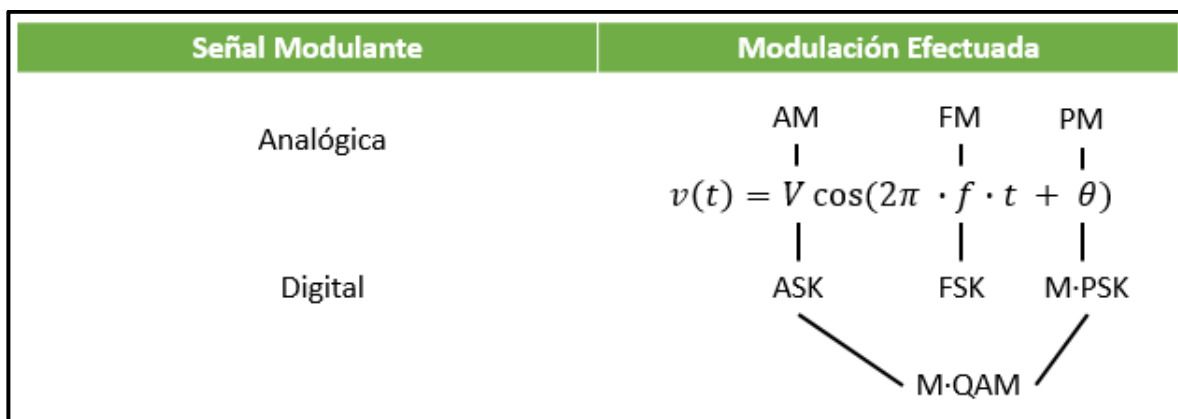
$f$  = *Frecuencia (Hertz)*

$\theta$  = *Desplazamiento de fase (Radianes)*

Se deben destacar dos puntos específicos por los cuales la modulación de señales se hace necesaria sobre un sistema de comunicaciones: 1) Irradiar señales de baja frecuencia en forma de energía electromagnética con una antena, es supremamente difícil, y 2) Las señales de información en ocasiones ocupan las mismas bandas de frecuencia y, en dado caso que se trasmitan en el mismo momento las señales de dos o más fuentes, interferirían entre sí [6].

Es por esto que se desarrollaron métodos de modulación según la propiedad de la señal que se modifique en la Ecuación 1. En la Figura 3 podemos apreciar algunas de las modulaciones que se tratarán en este documento y que propiedad característica de la onda senoidal se ve afectada al aplicar una modulación sobre la señal de información.

A continuación, se dividen las modulaciones en análogas, pulsadas y digitales, con el fin de evidenciar los componentes teóricos de cada uno de los procesos que se pretende desarrollar en el documento. Las modulaciones que se van a tratar en este documento se pueden apreciar en la Tabla 1.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 3 Modulaciones análogas y digitales según la propiedad de la onda que varían

Modulaciones	Señal Moduladora	Señal Portadora	Tipos de Modulación	Señal de Salida
Analógicas	Analógica	Analógica	AM, FM y PM	Analógica
Pulsadas	Analógica	Pulsada	PAM y PCM	Pulsada
Digitales	Digital	Analógica	ASK, FSK, MPSK y MQAM	Analógica

Fuente: Avalo Miguel

Tabla 1 Tipos de señales y de modulaciones

En la sección de modulaciones digitales también se desarrollarán las variaciones M-PSK y M-QAM, lo que hace referencia a la información incluida en la *Tabla 2*

M	PSK	QAM
4	PSK	QAM
8	PSK	QAM
16	PSK	QAM

Fuente: Avalo Miguel

Tabla 2 Modulaciones M-PSK y M-QAM a tratar

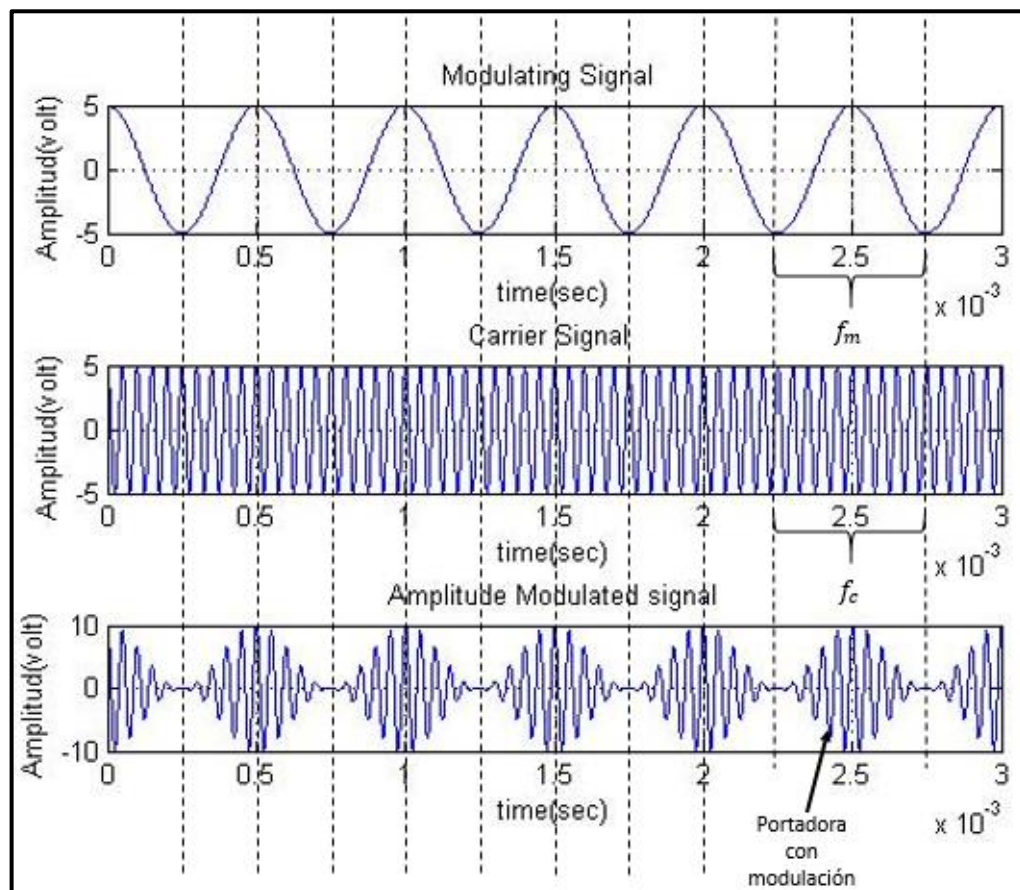
## 6.1 Modulaciones análogas

La información que se transmite sobre un sistema de comunicaciones debe viajar sobre un medio de transmisión. Las señales de información muy pocas veces tienen la forma apropiada para ser transmitidas. Por lo tanto, se deben modular sobre una portadora de alta frecuencia para generar una modulación. En esta sección se relacionan las modulaciones de tipo análogo, consiguientemente se tratarán señales de variación continua (análogas) tanto de información como la portadora.

### 6.1.1 Modulación de amplitud (AM – Amplitude Modulation)

La modulación es, como se había mencionado en el capítulo 5, el procedimiento mediante el cual se altera un parámetro específico de una señal cualquiera de forma proporcional a una segunda señal. Tratando la modulación AM, la amplitud de una onda senoidal de información se hace variar mientras la frecuencia y la fase permanecen fijas. Lo anterior desplaza los componentes de frecuencia de la señal a frecuencias más altas. La modulación de amplitud se emplea para generar desplazamientos en frecuencia además de facilitar la transmisión de señales de información (la voz, por ejemplo) por medio del ERE. Comercialmente se observan aplicaciones de la modulación en la radiodifusión, emitiendo desde varias fuentes información de emisoras y televisión sobre el mismo canal de transmisión, pero ubicando adecuadamente los datos que viajan sobre este para evitar la interferencia [7].

En la modulación AM se deben tomar como referencia dos parámetros de ingreso que se van a operar entre sí para obtener finalmente la modulación en amplitud. El primer parámetro se conoce como señal moduladora, esta incluye la información que queremos transmitir (audio, video y demás) y el segundo es la señal portadora la cual tiene como característica una frecuencia mayor comparada con la de la moduladora. La propiedad principal de este tipo de modulación analógico es la variación en amplitud de la onda portadora en función de las características implícitas en la señal moduladora, es decir que la amplitud en voltios de la portadora va a cambiar dependiendo de la forma de onda (amplitud) moduladora. En la Figura 4 podemos observar las señales que hacen parte del proceso de modulación y la señal modulada resultante.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 4 Señales de entrada y onda modulada AM



### **6.1.2 Modulación de frecuencia (FM – Frequency Modulation)**

La modulación de frecuencia se distingue por la alteración de la frecuencia sobre la onda portadora conforme al cambio de la señal moduladora. Los parámetros de entrada no cambian con respecto a la modulación de amplitud. Sin embargo, la salida es una onda de forma senoidal la cual cambia sus valores de frecuencia según sea la amplitud instantánea en un momento de tiempo determinado.

Como el cambio de la frecuencia en la señal modulada depende directamente de los cambios en amplitud de la onda moduladora sobre la portadora, se pueden establecer tres momentos en los cuales hay un cambio en frecuencia de la señal modulada, los cuales son.

- Semiciclo positivo.
- Cuando la señal moduladora está en amplitud cero.
- Semiciclo negativo.

Hay que tener en cuenta que el aumento que la señal moduladora produce en la frecuencia de la portadora se conoce como desviación de frecuencia y la desviación máxima de la frecuencia ocurren en los máximos de amplitud de la señal moduladora [8].

Cuando la señal moduladora inicia su semiciclo positivo, en la señal modulada FM se puede evidenciar un aumento en frecuencia hasta la desviación positiva máxima (es decir hasta el pico de amplitud máximo positivo de la señal moduladora), momento en el cual la señal alcanza su máxima frecuencia. Al pasar este punto la frecuencia inicia su descenso hasta llegar al segundo momento en el cual la amplitud de la onda moduladora alcanza el valor de cero. En este momento la señal modulada iguala la frecuencia central de la portadora. Por último, cuando el semiciclo negativo de la moduladora inicia se puede evidenciar un decrecimiento en la frecuencia de la señal modulada. Esta alcanza su menor valor en el pico mínimo de amplitud de la señal moduladora, es decir, en la desviación negativa mínima.

### **6.1.3 Modulación de Fase (PM – Phase Modulation)**

Como se ha podido observar en las distintas modulaciones análogas según la característica que se modifique de la portadora (amplitud y frecuencia) con respecto a la moduladora, la señal modulada va a verse de igual forma alterada. En el caso de la modulación de fase se debe modificar el mensaje original mediante una desviación de fase variante sobre la señal portadora con respecto a la moduladora. Aparentemente los cambios que se evidencian sobre la señal modulada pueden parecerse a los resultados obtenidos en la modulación FM, pero es en el espectro de frecuencia donde podremos verificar las características de la modulación sobre la fase.

## **6.2 Modulaciones Pulsadas**

En las modulaciones pulsadas se trabaja sobre una señal moduladora la cual es de carácter análogo y se pretende llevar a una sección de pulsos que se establecen según el orden del sistema. Es decir, dependiendo del sistema o modulación que se trabaje se pueden obtener varios niveles a los cuales la señal moduladora se va a trasladar para generar un tren de pulsos. Si trabajamos sobre  $2^n$  siendo  $n = 2$ , la señal modulada se podrá apreciar sobre cuatro niveles distintos de modulación o responderá a una sucesión distinta de pulsos. Se pretenden trabajar dos tipos de modulaciones: modulación por amplitud de pulsos (PAM- Pulse-Amplitude Modulation) y modulación por impulsos codificados (PCM- Pulse-Code Modulation). Se deben tener en cuenta para desarrollar este tipo de modulaciones factores como el teorema de Nyquist, de forma que se realice una captura coherente de los datos y de esta manera al demodular la información se pueda apreciar una recepción fiel de los elementos transmitidos. Los elementos transmitidos de forma análoga serán digitalizados sobre banda base [9].

### **6.2.1 Modulación por amplitud de pulsos (PAM)**

La modulación por amplitud de pulsos o PAM (Pulse-Amplitude Modulation) pretende tomar la señal de información y llevarla a un plano pulsado mediante el muestreo de la señal. La onda modulada resultante va a representar la forma en amplitud de la moduladora, teniendo en cuenta que la duración de los impulsos y la posición de los mismos será fija.

### **6.2.2 Modulación por impulsos codificados (PCM)**

En el caso de la modulación de impulsos modificados o PCM (Pulse-Code Modulation) es una conversión análogo-digital de una señal de información determinada. Para obtener una modulación PCM hay que desarrollar 3 pasos base:

1. Muestreo: Mediante el cual se obtienen datos analógicos sobre un tren de pulsos muestreado, es decir una modulación PAM.
2. Cuantificación: A partir de la señal descrita en pulsos, se aplican unos niveles de cuantización a los cuales donde se escalona la señal sobre criterios específicos para aplicar el último procedimiento y generar un mensaje en PCM.
3. Codificación: Una vez establecidos los niveles a utilizar en la señal, a cada uno de ellos se le asigna una palabra código según convenga. Por ejemplo, para una salida mayor a 7 voltios, suponiendo que es la máxima amplitud, le asignamos una palabra en código binario 111 y si es menor a 7 voltios, suponiendo que sea la mínima amplitud, hacemos lo mismo pero esta vez el código binario sería 000. Lo anterior para un código de 8 niveles, es decir sobre una base de  $2^3$  [9].

Según se defina la cuantización y la codificación del procedimiento, se van a obtener respuestas con mejor eficiencia y mayor fidelidad al mensaje original.

### 6.3 Modulaciones digitales

Para tratar los sistemas de modulaciones digitales, es necesario definir primero que nada el método de transmisión que se va a utilizar. Por un lado, existe la transmisión digital la cual consiste en la entrega de pulsos digitales en dos o más puntos en un sistema de comunicaciones. Mientras la radio digital consiste en la transmisión de portadoras análogas moduladas digitalmente entre dos o más puntos del sistema de comunicaciones. Para la transmisión digital es necesaria la implementación de un medio guiado de conexión (ya sea fibra óptica, cable coaxial o par trenzado) mientras en los sistemas digitales de radio es posible generar la transmisión sobre el espacio libre (ERE) además de los métodos de transmisión alámbricos [6]. En este proyecto se van a tratar los sistemas de radio digital para poder hacer uso del USRP N210 y transmitir de forma inalámbrica la información.

En la sección de modulaciones digitales se van a tratar los siguientes puntos.

- Amplitude Shift Keying (ASK) – Modulación por conmutación de amplitud.
- Frequency Shift Keying (FSK) – Modulación por conmutación de frecuencia.
- Phase Shift Keying (PSK) – Modulación por conmutación de fase.
- Quadrature Amplitude Modulation (QAM) – Modulación de amplitud en cuadratura.

Los factores que se alteran sobre los sistemas digitales en la señal modulada, responden directamente al nombre de la modulación aplicada. En estos casos la señal moduladora es de carácter digital, mientras la portadora es análoga y se produce un cambio sobre los elementos característicos de la onda senoidal. Tratando las dos últimas modulaciones (PSK y QAM) se pretenden obtener un desarrollo de constelaciones correspondiente a la M tratada en cada espacio. En el desarrollo teórico de cada modulación se tratarán a fondo los conceptos característicos de la misma y la forma en la cual se desarrolla la modificación de la señal modulada respecto a la moduladora.

## 7. CARACTERIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SOFTWARE Y HARDWARE

### 7.1 Radio definido por software USRP N210

El único hardware en el cual se realizarán las implementaciones del proyecto es en el USRP N210 (además de los equipos pc o laptop en los que se desarrolle la programación del equipo), el cual es el punto central del desarrollo del proyecto. La principal ventaja de este dispositivo es que permite implementar y diseñar sistemas de radio de software flexibles y potentes. Sus beneficios se despliegan sobre aplicaciones de alto desempeño sobre RF y gran ancho de banda, tales como acceso dinámico al espectro, monitoreo del espectro e incluso despliegue de redes de sensores [3]. En la Figura 5 se puede apreciar el dispositivo adquirido por la Universidad Santo Tomas, el cual será el objeto de estudio e implementación de las diferentes modulaciones planteadas.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 5 USRP N210 de Ettus Research

El dispositivo cuenta con interfaces que permiten la conexión con los mecanismos de programación que harán posible la variación y modificación de un equipo de hardware en el cual se programa una aplicación específica según sea la finalidad del usuario.

Cuenta con una interfaz gigabit ethernet en la cual se crea la interacción del USRP N210 con una laptop o pc compatible, también posee la conexión de potencia y capacidad MIMO (Multiple Input, Multiple Output) totalmente coherente. Además, cuenta con interfaces que permiten conectar antenas ya sea para transmisión o recepción de señales.

El dispositivo es compatible con los programas de software Simulink de Matlab, LabVIEW y GNU Radio en el sistema operativo Linux. Es posible observar en la parte frontal del equipo 6 leds que indican las siguientes características del equipo:

- Led A: El equipo está transmitiendo (TX).
- Led B: Indica si está conectado el cable MIMO.
- Led C: El equipo está recibiendo (RX).
- Led D: El firmware ha sido cargado.
- Led E: Reloj de referencia.
- Led F: CPLD (Complex Programmable Logic Device) está activo [10].

Sin embargo, no es el único equipo en el mercado que permite el tratamiento y desarrollo de radio definido por software (SDR en adelante). Equipos reconocidos de hardware que tienen como objeto desplegar sistemas sobre SDR, son: KUAR (Kansas University Agil Radio) [11], BEE2 (Berkeley Emulation Engine) [12] y WARP (Wireless Open-Access Research Platform) [13]. Sin embargo, el USRP ha sido el dispositivo de hardware más utilizado en el mundo de la investigación [14]. En la Tabla 3 podemos observar las diferentes características de radio frecuencia y ancho de banda de cada uno de los dispositivos que se han desarrollado para la implementación e investigación de SDR.

Las razones por las cuales el proyecto se implementa haciendo uso del equipo USRP N210, son su alcance en las bandas de radiofrecuencia mediante la adquisición de tarjeta hijas, las cuales permiten acceder a la mayor parte del ERE y por su versatilidad a la hora de implementar la configuración interna del equipo sobre diferentes aplicaciones reconocidas en el sector.

	USRP2	KUAR	WARP	BEE2
Ancho de banda RF (MHz)	100	30	40	64
Rango de frecuencia (GHz)	DC-5 (no continuo)	5.25-5.85	2.4-2.5 (4.9-5.87)	2.39-2.49
Arquitectura de procesamiento	FPGA	FPGA	FPGA	FPGA
Conectividad	Gigabit Ethernet	USB/Ethernet	Gigabit Ethernet	Ethernet
No. de antenas	2	2	4	18
Desempeño del ADC	400 Ms/s, 16 bit	105 Ms/s, 14 bit	125 Ms/s, 16 bit	64 Ms/s, 12 bit
Soporte de la comunidad	Si	No(extinto)	Si	No

Fuente: Tabassam, Kalsait y Suleman [15]

Tabla 3 Comparación de dispositivos para SDR

Se ha tratado el tema de SDR, pero ¿qué es en realidad esta tecnología? La Unión Internacional de Telecomunicaciones, máxima autoridad de regulación en el área de telecomunicaciones, definió el SDR o sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) como: “Un transmisor y/o receptor radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite fijar o modificar mediante programas informáticos los parámetros de funcionamiento de RF, incluidos, entre otros, la gama de frecuencias, el tipo de modulación o la potencia de salida, salvo los cambios de los

parámetros de funcionamiento que se producen durante el funcionamiento normal preinstalado y predeterminado de un sistema radioeléctrico con arreglo a una especificación del sistema o a una norma [16]”, para Jhoseph Mitola III un sistema de SDR consiste en “un conjunto de procesadores digitales de señal (DSP) primitivos, un sistema de nivel-meta para combinar los primitivos en funciones del sistema de comunicación (emisor, modelo de canal, receptor...) y un conjunto de procesadores de destino en el que se aloja el software de radio para comunicaciones en tiempo real [17]” y para el Wireless Innovation Forum en conjunto con la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) se define como “radio en el cual algunas o todas las funciones de la capa física son definidas por software [18]”. Contextualizando, es el cambio de hardware con un único propósito para promover el desarrollo de dispositivos capaces de soportar diferentes tipos de tecnologías de transmisión y recepción. Lo anterior se debe complementar con la capacidad de adquirir accesorios mediante los cuales se pueden acceder a distintas bandas de frecuencia y de esta forma hacer capaz al equipo para trabajar en varios campos con únicamente modificar su programación a nivel de software [19].

