

**Laboratorio para medir pérdidas de potencia en una transmisión RF por medio de equipos SDR**

Wendy Dayana Rojas Castillo

Universitaria Agustiniana

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá, D.C.

2018

**Laboratorio para medir pérdidas de potencia en una transmisión RF por medio de  
equipos SDR**

Wendy Dayana Rojas Castillo

Director

Guillermo Fernando Valencia Plata

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Universitaria Agustiniana

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería en Telecomunicaciones

Bogotá, D.C.

2018

## **Dedicatoria**

A mis padres por la dedicación, esfuerzo y sacrificio a lo largo de estos años de formación,  
gracias por el apoyo constante, el cual me permitió llegar a este punto.

## **Agradecimientos**

A mi familia por permitirme formarme en esta institución. A mi tutor por guiarme y brindarme apoyo en este proceso también al cuerpo docente que de alguna manera contribuyo a mi formación profesional.

## **Resumen**

Con el fin de diseñar unas prácticas de laboratorio que permitieran medir la pérdida de potencia en una transmisión de radio frecuencia, se realizó una breve investigación sobre transmisión de señales y equipos SDR específicamente en HackRF one, el cual se utilizó para este proyecto, a través de la investigación se determinó que los alcances de las ondas de radio dependen de la potencia de emisión, la sensibilidad del receptor, condiciones atmosféricas y terrenos además se indago sobre la radio definida por software y como las mejoras que ha venido presentando en los últimos años han contribuido al mejoramiento en transmisión y recepción de datos. Por medio del programa GNU Radio se implementaron dos diagramas de bloques, uno en capacidad de transmitir una señal en formato WAV y un receptor Fm, los cuales se utilizaron para llevar a cabo el diseño de las prácticas de laboratorio, las cuales, están a disposición de los estudiantes y demás personas interesadas en el campo de las telecomunicaciones y que deseen investigar el fenómeno de atenuación.

## **Abstract**

In order to design a laboratory guide that would allow measuring the power loss in a radio frequency transmission, a brief investigation was carried out about signals transmission and SDR, the SDR used on this project is the HackRF One, through the investigation it was determined that the scope of the radio waves depends on the emission power, the sensitivity of the receiver, atmospheric conditions and terrains. In addition, it was inquired about software defined radio and how the improvements that it has been presenting in recent years have contributed to the improvement of data transmission and reception. Through the GNU Radio program, two block diagrams were implemented, one capable of transmitting a signal in WAV format and a FM receiver, the ones that were used to carry out the design of the laboratory practices, which are available for students and others interested about the field of telecommunications and anyone who wishes to investigate the phenomenon of attenuation.

## Tabla de contenido

1.	Introducción -----	13
2.	Planteamiento del problema -----	14
3.	Objetivo general -----	15
<b>3.1.</b>	<b>Objetivos específicos</b> -----	16
4.	Justificación -----	17
5.	Antecedentes investigativos -----	18
6.	Conceptos claves del proyecto -----	20
<b>6.1.</b>	<b>Atenuación</b> -----	20
<b>6.2.</b>	<b>Atenuación por vegetación</b> -----	20
<b>6.3.</b>	<b>Atenuación por gases atmosféricos</b> -----	20
<b>6.4.</b>	<b>Atenuación por lluvia</b> -----	20
<b>6.5.</b>	<b>Radiodifusión</b> -----	21
<b>6.6.</b>	<b>Pérdida de espacio libre</b> -----	21
<b>6.7.</b>	<b>Modelos de propagación</b> -----	22
<b>6.8.</b>	<b>HackRF one</b> -----	22
7.	Descripción del lugar donde se llevará a cabo la investigación -----	24
8.	Análisis de las leyes y normas que inciden en el problema -----	25
9.	Cronograma de actividades -----	26
10.	Tipo de investigación -----	27
11.	Indagación de equipos SDR y transmisión de señales -----	28
<b>11.1.</b>	<b>Los equipos SDR</b> -----	28
<b>11.2.</b>	<b>El hackRF one</b> -----	28
<b>11.3.</b>	<b>GNU Radio</b> -----	29
<b>11.4.</b>	<b>Transmisor Fm</b> -----	30
<b>11.5.</b>	<b>Receptor Fm</b> -----	30
<b>11.6.</b>	<b>Transmisión de señales</b> -----	31
12.	Sistema de transmisión y recepción de una señal -----	34
<b>12.1.</b>	<b>Implementación del transmisor</b> -----	34

12.2.	<b>Implementación del receptor</b>	42
12.3.	<b>Aplicación de la transmisión y recepción</b>	52
12.4.	<b>Simulación</b>	58
13.	Practicas implementando SDR	61
13.1.	<b>Practica 01</b>	61
13.1.1	Objetivo	61
13.1.2	Conceptos claves	62
13.1.2.1	<b>La atenuación. A</b>	62
13.1.2.2	<b>SDR.</b>	62
13.1.2.3	<b>Los HackRF one</b>	62
13.1.3	Materiales necesarios	62
13.1.4	Organización de la practica	62
13.1.4.1	<b>Paso 1.</b>	63
13.1.4.2	<b>Paso 2.</b>	63
13.1.4.3	<b>Paso 3.</b>	64
13.1.4.4	<b>Paso 4.</b>	65
13.1.5	Cuestionario	67
13.2.	<b>Practica 02</b>	67
13.2.1	Objetivo	67
13.2.2	Conceptos claves	67
13.2.2.1	<b>Atenuación.</b>	67
13.2.2.2	<b>Atenuación por gases atmosféricos.</b>	67
13.2.2.3	<b>Atenuación por lluvia.</b>	68
13.2.2.4	<b>SDR.</b>	68
13.2.2.5	<b>Hackrf one.</b>	68
13.2.3	Materiales necesarios	68
13.2.4	Organización de la practica	68
13.2.4.1	<b>Paso 1.</b>	69
13.2.4.2	<b>Paso 2.</b>	69

<b>13.2.4.3 Paso 3.</b>	70
<b>13.2.4.4 Paso 4.</b>	71
13.2.4. Cuestionario	73
14. Conclusiones	73
15. Referencias	74

## Lista de figuras

Figura 1. Atenuación. ....	20
Figura 2. Telecomunicaciones y radiodifusión.....	21
Figura 3. Cálculo de Radioenlace .....	22
Figura 4. Evaluación de modelos de propagación de canal inalámbrico.....	22
Figura 5. HackRf one .....	23
Figura 6. Cronograma de actividades .....	26
Figura 7. Diagrama de bloques del transmisor Fm. ....	30
Figura 8. Diagrama de bloques receptor Fm. ....	31
Figura 9. Transmisor Fm. ....	34
Figura 10. Variable samp_rate.....	34
Figura 11. Center_freq .....	35
Figura 12. File Source .....	35
Figura 13. Parámetros File Source .....	36
Figura 14. Short To Float .....	36
Figura 15. Parámetros Short To Float .....	37
Figura 16. Multiply Const .....	37
Figura 17. Parámetros Multiply Const .....	38
Figura 18. WBFM Transmit .....	38
Figura 19. Parámetros WBFM Transmit .....	39
Figura 20. Multiply const_1 .....	39
Figura 21. Parámetros Multiply Const_1 .....	39
Figura 22. QT GUI Sink .....	40
Figura 23. Parámetros QT GUI Sink .....	40
Figura 24. Osmocom Sink .....	41
Figura 25. Parámetros osmocom Sink .....	41
Figura 26. Receptor FM .....	42
Figura 27. Variables para el receptor Fm .....	42
Figura 28. Variable ch_width .....	43
Figura 29. Osmocom Source .....	43
Figura 30. Parámetros osmocom Source .....	44
Figura 31. WX GUI FFT Sink .....	44
Figura 32. Parámetros WX GUI FFT Sink .....	45
Figura 33. Low Pass Filter .....	45
Figura 34. Parámetros Low Pass Filter .....	46

Figura 35. Rational Resampler .....	461
Figura 36. Parámetros Rational Resampler .....	47
Figura 37. WBFM Receive .....	47
Figura 38. Parámetros WBFM Receive .....	48
Figura 39. Multiply Const .....	48
Figura 40. Audio Sink .....	49
Figura 41. Parámetros Audio Sink .....	49
Figura 42. WX GUI Slider, audio_gain .....	50
Figura 43. WX GUI Slider, cutoff_freq .....	50
Figura 44. WX GUI Slider, center_freq .....	51
Figura 45. FFT PLOT .....	51
Figura 46. Antena Broadband Omni.....	52
Figura 47. Montaje de transmisión .....	52
Figura 48. coordenadas 1 .....	53
Figura 49. transmisor .....	53
Figura 50. Medición potencia de transmisión .....	54
Figura 51. Medición potencia .....	54
Figura 52. Coordenadas 1 .....	55
Figura 53. Montaje del receptor .....	56
Figura 54. Receptor .....	56
Figura 55. SDR Console .....	57
Figura 56. potencia de recepción .....	57
Figura 57. Puntos de simulación.....	58
Figura 58. Línea de vista .....	59
Figura 59. Datos de la simulación. ....	60
Figura 60. Puntos de transmisión y recepción .....	60
Figura 61. Diagrama de bloques para la transmisión. ....	63
Figura 62. SDR Console. ....	63
Figura 63. SDR Console_1. ....	64
Figura 64. Edificio Fray Abel Salazar. ....	65
Figura 65. Edificio Fray Rubén Buitrago. ....	65
Figura 66. Laboratorio de telecomunicaciones.....	65
Figura 67. Amplificador, analizador de espectro y HackRF one. ....	66
Figura 68. Diagrama de bloques para la transmisión en GNU RADIO. ....	69
Figura 69. SDR console. ....	70

Figura 70. Cancha de futbol .....	70
Figura 71. Plazoleta. ....	70
Figura 72. Analizador de espectro, antena tipo omnidireccional y HackRF one. ....	71

## 1. Introducción

En un breve estudio de transmisión de señales y equipos SDR, se indica que, para generar una onda de radio, se necesita aplicar una corriente alterna a una antena, la cual funciona como conductor eléctrico con características especiales, ya que, al generarse un campo magnético y eléctrico alrededor de esta, se produce la señal de radio en forma de onda electromagnética. Las ondas de radio en la tierra se propagan en línea recta y su atenuación depende de la frecuencia de la transmisión y de las características eléctricas de la tierra o material atravesado.

La radio definida por software (SDR), permite que un software realice tareas complejas en un equipo de radio, en lugar de utilizar grandes cantidades de circuitos que estarían en capacidad de ejecutar la misma tarea, esta tecnología está compuesta por un hardware en donde debe de haber dos antenas para la transmisión y recepción de datos y un software, el cual permite la configuración para habilitar comunicaciones, radio enlaces y para diseñar equipos de redes con la facilidad de poder ser reconfigurados a través de actualizaciones de software.

Los sistemas de transmisión y recepción de señales se pueden desarrollar a través del programa GNU Radio, una de las plataformas que permiten la implementación de equipos SDR, estas implementaciones se hacen a través de bloques que permiten el desarrollo de funciones básicas, cabe resaltar que GNU Radio companion también permite el desarrollo a través de lenguajes como C++ y Python.

Las prácticas diseñadas a continuación, proporcionan a estudiantes y personas interesadas en este campo, un instrumento que les permitirá medir la pérdida de potencia en una transmisión de radiofrecuencia.

## 2. Planteamiento del problema

Hay varios factores que afectan las transmisiones de señales como lo son la atenuación, distorsión, pérdidas por espacio libre, ruido, multi - trayecto, refracción, entre otros. Es por lo anterior que para las personas interesadas en el campo de las telecomunicaciones o afines es importante entender el fenómeno de la atenuación en una señal para un mejor desarrollo de sus actividades.

Hay factores que contribuyen al debilitamiento de la señal, los comúnmente llamados obstáculos los cuales hacen referencia a la vegetación, el clima, terreno, objetos que se interpongan en la transmisión o simplemente el medio por el que se transmita. En la actualidad existen equipos que permiten medir magnitudes como potencia, estos datos al ser analizados posibilitan el entendimiento de fenómenos como el de atenuación, es el caso del HackRF one que cuenta con características favorables al momento de realizar la medición, en comparación a equipos que se encuentran en las instalaciones de la universitaria Agustiniense, es el caso del Wattmeter, el cual solo ofrece mediciones precisas de potencia en el rango de frecuencias de operación de 450 KHz – 2.7 GHz por el contrario el HackRF one proporciona un rango de 1MHz – 6GHz.

Los equipos SDR (radio definido por software) no son nuevos en la industria, pero últimamente se ha incrementado el uso de estos por las ventajas que pueden ofrecer en el campo de las telecomunicaciones, este al ser un equipo que proporciona múltiples funciones todos en un mismo equipo nos da la opción implementar componentes como filtros, moduladores, detectores, entre otros, a través de software. Esta tecnología está compuesta por un hardware en donde debe haber dos antenas para la transmisión y recepción de datos y un software el cual permite la configuración para habilitar comunicaciones, radio enlaces y para diseñar equipos de redes con la facilidad de poder ser reconfigurados a través de actualizaciones de software, se ha hecho frecuente su uso en las comunicaciones espaciales las cuales requieren dispositivos más adaptables y reconfigurables, Duarte C (2017) hace referencia a la misión Rover Curiosity de la NASA la cual consiste en un astro móvil que se encarga de explorar marte, este utiliza SDR para lograr la comunicación con Mars reconnaissance orbite, esta nave espacial es la encargada de evaluar zonas donde se puedan realizar posibles aterrizajes a futuro, dicha comunicación se establece en la banda

UHF, la cual ocupa el rango de frecuencias de 300 MHz a 30 GHz y sus usos más comunes son para enlaces de radio, televisión y radares.

La radio definida por software, cuentan con gran variedad de ventajas en comparación con los radios basados en hardware, Fico seco F (2012), menciona la facilidad que tienen los SDR al adaptarse a diferentes escenarios también la gran cantidad de métodos de modulación y su lenguaje de programación por bloques se considera fácil para el aficionado.

### **3. Objetivo general**

Diseñar prácticas de laboratorio, en las cuales se pueda medir la pérdida de potencia de una transmisión de radiofrecuencia, a través de equipos SDR.

#### **3.1. Objetivos específicos**

- Realizar un estudio acerca de equipos SDR y transmisión de señales
- Implementar un sistema de transmisión y recepción usando SDR
- Diseñar las prácticas que se desarrollaran con los equipos SDR

#### 4. Justificación

A través de este proyecto de grado se busca facilitarle a los estudiantes o personas con intereses en esta área la obtención de datos respecto a atenuación en una transmisión y recepción de datos ya que este factor se genera al momento en que la señal viaja a través de un medio de transmisión que puede ser guiado como el cable coaxial, fibra óptica, entre otros o no guiados como el aire, la señal pierde potencia dependiendo del medio en que se transmita como es el caso de las líneas de cobre donde se presenta atenuación debido a la resistencia eléctrica. Se decide utilizar el equipo SDR HackRF One para la obtención de datos ya que este cuenta con una plataforma de código abierto, la cual permite el desarrollo de actividades libremente como la interceptación de señales siempre y cuando se tengan en cuenta la normatividad acerca del uso de frecuencias que limitan las transmisiones de datos, además puede transmitir o recibir señales de radio que van desde 1 MHz hasta 6 GHz a través de funciones asignadas por software, ofrece 20 millones de muestras por segundo, es fácil la obtención de este ya que se ha vuelto común en la industria y sus precios son asequibles, este equipo está en la capacidad de desarrollar múltiples funciones a través de un mismo hardware, como analizar el espectro, interceptar señales o su más básica función, transmitir y recibir señales. Este proyecto también se llevará a cabo con el fin de poner en práctica conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

## 5. Antecedentes investigativos

Riera J, et al, (2013), afirma que los servicios que relacionan emisión y recepción de ondas radioeléctricas se denominan servicios de radio comunicación siempre y cuando tenga fines de transmisión y recepción de información, dichos servicios se clasifican en fijos, móviles y de radiodifusión, este último se caracteriza por las emisiones destinadas a la recepción del público en general. Dentro de los parámetros y características de la radiocomunicación se encuentran las clases de emisión, las cuales hacen referencia a las características de esta, como por ejemplo el tipo de modulación y de información que se quiera transmitir, se encuentra también la potencia, la cual está definida por la clase de emisión, además las potencias en la cresta del envolvente, la cual es suministrada por el transmisor de la antena en condiciones normales, la potencia media de la modulada está definida por las condiciones anteriores pero se evalúa en un intervalo de tiempo extenso comparado con el periodo de la frecuencia más baja de la señal moduladora y por último la potencia portadora se verifica en un ciclo de radiofrecuencia siempre y cuando esté ausente la modulación. Riera J, et al, (2013)

Además, Huidobro J, (2015) dice que las ondas de radio constituyen uno de los sistemas de transporte de señales en telecomunicaciones, tienen la ventaja de ser menos costosas al no necesitar medios físicos para transportar la señal. Estas se propagan al oscilar en campos eléctricos y magnéticos. Para poder transmitir señales de alta frecuencia se utiliza una estación emisora y una receptora, una de las principales razones que causan pérdidas es la atenuación, la cual puede aumentar dependiendo del clima o medio por el que se envíe la señal, Huidobro J, (2015)

Por su parte Bruno S, et al. (2011) realizaron un estudio de los distintos modelos de propagación de RF, enfocados en las condiciones particulares de la región de la amazonia, dada la necesidad de aplicar un modelo de proyección para las etapas de pre diseño de proyectos de conectividad inalámbrica. Mediante un estudio en 12 ciudades diferentes de esta región, se compararon diferentes modelos para calcular su rendimiento y eficiencia respecto a la predicción de ondas para lo cual se observó las diferentes mediciones de propagación de los modelos SUI, COST231-Hata y ECC-33 para lo cual se aplicaron algoritmos de sintonización para una banda de frecuencia de 5,8 GHz.

Los modelos COST231-Hata y ECC-33 presentaron una menor propagación de ondas a comparación del modelo SUI el cual tenía mínimo rango de error y desviación, al aplicarse en alturas específicas en la instalación. Bruno S, et al. (2011)

De la misma manera García N. (2015) plantea que el modelo de cobertura en redes inalámbricas posee un límite de frecuencia permitidos en los siguientes países: USA, Australia, Francia, Alemania, Reino Unido, Países escandinavos y España, depende de las potencias generales y del uso que se brinde. Este modelo está basado en la implementación de una nueva técnica de predicción de cobertura en redes, para darle forma a las representaciones realistas de propagación de radiofrecuencia, por medio de la radiosidad, la cual nos permite predecir el comportamiento físico de la propagación.

La propagación inalámbrica es de mayor magnitud en este modelo, lo cual se vio reflejado en entornos con un número elevado de obstáculos sin importar el tipo de material al que se exponían estas ondas electromagnéticas. García N. (2015)

ITU (2017) También estudia los métodos para predecir la pérdida de ruido, en donde el término desorden se origina con el desarrollo del radar ya que los retornos no deseados en la pantalla de radar se denominan así. La pérdida de desorden significa pérdidas debidas a objetos que están en un suelo pero que no pertenecen a este. En el informe se estudiaron las pérdidas debidas al desorden urbano o suburbano.

El desorden urbano depende de los materiales y la geometría esto lo hace propenso a causar pérdidas debido a la obstrucción. Las estadísticas urbanas evaluadas en el modelo de propagación consisten en distribuciones de probabilidad de distancias horizontales y alturas de construcción, se especifica el proceso de complicación a partir del uso de puntos de encuesta representativos, la obtención de datos de distancia y altitud además la conversión a distribuciones acumulativas y las distribuciones formando una plantilla, el valor aleatorio de una distribución acumulada.

Un proceso estocástico calcula las pérdidas de desorden para un rayo que sale desde una estación ubicada debajo de un techo en área urbana, se usan números para conocer las distancias y alturas de construcción, dichas dimensiones definen la geometría en un plano vertical. Las distancias horizontales y alturas verticales de construcción se obtienen a través de entradas de la plantilla de área urbana representativa, altura de la estación sobre el nivel del suelo, ángulo de elevación del camino y frecuencia que permiten la ejecución múltiple de cálculos para compilar las estadísticas de pérdida de ecos y también por medio del modelo general. ITU (2017)

En Madrid, España se implementó y configuró un SDR con el fin de realizar estudios de propagación, se realizó una prueba la cual consistió en verificar las respuestas en frecuencia y el rango dinámico que puede soportar un receptor en un entorno de simulación separado del sistema de recepción real. García D, et al. (2012)

La prueba realizada por García D, et al. (2012) en entorno real, consistió en provocar desvanecimiento en la antena, obstruyendo el reflector y simulando el efecto de atenuación de lluvia y medir la respuesta con el receptor. Se utilizaron receptores PPL y SDR en el experimento de propagación, el SDR se basa en una estimación espectral la cual presenta mejoras respecto al tiempo de recuperación de la señal luego del desvanecimiento, es decir, PPL realiza barridos en frecuencia con anchos de banda mayores en el tiempo hasta que encuentra de nuevo la señal, aunque con este receptor el nivel de ruido es más bajo, mientras que los SDR recuperan la señal al momento que esta vuelva a aparecer.

## 6. Conceptos claves del proyecto

### 6.1. Atenuación

Al propagar ondas estas se alejan entre sí y se extienden sobre una mayor área esto causa que se reduzca la densidad de potencia, Fig. 1, lo que es equivalente a la atenuación, la cual está expresada en dB, donde su definición matemática es  $y=10 \log (P1/P2)$ , P1 representa la potencia transmitida y P2 la potencia de recepción, el comportamiento de las ondas puede ser alterado en el espacio libre debido a los efectos ópticos, como lo es el cambio de dirección al momento de pasar de un medio a otro, a diferentes velocidades de propagación, esta velocidad es inversamente proporcional a la densidad del medio, lo que lleva a concluir que siempre y cuando una onda se traslade de un medio a otro y estos cuenten con distinta densidad se evidenciara el efecto de refracción. Se presenta también el efecto de difracción, donde las ondas se deforman al atravesar un orificio lo que causa que esta se disperse. Tomasi, W (2003)

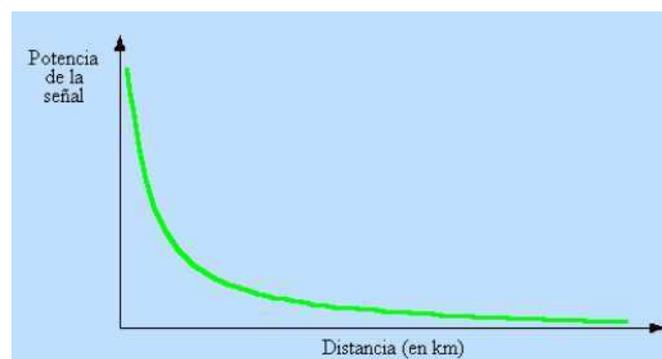


Figura 1. Atenuación, recuperado de informaticapablo.galeon.com (2008).

### 6.2. Atenuación por vegetación

Si el receptor de un sistema de radiocomunicación se encuentra en el interior de un terreno boscoso, hay una pérdida adicional por penetración de las ondas a través de la vegetación. Riera J, et al, (2013)

### 6.3. Atenuación por gases atmosféricos

En trayectos troposféricos las moléculas de absorben energía electromagnética produciendo atenuación la cual puede ser elevada dependiendo de la frecuencia, es decir mayores a 10GHz. Riera J, et al, (2013)

### 6.4. Atenuación por lluvia

En los radioenlaces troposféricos y por satélite, existe la componente de atenuación debida a la absorción y dispersión por hidrometeoros es decir lluvia, nieve y granizo. Riera J, et al, (2013)

## 6.5. Radiodifusión

Es la emisión y recepción de datos que viajan a través de ondas electromagnéticas sin utilizar un medio físico. Figueroa, R (1996).

Según la UIT los servicios de radiodifusión son las emisiones que pueden ser captadas por el público, estos pueden ser sonoros, televisión, entre otros.

Hoy en día se observa que la televisión en su totalidad es digital caso contrario a lo que pasa con los servicios de radiodifusión sonora los cuales aún se manejan con técnicas analógicas, por ejemplo, la radiodifusión sonora en las frecuencias inferiores a 30 MHz, utilizan modulación AM, además de usar antenas muy grandes y transmisores que cuentan con gran potencia. Fig 2. Para la radiodifusión sonora por modulación de frecuencia (FM), es decir la que se encuentra en la banda de 87.5 - 108 MHz, la cual ofrece una mejor calidad sonora. Riera, J., et al, (2013)



Figura 2. Telecomunicaciones y radiodifusión, recuperado de [www.monitorbc.info](http://www.monitorbc.info). (2014)

## 6.6. Pérdida de espacio libre

Es la pérdida que la onda electromagnética sufre cuando se propaga en línea recta por un vacío sin reflexión de energía de los objetos cercanos a ella. Esta energía se reparte al momento que la onda se propaga alejándose de la fuente y así tener una densidad de potencia menor en un punto y una distancia determinada de la fuente. En la Fig. 3. se observa la pérdida en espacios abiertos y en la ecuación 1 la definición de la pérdida en el espacio libre. Tomasi, W. (2003)

$$L_p = (4\pi D\lambda)^2 = (4\pi Df_c) \quad (1)$$

Ecuación 1. Tomasi, W. (2003). Ecuación Pérdida en espacio libre

- **L<sub>p</sub>** = Pérdida de trayectoria por el espacio libre (adimensional)
- **D** = distancia (kilómetros)
- **λ** = longitud de onda (metros)
- **c** = velocidad de la luz en el espacio libre

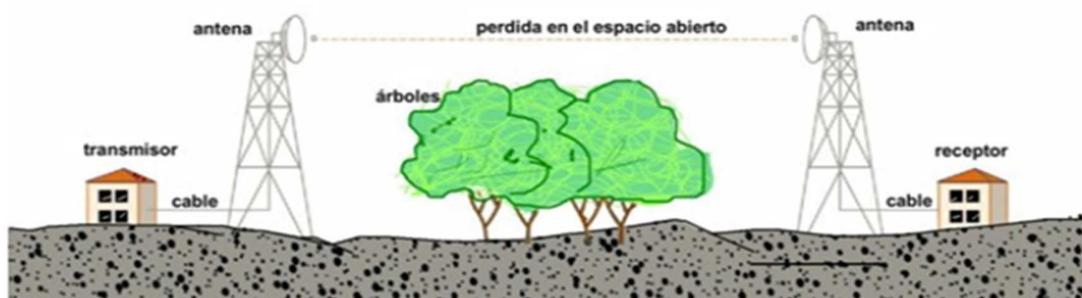


Figura 3. Cálculo de Radioenlace, recuperado de <http://slideplayer.es> (2016)

### 6.7. Modelos de propagación

Existen varios modelos de propagación, donde cada uno de ellos se basa en tres fenómenos fundamentales: La reflexión, la difracción y la dispersión. La reflexión se produce cuando la onda se propaga y encuentra un objeto de dimensiones mayor a su longitud de onda de la cual se originan múltiples ondas reflejadas por otro lado la difracción, surge debido a superficies afiladas que están entre el transmisor y el receptor generando así ondas secundarias y la dispersión, se genera cuando en la propagación de la onda existen objetos pequeños. En la fig. 4, se observa los fenómenos.