En principio, se planteó como un intento por mejorar el uso del ERE mediante el acceso oportuno al mismo [20]. Posterior a esto, se han desplegado proyectos para alcanzar la disponibilidad de las redes sobre la capacidad de programación de los equipos de radio software. En Alemania se desarrolló un proyecto para generar la medición en tiempo real de un radar OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) basado en SDR sobre un USRP [21], el sistema utiliza las características MIMO del equipo USRP, está desarrollado en Matlab, permite detectar objetos, medir el efecto Doppler y obtener imágenes de radar con una tasa de refrescamiento de 10 Hz [22].

Los beneficios de utilizar este tipo de tecnología se despliegan sobre tres actores fundamentales de la sociedad a nivel de radiocomunicaciones, los cuales son:

- Fabricantes de equipos de radio:



- Una familia de radio productos para ser implementada utilizando una plataforma de arquitectura común, que permita introducir rápidamente los nuevos productos al mercado.
- El software reduce los costos de desarrollo dramáticamente debido a la posibilidad de reusar el software a través de la familia de productos de radio.
- Proveedores de servicios de radio:
  - Nuevas características y capacidades que se pueden añadir a la infraestructura existente sin necesidad de una inversión mayor.
  - Utilizar una plataforma de radio de uso común para múltiples mercados.
- Usuario final:
  - Reducir costos al proveer a los usuarios finales con acceso a comunicaciones inalámbricas ubicuas, permite que estos se comuniquen con quien ellos necesiten, en el momento que necesiten y de cualquier forma es apropiado [23].

## 7.2 GNU Radio

Es una herramienta de software que provee bloques de procesamiento de señal para implementar radios sobre software. Es posible utilizarlo con hardware de bajo costo buscando implementar radios definidos por software y además tiene una interfaz que permite trabajar sin necesidad de hardware, en un ambiente de simulación.

La programación sobre la herramienta se puede realizar sobre Python o sobre C++ dependiendo de la aplicación y la robustez de la misma [24].

La principal característica de esta herramienta es que es software libre y en constante desarrollo por los usuarios, al mejor estilo de los sistemas operativos que se desplegaron sobre Linux.

En el diseño sobre la aplicación existen tres elementos generales que conforman el despliegue de un sistema de comunicaciones. Se resumen en fuentes, bloques de procesamiento de señal y sumideros. Las fuentes y sumideros se pueden tomar como

archivos, programas, hardware de radio, inputs, outputs y demás. Mientras los bloques de procesamiento de señal corresponden a filtros, amplificadores, moduladores, operadores matemáticos, operadores lógicos y demás bloques propios de la aplicación [25].

### **7.3 Matlab – Simulink**

Es una aplicación desarrollada por la compañía MathWorks la cual es una empresa líder en el área de software de computación matemática y por lo tanto se ha convertido en una de las herramientas más usadas por científicos e ingenieros alrededor del mundo [26]. Se pueden desarrollar múltiples aplicaciones sobre la herramienta, desde cálculos sencillos hasta complejos sistemas de código fuente en archivos y lenguaje de la herramienta. La herramienta que son relevantes para el desarrollo del proyecto sobre Matlab, es la interfaz de configuración de bloques de procesamiento Simulink. Se pueden encontrar librerías específicas para el desarrollo de programas ejecutables sobre el hardware USRP N210 adquirido por la universidad en SDR. Se pretende utilizar las interfaces de transmisión y recepción del equipo para lograr un sistema de comunicaciones completo y desarrollar todas las variables que se desprenden en el ejercicio.

## **8. INTRODUCCIÓN A GNU RADIO**

En este capítulo se plantea una introducción a las herramientas que debe tener y conocer cualquier persona que quiera hacer uso de las guías de laboratorio, las cuales son el objeto del desarrollo de este proyecto. En primera instancia se abarca la instalación y puesta en marcha del sistema operativo Ubuntu el cual es una distribución del sistema operativo Linux. Una vez el usuario tenga a disposición el sistema operativo Ubuntu se debe proceder con la instalación de los paquetes y dependencias necesarios para hacer uso de la aplicación GNU (GNURADIO-COMPANION), en este punto es preciso aclarar que la aplicación es software libre lo cual no sugiere ningún costo para la instalación o uso de sus múltiples aplicaciones. Normalmente cuando se realiza la instalación de la aplicación desde un terminal por comandos se obtiene una versión desactualizada, la cual no permite hacer uso de bloques y dispositivos hardware que se han desarrollado recientemente; por lo cual se incluye una guía para para descargar e instalar el software en una versión que permita implementar y ejecutar los laboratorios prácticos sin ningún problema.

### **8.1 Instalación de Ubuntu (14.04 o 16.04)**

Ubuntu es un sistema operativo (SO en adelante) de fuente abierta, lo cual quiere decir que no tiene costo descargarlo o utilizarlo y la gran mayoría de aplicaciones y software desarrollado para el mismo es de libre descarga y modificación. Ubuntu es una de las distribuciones más utilizadas de Linux debido que la interfaz de usuario (UI – User Interface) es amigable y no representa mayor dificultad para las personas que no han tenido experiencia sobre el uso del SO, además de ser uno de los más estables y con soporte de solución de problemas con personal certificado y usuarios alrededor del mundo. Cabe aclarar que la versión con la cual se desarrolló el proyecto fue la 16.04 LTS, por lo cual la guía y especificaciones están basadas sobre la versión mencionada. La versión 14.04 del SO Ubuntu también soporta el software que se requiere para implementar los laboratorios desarrollados en el documento y se deja a libre elección del usuario la instalación del mismo, lo cual

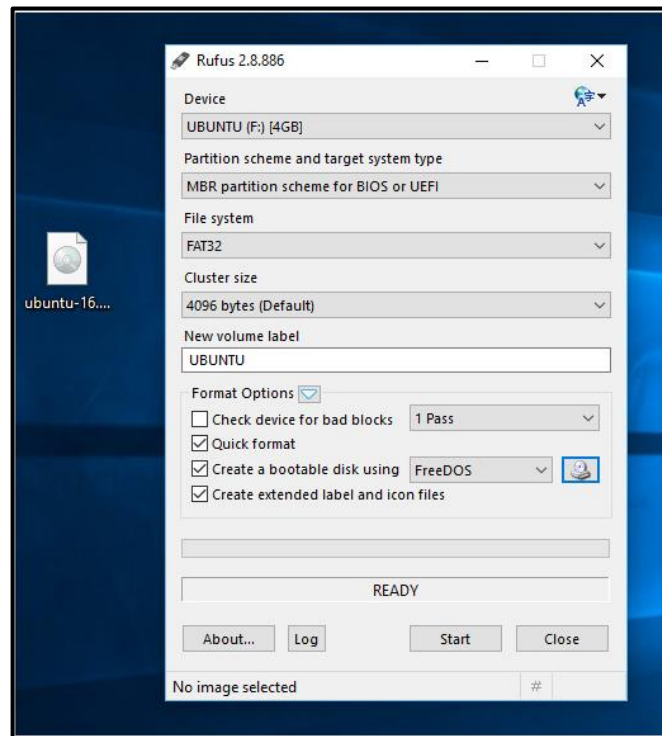
dependerá de las preferencias personales y tipo de equipo (Hardware) sobre el cual se pretende instalar.

El primer paso para realizar la instalación del SO Ubuntu, es acceder a la página oficial (<http://www.ubuntu.com/>) y realizar la descarga de la versión seleccionada, en este caso la 16.04. La descarga tomara un tiempo considerable y dependerá de la conexión a internet que tenga el usuario en el momento del desarrollo de la actividad, una vez finalizada se obtiene un archivo .ISO en el cual contiene una versión live del SO y la información para realizar la instalación del mismo de forma permanente. La versión live es utilizada para iniciar el SO desde un pendrive como un archivo ejecutable y así, hacer uso del mismo sin necesidad de instalarlo de forma permanente en el equipo. Se debe aclarar que cualquier tipo de modificación o software instalado al utilizar la versión live será eliminado una vez se reinicie el dispositivo en el que se esté trabajando, lo anterior debido a que el equipo guarda la información en la memoria RAM al trabajar desde la versión live. Después de realizar pruebas y estar satisfecho con el SO se puede realizar la instalación permanente.

Continuando con la instalación del SO, se debe convertir el archivo .ISO en un ejecutable; Para ello se puede usar cualquier herramienta que convierta archivos .ISO en ejecutables. En la página oficial se recomienda realizar la actividad con el software rufus. En la Figura 6 se puede apreciar la interfaz gráfica del software en ejecución y el procedimiento para obtener el ejecutable en el dispositivo pendrive.

Para realizar el procedimiento se deben modificar únicamente dos espacios de la herramienta, el primero de ellos es la opción **DEVICE** en donde se selecciona el dispositivo extraíble en donde queremos generar el ejecutable y el segundo es el recuadro que esta resaltado con color azul en la Figura 6, en el cual hay que seleccionar el archivo .ISO que descargamos previamente. Los demás espacios se deben dejar como aparece en la Figura 6 y aceptar cualquier dialogo que aparezca en pantalla una vez se inicie el procedimiento al ejecutar la aplicación. Por último, se aclara que el dispositivo pendrive en el que se realice el proceso será formateado

para poder instalar los archivos del SO, por lo cual se recomienda hacer un back up de la información o tener el dispositivo libre en el momento de realizar el proceso.



Fuente: Página web oficial de Ubuntu

Figura 6 Herramienta rufus en ejecución

Teniendo el ejecutable en el dispositivo extraíble se debe ejecutar para poder ingresar al nuevo SO. Para Windows 8.1 hay que seguir los siguientes pasos para iniciar el equipo desde una memoria extraíble:

1. Ingresar a las configuraciones del PC
2. Ingresar a la opción **Actualización y Recuperación**
3. Ingresar a la opción **Recuperación**
4. Seleccionar en la opción **Inicio Avanzado**
5. Seleccionar la opción para reiniciar desde un dispositivo USB.

Para completar este procedimiento el equipo de escritorio o portátil que se esté utilizando se reiniciará, pero esta vez no accederá directamente al kernel de Windows si no que ejecutara un grub (cargador de arranque) en el cual el usuario puede seleccionar desea iniciar.

Como se había mencionado anteriormente en el grub se puede encontrar la opción para utilizar la versión live del SO Ubuntu o para instalarlo permanentemente, queda a libre elección del usuario el procedimiento de prueba del SO para proceder con la instalación del mismo en su dispositivo. Una vez realizada la instalación de Ubuntu el usuario tiene la opción de fragmentar la unidad de disco duro en la cual pretende instalar el nuevo sistema o puede optar por que el SO asigne los espacios de memoria automáticamente. En este caso es recomendable que se asigne el espacio de memoria automáticamente debido a que los fines prácticos para los que se requiere la instalación del mismo no hacen necesaria la asignación de un espacio de memoria específico. Para complementar la instalación del sistema operativo solo se deben seguir las instrucciones del instalador y procurar estar conectado a una red inalámbrica o cableada de internet con el fin de adquirir los paquetes actualizados del SO.

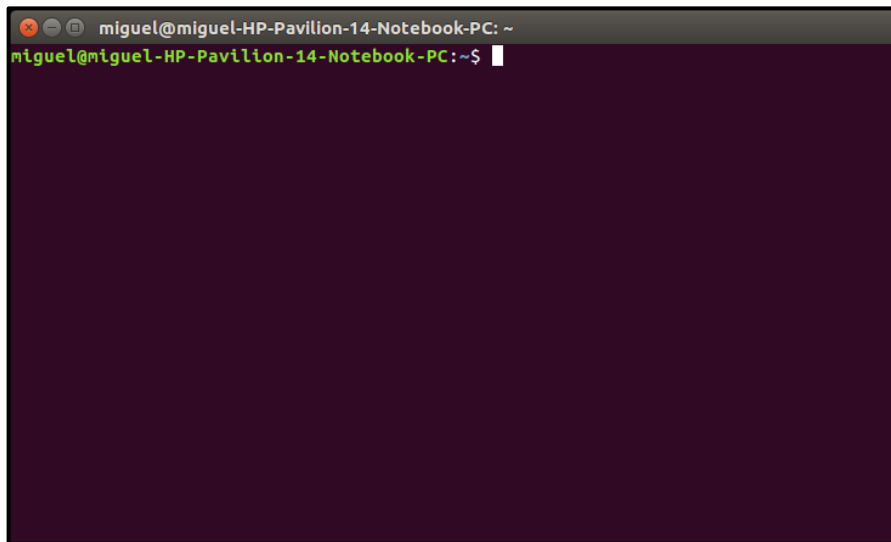
#### **8.1.1 Requerimientos del Sistema Recomendados**

Ubuntu es un SO estable y liviano que permite la instalación en casi todos los equipos actuales de escritorio o laptop, sin embargo, se recomienda que el dispositivo de hardware en el cual se pretende instalar tenga como mínimo las siguientes características:

- Procesador de 2GHz doble núcleo o mejor
- 2GB de memoria del sistema
- 25GB de espacio libre en el disco duro [27]

## 8.2 Instalación GNU RADIO

Como se ha mostrado a lo largo del documento, GNU RADIO es un software de diseño que permite implementar diagramas de bloques con los cuales se pueden visualizar sistemas de comunicaciones, operaciones aritméticas, respuesta en frecuencia de una señal y demás. Es necesario comprender algunos aspectos básicos del SO para proceder con la instalación de la aplicación, por lo tanto, se pone a disposición del usuario una breve introducción a lo que es el SO Ubuntu y algunos comandos rápidos que van a permitir hacer un buen uso del mismo. El terminal en Ubuntu es algo similar a la consola o CMD (Command Prompt) de Windows, en este podemos realizar un sin número de actividades como por ejemplo crear una carpeta, gestionar directorios, abrir una aplicación, descargar e instalar paquetes, modificar archivos y demás. Después de entender ligeramente que es el terminal de Ubuntu hay que tener claros algunos comandos básicos, los cuales permiten realizar actividades específicas sobre archivos, directorios, aplicaciones y demás.



Fuente: Avalo Miguel

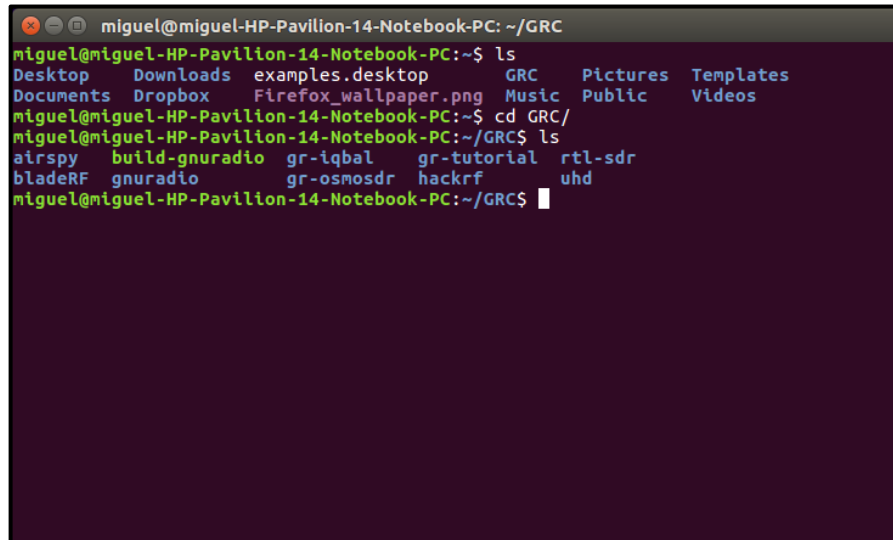
Figura 7 Terminal de Ubuntu

En la Figura 7 se puede observar el UI del terminal de Ubuntu. A continuación, se presentan los comandos básicos con una breve explicación del uso de los mismos:

- **mkdir:** Este comando permite crear una carpeta o directorio en la ruta que desee el usuario.
- **pwd:** Con este comando se puede verificar en que carpeta o directorio está ubicado el usuario y sus siglas responden a la frase en inglés 'Print Working Directory'.
- **cd:** Con el comando cd el usuario se puede desplazar entre carpetas. Es decir, permite ingresar a una carpeta o salir de la misma utilizando el comando. En la Figura 8 se puede observar un ejemplo en donde desde la carpeta Home se ingresa a la carpeta GRC utilizando el comando **cd GRC/**. El comando cd tiene tres variaciones que facilitaran el desplazamiento por los directorios del dispositivo, las cuales son:
  - o **cd directorio\_destino/** con este comando el usuario puede ingresar al directorio o carpeta seleccionado, en este caso directorio\_destino. En el caso de la Figura 8 a la carpeta GRC/.
  - o **cd ..** este comando permite regresar a la carpeta inmediatamente anterior.
  - o Si se ingresa el comando cd seguido de un espacio, el usuario será dirigido a la carpeta home o inicio del equipo.
- **ls:** El comando ls permite observar que información (carpetas, archivos, imágenes, etc) está ubicada en la carpeta en la cual se encuentra el usuario al momento de su ejecución. En la Figura 8 se observa que, al cambiar de directorio, la información de respuesta del comando ls cambia según los archivos que contenga la carpeta en la cual está ubicado el usuario.
- **sudo:** Este comando permite realizar procedimientos como súper usuario, algo similar al modo administrador de Windows. Procedimientos como instalar y actualizar paquetes, reiniciar el equipo o eliminar archivos del sistema deben estar precedidos por el comando sudo para poder ser ejecutados. Se debe aclarar que al ejecutar el comando el sistema solicitará la clave asignada al equipo para poder realizar el procedimiento. En la Figura



9 se puede observar como al ejecutar el comando el sistema solicita la clave de usuario para poder proceder.

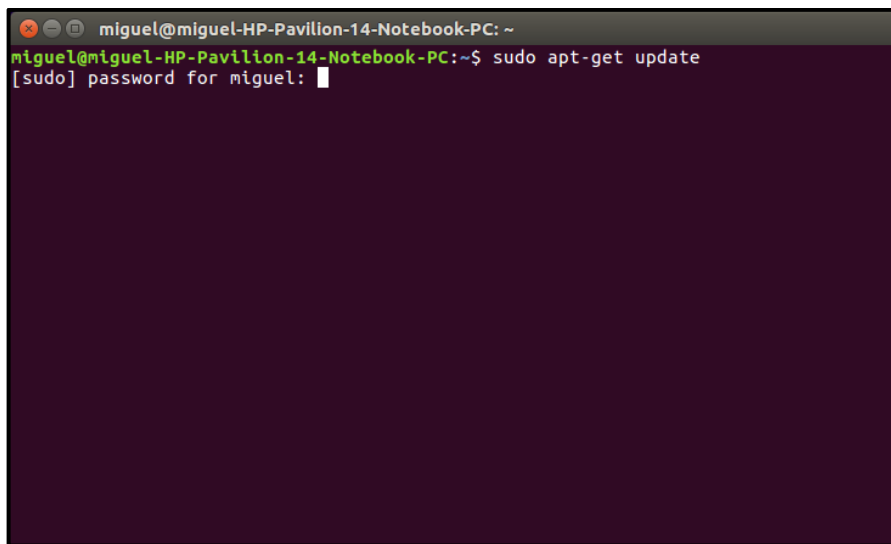
A terminal window with a dark purple background and light green text. The window title is 'miguel@miguel-HP-Pavilion-14-Notebook-PC: ~/GRC'. The terminal shows the following commands and output:  
1. Command: `ls`  
Output: `Desktop Downloads examples.desktop GRC Pictures Templates Documents Dropbox Firefox_wallpaper.png Music Public Videos`  
2. Command: `cd GRC/`  
3. Command: `ls`  
Output: `airspy build-gnuradio gr-iqbal gr-tutorial rtl-sdr bladeRF gnuradio gr-osmosdr hackrf uhd`  
The prompt is currently `miguel@miguel-HP-Pavilion-14-Notebook-PC:~/GRC$` with a cursor.