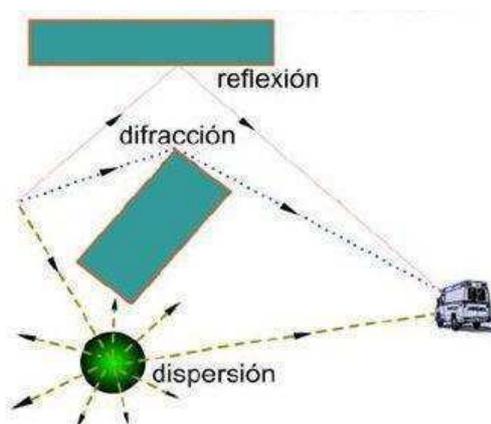


Figura 4. Evaluación de modelos de propagación de canal inalámbrico, López, R (2012).

### 6.8. HackRF one

Es un periférico de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1 MHz a 6 GHz diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, el HackRF one es una plataforma de hardware de código abierto que puede usarse como un periférico USB o programarse para una operación independiente. Fig. 5



Figura 5. HackRf one, recuperado de <https://greatscottgadgets.com/hackrf>. (2009)

## **7. Descripción del lugar donde se llevará a cabo la investigación**

Los laboratorios se llevarán cabo en las instalaciones de la universitaria Agustiniiana, específicamente en los edificios Fray Rubén Buitrago, Fray Abel Salazar y en las zonas verdes de esta. Se realizarán las mediciones dejando el emisor en uno de los edificios y el receptor en el otro o bien sea en unas de las zonas verdes también se harán en diferentes pisos del mismo edificio y por último en alguno de los salones de las instalaciones ya mencionadas; esto con el fin de evaluar las pérdidas con diferentes obstáculos como los objetos que se encuentren dentro de cada edificio o simplemente con los materiales con los que fueron construidos además de los posibles cambios de clima que se puedan presentar los días en que se realicen las mediciones

## 8. Análisis de las leyes y normas que inciden en el problema

- Resolución 711 de 2016 donde se definen las bandas de uso libre en Colombia. Si un dispositivo ocasiona interferencia en una radiocomunicación se deberá suspender la operación del dispositivo, aunque cumpla con los requisitos de autorización de este y solo se reanudara cuando el Ministerio de tecnologías de la información y comunicación autorice y se demuestre la solución del conflicto. (ANE.2014)
- Ley 1341 de 2009 donde se da neutralidad tecnológica; es decir el gobierno no establece que tecnología se puede usar en las bandas de uso libre, pero si define que aplicaciones se pueden usar en estas. (ANE, 2016)
- Resolución 254 del 2015 donde se adoptan medidas en materia de ordenación técnica del espectro radioeléctrico atribuido al servicio de radiodifusión sonora, en el cual se adoptan medidas en materia de ordenación técnica del espectro radioeléctrico distribuido al servicio de radiodifusión sonora en amplitud modulada y el plan técnico nacional de radiodifusión sonora en frecuencia modulada, se modifican los parámetros técnicos de los concesionarios del servicio de radiodifusión sonora como lo es la frecuencia de operación, potencia radiada entre otros y se incorporan nuevos canales para la asignación de futuras emisoras. (Min Tic, 2015)

### 9. Cronograma de actividades

ACTIVIDAD	Agosto				Septiembre				Octubre			
	S.1	S.2	S.3	S.4	S.1	S.2	S.3	S.4	S.1	S.2	S.3	S.4
Indagar en libros y páginas de internet sobre el significado, funcionamiento y aplicaciones de los equipos SDR	x	x										
Investigar acerca de la transmisión de señales, como se efectúa y que parámetros pueden afectarla.	X	X										
Buscar asesoría de docentes o personas que tengan experiencia con los equipos SDR			X	X								
Solicitar el préstamo de equipos SDR a la Universitaria Agustiniana.					X							
Realizar el diseño del diagrama en el SDR console para transmitir la señal.					X	X						
Llevar a cabo mediciones de prueba con equipos SDR a diferentes distancias para lograr evidenciar el comportamiento de la señal y que porcentaje de potencia se logra perder.						X	X	X				
Tomar evidencias del espectro en el rango de frecuencias establecidas para realizar la transmisión con los equipos SDR							X	X				
Establecer posibles bandas de operación									X			
Delimitar la distancia entre el punto de emisión y el punto de recepción									X			
Definir obstáculos que puedan influir en los resultados de las mediciones									X			
Tomar evidencia de los datos obtenidos durante las mediciones										X	X	
verificar que las practicas diseñadas esten en capacidad de proporcionar un entendimiento del fenomeno de atenuacion												X

Figura 6. Cronograma. Rojas (2019).

### **10. Tipo de investigación**

Esta investigación según su objeto es de tipo aplicada, ya que se utilizan los conocimientos adquiridos en el programa ingeniería en telecomunicaciones además se centra en el fenómeno denominado atenuación, el cual es uno de los principales factores que debilitan las señales. Por otro lado, se puede afirmar que esta es una investigación experimental según el tipo de datos, en este caso magnitudes de potencia en una transmisión de radio frecuencia esta información recolectada en las pruebas de laboratorio están en capacidad de aportar a otras investigaciones y a su vez comprobar algunas teorías ya establecidas, y por último según el conocimiento adquirido esta investigación es de tipo descriptiva, debido a que implica la observación de un fenómeno en este caso las pérdidas de potencia en una transmisión de radio frecuencia y a su vez la descripción y entendimiento de este.

## 11. Indagación de equipos SDR y transmisión de señales

### 11.1. Los equipos SDR

Radio definido por software, un radio en donde todas las funciones de la capa física se definen por software, la radio como medio inalámbrico entre dos puntos ha venido presentando mejoras en su diseño electrónico, lo cual ha permitido mejorar la emisión y recepción de datos pero no fue hasta mediados de los años 90 cuando se realizaron investigaciones para poder crear sistemas que no tuvieran que depender de su hardware, es decir, que muchas de sus partes físicas pudieran ser controladas a través de un ordenador, en conclusión SDR, permite que un software realice las tareas complejas en un equipo de radio en lugar de grandes cantidades de circuitos que estarían en capacidad de ejecutar la misma tarea. A través de estos se pueden crear transmisores y receptores para todo tipo de señales, filtros, moduladores y demoduladores, entre muchos otros. El uso de la tecnología SDR aporta ventajas respecto a sus múltiples modos de operación, reconfiguración y sus bajos costos.

Una de las más comunes plataformas de software que permiten la implementación de equipos SDR es GNU RADIO, la cual está basada en Linux, aunque en la actualidad se encuentra una versión para Windows, esta plataforma permite crear sistemas de transmisión, recepción, procesamiento de señales a partir de la unión de bloques que pueden variar desde osciloscopios, analizadores, generadores de señales, entre otros, los cuales realizan una tarea específica dentro de un sistema SDR. Estos al ser unidos genera un código con el cual se implementa el diseño.

Para la transmisión y recepción de señales RF además de ser necesarios amplificadores y antenas, entre otros, se necesita un módulo de hardware y el ya mencionado software GNU RADIO, los hardware en la industria que permiten se les implemente SDR son el HackRF ONE y el RTL – SDR.

### 11.2. El hackRF one

Está en la capacidad de transmitir o recibir señales de radio siempre y cuando se encuentren en el rango de frecuencias que van desde 1MHz hasta 6GHz. Se creó con el fin de facilitar el desarrollo de las actuales tecnologías de radio, esta plataforma de hardware puede ser programada para que opere de manera autónoma o puede ser usada vía USB.

Principales características del HackRF ONE ( (HackRF ONE, 2009)

- Transmisor y receptor, semiduplex
- Proporciona 20 millones de muestras por segundo
- Es compatible con GNU RADIO, SDR #, entre otros
- Software de ganancia, transmisión, recepción, filtro de banda base configurable por software
- La potencia del puerto de antena es configurable por software
- Conector de antena entrada SMA
- Alimentación por USB

### 11.3. GNU Radio

Es un software de código libre que permite la implementación de SDR en plataformas como Mac OS, Windows y Linux. A través de GNU radio se pueden desarrollar aplicaciones de procesamiento de señales que a su vez posibilita el análisis, el filtrado, la modulación y demodulación de las señales. Las tarjetas como HackRF one, SDR-RTL, USRP, entre otras permiten la transmisión y recepción de las señales de radio frecuencia. El código de GNU radio se desarrolla en lenguaje Python, C++, pero también es posible la implementación de bloques que permiten desarrollar funciones básicas de procesamiento de señales a través de la interfaz gráfica de GNU radio companion. (Fernandez, 2015)

En la figura 6 se presenta un sistema FM para la transmisión de señales de audio utilizando el HackRF one y realizando su programación en el GNU RADIO.

## 11.4. Transmisor Fm

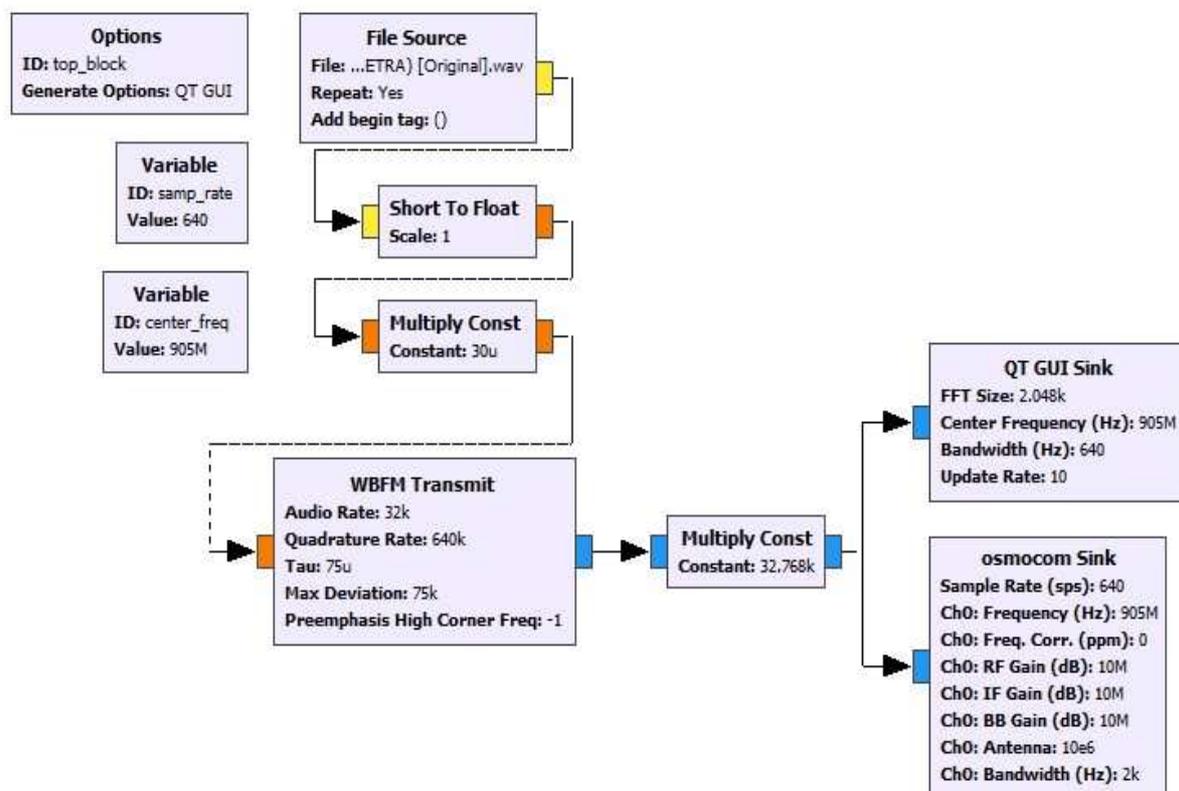


Figura 7. Diagrama de bloques del transmisor Fm. GNU Radio (2019).