Fuente: Avalo Miguel

Figura 8 Ejemplo uso de comandos `cd` y `ls`

Estos comandos básicos van a permitir interactuar al usuario con el terminal, lo cual es necesario para generar la instalación del software GNU RADIO.

La instalación de GNU RADIO, según la página oficial, requiere únicamente de la ejecución de un comando sobre el terminal. Sin embargo, en ocasiones el directorio donde se pretende instalar el software puede presentar inconvenientes de dependencias “rotas” (broken dependencies), por lo cual la ejecución de los comandos no va a realizar la acción requerida. A continuación, se muestra una guía práctica de instalación para limpiar el directorio y reparar cualquier tipo de inconveniente que pueda presentar el mismo.

A terminal window with a dark purple background. The title bar shows 'miguel@miguel-HP-Pavilion-14-Notebook-PC: ~'. The prompt is 'miguel@miguel-HP-Pavilion-14-Notebook-PC:~\$'. The command 'sudo apt-get update' has been entered. Below it, the prompt '[sudo] password for miguel:' is shown with a white cursor character.

Fuente: Avalo Miguel

Figura 9 solicitud de clave para ejecutar comando súper usuario

1. Abrir el terminal de Ubuntu. (Ctrl + Shift + t)
2. Ingresar a la carpeta o directorio en donde se quieren instalar los paquetes o el software.
3. Ejecutar el comando  
\$sudo apt-get clean  
Este comando realizará la limpieza de la carpeta local en la cual se encuentra ubicado el usuario de los archivos empaquetados recuperados.
4. Ejecutar el comando  
\$sudo apt-get install -f  
El cual corrige dependencias rotas. El parámetro -f representa “fix broken”, traducido al español significa “reparar lo dañado.”
5. Ejecutar el comando  
\$sudo dpkg - -configure -a  
Con el cual se realiza la configuración de todos los paquetes (-a) que no han sido configurados, los que presentan problemas con la actualización o que tienen pendiente alguna instalación.
6. Por último, ejecutar el comando

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

El cuál es el comando para realizar las actualizaciones de los paquetes.

Una vez finalizado este procedimiento, se puede realizar la instalación del programa GNU RADIO mediante la ejecución del siguiente comando en el terminal:

```
$sudo apt-get install gnuradio
```

Al ejecutar este comando, el sistema iniciará con la descarga e instalación de la aplicación solicitada y al finalizar, se habrá instalado la versión 3.7.2. Con la versión mencionada se pueden realizar las actividades desarrolladas en el documento sin inconvenientes; sin embargo, el usuario puede instalar la versión 3.7.9.2 con la cual se pueden implementar más aplicaciones y cuenta con una amplia variedad de bloques de DSP. La instalación de esta versión se realiza mediante el comando que se muestra a continuación, se recomienda disponer de tiempo para la instalación ya que toma entre 2-3 horas dependiendo de la conexión a internet y las características del equipo en donde se instala.

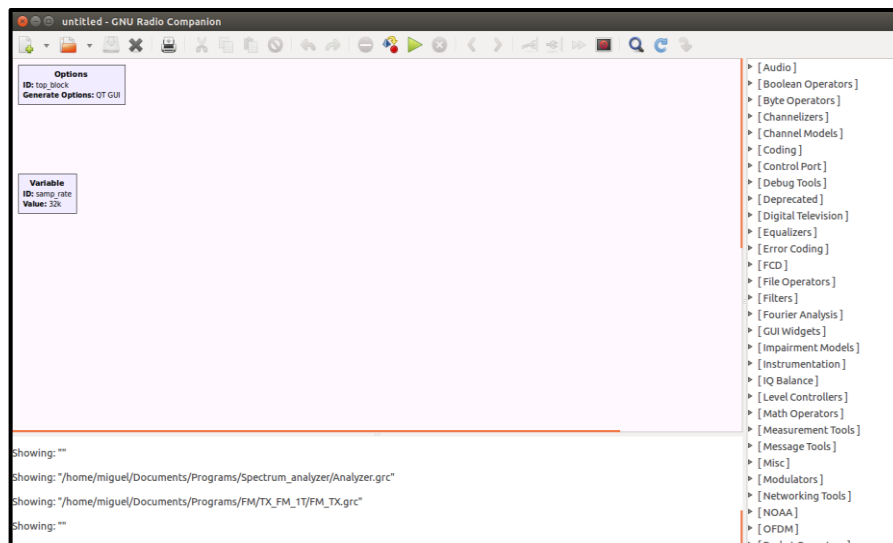
```
$sudo wget http://www.sbrac.org/files/build-gnuradio && chmod a+x ./build-gnuradio  
&& ./build-gnuradio
```

Se debe tener paciencia para realizar la instalación ya que el procedimiento toma tiempo. Finalizado el proceso, podemos ingresar al programa e iniciar el desarrollo de las actividades prácticas, las cuales son el objetivo final del proyecto.

### 8.3 Introducción a GNU Radio

Una vez instalado el software en el equipo se deben revisar varios aspectos básicos de la herramienta, esto con el fin de facilitar su uso y comprender la interfaz que se presenta al usuario. Para ejecutar la aplicación se debe abrir un terminal y ejecutar el comando:

`$ `gnuradio-companion``



Fuente: Avalo Miguel

Figura 10 UI (User Interface) de la aplicación GNU RADIO

Al realizar este procedimiento la aplicación iniciará como se puede ver en la Figura 10 la cual tiene una interfaz de diseño bastante similar a la herramienta simulink de Matlab. El sistema de trabajo sobre la herramienta es con el diseño de diagramas de bloques de DSP que permiten visualizar la respuesta de los mismos en los planos de frecuencia, tiempo y demás, según sea requerido por el usuario. A continuación, se informan detalladamente los elementos que hacen parte de la interfaz de usuario de la herramienta y la función que cumplen sobre la misma.

1. **Canvas:** El canvas es el área de construcción del diagrama de bloques.
2. **Lista de Bloques:** Sobre la parte derecha de la pantalla se encuentra la lista de bloques en la cual se pueden encontrar los elementos de DSP para

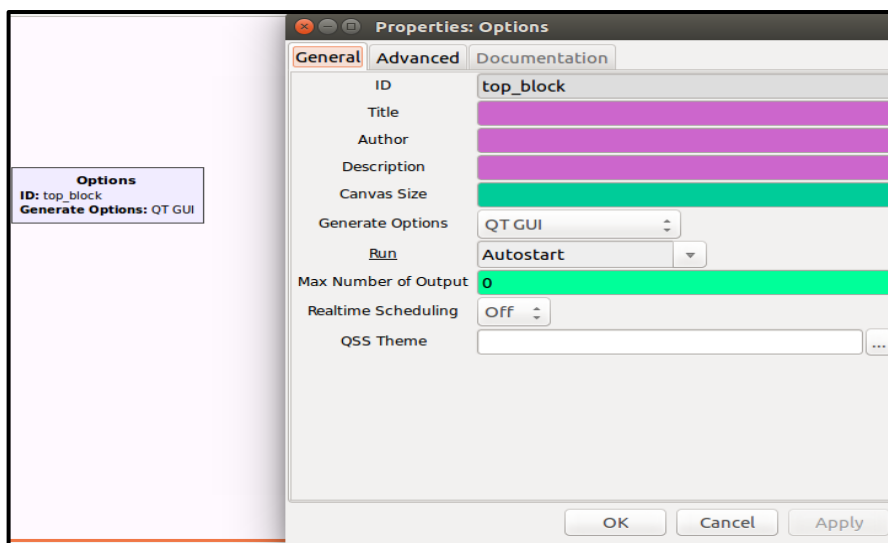
generar los diseños sobre él Canvas. Para buscar un bloque por nombre, se debe presionar CTRL + F.

3. **Ventana de registro:** Se encuentra en la parte inferior de la pantalla y es recomendable prestar atención a esta, ya que en ella se llevan los registros de las actividades realizadas (ejecución, detección de errores y demás).

Estos tres elementos componen la UI de la aplicación en la cual el usuario generará el desarrollo de proyectos y aplicaciones.

Continuando, se pueden identificar dos bloques que por defecto se encuentran en el canvas al iniciar cualquier proyecto. La función que cumplen y las opciones que se desprenden de los mismos se describen a continuación.

- **Bloque de opciones:** Es utilizado para establecer los parámetros globales del programa que se está ejecutando. En la Figura 11 se puede apreciar el bloque de opciones el cual presenta al usuario varias alternativas las cuales cumplen las siguientes funciones sobre el programa.

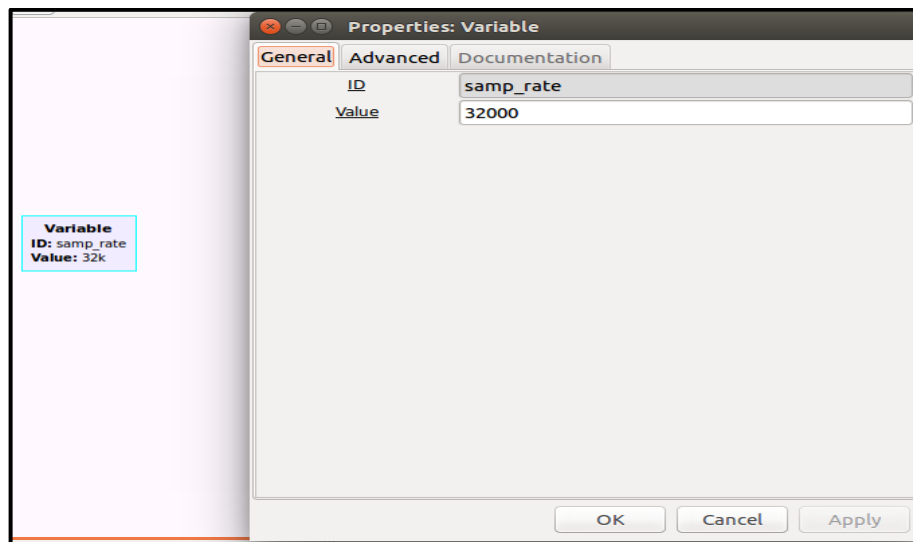


Fuente: Avalo Miguel

Figura 11 Ventana de configuración bloque de opciones

- **ID:** Este espacio determina el nombre del archivo Python generado, el cual es de libre modificación según la necesidad del usuario.

- **Title:** Corresponde al título del proyecto a realizar.
- **Author:** En este espacio se asignan los datos del autor o autores que desarrollaron el proyecto.
- **Description:** En esta opción se realiza una breve descripción del proyecto realizado.
- **Canvas Size:** En este punto se define el tamaño del canvas según el espacio necesario para implementar el diagrama de bloques.
- **Generate Options:** En este espacio se realiza una descripción más detallada de las opciones debido a que la selección influye en el tipo de código a generar. A continuación, se presentan las opciones y una breve descripción de cada una.
  - **WX GUI:** Utiliza la aplicación GUI (Graphical User Interface) con el conjunto de herramientas WX (Utiliza los bloques GUI WX)
  - **QT GUI:** Utiliza la aplicación GUI con el conjunto de herramientas QT (Utiliza los bloques GUI QT)
  - **No GUI:** Utiliza la aplicación de línea de comandos sin GUI (basada en texto, ejecución en consola)
  - **Hier Block:** Genera un bloque jerárquico el cual aparecerá en la lista de bloques (un componente reutilizable, no es una aplicación)
- **RUN:** Hace referencia a como iniciar y detener el diagrama de bloques.
- **Max Number of Output:** Limita el número de muestras a la salida por cada iteración de la función de trabajo de los bloques.
- **Realtime Scheduling:** Si el código se ejecuta como 'super usuario' (utilizando el comando sudo) se genera un requerimiento al núcleo del SO para dar prioridad al proceso.
- **Bloque Variable:** Es un bloque que contiene una expresión arbitraria en Python. Cada vez que se inicie un nuevo proyecto se generará un bloque con la variable 'samp\_rate' la cual define el tiempo de muestreo del proyecto.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 12 Ventana de configuración bloque Variable

En la Figura 12 podemos ver el bloque Variable y al detallar las propiedades del mismo encontramos:

**-ID:** Este espacio responde al nombre de la variable Python que se genera. El valor a introducir en este espacio es de libre elección del usuario. Se puede hacer referencia a esta variable en otro bloque mediante su ID, hacer esto genera que en el espacio en que se referencia a la variable (samp\_rate en este caso) sea asignado el valor de la misma en el bloque.

**-Value:** En este espacio se debe introducir el valor de la variable, el cual es arbitrario según la necesidad del usuario. Como se puede apreciar en la Figura 12, por defecto la variable 'samp\_rate' tiene el valor entero de '32000', lo cual también se puede expresar como un número de coma flotante '32e3' (32000.0) o se puede representar como la parte entera de un número de coma flotante 'int(32e3)'. También se puede ingresar en este espacio resultados de operaciones aritméticas como sumas, restas, multiplicaciones y divisiones (ej 10+ 15). Cabe recordar que como se mencionó anteriormente el valor asignado a la variable es arbitrario.

Para lograr un correcto desarrollo de la práctica se debe comprender cómo funciona la herramienta y el proceso mediante el cual se ejecutan los proyectos implementados, para esto se genera el programa 'Hola Mundo' de GRC el cual nos permite comprender el proceso de desarrollo y ejecución de un proyecto simple utilizando señales en banda base.

### **8.3.1 Señales Banda base**

Una señal banda base es aquella que ocupa el rango en frecuencia desde 0 Hz hasta determinado punto de corte, se les llama señales en banda base debido a que ocupan la base o el rango más bajo del espectro. Teniendo en cuenta lo anterior, una señal en banda base es toda aquella que se genera desde cualquier elemento que no modifica su frecuencia original (micrófono, generador de señales, audio y demás). Como ejemplo podemos decir que el espectro audible o los sonidos que puede escuchar el ser humano, se encuentran en el rango de 0 Hz a 20 KHz.

Para realizar la revisión del programa 'Hola Mundo' se tendrán en cuenta conceptos necesarios para la comprensión del uso apropiado de la herramienta y el procedimiento mediante el cual se genera la simulación sobre la misma. Lo primero que hay que tener claro, es que GRC hace uso de dos lenguajes de programación (C++ y Python), por medio de los cuales se realiza la ejecución de los diagramas de bloques implementados sobre el UI.

La implementación del proyecto 'Hola Mundo' consiste en un tono de marcación generado por la suma de dos señales en banda base, el cual podremos evidenciar sobre los dispositivos de audio del equipo utilizado y gráficamente sobre un plano de frecuencia. El primer paso para el desarrollo del proyecto es ingresar a la herramienta GRC, para ello se puede hacer doble click sobre el icono de la aplicación o digitar sobre el terminal el siguiente comando:

*\$gnuradio-companion*

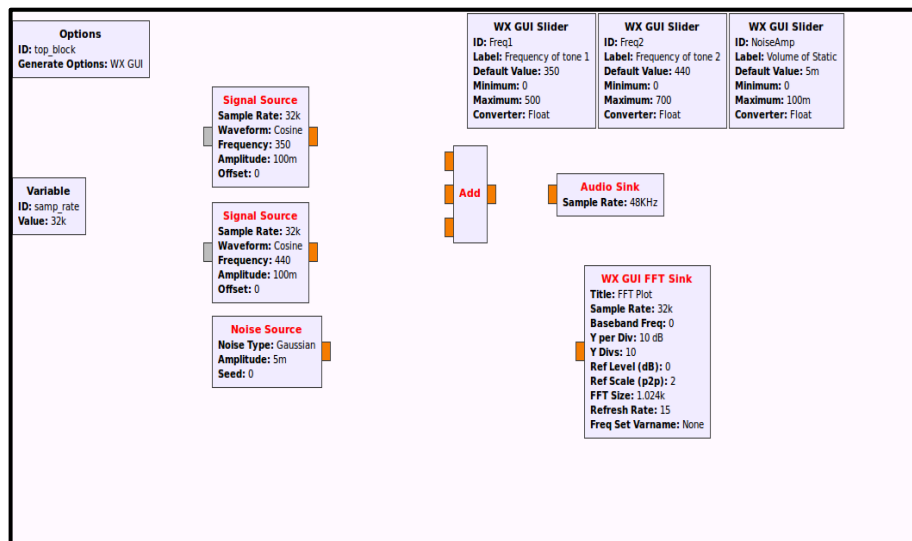
Al haber ingresado en la herramienta se pueden encontrar los tres elementos que componen el UI. Para implementar un bloque el usuario se debe dirigir a la lista de



bloques y ubicar el bloque que requiera o bien digitar el comando CTRL + F e ingresar el nombre del mismo. Para el desarrollo de la práctica se utilizarán los bloques relacionados a continuación.

- Signal Source
- Noise Source
- Add
- Audio Sink
- WX GUI FFT Sink
- WX GUI Slider

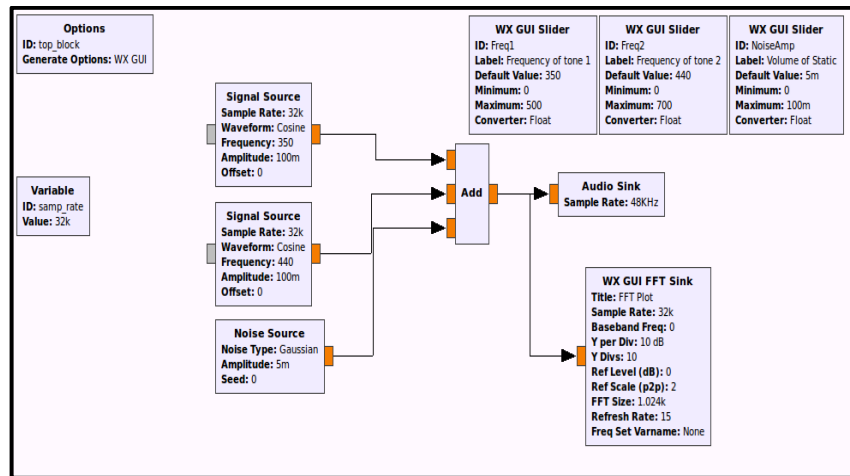
Los bloques que se utilizaran se deben ubicar como se muestra en la Figura 13.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 13 Diagrama de bloques programa 'Hola Mundo'

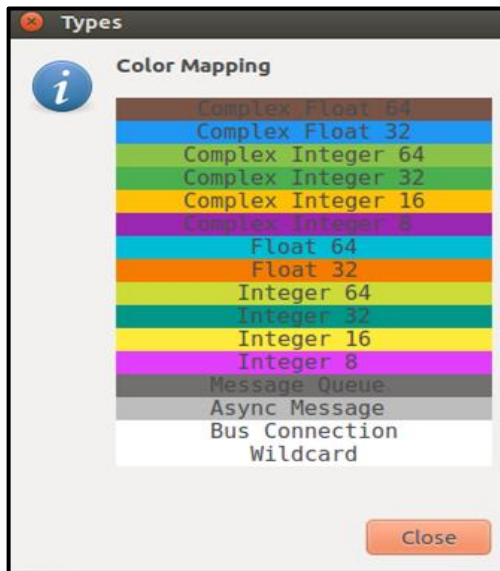
En este punto se deben revisar varios conceptos que facilitaran el trabajo sobre la aplicación. Uno de ellos es la conexión entre bloques, para lo cual Se debe seleccionar el puerto de salida del bloque 'fuente' y de igual forma en el puerto de entrada del bloque 'receptor'. Una vez conectado el diagrama se debe ver como la Figura 14.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 14 Diagrama de bloques programa 'Hola Mundo' conectado

Teniendo este diagrama, se pueden analizar nuevos conceptos de la herramienta. Por ejemplo, es posible observar que los puertos en todos los bloques son de color naranja, lo cual hace referencia a que los datos de salida y de entrada de los mismos son números de coma flotante. La herramienta maneja datos de tipo entero, coma flotante, complejos y demás, como se puede evidenciar en la Figura 15.



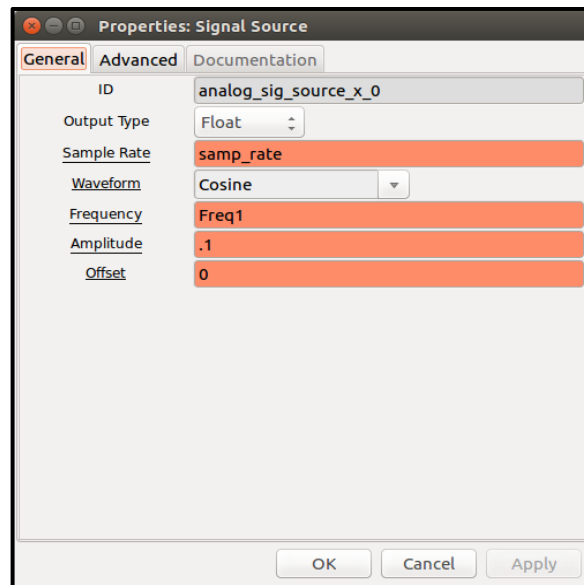
Fuente: Avalo Miguel

Figura 15 Tipos de datos usados en GNU-Radio

Dentro del software es posible ingresar a esta ventana dirigiéndose a la pestaña Help y seleccionando la opción Types. Se debe tener claro que dependiendo del bloque y el programa que se pretenda implementar, se hace necesario modificar el tipo de dato de salida o entrada de los bloques del diseño. A continuación, se realizará una introducción a la configuración y función de cada uno de los bloques implementados en el proyecto 'Hola\_Mundo'.

### Signal Source:

Con este bloque es posible generar señales senosoidales, cuadradas, triangulares, diente de sierra y constantes. Es posible ajustar arbitrariamente los parámetros de la señal generada como la frecuencia y la amplitud. En la Figura 16 se puede observar la ventana de opciones del bloque.

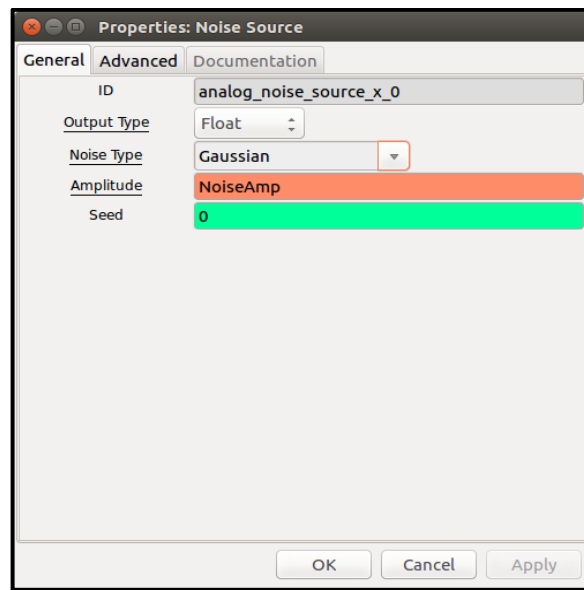


Fuente: Avalo Miguel

Figura 16 Ventana de configuración bloque Signal Source

### Noise Sorce:

Como su nombre lo indica es un generador de ruido en el cual se varia el tipo de ruido (Gaussiano, laplaciano, constante y demas) y la amplitud del mismo. En la Figura 17 se observa la ventana de opciones de modificación del bloque.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 17 Ventana de configuración bloque Noise Source

### **Add:**

Este bloque corresponde a la operación aritmética suma, en la cual varia el número de entradas que se quieren sumar.

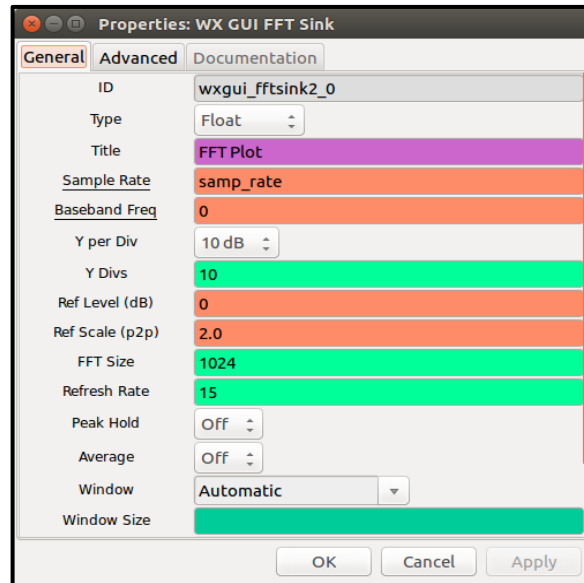
### **Audio Sink:**

Corresponde al bloque que asigna la salida del sistema a la tarjeta de audio del equipo, en el bloque es posible variar el número de entradas y la frecuencia de muestreo. La mayoría de tarjeta de sonidos funciona a 48 Khz por lo cual se debe modificar el valor por defecto de bloque al valor mencionado.

### **WX GUI FFT Sink:**

Este bloque pertenece al conjunto de herramientas WX GUI por lo cual para poder ejecutar la simulación es necesario seleccionar la opción WX GUI en el bloque de Opciones. Cumple la función de mostrar gráficamente la respuesta en frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier (FFT). En el bloque se pueden variar características como la frecuencia de muestreo, el tamaño de la ventana que se

quiere analizar, frecuencia de banda base y demás. Por el momento no es necesario modificar el bloque y solo se debe asignar el tipo de dato de ingreso al bloque como de coma flotante. En la Figura 18 se puede observar la ventana de configuración del bloque.



Fuente: Avalo Miguel

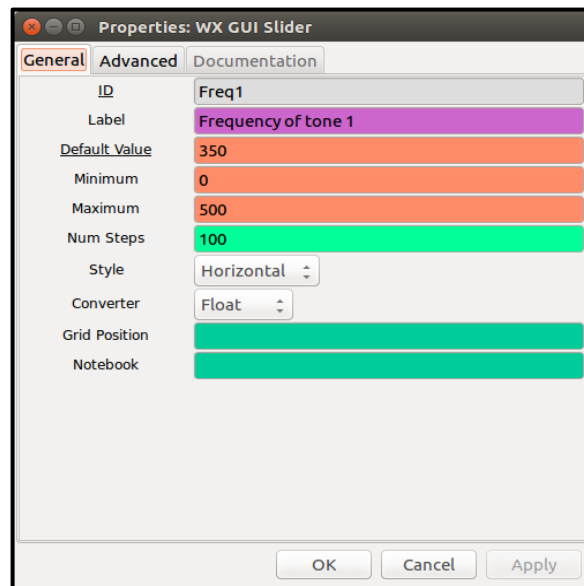
Figura 18 Ventana de configuración bloque WX GUI FFT SINK

### WX GUI Slider:

Este bloque permite generar una variable que varía en tiempo real sobre la simulación del sistema implementado. En la Figura 19 se pueden observar las opciones de configuración del bloque. El ID corresponde al nombre de la variable que se asignará al bloque, el cual se debe insertar en el espacio del bloque que hará uso de la variable generada; es posible modificar también el valor inicial de la variable, valor máximo, valor mínimo y el número de datos que se quieren en el intervalo.

A continuación, se hará un breve resumen de los bloques y datos que se deben implementar en la herramienta para generar el programa 'Hola Mundo'.

- **Signal Source 1:** Frecuencia central Freq1 (Variable Slider ID) y amplitud 0.1.
- **Signal Source 2:** Frecuencia central Freq2 (Variable Slider ID) y amplitud 0.1.
- **Noise Source:** Tipo Gaussiano y amplitud NoiseAmp (Variable Slider ID).
- **Audio Sink:** Frecuencia de muestreo de 48 Khz.
- **WX GUI SLIDER 1:** ID Freq1, Default Value 350, Valor Mínimo 0, Valor Máximo 500.
- **WX GUI SLIDER 2:** ID Freq2, Default Value 440, Valor Mínimo 0, Valor Máximo 700.
- **WX GUI SLIDER 3:** ID NoiseAmp, Default Value 0.005, Valor Mínimo 0, Valor Máximo 0.1.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 19 Ventana de configuración bloque WC GUI SLIDER

Al finalizar la implementación del programa se debe ejecutar el mismo para lo cual se solicitará una carpeta en la cual la información del proyecto será guardada. Al finalizar el procedimiento de ejecución del programa se obtienen los siguientes resultados en la carpeta destino donde se decidió guardar el proyecto:

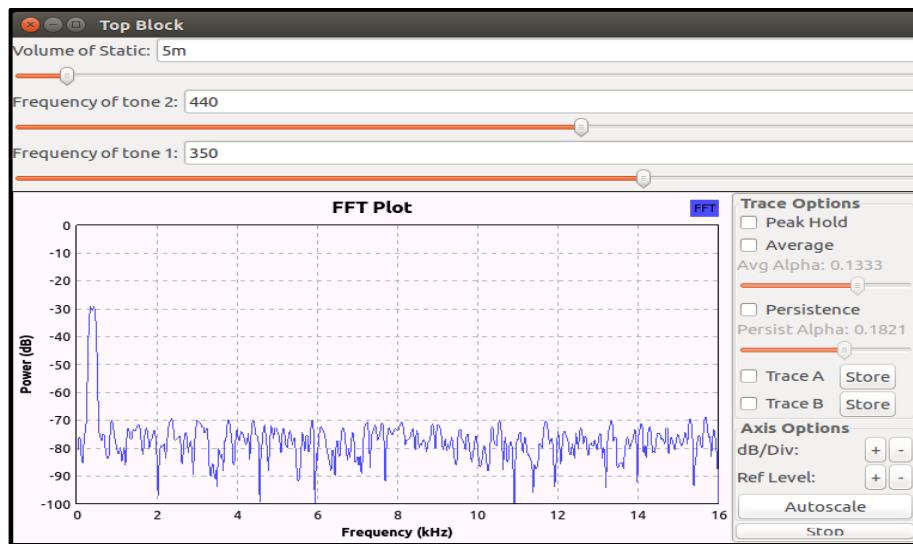
- El nombre del archivo ejecutable en gnuradio o diagrama de bloques (archivo.grc)
- Archivo de python (top\_block.py). El nombre del archivo puede variar según la configuración del usuario.

Para ejecutar el programa existen dos opciones, la primera es la forma convencional en donde es diseñado el diagrama de bloques y generado el archivo python por medio de la ejecución del mismo y, la segunda es ejecutar el programa por medio del terminal mediante la herramienta phyton. Para ello es necesario tener el archivo python (.py) generado y el usuario debe estar ubicado en la carpeta en la cual se encuentra el mismo; Después de lo cual se debe ejecutar el siguiente comando en la terminal:

*\$ python archivo.py*

Al ingresar el comando se inicia la ejecución del proyecto desde phyton, pero respuesta se genera tal y como si se estuviera realizando desde la interfaz gráfica de la herramienta GNU-RADIO.

Al analizar el resultado de la implementación realizada (Figura 20) se encuentran tres barras horizontales sobre la ventana, estas son el resultado de la implementación de una variable de carácter slider la cual variará según la configuración realizada en el bloque. También es posible observar una gráfica, la cual es la respuesta en el dominio de la frecuencia del diagrama implementado la cual es generada mediante el bloque WX GUI FFT SINK. En la parte derecha de la pantalla se observan los mecanismos de escala y análisis que permiten modificar la gráfica o el segmento a analizar sobre la gráfica.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 20 Respuesta en frecuencia del programa 'Hola Mundo'

Al realizar la ejecución del programa el usuario debe apreciar que además de obtener las respuestas analizadas en la Figura 20 también se podrá escuchar un tono de marcación que responde a la suma de las frecuencias de las señales, el cual tiene un piso de ruido que varía según la amplitud seleccionada por el usuario. El resultado gráfico de la práctica es el diagrama FFT en el cual se encuentra un pico que corresponde a la suma de las señales realizada. Las variaciones realizadas sobre el esquema se pueden apreciar en tiempo real, por lo cual al modificar las frecuencias de las señales varía la respuesta gráfica de la implementación.



## **9. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE MODULACIONES ANALOGAS Y DIGITALES EN GNU RADIO**

Interpretando lo expuesto en el capítulo 6, la modulación es el sistema por el cual se transmite información mediante una señal portadora de alta frecuencia, esta es modificada según el contenido característico del mensaje que se desea transmitir.

En este capítulo se hará una apreciación más detallada acerca de las modulaciones a desarrollar en este proyecto para así, comprender el modelo matemático que permita implementar un diagrama de bloques y de esta manera, obtener resultados prácticos soportados sobre bases teóricas.

### **9.1 Modulaciones análogas**

Para continuar con el desarrollo del proyecto a nivel práctico, compete al usuario comprender el proceso mediante el cual una señal de carácter senoidal cambia sus características a través del sistema de modulación para ser recibida nuevamente al finalizar el proceso, de tal forma que el receptor del mensaje la perciba tal y como fue enviada originalmente. A continuación, se realiza el desarrollo teórico mediante el cual se obtienen las modulaciones de carácter análogo, lo cual en última instancia permite generar los modelos prácticos sobre la herramienta GNU RADIO.

#### **9.1.1 Modulación de Amplitud**

Se inicia el análisis de la modulación sobre la Ecuación 1, la cual se relacionará nuevamente a continuación.

$$v(t) = V \cos(2\pi ft + \theta)$$

Las modulaciones análogas se desarrollan haciendo uso de dos señales principales, la de información y la portadora. Por consiguiente, la modulación AM produce el cambio en amplitud de la señal portadora con respecto a la señal de información. Teniendo en cuenta lo anterior, se muestra el proceso matemático mediante el cual se genera la ecuación de una señal AM para todo tiempo  $t$ . Se

considera la fase  $\theta = 0$ , debido a que la modulación altera los valores de amplitud de las expresiones y el cambio de la fase es indiferente para el desarrollo del procedimiento de modulación por amplitud. Entonces, siendo:

$$v_c(t) = V_c \sin(2\pi f_c t)$$

Ecuación 2 Ecuación senoidal de una señal portadora

La ecuación para la señal portadora y:

$$v_m(t) = V_m \sin(2\pi f_m t)$$

Ecuación 3 Ecuación senoidal de una señal de información

La ecuación para la señal de información; la señal modulada en amplitud será el resultado del valor pico de la señal portadora en adición al valor instantáneo de la señal de información. Entonces se tiene:

$$v_{AM}(t) = (V_c + v_m(t)) \sin(2\pi f_c t)$$

$$v_{AM}(t) = (V_c + V_m \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_c t)$$

$$v_{AM}(t) = V_c \left( 1 + \frac{V_m}{V_c} \sin(2\pi f_m t) \right) \sin(2\pi f_c t)$$

Ecuación 4 Ecuación inicial para una señal AM

De la Ecuación 4 se puede determinar el índice de modulación, el cual se denota como sigue:

$$m = \frac{V_m}{V_c}$$

Ecuación 5 Ecuación de índice de modulación AM

La respuesta de la modulación AM depende directamente del índice de modulación  $m$  el cual puede tomar valores de 0 hasta 1 para tener una respuesta coherente que permita transmitir la información, sin embargo a continuación se muestran los posibles casos que se pueden presentar al transmitir una señal a través de un sistema de modulación por amplitud:

- $m = 0$  Ausencia de modulación.

- $m \leq 1$  Modulación coherente AM, con máximo valor de una unidad (100%),
- $m > 1$  Sobre modulación AM.

Teniendo en cuenta lo anterior y remplazando  $m$  en la Ecuación 4:

$$v_{AM}(t) = V_c(1 + m \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_c t)$$

$$v_{AM}(t) = (V_c + V_c m \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_c t)$$

$$v_{AM}(t) = V_c \sin(2\pi f_c t) + V_c m \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_c t)$$

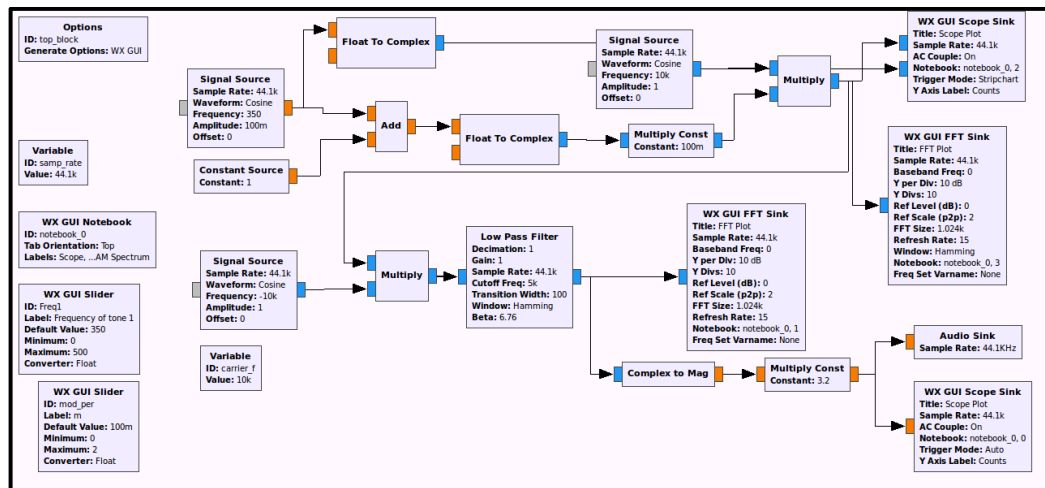
$$v_{AM}(t) = V_c \sin(2\pi f_c t) + \frac{V_c m}{2} \cos[2\pi(f_c - f_m)t] - \frac{V_c m}{2} \cos[2\pi(f_c + f_m)t]$$

Fuente: Tomasi, Wayne [6]

Ecuación 6 Ecuación para una señal AM en todo tiempo  $t$

### 9.1.1.1 Implementación en GNU RADIO

A partir del análisis desarrollado previamente se realiza el diseño e implementación del diagrama de bloques construido sobre la herramienta, el cual se puede observar en la Figura 21.



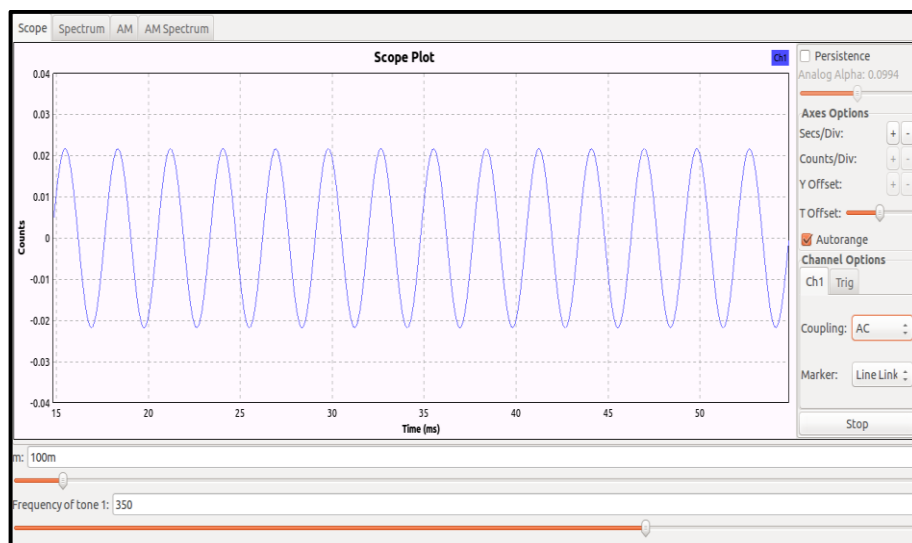
Fuente: Avalo Miguel

Figura 21 Diagrama de bloques modulación AM

Para realizar el análisis práctico se hace una breve recopilación de los elementos más relevantes implementados en el diagrama, como sigue:

- **Dos Signal Source:** Una señal para simular el mensaje ( $v_m$ ) y una para simular la portadora ( $v_c$ ).
- **Un Slider:** Para verificar en tiempo real el índice de modulación AM.
- **Un Slider:** Para modificar la frecuencia de la señal  $v_m$ .