El bloque File Source, se encarga de leer un archivo de audio en formato WAV. El bloque WBFM Transmit, es el encargado de generar una envolvente compleja en una señal FM de banda ancha de acuerdo a la ecuación (2). El bloque osmocomb sink envía a través de la interfaz USB la señal FM a la tarjeta HackRF one, la cual genera la señal de radio frecuencia en la banda FM. (Fernandez, 2015). El bloque Short To Float establece el factor de escala necesario para la conversión y por último el bloque Multiply const especifica la constante para multiplicar la entrada.

$$\hat{S}_{fm}(t) = A \cdot \exp(K_0 \int_{-\infty}^t m(T) dt) \quad (2)$$

**A**: amplitud de la envolvente

**$K_0$** : constante de desviación de frecuencia

**$m(T)$** : señal moduladora

## 11.5. Receptor Fm

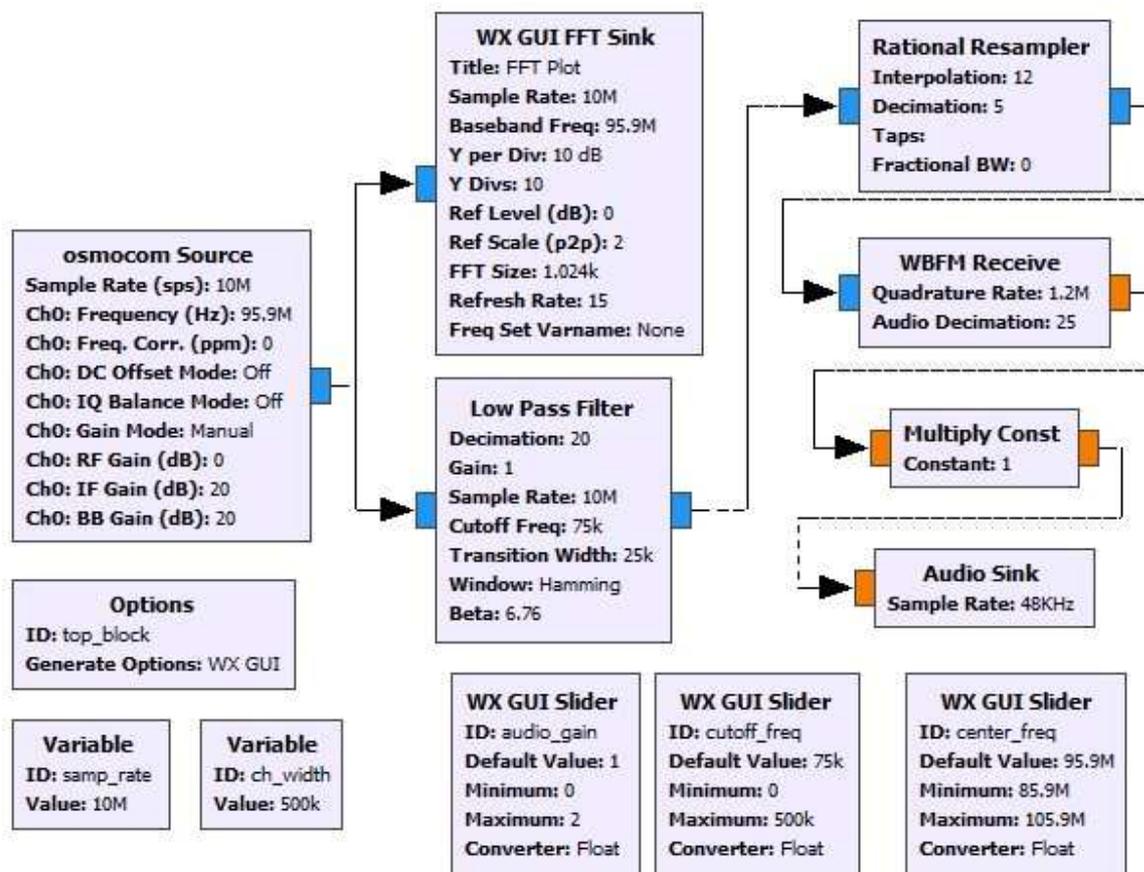


Figura 8. Diagrama de bloques receptor Fm. GNU Radio (2019).

El primer bloque Osmocom source es una capa de abstracción el cual permitirá que el hardware y GNU radio companion se puedan comunicar. WX GUI FFT Sink posibilita la visualización de los componentes de la señal. Low Pass Filter permite el paso de frecuencia bajas y debilita las altas. Rational Resampler se usa para convertir una frecuencia de muestreo en otra, los bloques que siguen a este funcionan siempre y cuando este entregue una frecuencia de muestreo de salida. WBFM Receive, funciona como demodulador. Multiply Const establece la constante para multiplicar la entrada. Audio Sink a través de este bloque se especificará la frecuencia de muestreo que se utilizará.

### 11.6. Transmisión de señales

Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz y no requieren de un medio físico para ser propagadas. Para generar una onda de radio se necesita aplicar una corriente alterna a una antena, la cual funciona como conductor eléctrico con características especiales ya que al generarse un campo magnético y eléctrico alrededor de esta se produce la señal de radio en forma de onda electromagnética. Las ondas de radio en la tierra se propagan en línea recta y su atenuación depende de la frecuencia de la transmisión y de las características eléctricas de la tierra o material atravesado. Para calcular la atenuación de una señal de radio es

necesario conocer la ganancia de la antena transmisora y la ganancia de la antena receptora. (Molina C. )

$$\frac{Pr}{Pt} = GtGr \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (3)$$

Ecuación 3. Transmisión de Friis

**Pr:** potencia recibida

**Pt:** potencia transmitida

**Gt:** ganancia transmitida

**Gr:** ganancia recibida

$\lambda$ : Longitud de onda

**R:** distancia a la que están situadas las antenas

El alcance de las ondas de radio depende de su potencia de emisión, la sensibilidad del receptor, relieve del terreno y condiciones atmosféricas. Estas al ser transmitidas a bajas frecuencias están en capacidad de cruzar los obstáculos mientras que en altas frecuencias tienden a rebotar en los objetos.

Los principales factores que afectan las señales son, atenuación, distorsión, ruido, absorción de la atmosfera, etc.

La atenuación hace referencia a la reducción de la fuerza de una señal, este fenómeno se puede producir sin importar de que tipo sea la señal, es decir, analógica o digital, si una señal recorre una gran distancia es posible que al llegar a su destino esta no se pueda distinguir, una solución para esto es la instalación de repetidoras, estas se encargan de dar más fuerza a una señal. La distorsión, es la deformación de la señal debido al comportamiento del canal en cada frecuencia, existe la distorsión por atenuación, la cual se ocasiona porque las altas frecuencias pierden potencia, por otro lado, se conoce la distorsión por retraso, la cual ocurre cuando la señal se retrasa en ciertas frecuencias.

El ruido es la energía eléctrica, electromagnética o de frecuencia no deseada y que está en capacidad de degradar la calidad de la señal, este fenómeno se produce tanto en sistemas analógicos como en digitales, en esta última los bits se fusionan y la computadora de destino no es capaz de distinguirlos y aumenta la tasa de errores de bit durante un tiempo dado y no se permite la correcta lectura del bit, mientras que en los sistemas analógicos la señal que se vuelve ruidosa adquiere un sonido de raspado. (Molina C. ). La tasa de error de bit representa

la cantidad de bits que se reciben con errores, dividido en la cantidad total de los bits recibidos.

Absorción, se presenta cuando un objeto disminuye la intensidad de la radiación incidente, generalmente la energía absorbida se convierte en calor. (Molina C. )

La modulación para señales de radio, consiste en variar un determinado aspecto de la misma señal denominándola, así como portadora respecto a otra señal que se llamara moduladora, algunos de los parámetros modificables son: la frecuencia, amplitud, fase, entre otros. El proceso de modulación evita la interferencia, hace más eficientes los sistemas de transmisión, protege la información ante fenómenos como ruido y proporciona una mejor calidad. El proceso denominado demodulación se encarga de recuperar los datos de la señal original luego de ser modulada. Giordano, J. (2009)

## 12. Sistema de transmisión y recepción de una señal

### 12.1. Implementación del transmisor

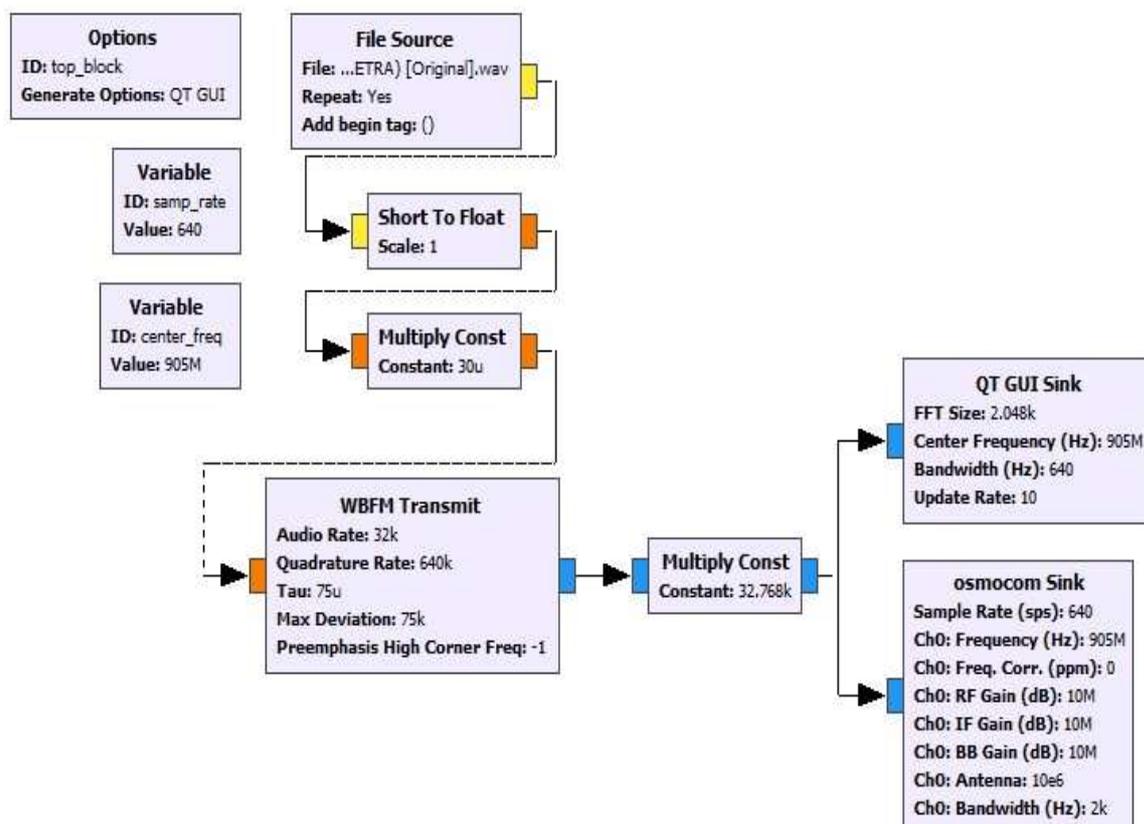


Figura 9. Transmisor Fm. GNU Radio (2019).

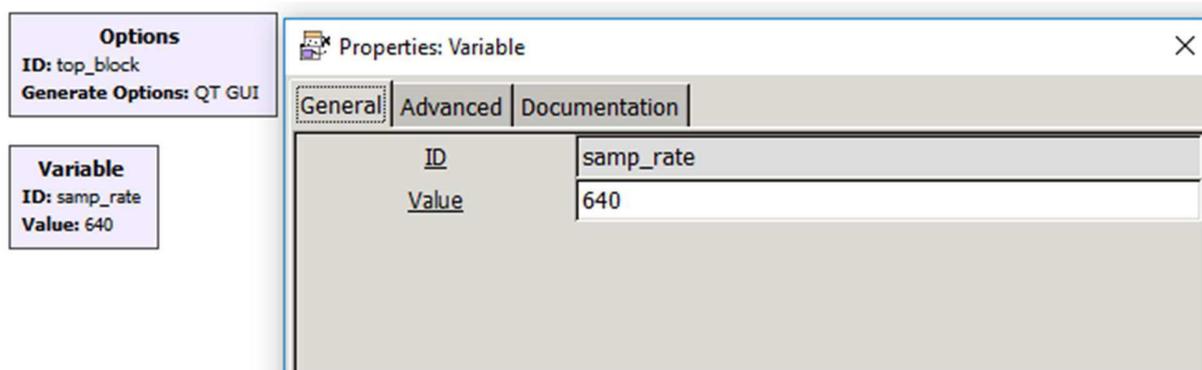


Figura 10. Variable samp\_rate

En la figura 9, se crea la variable `samp_rate`, donde se asigna un valor de 640, esta representara la frecuencia de muestreo.

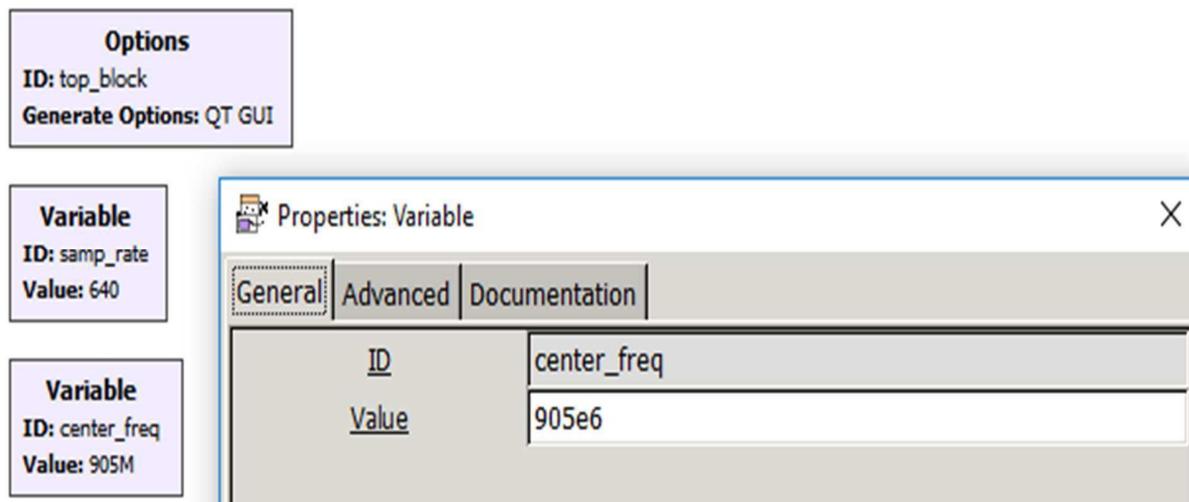


Figura 11. Center\_freq GNU Radio (2019).