En primera medida se debe verificar el mensaje que se pretende transmitir a través del sistema, por tanto, en la Figura 22 se muestra la señal obtenida de un tono con frecuencia de  $f = 350 \text{ KHz}$ .



Fuente: Avalo Miguel

Figura 22 Señal de información  $v_m$  en GNU RADIO

Al tener claros los parámetros de la señal que se quiere transmitir, se realiza un análisis de la modulación AM teniendo en cuenta las características de amplitud determinadas para la señal de información y portadora. A continuación, se relacionan en la Tabla 4 los valores trabajados en el análisis práctico sobre la herramienta con el propósito de verificar la respuesta del sistema según la variación del parámetro  $m$ .

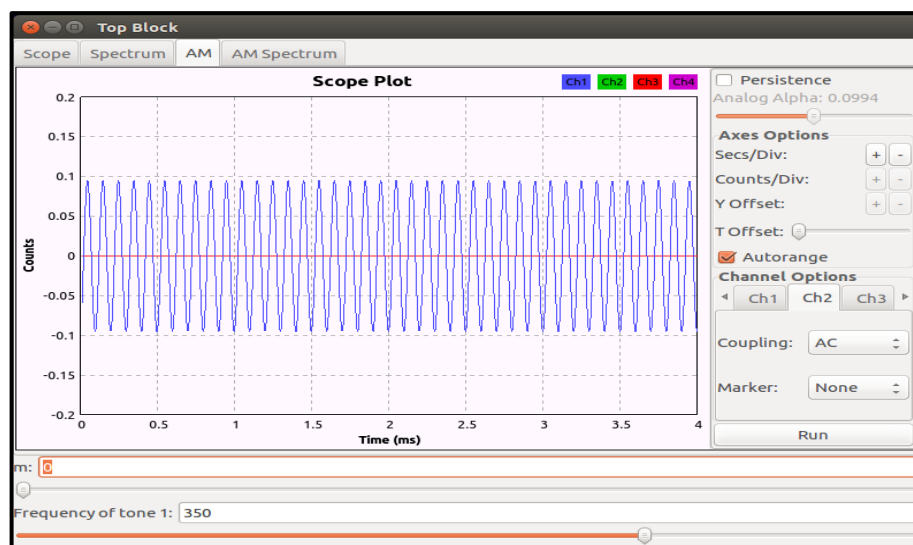
Se puede evidenciar que se tratan valores para  $m$  los cuales se encuentran entre los rangos, que permiten identificar los posibles resultados del sistema en cuanto a

la señal AM generada. Las señales obtenidas se pueden observar en la Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 26.

$v_m(V)$	$v_c(V)$	$m\left(\frac{v_m}{v_c}\right)$	% <i>modulación</i>
0	1	0	0
0.7	1	0.7	70
1	1	1	100
1.3	1	1.3	130

Fuente: Avalo Miguel

Tabla 4 Valores para el índice de modulación AM

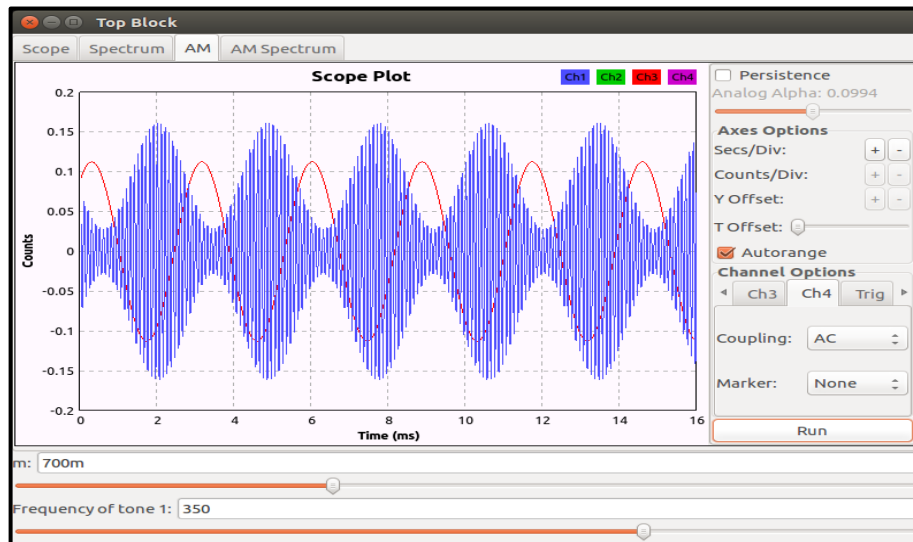


Fuente: Avalo Miguel

Figura 23 Ausencia de modulación AM

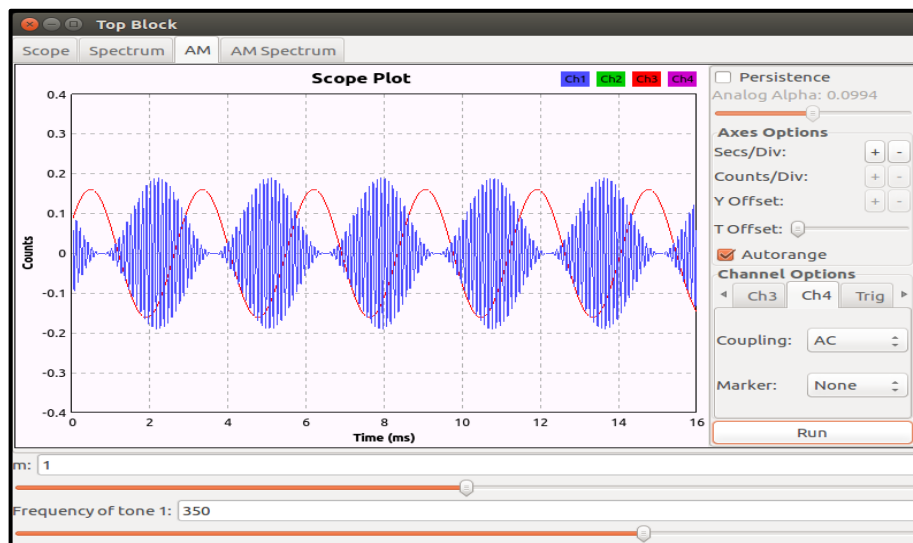
Se puede apreciar en las imágenes dos señales, una de color azul (AM) y una de color rojo (señal de información). Es notable que la respuesta de la modulación se encuentra desfasada según la respuesta esperada del sistema en la que, al alcanzar la señal de información a su máxima amplitud negativa ( $-V_m$ ) se esperaría que la amplitud de la señal AM tuviera su pico mínimo, lo anterior se ocasiona debido a

que los bloques implementados en el diagrama adicionan un retraso en la señal (delay).



Fuente: Avalo Miguel

Figura 24 Modulación coherente AM

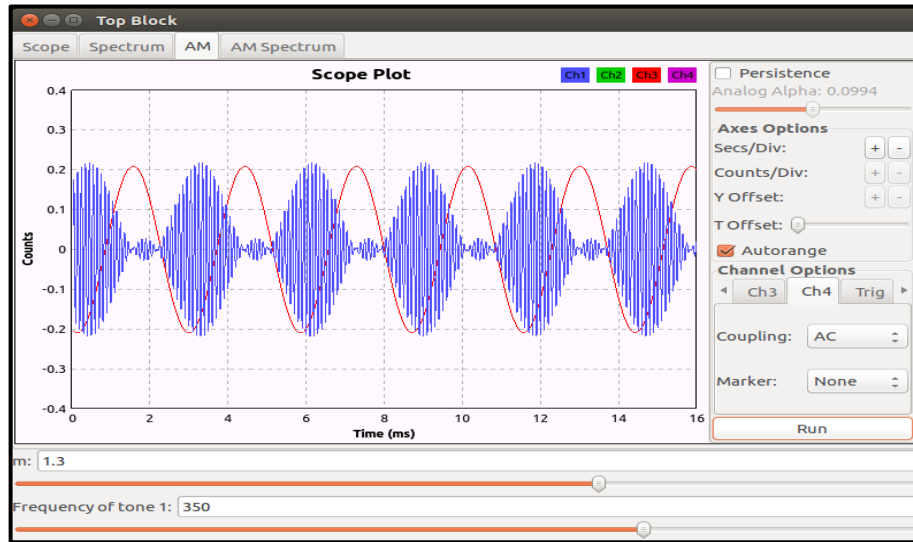


Fuente: Avalo Miguel

Figura 25 Máximo nivel de modulación AM

El sistema implementado muestra como resultado el mensaje de información enviado  $v_m$  en un plano de amplitud Vs tiempo y adicionalmente se puede percibir

la respuesta a nivel auditivo mediante el hardware del equipo en el cual se implementa el sistema.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 26 Sobremodulación AM

Se debe informar adicionalmente que debido a las frecuencias soportadas en los equipos USRP N210 no es posible realizar una implementación que permita la transmisión real sobre el ERE de la señal de información.

### 9.1.2 Modulación de Frecuencia

El modelo matemático de la modulación por frecuencia se describe a continuación:

$$v_{FM}(t) = V_c \cos[2\pi f_c t + \beta \sin 2\pi f_m t]$$

$$v_{FM}(t) = V_c \cos[\omega_c t + \beta \sin \omega_m t]$$

Al expandir el coseno de la ecuación, se obtiene:

$$v_{FM}(t) = V_c \cos(\omega_c t) \cos(\beta \sin \omega_m t) - V_c \sin(\omega_c t) \sin(\beta \sin \omega_m t)$$

Ecuación 7 Consideración inicial para una onda senoidal modulada en FM

En donde:

$$\cos(\beta \sin \omega_m t) = J_0(\beta) + \sum_{2n}^{\infty} 2J_{2n}(\beta) \cos(n\omega_m t) \text{ para } n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Ecuación 8 Coeficientes de Bessel para la sumatoria coseno

$$\sin(\beta \cos \omega_m t) = \sum_{2n-1}^{\infty} 2J_{2n-1}(\beta) \sin(n\omega_m t) \text{ para } n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Ecuación 9 Coeficientes de Bessel para la sumatoria seno

Se determinan los coeficientes de Bessel de primer orden como  $J_n(\beta)$ , con argumento  $\beta$ , el cual corresponde al índice de modulación de frecuencia.

Reemplazando los elementos descritos en la Ecuación 8 y Ecuación 9 en la Ecuación 7, se obtiene:

$$v_{FM}(t) = V_c \cos(\omega_c t) \left[ J_0(\beta) + \sum_{2n}^{\infty} 2J_{2n}(\beta) \cos(n\omega_m t) \right] - V_c \sin(\omega_c t) \left[ \sum_{2n-1}^{\infty} 2J_{2n-1}(\beta) \sin(n\omega_m t) \right]$$

Ecuación 10 Ecuación para una señal modulada en FM teniendo en cuenta los coeficientes de Bessel

Considerando las siguientes propiedades trigonométricas:

$$\cos(\alpha) \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

$$\sin(\alpha) \sin(\beta) = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

Ecuación 11 Identidades trigonométricas de producto para seno y coseno

Desarrollando la Ecuación 10 teniendo en cuenta las identidades de la Ecuación 11,

$$v_{FM}(t) = V_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) + \sum_{2n}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cos(n\omega_c t) + \sum_{2n-1}^{\infty} V_c J_{2n-1}(\beta) \cos(\omega_c - (2n-1)\omega_c)t \\ - V_c J_{2n-1}(\beta) \cos(\omega_c + (2n-1)\omega_c)t$$

Ecuación 12 Ecuación para una señal modulada en FM desarrollando las identidades trigonométricas de producto

Solucionando la sumatoria en algunos de sus componentes, se tiene:



$$\begin{aligned}
v_{FM}(t) = & V_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) + V_c J_2(\beta) \cos(\omega_c - 2\omega_m)t + V_c J_2 \cos(\omega_c + 2\omega_m)t \\
& + V_c J_4(\beta) \cos(\omega_c - 4\omega_m)t + V_c J_4(\beta) \cos(\omega_c + 4\omega_m)t + \dots \\
& - V_c J_1 \cos(\omega_c - \omega_m)t - V_c J_1(\beta) \cos(\omega_c + \omega_m)t + V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c - 3\omega_m)t \\
& - V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c + 3\omega_m)t - \dots
\end{aligned}$$

Ecuación 13 Ecuación para una señal modulada en FM evaluando algunos componentes de la sumatoria  
Organizando la expresión.

$$\begin{aligned}
v_{FM}(t) = & V_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) + V_c J_1 \cos(\omega_c + \omega_m)t + V_c J_2 \cos(\omega_c + 2\omega_m)t \\
& + V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c + 3\omega_m)t + \dots - V_c J_1 \cos(\omega_c - \omega_m)t \\
& - (-1)V_c J_2(\beta) \cos(\omega_c - 2\omega_m)t - V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c - 3\omega_m)t \\
& - (-1)V_c J_4(\beta) \cos(\omega_c - 4\omega_m)t + \dots
\end{aligned}$$

Ecuación 14 Ecuación para una señal modulada en FM organizando los elementos obtenidos  
Finalmente se obtiene una expresión general para todo tiempo t, en FM:

$$v_{FM} = V_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) + \sum_{n=1}^{\infty} V_c(\beta) \cos(\omega_c + n\omega_m)t + (-1)^n \sum_{n=1}^{\infty} V_c J(\beta) \cos(\omega_c - n\omega_m)t$$

Fuente: Espinosa, Díaz [28]

Ecuación 15 Ecuación final para una señal modulada en FM en todo tiempo t

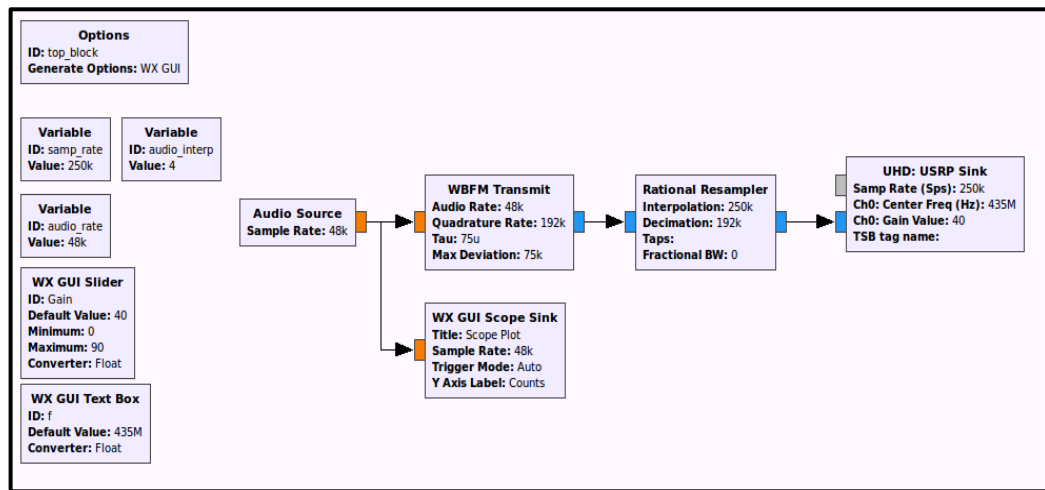
### 9.1.2.1 Implementación en GNU RADIO

El desarrollo del modelo de modulación de frecuencia sobre la herramienta GNU RADIO permite realizar la transmisión en tiempo real de la señal de información, señales de audio en este caso particular, logrando la recepción desde cualquier equipo demodulador FM.

El diagrama de bloques de la práctica realizada para la modulación en FM se divide en dos partes principales, las cuales son, el diagrama de transmisión (modulador) y diagrama de recepción (demodulador). A continuación, se tratan los diseños de transmisión y recepción sobre señal modulada en frecuencia.

### 9.1.2.2 Transmisor FM

El transmisor FM, permite tomar en tiempo real una señal de audio mediante el hardware del equipo en el cual se está implementando la práctica y transmitirla sobre el ERE en la frecuencia seleccionada por el usuario; siempre y cuando la frecuencia este comprendida en el rango de frecuencia soportado por los equipos Ettus. El esquema implementado se observa a continuación:



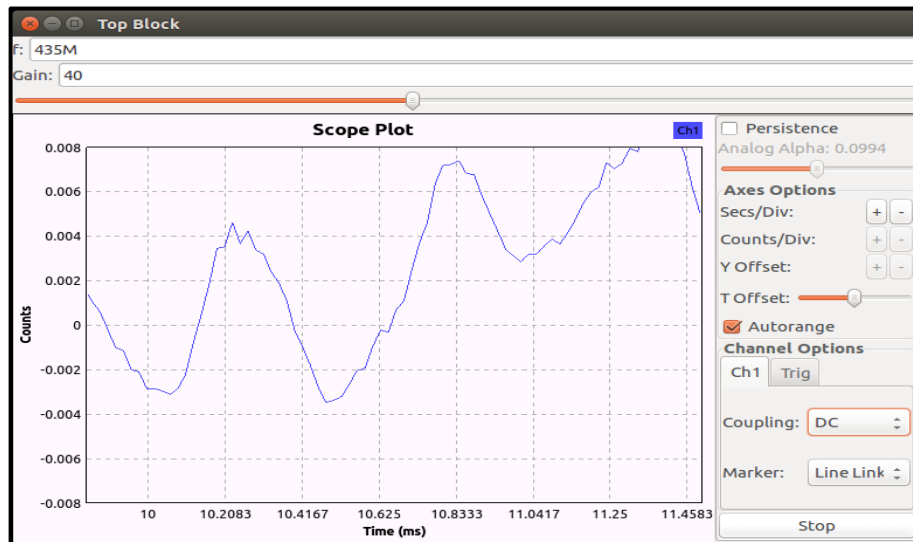
Fuente: Avalo Miguel

Figura 27 Diagrama de bloques TX FM

En este punto se hace uso de los equipos USRP N210 mediante la integración del bloque **UHD: USRP Sink**, el cual se encarga de tomar la información generada en el diagrama de bloques y emitirla sobre el ERE. Hay que tener en cuenta que, para poder hacer uso de los dispositivos de radio definido por software es necesario que estos estén conectados al equipo en el cual se está realizando la practica mediante conexión Gigaethernet y además se debe modificar la dirección ip del mismo para lograr una conexión punto a punto. El diagrama de bloques de transmisión se puede observar en la Figura 27.