La frecuencia central tendrá un valor de 905M y se representará bajo el nombre de `center_freq`.

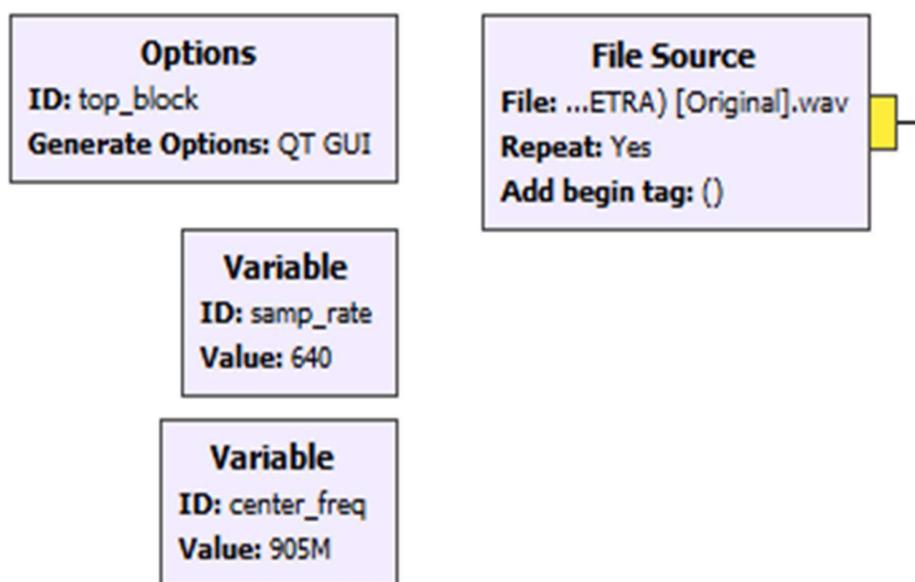


Figura 12. File Source. GNU Radio (2019).

El bloque de la figura 11, File source se encarga de leer un archivo en formato WAV.

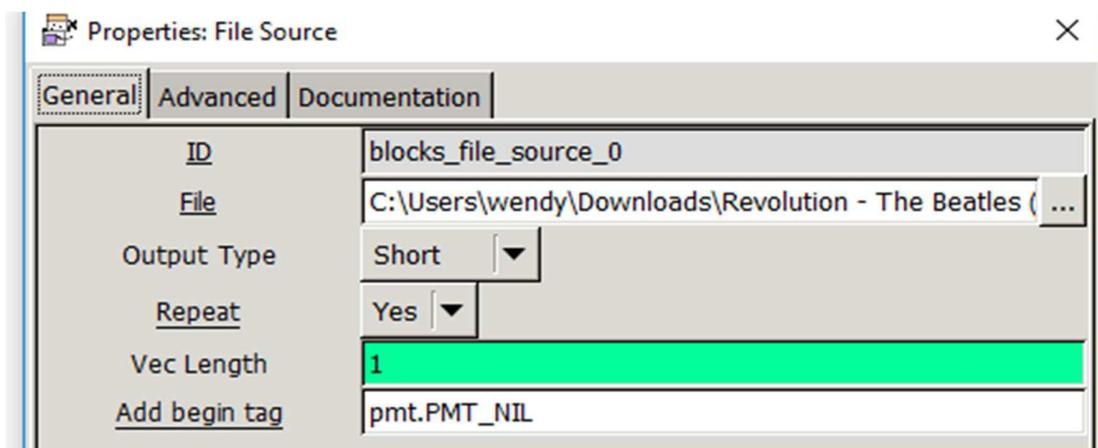


Figura 13. Parámetros File Source. GNU Radio (2019).

Como se muestra en la figura 12 en el parámetro File se adjuntará el archivo que se desea transmitir en formato WAV.

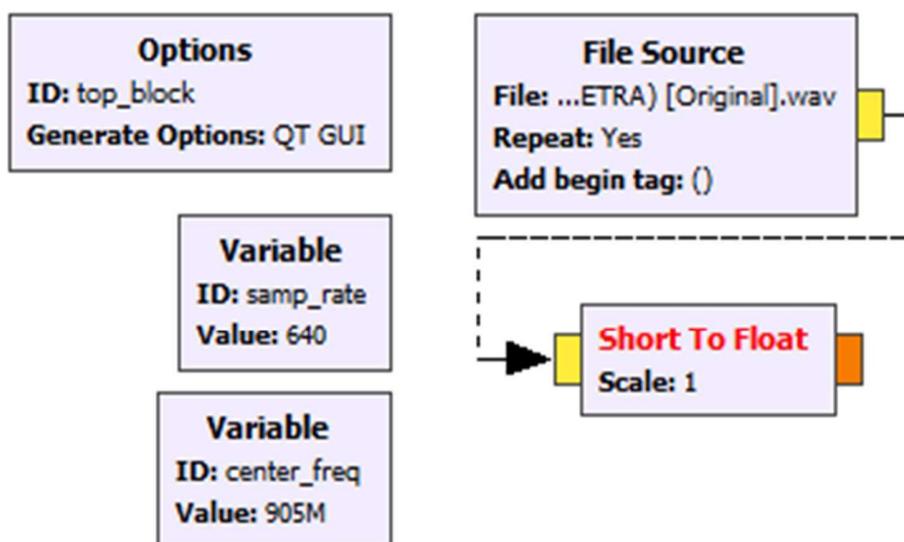


Figura 14. Short To Float. GNU Radio (2019).

El bloque Short To Float en el parámetro Scale, establece el factor de escala necesario para la conversión.

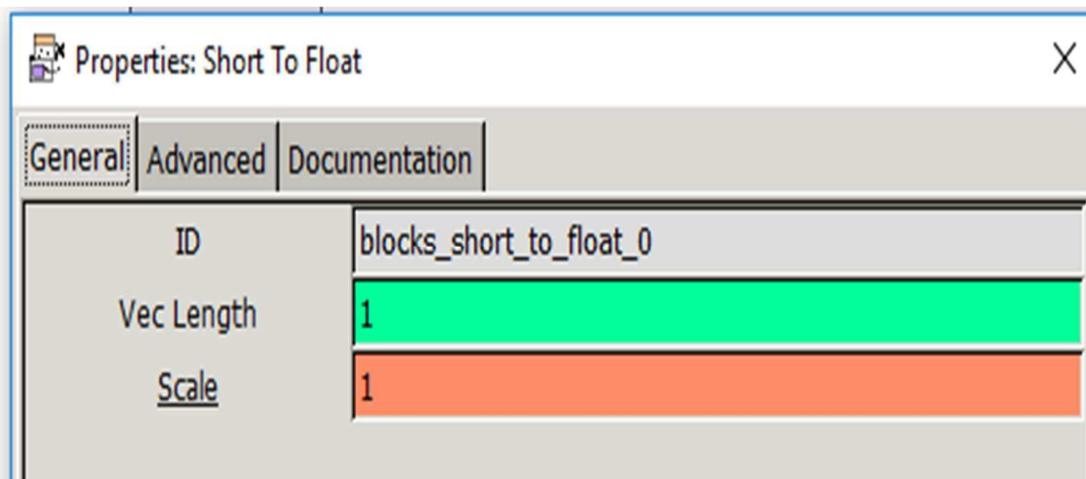


Figura 15. Parámetros Short To Float. GNU Radio (2019).

El parámetro Scale se le asigna un valor de 1 y el parámetro Vec Length también se deja en 1.

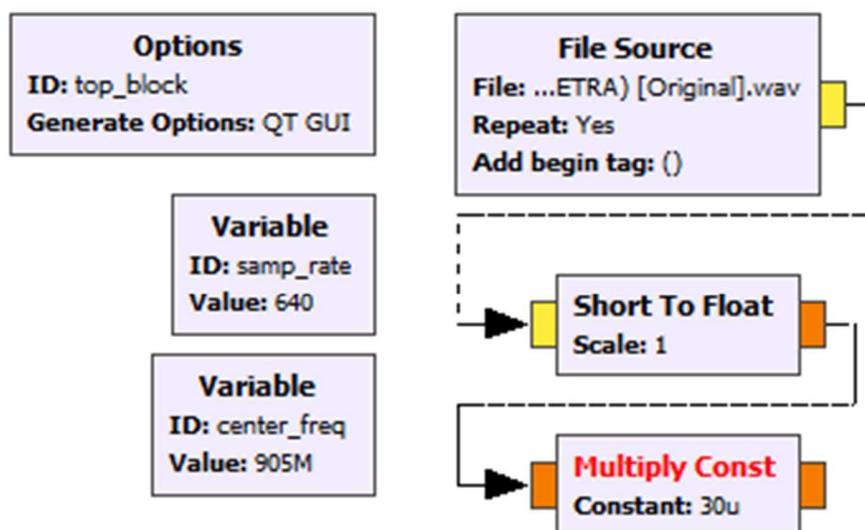


Figura 16. Multiply Const. GNU Radio (2019).

El bloque multiply const permite especificar la constante que multiplicara la entrada.

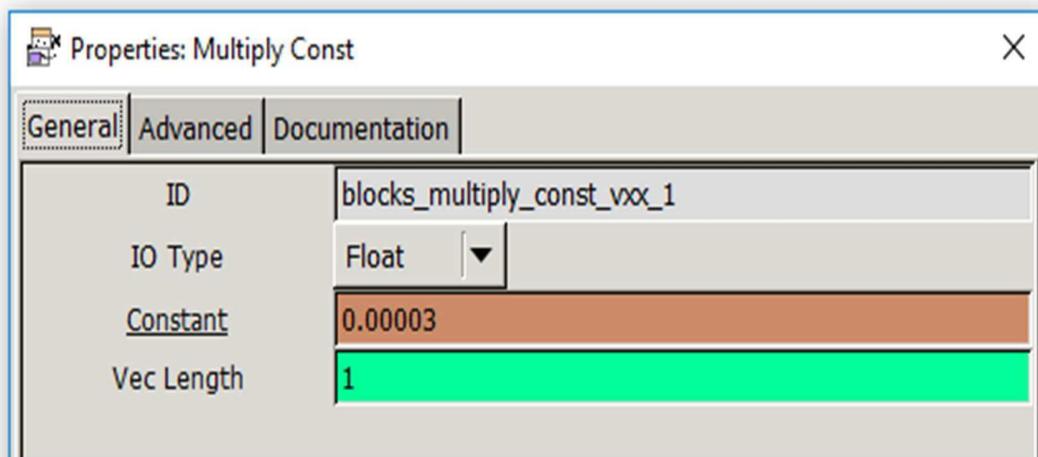


Figura 17. Parámetros Multiply Const. GNU Radio (2019).

El parámetro Constant tendrá un valor de 0.00003, y el tipo de entrada es Float.

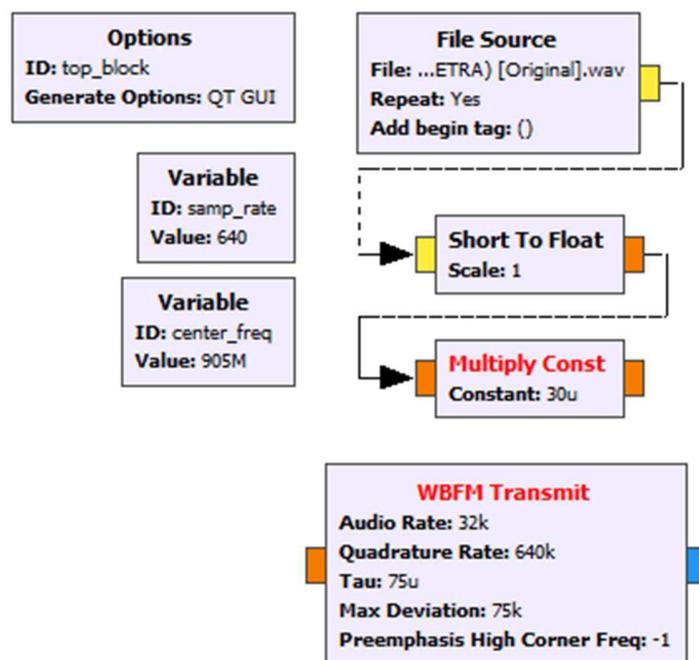


Figura 18. WBFM Transmit. GNU Radio (2019).

El bloque de la figura 17, permite generar una envolvente compleja en una señal FM.

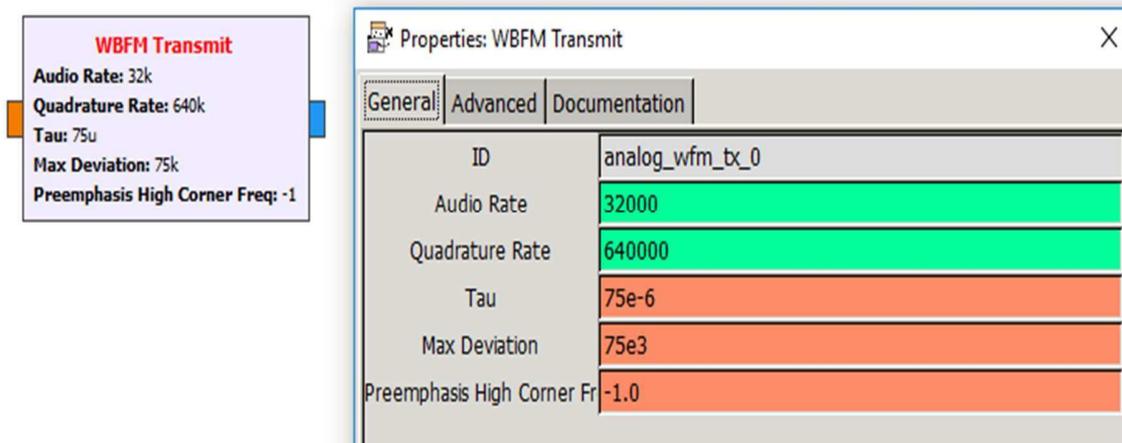


Figura 19. Parámetros WBFM Transmit. GNU Radio (2019).

Se modifica el parámetro Audio Rate (velocidad de audio), se asigna un valor de 32K, la tasa de cuadratura será de 640K y los demás parámetros se dejan por defecto.

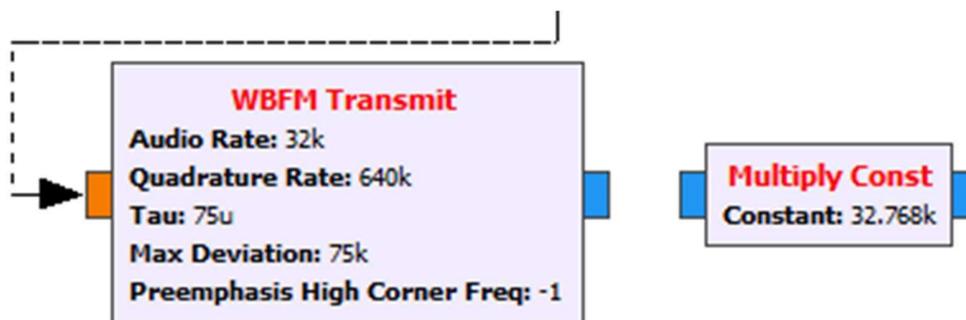


Figura 20. Multiply const\_1. GNU Radio (2019).

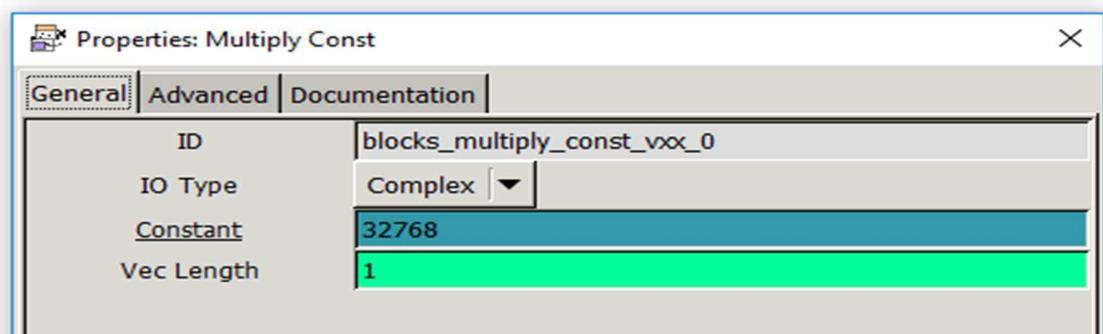


Figura 21. Parámetros Multiply Const\_1. GNU Radio (2019).

Para el bloque de la figura 20, en el parámetro constant se asignará un valor de 32.768K, el parámetro Vec Length permanece en 1.

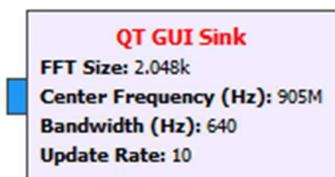


Figura 22. QT GUI Sink. GNU Radio (2019).

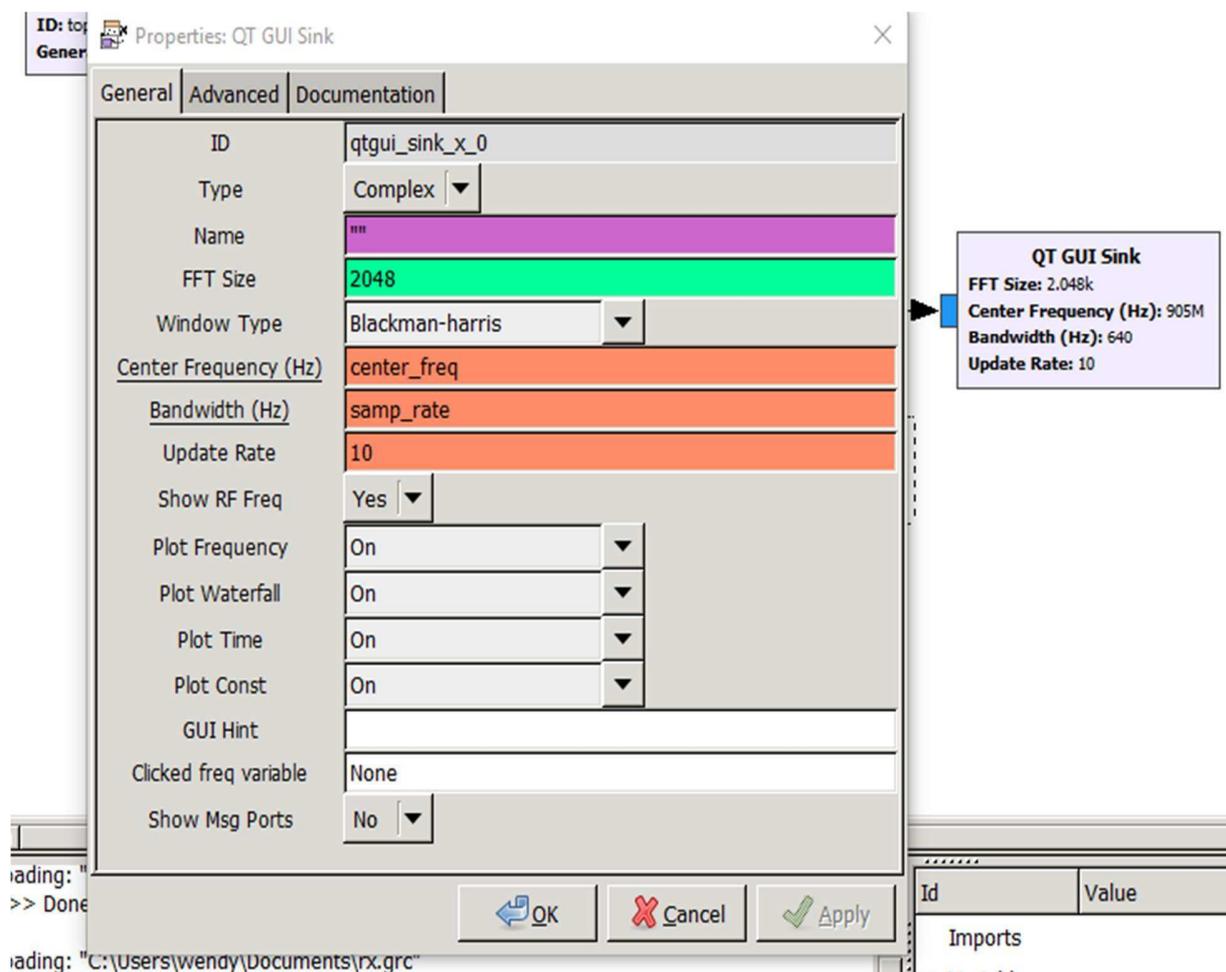


Figura 23. Parámetros QT GUI Sink. GNU Radio (2019).

Según la figura 22, al parámetro FFT Size, tendrá un valor de 2048, luego en center frequency, asignamos la variable center\_freq, de igual manera en el parámetro Bandwidth, se asigna la variable samp\_rate por ultimo el parámetro Update Rate tendrá un valor de 10.

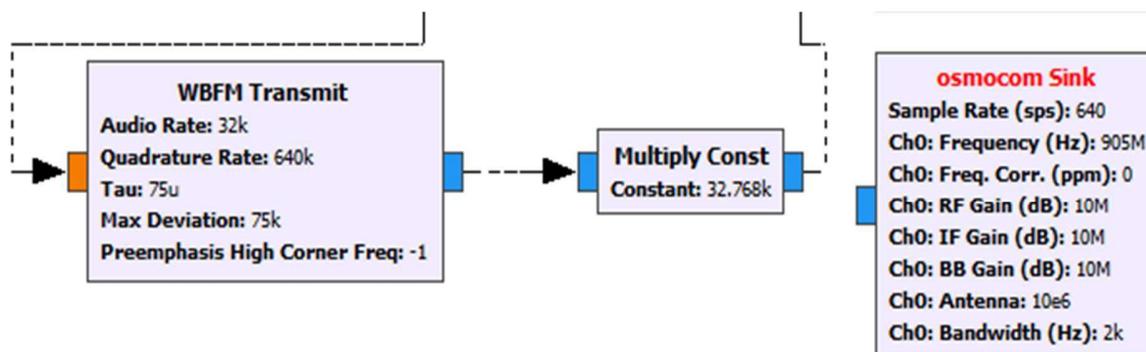


Figura 24. Osmocom Sink. GNU Radio (2019).

El bloque osmoccom sink envía a través de la interfaz USB la señal FM a la tarjeta HackRF one, la cual genera la señal de radio frecuencia en la banda FM.

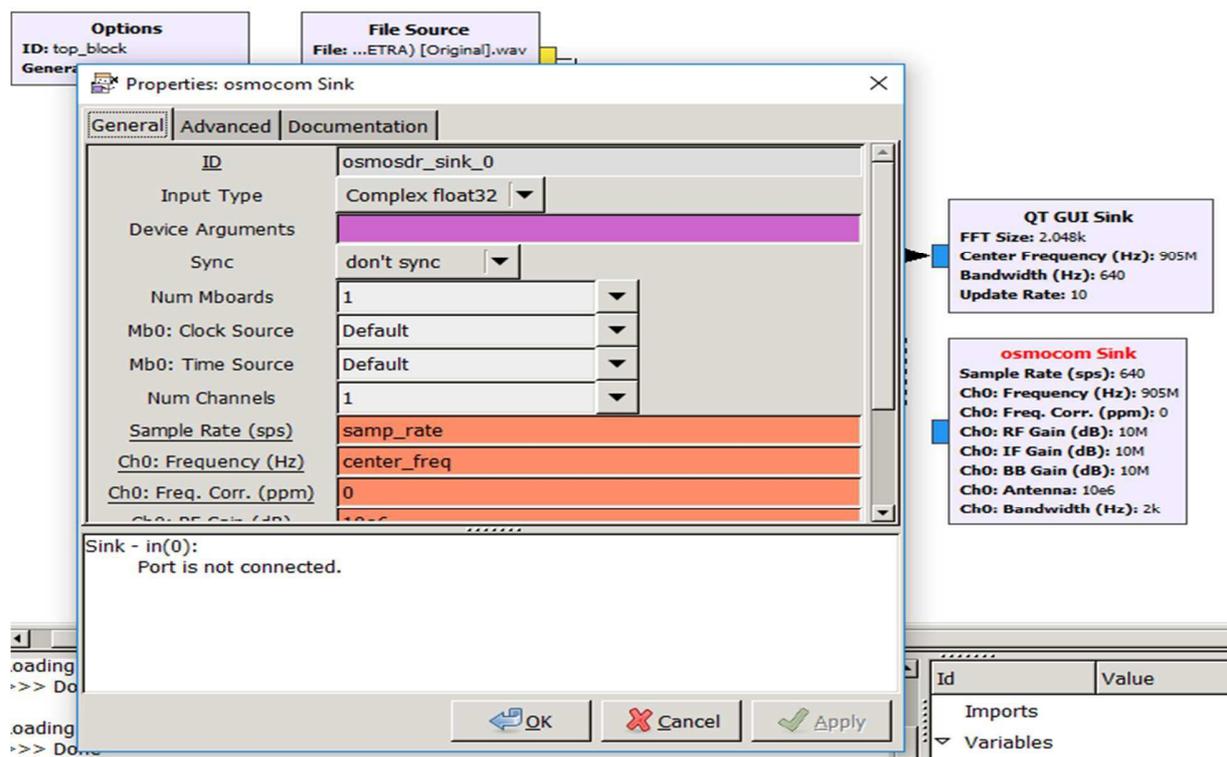


Figura 25. Parámetros osmoccom Sink. GNU Radio (2019).

Los parámetros que se modifican en la figura 24, correspondientes al bloque osmoccom Sink son la frecuencia central la cual como se ha venido mencionando es de 640, es decir, la variable samp\_rate, mientras que para el parámetro de Ch0: Frequency tendrá la variable de la frecuencia central, center\_freq, la ganancia en RF, IF, BB, tendrán un valor de 10M, este mismo valor tendrá el parámetro Antenna mientras que el ancho de banda será de 2K.