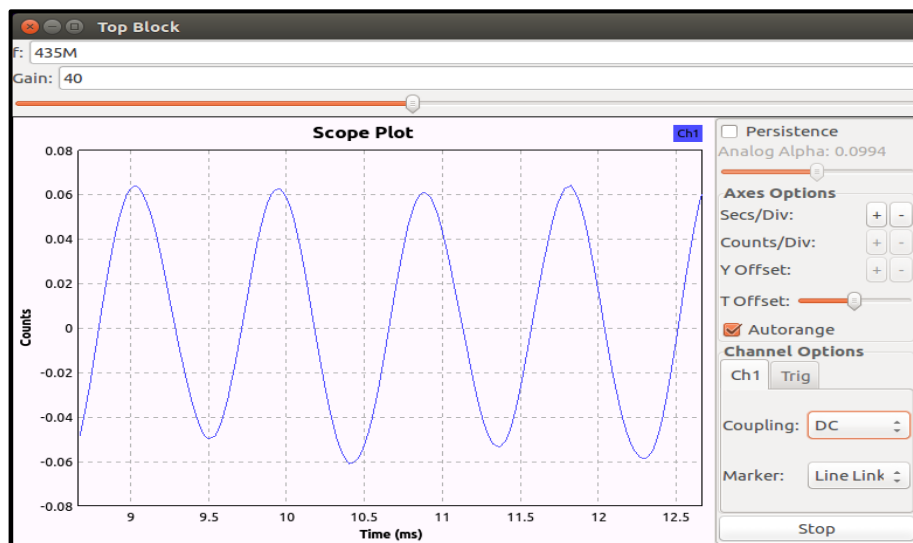
La respuesta del sistema, permite observar en tiempo real la señal captada por el dispositivo de hardware (micrófono) la cual será en la practica la señal  $v_m$  o señal

de información. A continuación, se relacionan las respuestas obtenidas una vez se ejecuta el sistema.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 28 Señal de ruido transmitida en FM sobre la frecuencia  $f = 435\text{MHz}$

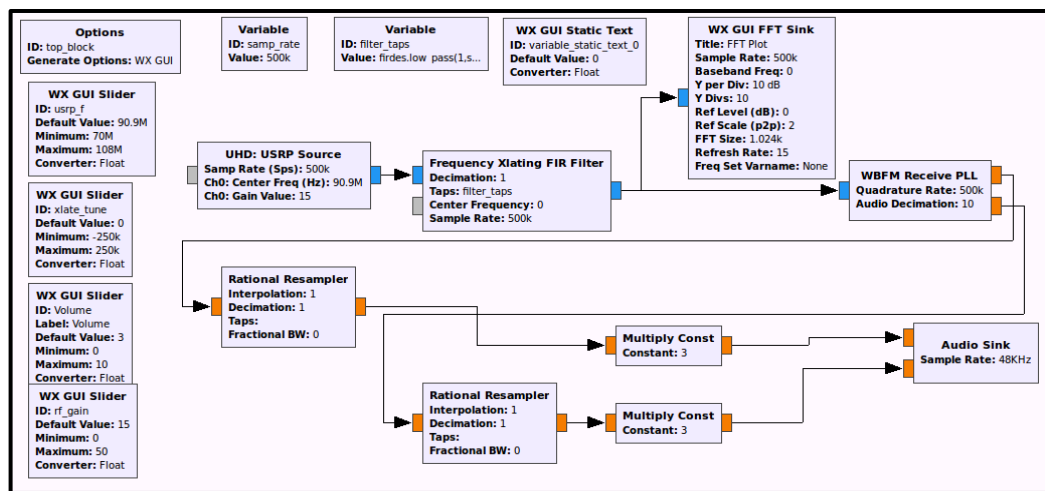


Fuente: Avalo Miguel

Figura 29 Señal de información (tono) transmitida en FM sobre la frecuencia  $f = 435\text{MHz}$

### 9.1.2.3 Receptor FM

El diagrama de bloques implementado para el desarrollo de la demodulación FM, permite recibir las señales de FM que se perciban mediante el equipo USRP N210. El objetivo de la práctica es, realizar la implementación de los módulos transmisor y receptor y evidenciar la interferencia generada al variar la frecuencia de la señal portadora  $v_c$ . En la *Figura 30* se puede observar el diagrama de bloques implementado para la recepción y demodulación de la señal FM para recibir una señal en banda base la cual se pueda detectar mediante el equipo de audio del dispositivo en el cual se está desarrollando la práctica.



Fuente: Avalo Miguel

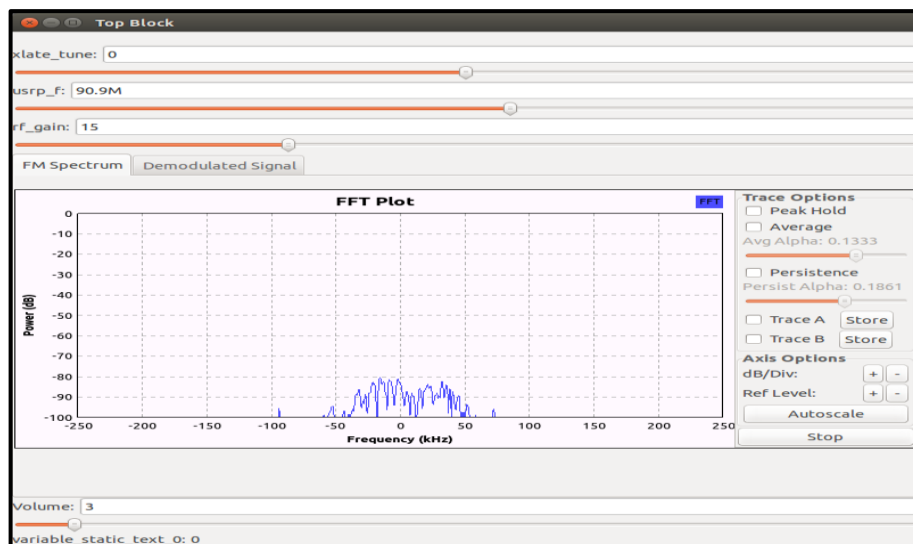
Figura 30 Diagrama de bloques RX FM

La respuesta del sistema se evidencia como sigue, se realizaron mediciones sin interferencia sobre una emisora comercial en frecuencia de  $f = 90.9 \text{ MHz}$  y se realiza la interferencia haciendo uso del transmisor FM sobre la misma frecuencia en la cual se transmite un tono (silbido). Adicional-mente se muestra el espectro en frecuencia de la recepción de la emisora comercial y de la señal transmitida mediante la implementación de la modulación por frecuencia en la herramienta GNU RADIO. Seguidamente, se pueden observar las respuestas obtenidas en el ejercicio práctico:



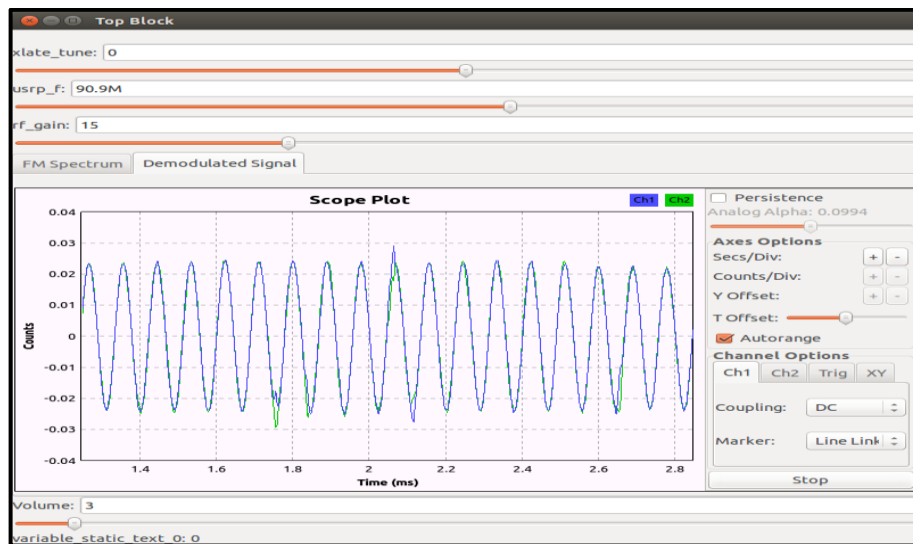
Fuente: Avalo Miguel

Figura 31 Señal recibida emisora comercial en frecuencia  $f = 90.9\text{MHz}$



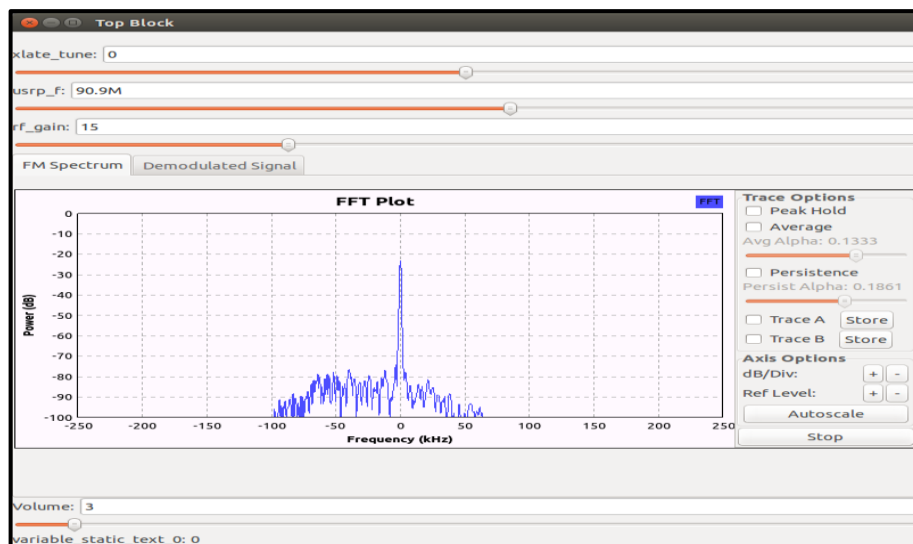
Fuente: Avalo Miguel

Figura 32 Espectro en frecuencia recibido emisora comercial en frecuencia  $f = 90.9\text{MHz}$



Fuente: Avalo Miguel

Figura 33 Señal recibida de tono interfiriendo emisora comercial en frecuencia  $f = 90.9\text{MHz}$



Fuente: Avalo Miguel

Figura 34 Espectro en frecuencia recibido de tono interfiriendo emisora comercial en frecuencia  $f = 90.9\text{MHz}$

## 9.2 Modulaciones digitales

La esencia de las comunicaciones electrónicas se basa en la transmisión de información, la cual en un cuadro simplificado consta de tres secciones fundamentales; una fuente, un destino y un canal de transmisión. Los datos de información se irradian sobre un sistema de comunicaciones caracterizados como símbolos analógicos, tales como la voz humana, tonos, música o información de imágenes de un video; o de igual forma pueden ser de carácter digital, tales como números codificados en sistema binario, códigos alfanuméricos, símbolos gráficos y demás [6]. Frecuentemente el mensaje de información no es adecuado para transmitirse en su estado original y se debe transformar a una forma adecuada antes de proceder con la transmisión. Por ejemplo, la información análoga se convierte en digital para poderla transmitir sobre sistemas de comunicación digital, y de igual forma para los sistemas de comunicación analógicos, se convierten los datos digitales en señales análogas antes de transmitirlos sobre el sistema.

Los sistemas de comunicaciones analógicos se remplazaron rápidamente por sistemas de comunicación digital, los cuales tienen notables ventajas sobre los sistemas analógicos tradicionales:

- Facilidad de procesamiento.
- Facilidad de multiplexado.
- Inmunidad al ruido.
- Antenas eficientes de un tamaño físico razonable construidas para sistemas de comunicación por radio.
- El espectro radioeléctrico se asignará a los servicios de forma racional y se regulará de forma que la interferencia entre sistemas se mantenga en niveles aceptables [6] [29].

Se realizará la comprensión teórica de las modulaciones digitales a tratar en el documento, con el fin de generar una comprensión a fondo de las mismas. Adicionalmente esto permitirá tener un punto de comparación sobre el cual el

estudiante sea capaz de asimilar los resultados obtenidos a nivel práctico desde el conocimiento teórico desarrollado.

### 9.2.1 Modulación por desplazamiento de fase (PSK – Phase Shift Keying)

Compete aclarar que, al tratarse de una modulación digital, el número de estados de la señal moduladora es limitado; a diferencia de modulaciones de carácter análogo como la modulación PM, en la cual la fase de la portadora varía según el cambio continuo de la señal moduladora análoga.

Los beneficios del sistema PSK en cuanto a la capacidad de transmisión sobre el sistema, comienzan a notarse al tratar el sistema M-ario (M-ario). El sistema se deriva de la palabra binario y hace referencia al dígito M, el cual indica la cantidad de combinaciones posibles para determinada cantidad de variables binarias [6]. La cantidad de condiciones de salida se calcula sobre la Ecuación 16.

$$N = \log_2 M$$

Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Ecuación 16 Ecuación de cantidad de bits codificados

Donde  $N = \text{Cantidad de bits codificados}$

$M = \text{Cantidad de condiciones posibles de salida con } N \text{ bits}$

Despejando M de la Ecuación 16 se obtiene:

$$M = 2^N$$

Fuente: Wayne, Tomasi [6]

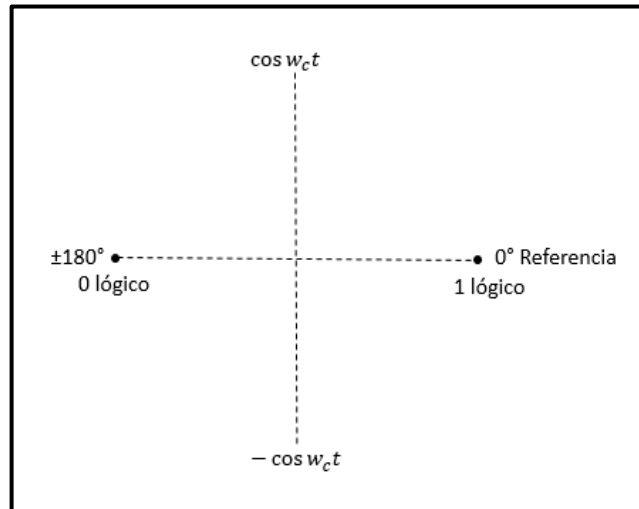
Ecuación 17 Ecuación de cantidad de condiciones posibles de salida con N bits.

#### 9.2.1.1 Modulación BPSK (Binary Phase Shift Keying)

El primer sistema de modulación PSK se hace evidente al desarrollar el valor mínimo de N, el cual es de 1 bit. A este sistema se le llamará BPSK (Binary Phase Shift Keying), lo anterior debido a que los valores que puede tomar el sistema se reducen a un 0 y 1 lógico. Por tanto, la respuesta en la constelación sobre el plano de cuadratura y en fase (Quadrature & In phase) será información sobre el punto a



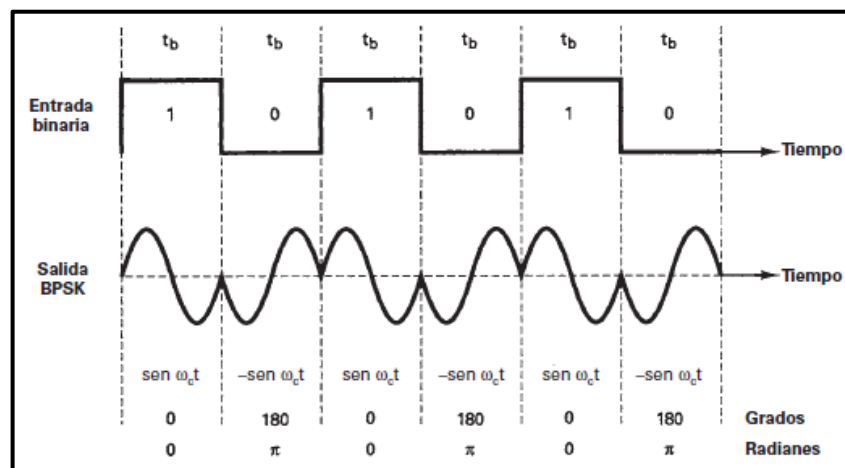
0° al recibir un 1 lógico y, por el contrario, al obtener un 0 lógico se obtendrá el punto 180° desfasado sobre el plano. Lo anterior se puede observar en la Figura 35.



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 35 Diagrama de constelación BPSK

Así, la respuesta de la señal modulada BPSK en el tiempo, será el cambio de fase cada vez que el símbolo N (0,1) cambie en señal de información como se puede observar en la Figura 36.



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 36 Relación de fase de salida en función del tiempo para un modulador BPSK.

### 9.2.1.2 Modulación QPSK (PSK M-ario con M=4)

Al igual que en el caso de la modulación BPSK, se parte de la premisa de que el valor asignado a M, en este caso, será igual a cuatro. Lo anterior permite que el desarrollo del modulador despliegue sobre la constelación cuatro posibles niveles los cuales serán asignados según el valor instantáneo de la señal digital de modulación. Sobre la Tabla 5 se observan los valores de M según varia el número de bits N.

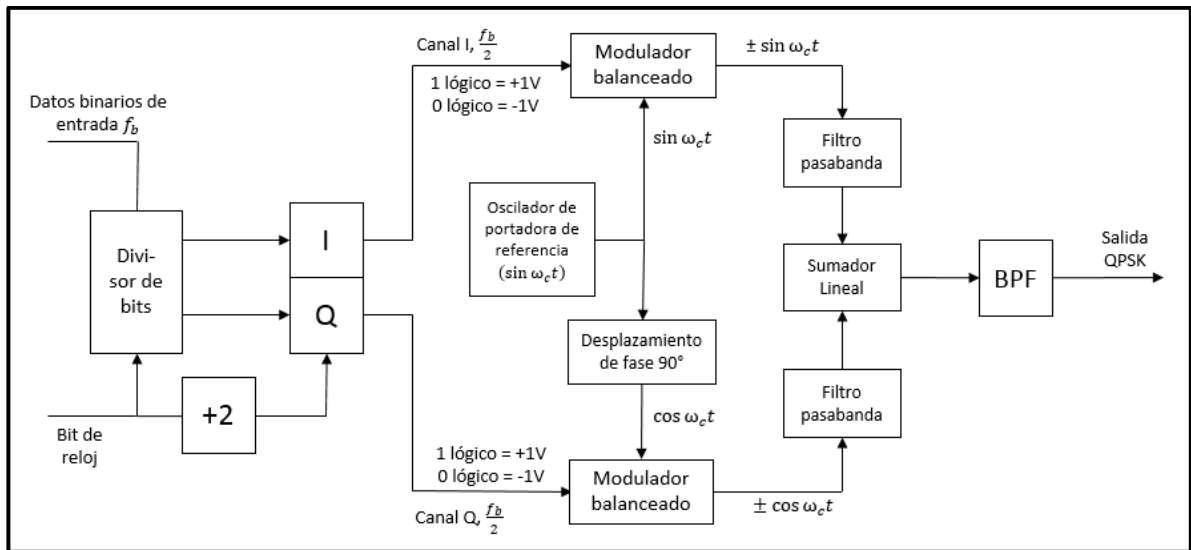
N	M
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32

Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Tabla 5 Cantidad de condiciones de salida M según la cantidad de bits codificados N.

La modulación QPSK o modulación cuaternaria por desplazamiento de fase, se compone de cuatro respuestas de fase, las cuales están dadas por los dibits 00, 01, 10 y 11. Sin embargo, para que sea posible que a la salida del sistema de modulación se obtengan las cuatro fases de constelación sobre el plano I vs Q, es necesario que a la entrada ingresen dos bits, lo que en ultimas produce los dibits mencionados anteriormente. De esta forma, para cada dibit de dos bits sincronizados en el modulador, se obtiene un solo cambio a la salida. Y así la rapidez de cambio en la salida (baudios) es la mitad de la rapidez de entrada de bits [6].

El diagrama mediante el cual se implementa la modulación QPSK se muestra en la Figura 37.



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 37 Diagrama modulador QPSK.

Haciendo el análisis del diagrama mediante el cual se implementa la modulación QPSK se obtienen cuatro fasores posibles, los cuales son:

- $+sen(\omega_c t) + cos(\omega_c t)$
- $+sen(\omega_c t) - cos(\omega_c t)$
- $-sen(\omega_c t) + cos(\omega_c t)$
- $-sen(\omega_c t) - cos(\omega_c t)$

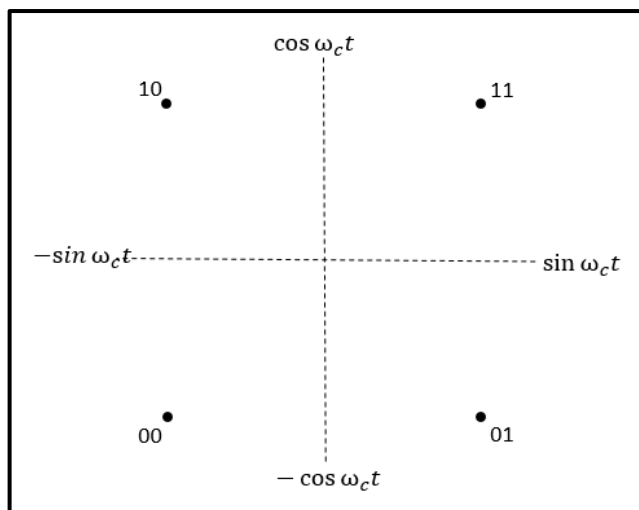
Por lo cual una señal QPSK el mayor desplazamiento en fase que puede realizar es de  $\pm 45^\circ$  durante la transmisión. En la Tabla 6 se muestran los valores de entrada binaria y sus resultados correspondientes en fase a la salida del modulador QPSK.