### 12.2. Implementación del receptor

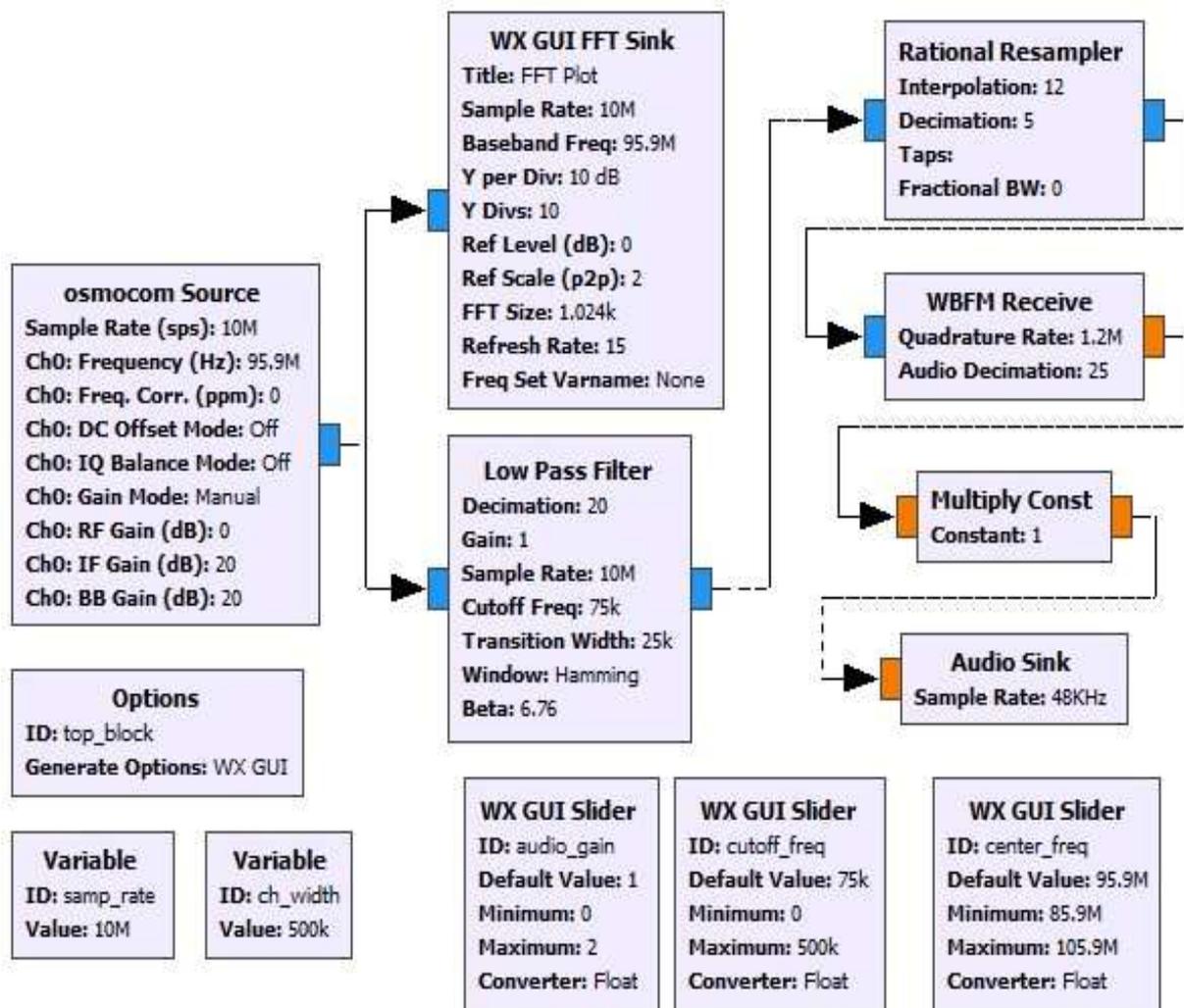


Figura 26. Receptor FM. GNU Radio (2019).

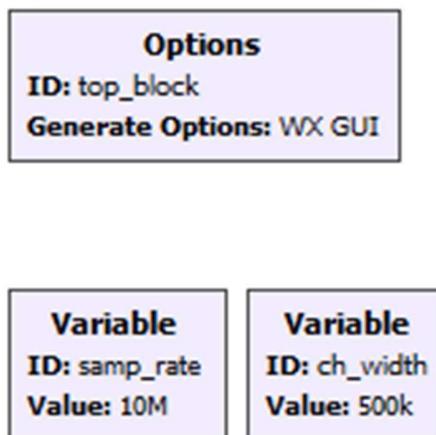


Figura 27. Variables para el receptor Fm. GNU Radio (2019).

Este bloque permite asignar un valor único bajo un nombre, como se muestra en la figura 26 y 28, se crea la variable `samp_rate` a la cual se le asigna un valor de 10M y a la variable `ch_width`, un valor de 500K.

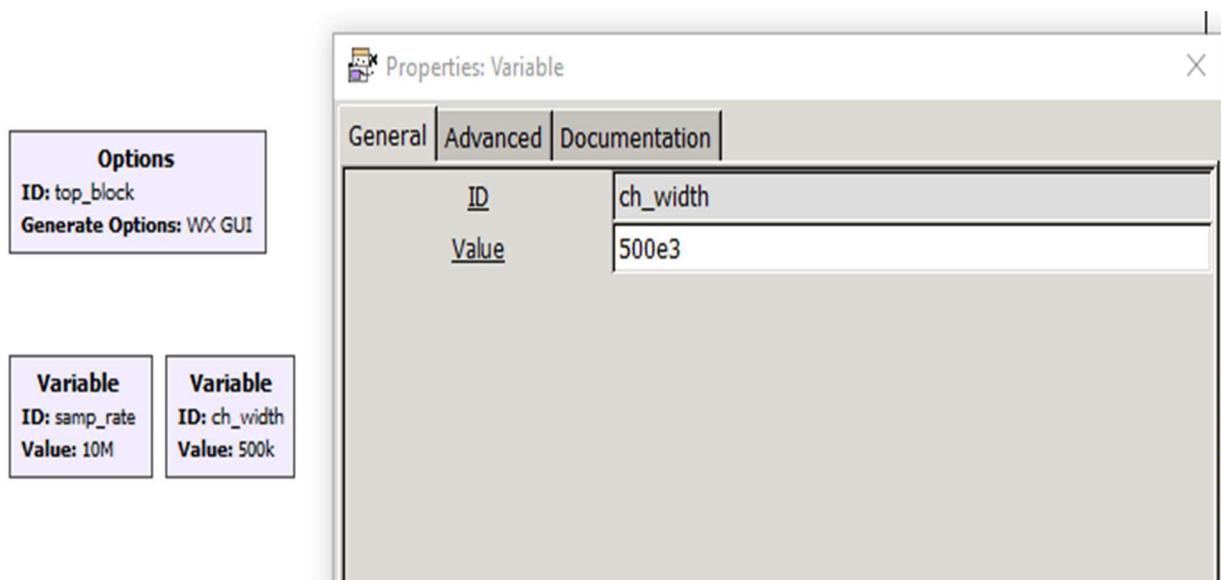


Figura 28. Variable `ch_width`. GNU Radio (2019).

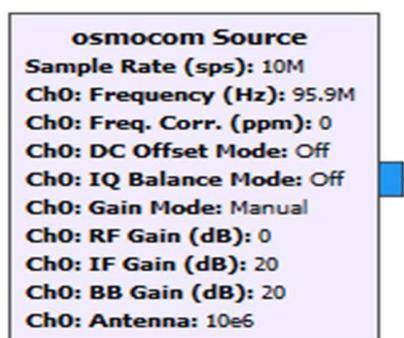


Figura 29. Osmocom Source. GNU Radio (2019).

Para permitir la comunicación entre el hardware y el GNU radio, usamos el bloque de la figura 29, en el cual se visualizan los parámetros a modificar, es decir, Sample Rate o frecuencia de muestreo, Frecuencia, Antena y ganancia RF como se muestra en la tabla 01, los parámetros restantes se dejan por defecto.

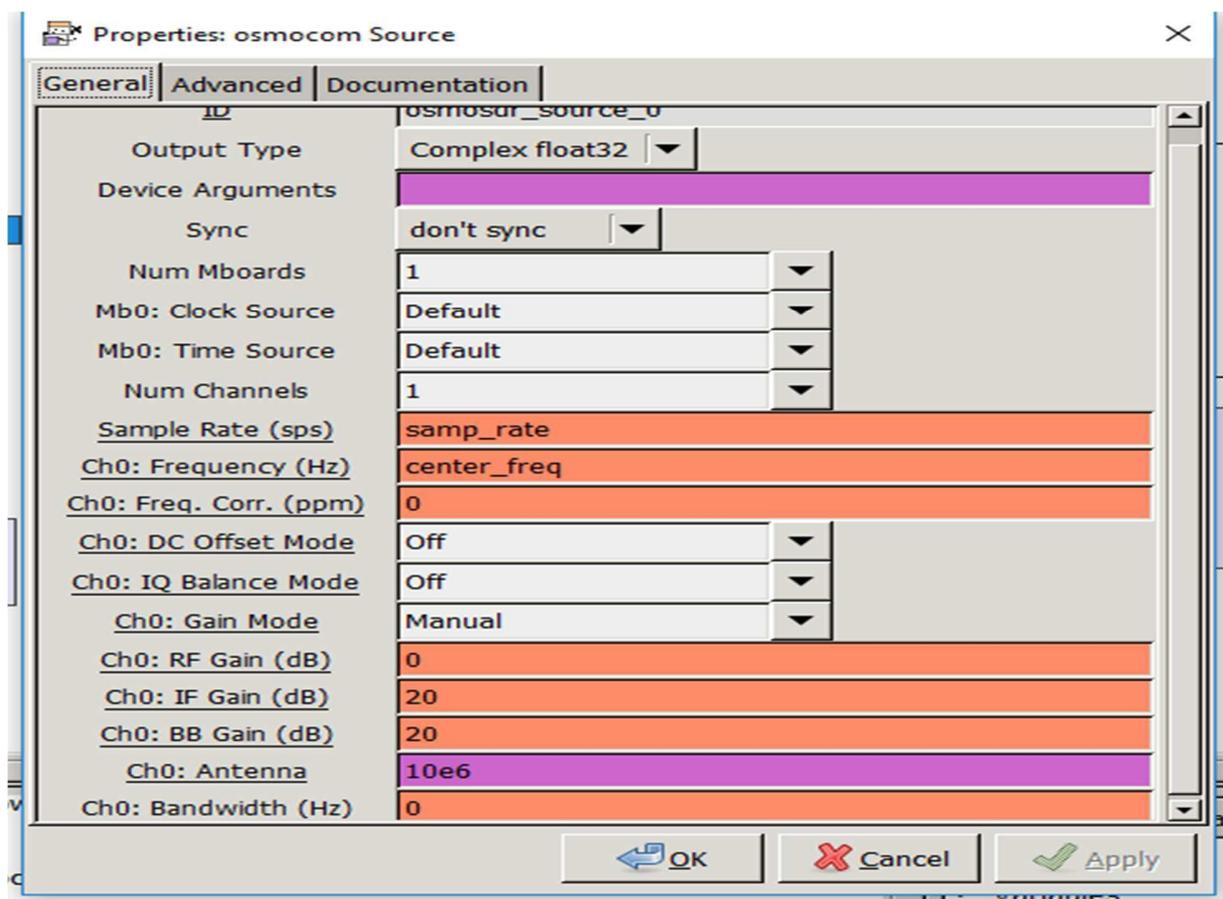


Figura 30. Parámetros osmocom Source. GNU Radio (2019).

Parámetros para el bloque osmocom Source, a la frecuencia de muestreo se le asigna un valor de 10M, para la frecuencia se da un valor de 95.5M, la antena 10M y la ganancia en 0, a los valores restantes se les deja en valor proporcionado por el programa.

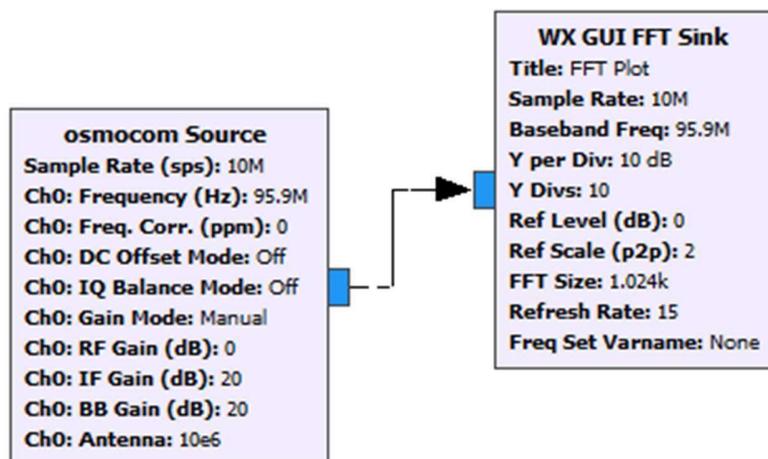


Figura 31. WX GUI FFT Sink. GNU Radio (2019).

A través del bloque WX GUI FFT Sink de la figura 30, se visualizarán los componentes de la señal.