Una de las ventajas de la modulación QPSK, es que debido a que las amplitudes sobre los planos están determinadas por dos valores discretos (0 y 1); por lo tanto, la magnitud de los cuatro fasores resultantes es  $\sqrt{2}$ . Por tanto, se puede observar sobre la Figura 38 el diagrama de constelación de la modulación QPSK cuatro puntos ubicados a una distancia  $\sqrt{2}$  del punto (0,0) separados por un desfase de  $\pm 45^\circ$  sobre los planos (I,Q).

Entrada Binaria		Fase de salida QPSK
Q	I	
0	0	-135°
0	1	-45°
1	0	+135°
1	1	+45°

Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Tabla 6 Tabla de verdad modulación QPSK



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

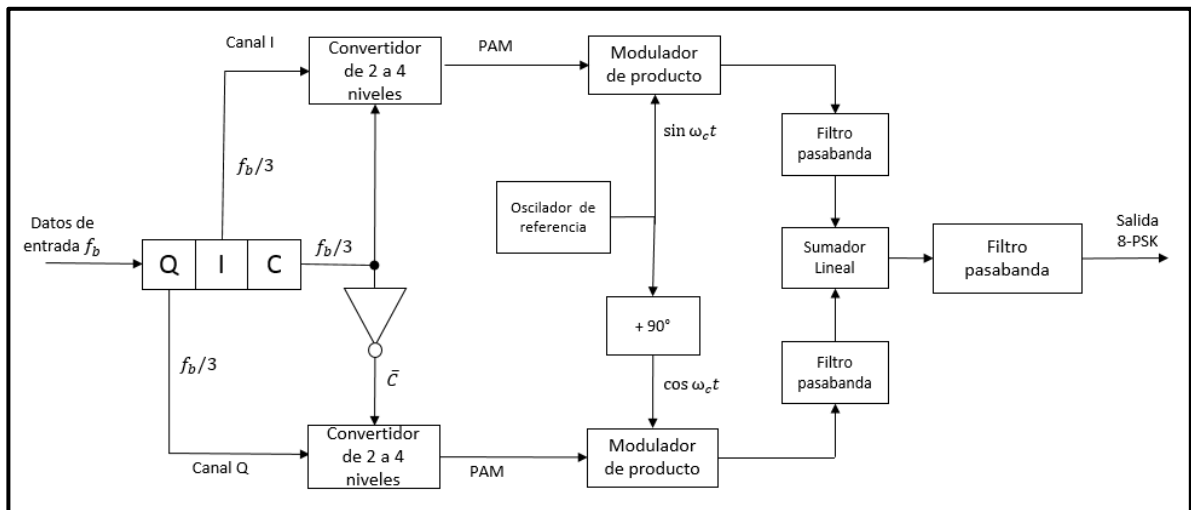
Figura 38 Diagrama de constelación QPSK

### 9.2.1.3 Modulación 8PSK (PSK M-ario con M=8)

El modulador 8-PSK permite la salida de ocho fases posibles de salida, las cuales requieren la agrupación de tres bits, los cuales son llamados tribits ( $2^3 = 8$ ).

En el desarrollo de este método de modulación M-ario se trata además del canal enfasado (I) y en cuadratura (Q), el canal de control C. Por lo cual, la rapidez de bits en cada uno de los canales es de  $f_b/3$ . En la Figura 39 se aprecia, que tanto los

canales I y C como los Q y  $\bar{C}$  ingresan al conversor de 2 a 4 niveles de su respectivo canal. Los conversores de 2 a 4 niveles, son esencialmente DAC (digital-to-analog converter) de entrada en paralelo. Al ingresar dos bits es posible generar 4 niveles de salida por cada uno de los conversores. Entonces, los bits I o Q definen la polaridad de salida de la señal analógica (1 lógico = +V, y 0 lógico = -V), en tanto el bit C y  $\bar{C}$  define la magnitud de los fasores (1 lógico = 1.307 V , y 0 lógico = 0.541 V). De esta manera, con dos polaridades y dos magnitudes son posibles cuatro condiciones de salida diferentes por cada uno de los conversores de 2 a 4 niveles.



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 39 Diagrama modulador 8-PSK

Los fasores obtenidos en el análisis, según las consideraciones de los conversores de nivel tanto en el canal I como en el Q responden a la forma descrita en la Ecuación 18.

$$C I \sin(\omega t) + \bar{C} Q \cos(\omega t)$$

Fuente: Avalo Miguel

Ecuación 18 Ecuación fasorial general 8-PSK

Por tanto, al desarrollar cada uno de los fasores, teniendo en cuenta los valores de salida de los canales sobre la *Tabla 7*, se obtienen los resultados descritos en la *Tabla 8*, representados gráficamente en la *Figura 40*.

Canal IC			CANAL $Q\bar{C}$		
I	C	Salida	Q	$\bar{C}$	Salida
0	0	-0.541V	0	0	-1.307V
0	1	-1.307V	0	1	-0.541V
1	0	+0.541V	1	0	+1.307V
1	1	+1.307V	1	1	+0.541V

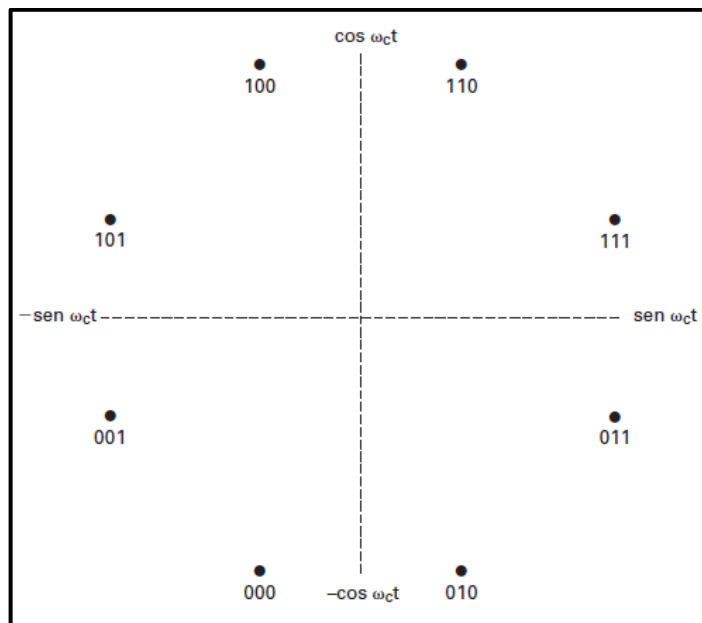
Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Tabla 7 Tablas de verdad canales IC y  $Q\bar{C}$ .

Q	I	C	Forma fasorial	Fase de salida 8-PSK
0	0	0	$-0.541 \operatorname{sen}(\omega t) - 1.307 \cos(\omega t)$	$-112.5^\circ$
0	0	1	$-1.307 \operatorname{sen}(\omega t) - 0.541 \cos(\omega t)$	$-157.5^\circ$
0	1	0	$+0.541 \operatorname{sen}(\omega t) - 1.307 \cos(\omega t)$	$-67.5^\circ$
0	1	1	$+1.307 \operatorname{sen}(\omega t) - 0.541 \cos(\omega t)$	$-22.5^\circ$
1	0	0	$-0.541 \operatorname{sen}(\omega t) + 1.307 \cos(\omega t)$	$+112.5^\circ$
1	0	1	$-1.307 \operatorname{sen}(\omega t) + 0.541 \cos(\omega t)$	$+157.5^\circ$
1	1	0	$+0.541 \operatorname{sen}(\omega t) + 1.307 \cos(\omega t)$	$+67.5^\circ$
1	1	1	$+1.307 \operatorname{sen}(\omega t) + 0.541 \cos(\omega t)$	$+22.5^\circ$

Fuente: Avalo Miguel

Tabla 8 Tabla de verdad modulación 8-PSK



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 40 Diagrama de constelación 8-PSK

#### 9.2.1.4 Implementación en GNU RADIO

Para la implementación del modelo PSK sobre la plataforma de software GNURADIO se utilizó la guía para ejecutar la modulación digital desarrollada en la página web [gnuradio.org](http://gnuradio.org).

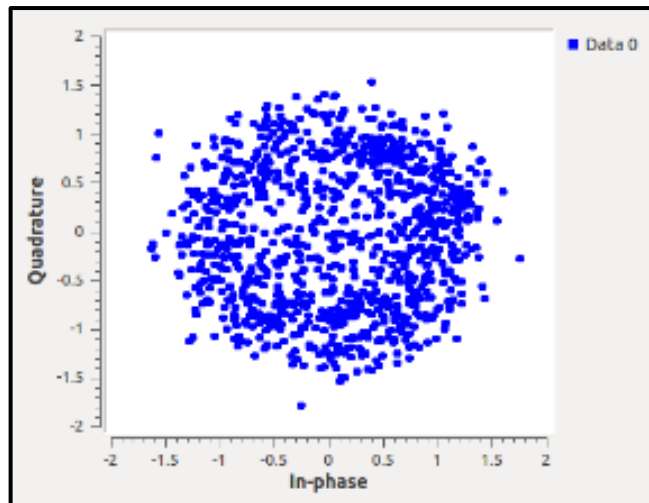
El diagrama de bloques sobre la herramienta se encuentra en la Figura 42.

Los bloques utilizados en el desarrollo de este laboratorio están incluidos en la librería básica del programa, por lo cual no es necesario realizar o implementar algún bloque adicional. El desarrollo de la práctica permite implementar un sistema de modulación para apreciar los símbolos sobre el plano IQ. Cabe resaltar que la práctica utiliza la simulación de un canal, el cual permite simular los principales inconvenientes que tiene un sistema de telecomunicaciones real, como lo son el ruido y la sincronización entre radios.

En primera instancia, se genera un tren de pulsos aleatorio en el bloque Random Source. Al tener la información que el sistema va a modular, está ingresa en el bloque Constellation Modulator, el cual realiza la asignación de la información en

los niveles definidos según sea un modulador BPSK, QPSK o 8PSK. Es importante que el usuario defina de forma apropiada los espacios del bloque para que se obtengan los resultados esperados al finalizar el sistema.

Una vez se modula la señal, esta ingresa en un canal de transmisión que simula el ruido AWGN (Ruido Aditivo Blanco Gaussiano) y los principales problemas que presenta un sistema de telecomunicaciones. En este punto de la práctica se puede observar que la información se encuentra dispersa sobre el espacio como se puede observar en la Figura 41.



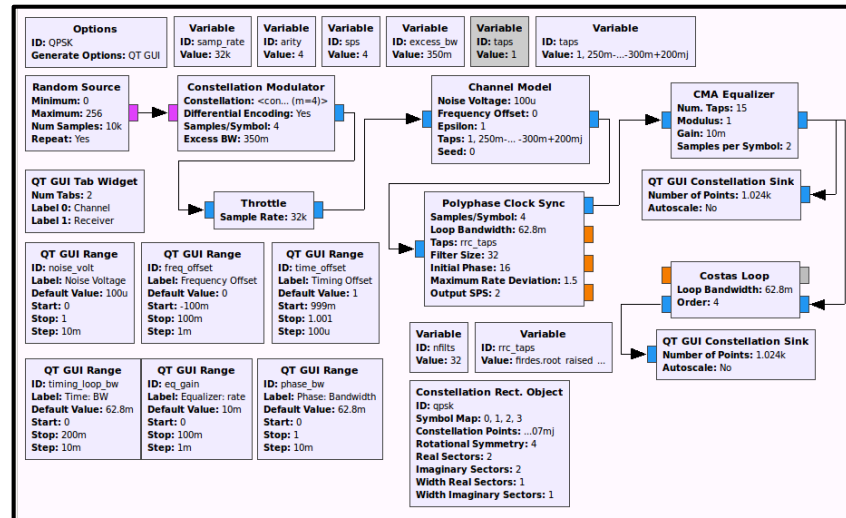
Fuente: Avalo Miguel

Figura 41 Información modulada sobre un modelo de canal simulado

Para corregir y definir la modulación como se espera, se llevan a cabo tres procesos que permiten recuperar la señal. En primer lugar, se implementa un bloque de sincronismo que permite recuperar la señal de reloj entre los dispositivos (tanto el transmisor como el receptor), adicionalmente el bloque remueve la interferencia inter símbolo (ISI) y reduce la tasa de muestreo a 1 sps (Samples Per Symbol). Al recuperar el sincronismo, se procede a ecualizar la señal mediante un ecualizador CMA (Constant Modulus Algorithm), el cual funciona únicamente para señales de amplitud constante. Cabe recordar que la señal de salida PSK es una circunferencia de magnitud constante. Por último, se implementa un bloque Costas Loop que



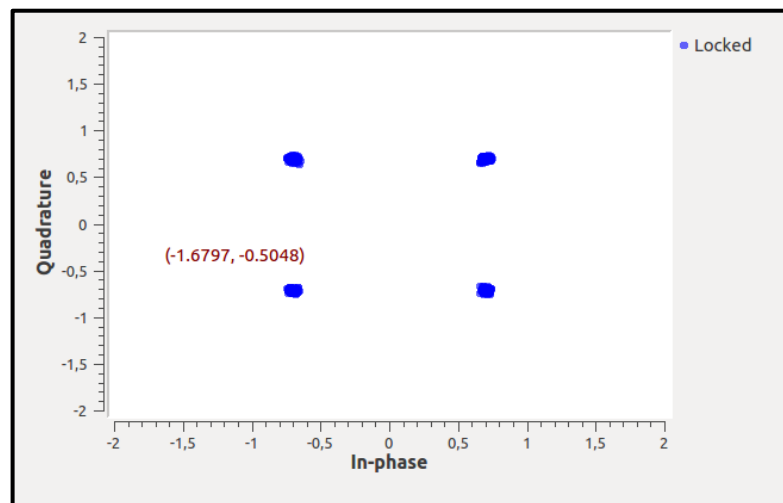
realiza la sincronización de la modulación según corresponda, cabe aclarar que dependiendo de la modulación que se implemente, el valor del bloque cambia como sigue BPSK = 2, QPSK =4 y 8PSK =8.



Fuente: Avalo Miguel

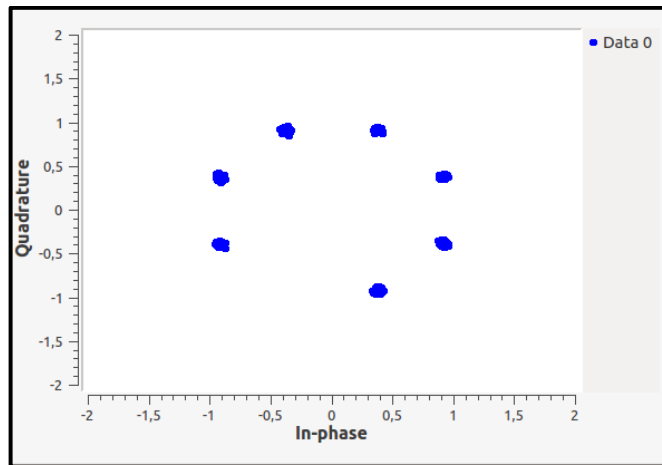
Figura 42 Diagrama de bloques modulación PSK

Al realizar las implementaciones mencionadas, se puede observar el resultado del QPSK y 8PSK en las Figura 43 y Figura 44 respectivamente.



Fuente: Avalo Miguel

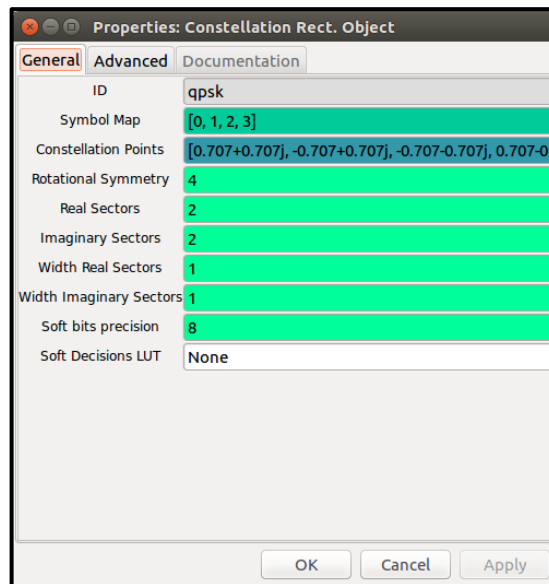
Figura 43 Diagrama de constelación Q-PSK práctico



Fuente: Avalo Miguel

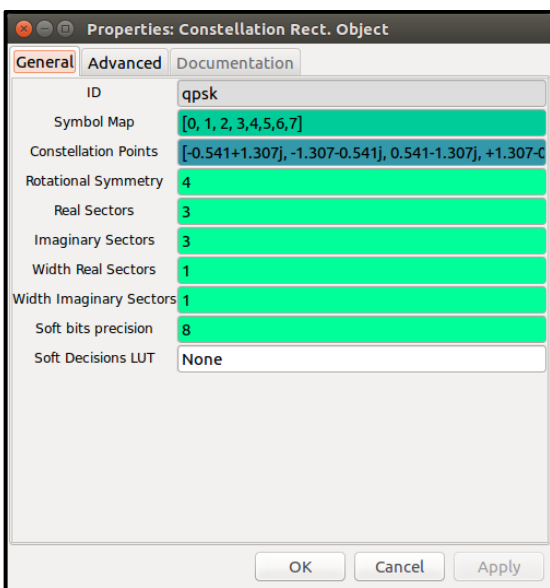
Figura 44 Diagrama de constelación 8-PSK práctico

Adicionalmente, se muestra debe tener en cuenta que la modificación del bloque Constellation Modulator corresponde al cambio en el bloque Constellation Rect. Object. Se muestra, la configuración básica del mismo para Q-PSK y 8-PSK en las imágenes Figura 45 y Figura 46.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 45 Configuración bloque para Q-PSK práctico



Fuente: Avalo Miguel

Figura 46 Configuración bloque para 8-PSK práctico

### **9.2.2 Modulación de amplitud en cuadratura (QAM – Quadrature Amplitude Modulation)**

Este sistema de modulación, permite contener la información tanto en la fase como en la amplitud de la portadora que se transmite sobre el sistema. El sistema QAM maneja, al igual que el PSK, sistemas de modulación M-arios los cuales permiten diferenciar la información en el sistema con respecto al número de condiciones posibles de salida ( $M$ ) con respecto al número de bits ( $N$ ) que ingresan al sistema. La señal de salida de un sistema QAM, a diferencia de una señal PSK, no tiene una amplitud constante.

A continuación, se describen los sistemas trabajados en el proyecto para obtener los resultados esperados en la señal de salida modulada sobre el sistema QAM.

#### **9.2.2.1 Modulación 8-QAM (QAM M-ario con $M=8$ )**

El sistema de modulación por amplitud en cuadratura con  $M=8$ , funciona con el mismo principio de modulación en el que se tienen grupos con 3 bits, tribits, los cuales varían sobre los canales de entrada I, Q y C. La variación con respecto al modelo 8-PSK, como se puede evidenciar en la Figura 47, es que se omite la inversión del canal C antes de su ingreso en el modulador de producto Q. Los canales I y Q continúan determinando la polaridad de la señal de salida, mientras C define la magnitud. En la Tabla 9 se observa la tabla de verdad de la salida de los conversores de 2 a 4 niveles, los cuales son el recurso primordial para ubicar los resultados del sistema sobre el plano (I,Q).

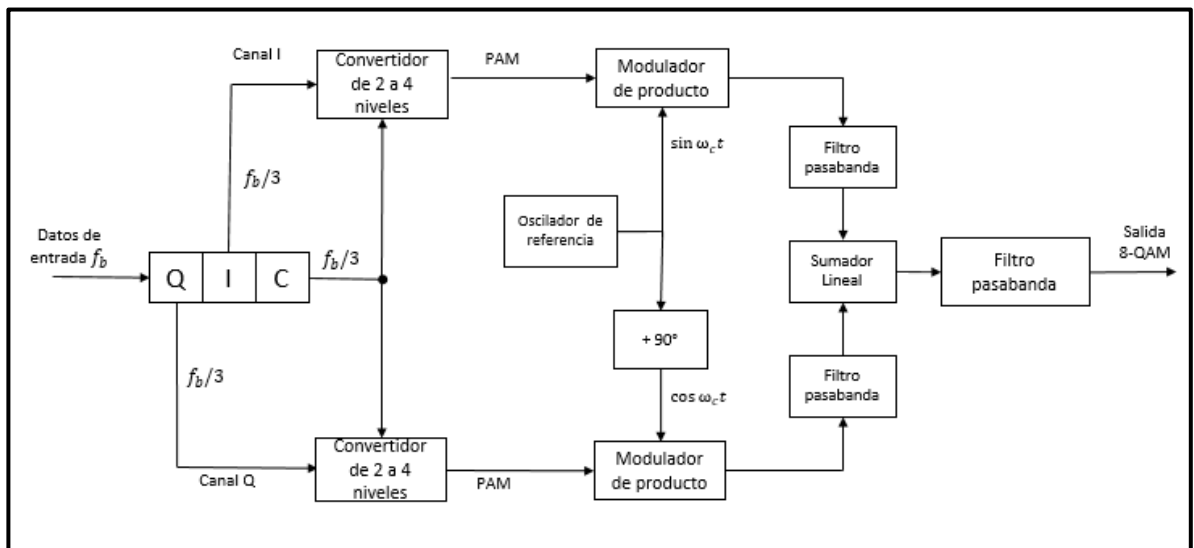
Al tener en cuenta los datos descritos en la Tabla 9 y realizar el análisis de la Ecuación 18, recordando que el canal C no se invierte, se obtienen los resultados de la señal modulada en 8-QAM sobre la Tabla 10.

I/Q	C	Salida
0	0	-0.541V
0	1	-1.307V
1	0	+0.541V
1	1	+1.307V

Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Tabla 9 Tabla de verdad salida convertidores de 2 a 4 niveles

Podemos apreciar en la Figura 48 la respuesta gráfica del sistema encontrando los 8 símbolos de información sobre la gráfica de constelación del sistema.



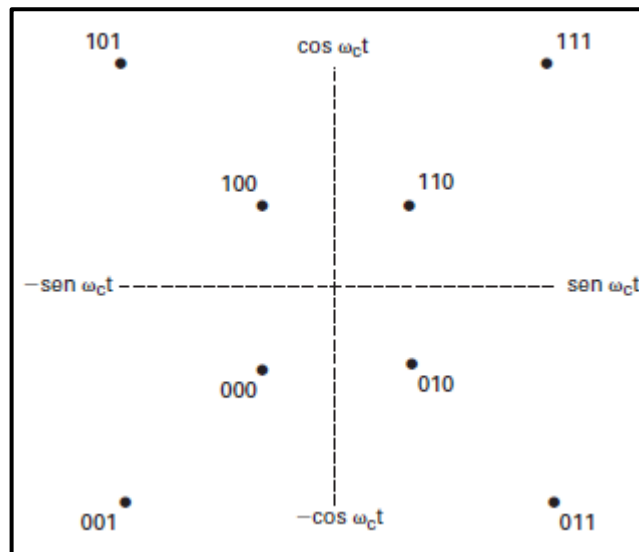
Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 47 Diagrama modulador 8-QAM

Entrada binaria			Salida 8-QAM		
Q	I	C	Forma fasorial	Amplitud	Fase
0	0	0	$-0.541 \operatorname{sen}(\omega t) - 0.541 \cos(\omega t)$	0.765V	-135°
0	0	1	$-1.307 \operatorname{sen}(\omega t) - 1.307 \cos(\omega t)$	1.848V	-135°
0	1	0	$+0.541 \operatorname{sen}(\omega t) - 0.541 \cos(\omega t)$	0.765V	-45°
0	1	1	$+1.307 \operatorname{sen}(\omega t) - 1.307 \cos(\omega t)$	1.848V	-45°
1	0	0	$-0.541 \operatorname{sen}(\omega t) + 0.541 \cos(\omega t)$	0.765V	+135°
1	0	1	$-1.307 \operatorname{sen}(\omega t) + 1.307 \cos(\omega t)$	1.848V	+135°
1	1	0	$+0.541 \operatorname{sen}(\omega t) + 0.541 \cos(\omega t)$	0.765V	+45°
1	1	1	$+1.307 \operatorname{sen}(\omega t) + 1.307 \cos(\omega t)$	1.848V	+45°

Fuente: Avalo Miguel

Tabla 10 Tabla de verdad modulación 8-QAM



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 48 Diagrama constelación 8-QAM

### 9.2.2.2 Modulación 16-QAM (QAM M-ario con M=16)

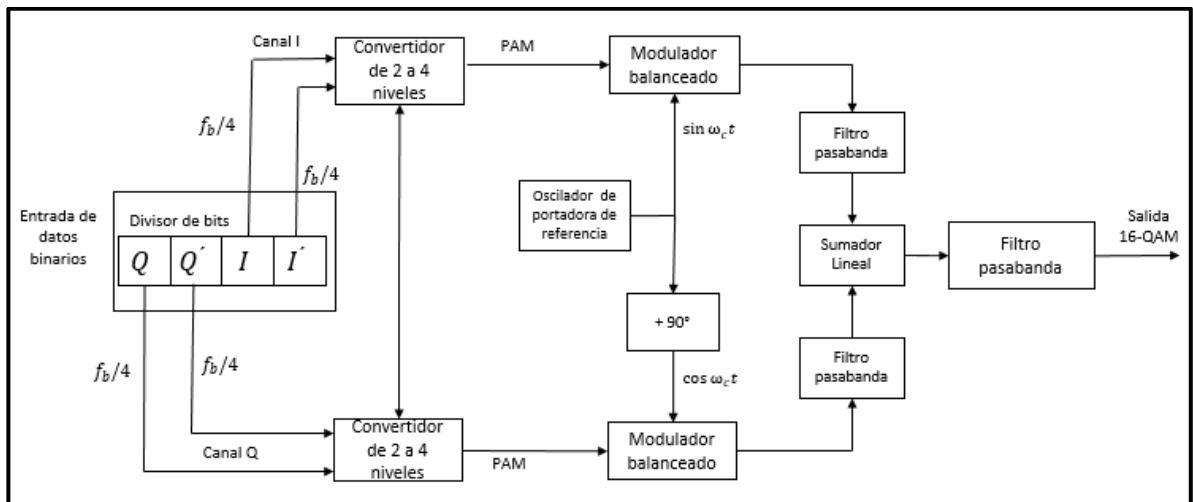
Tal como en los sistemas de modulación m-arios analizados previamente, la modulación 16-QAM utiliza como datos de entrada grupos de cuatro bits ( $2^4 = 16$ ) al ser  $M = 16$ .

Para este sistema, los datos binarios de entrada son cuatro  $I, I', Q$  y  $Q'$ . La rapidez de los bits en cada canal se reduce a un cuarto de la rapidez de entrada de bits ( $f_b/4$ ). Los bits  $I$  y  $Q$  determinan en el sistema la polaridad de la salida en los conversores de 2 a 4 niveles (1 lógico = positivo y 0 lógico = negativo), mientras que los bits  $I'$  y  $Q'$  determinan las magnitudes (1 lógico = 0.821 V y 0 lógico = 0.22 V). En la Tabla 11 se pueden encontrar las tablas de verdad de los convertidores de 2 a 4 niveles para el modulador 16-QAM. Por cada modulador de producto, son posibles cuatro salidas. Para el modulador de producto del canal  $I$  son  $+0.821 \sin(\omega t), -0.821 \sin(\omega t), +0.22 \sin(\omega t)$  y  $-0.22 \sin(\omega t)$ . Mientras que para el modulador de producto del canal  $Q$  son  $+0.821 \cos(\omega t), +0.22 \cos(\omega t), -0.821 \cos(\omega t)$  y  $-0.22 \cos(\omega t)$ . El sumador lineal, que podemos observar en la Figura 49, combina las salidas de los moduladores de producto de canal  $I$  y  $Q$  y produce las 16 condiciones de salida necesarias para el modulador 16-QAM, de la cual podemos apreciar los valores en la Tabla 12 y ver la constelación sobre el plano en la Figura 50.[6]

Canal $I$			CANAL $Q$		
$I$	$I'$	Salida	$Q$	$Q'$	Salida
0	0	-0.22V	0	0	-0.22V
0	1	-0.821V	0	1	-0.821V
1	0	+0.22V	1	0	+0.22V
1	1	+0.821V	1	1	+0.821V

Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Tabla 11 Tablas de verdad canales  $I$  y  $Q$ .



Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 49 Diagrama modulador 16-QAM

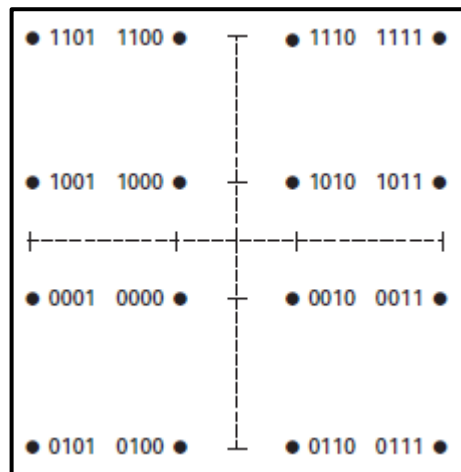
Entrada binaria				Salida 8-QAM	
I	I'	Q	Q'	Amplitud	Fase
0	0	0	0	0.311V	-135°
0	0	0	1	0.850V	-165°
0	0	1	0	0.311V	-45°
0	0	1	1	0.850V	-15°
0	1	0	0	0.850V	-105°
0	1	0	1	1.161V	-135°
0	1	1	0	0.850V	-75°
0	1	1	1	1.161V	-45°
1	0	0	0	0.311V	+135°
1	0	0	1	0.850V	+165°



1	0	1	0	0.311V	+45°
1	0	1	1	0.850V	+15°
1	1	0	0	0.850V	+105°
1	1	0	1	1.161V	+135°
1	1	1	0	0.850V	+75°
1	1	1	1	1.161V	+45°

Fuente: Avalo Miguel

Tabla 12 Tabla de verdad modulación 16-QAM

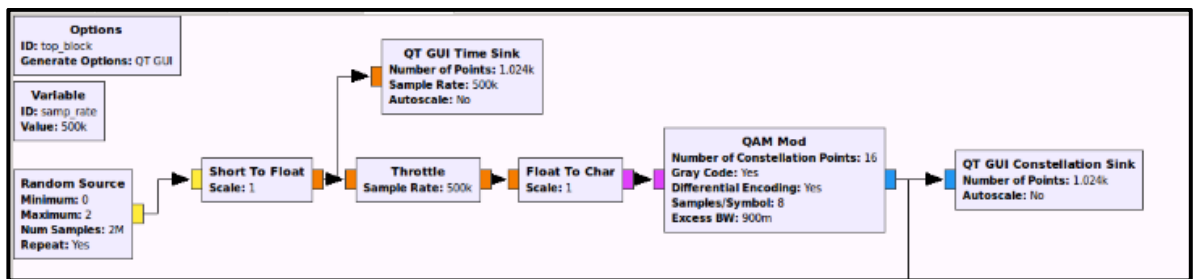


Fuente: Wayne, Tomasi [6]

Figura 50 Diagrama constelación 16-QAM

### 9.2.2.3 Implementación en GNU RADIO

Para la modulación QAM se presentó un inconveniente con el bloque de modulación incluido en la herramienta, debido a que está programado para calcular la modulación de sistemas QAM con base  $4^n$ . Por tanto, se realizó la implementación del sistema 16-QAM. Se muestra el diagrama práctico del sistema en la Figura 51.

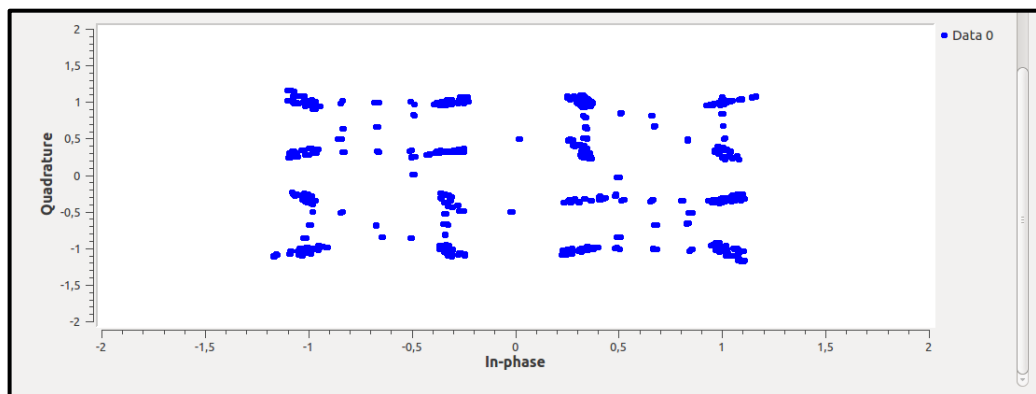


Fuente: Avalo Miguel

Figura 51 Diagrama de bloques modulación 16-QAM

Para esta modulación, se realiza la inserción de información mediante una fuente aleatoria. Una vez generados los datos que se quieren transmitir sobre el sistema. Estos ingresan al modulador QAM, el cual permite la asignación de los datos sobre la constelación QAM para realizar la transmisión. En modelo solo se efectúa la modulación de la información, debido a que solo se tenía planteado como fin del proyecto verificar las modulaciones digitales sobre la herramienta para contrastar los conocimientos teóricos del estudiante frente a una respuesta práctica que permita variar los parámetros de ingreso del sistema para alterar sus resultados en tiempo real.

El resultado de la práctica se puede observar en la Figura 52.



Fuente: Avalo Miguel

Figura 52 Diagrama de constelación 16-QAM práctico

## **10.CONCLUSIONES**

1. Haciendo uso del dispositivo USRP N210, se logró desarrollar prácticas de laboratorio en la asignatura sistemas de telecomunicaciones en modulaciones análogas, pulsadas y digitales dirigidas a los estudiantes de ingeniería de telecomunicaciones de la universidad Santo Tomas.
2. El funcionamiento del dispositivo USRP N2010, se caracterizó con la herramienta GNU Radio bajo el sistema operativo Linux y las librerías necesarias para su funcionamiento. Adicionalmente, la configuración de las modulaciones análogas, pulsadas y digitales se desarrollaron de acuerdo con la caracterización de la modulación.
3. Las modulaciones pulsadas se encuentran implícitas en el desarrollo de radio digital del dispositivo USRP N2010, por lo cual en todas las fases de diseño del sistema se especifican frecuencias de muestreo y la homogeneidad de estas en todos los bloques de GNU Radio.
4. Las guías de laboratorio fueron desarrolladas con el fin de documentar resultados obtenidos que permitan al estudiante relacionar sus conocimientos aplicados.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Unión Internacional de Telecomunicaciones, Reglamento de Radiocomunicaciones. International Telecommunication Union, 2012.
- [2] Huidobro, José Manuel and Luque, Javier, *Comunicaciones por radio - tecnologías, redes y servicios de radiocomunicaciones. el espectro electromagnético*. Alfaomega, Ra-Ma, 2014.
- [3] Ettus Research, "USRP n200/n210 Networked Series Datasheet." 2015.
- [4] F. K. Jondral, "From Maxwell's Equations to Cognitive Radio," in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on*, 2008, pp. 1–5.
- [5] S. S. Haykin and G. N. Cázares, *Sistemas de comunicación*. Interamericana, 1985.
- [6] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Pearson educación, 2003.
- [7] Stremler Ferrel G., *Introducción a los sistemas de comunicación*. Addison-Wesley Oberamericana, S.A., 1993.
- [8] L. E. Frenzel and C. C. Gutiérrez, *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Alfaomega México, 2003.
- [9] L. W. Couch, R. N. Salas, and R. de J. B. de la Parra, *Sistemas de comunicación digitales y analógicos*. Prentice-Hall, 1998.
- [10] Tene Castillo, Juan Pablo, "Diseño e implementación de un Sistema de Conmutación de red para un sistema GSM basado en OpenBTS y Asterisk." UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA, 2013.
- [11] G. J. Minden *et al.*, "KUAR: A Flexible Software-Defined Radio Development Platform," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 428–439.
- [12] C. Chang, J. Wawrzynek, and R. W. Brodersen, "BEE2: a high-end reconfigurable computing system," *Des. Test Comput. IEEE*, vol. 22, no. 2, pp. 114–125, Mar. 2005.
- [13] Wireless Open-Access Research Plataform, "About the WARP Project." <http://warpproject.org/trac/wiki/about>.
- [14] P. Pawelczak, K. Nolan, L. Doyle, S. W. Oh, and D. Cabric, "Cognitive radio: Ten years of experimentation and development," *Commun. Mag. IEEE*, vol. 49, no. 3, pp. 90–100, Mar. 2011.
- [15] A. A. Tabassam, F. A. Ali, S. Kalsait, and M. U. Suleman, "Building Software-Defined Radios in MATLAB Simulink - A Step Towards Cognitive Radios," in

*Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2011 UkSim 13th International Conference on*, 2011, pp. 492–497.

- [16] Unión Internacional de Telecomunicaciones, “Definiciones de sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) y sistema radioeléctrico cognoscitivo (SRC). Serie SM Gestión del espectro. Informe UIT-R SM.2152.” Sep-2009.
- [17] I. Mitola J., “Software radios-survey, critical evaluation and future directions,” in *Telesystems Conference, 1992. NTC-92., National*, 1992, pp. 13/15–13/23.
- [18] SDR Forum and IEEE P1900.1 group, “SDRF Cognitive Radio Definitions Working Document SDRF-06-R-0011-V1.0.0.” 08-Nov-2007.
- [19] I. Mitola J., “Software radios: Survey, critical evaluation and future directions,” *Aerosp. Electron. Syst. Mag. IEEE*, vol. 8, no. 4, pp. 25–36, Apr. 1993.
- [20] J. Mitola and J. G.Q. Maguire, “Cognitive radio: making software radios more personal,” *Pers. Commun. IEEE*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [21] M. Braun, M. Muller, M. Fuhr, and F. K. Jondral, “A USRP-based testbed for OFDM-based radar and communication systems,” in *Proceedings of 22nd Virginia Tech. Symposium on Wireless Communications*, 2012.
- [22] J. Rugeles U., T. Mancilla B., and C. H. Clavijo S., “Caracterización de la plataforma de radio definido por software WSRP N210 - WBX,” vol. 12, no. 34, pp. 91–101, Oct. 2013.
- [23] Wireless Innovation Forum, “What is Software Defined Radio?” [http://www.wirelessinnovation.org/what\\_is\\_sdr](http://www.wirelessinnovation.org/what_is_sdr).
- [24] Iván Pinar Domínguez and Juan José Murillo Fuentes, *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software*. Universidad de Sevilla, 2011.
- [25] Juan Pablo Montero Hidalgo, “Implementación de un sistema de comunicaciones basado en Software Radio.” Escuela Politécnica Superior Universidad Autónoma de Madrid, Enero-2014.
- [26] Mathworks, “MathWorks Fact Sheet.” 2015.
- [27] Página Oficial Ubuntu, “<http://www.ubuntu.com/>.” .
- [28] M.Sc. Ing. Mónica Espinosa Buitrago and M.Sc. Iván Díaz Pardo, “Informe final convocatoria FODEIN 2014 Diseño y desarrollo de un Radio Definido por Software.” Jun-2015.
- [29] I. Glover and P. M. Grant, *Digital Communications*. Pearson/Prentice Hall, 2004.