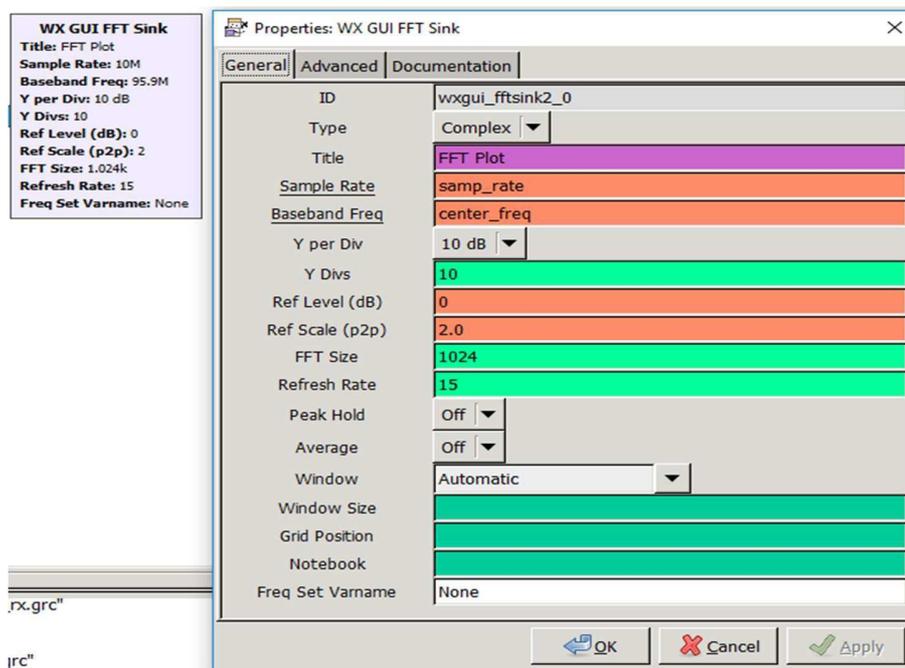


Figura 32. Parámetros WX GUI FFT Sink. GNU Radio (2019).

Los parámetros a modificar en el bloque WX GUI FFT Sink, son Sample Rate al cual se le asigna el nombre de la variable `samp_rate` y en el parámetro correspondiente la baseband o banda base, se asigna la variable `center_freq`, la cual equivale a 95.9M.

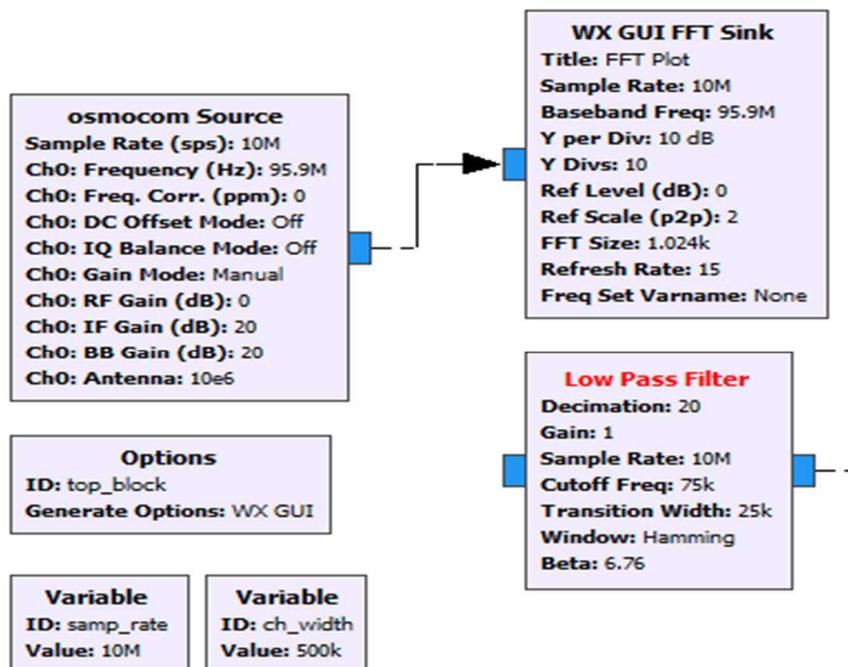


Figura 33. Low Pass Filter. GNU Radio (2019).

El filtro pasa bajo permite el paso de frecuencias bajas y debilita las altas, en esta sección se modificarán los parámetros decimation, simple rate cutoff freq, transition Width y los demás se dejan por defecto.

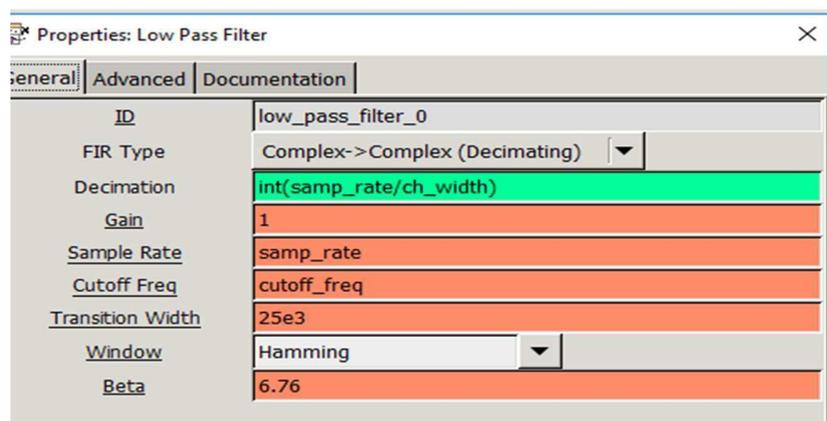


Figura 34. Parámetros Low Pass Filter. GNU Radio (2019).

Para el parámetro Decimation ingresamos la relación ente las variables samp\_rate y ch\_width,  $\text{int}(\text{samp\_rate}/\text{ch\_width})$ , luego se establece la ganancia del filtro, es decir, se le asigna un valor de 1 a la variable Gain, como el nombre lo indica a los dos siguientes parámetros frecuencia de muestreo y frecuencia de corte, se les asigna la variable que coincide con su nombre, samp rate y cutoff freq.

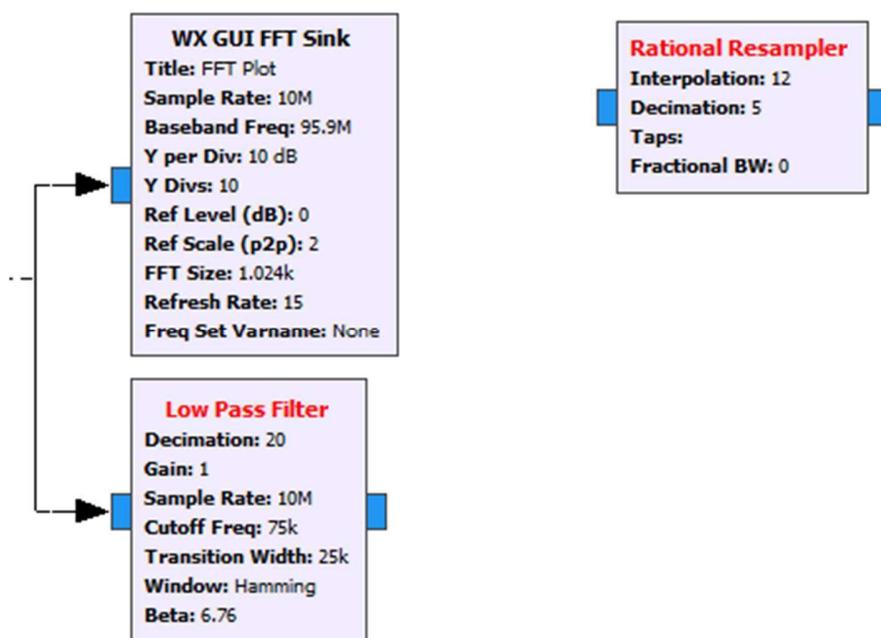


Figura 35. Rational Resampler. GNU Radio (2019).

El bloque de la figura 32 es el encargado de convertir la frecuencia de muestreo en otra, en el diagrama los bloques que siguen a éste, están a la espera de la frecuencia de muestreo de salida.

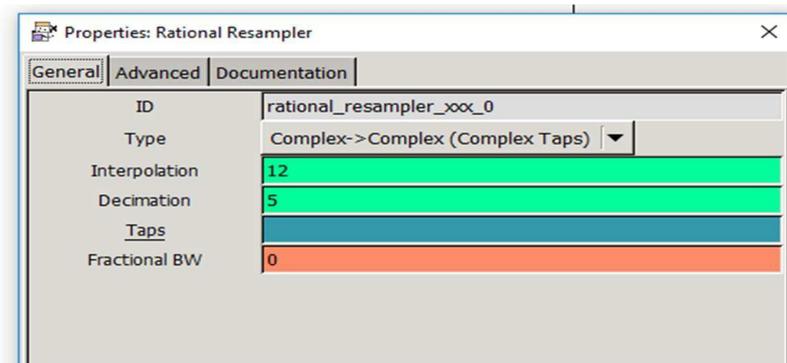


Figura 36. Parámetros Rational Resampler. GNU Radio (2019).

Para el caso de este bloque solo se modificarán el parámetro Interpolation, al cual se le asigna un valor de 12 y el parámetro Decimation al cual se le asignan un valor de 5.

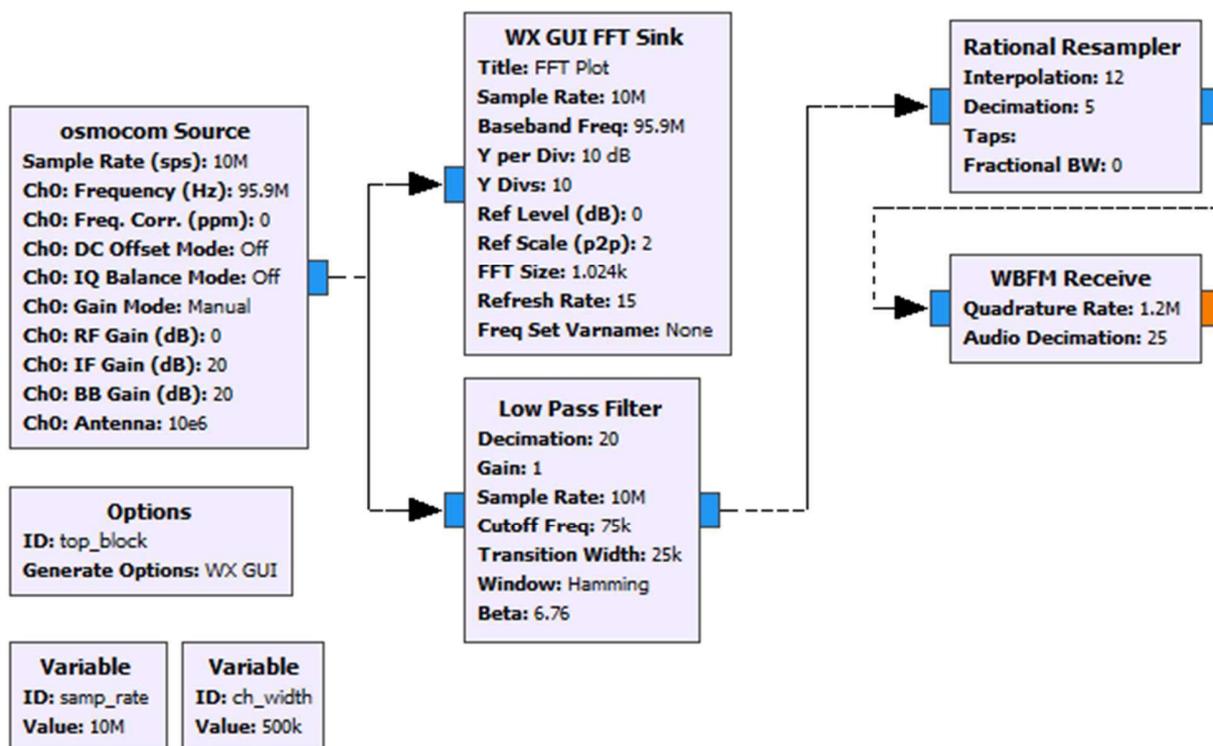


Figura 37. WBFM Receive. GNU Radio (2019).

El bloque de la figura 34, funciona como demodulador. Se modifica la tasa de cuadratura y la decimación de audio.

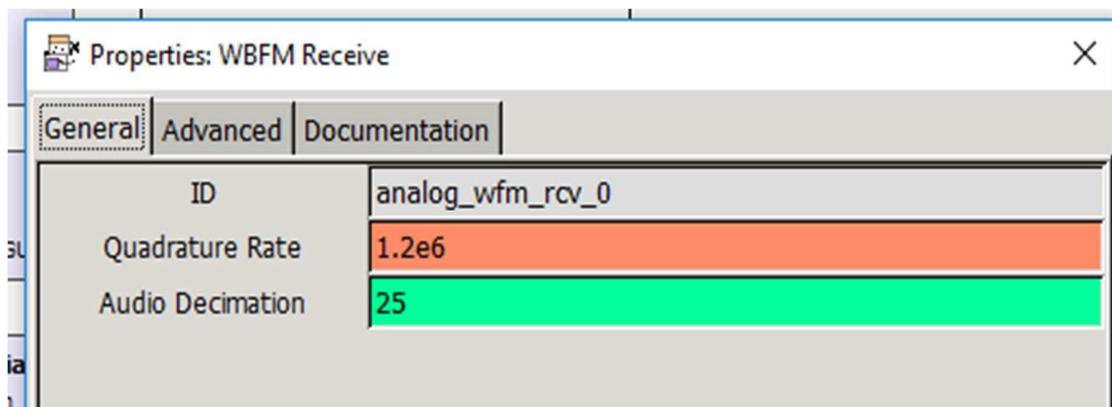


Figura 38. Parámetros WBFM Receive. GNU Radio (2019).

Para los parámetros del bloque WBFM Receive, se asignará un valor de 1.2M a la tasa de cuadratura y 25 a la decimación de audio.

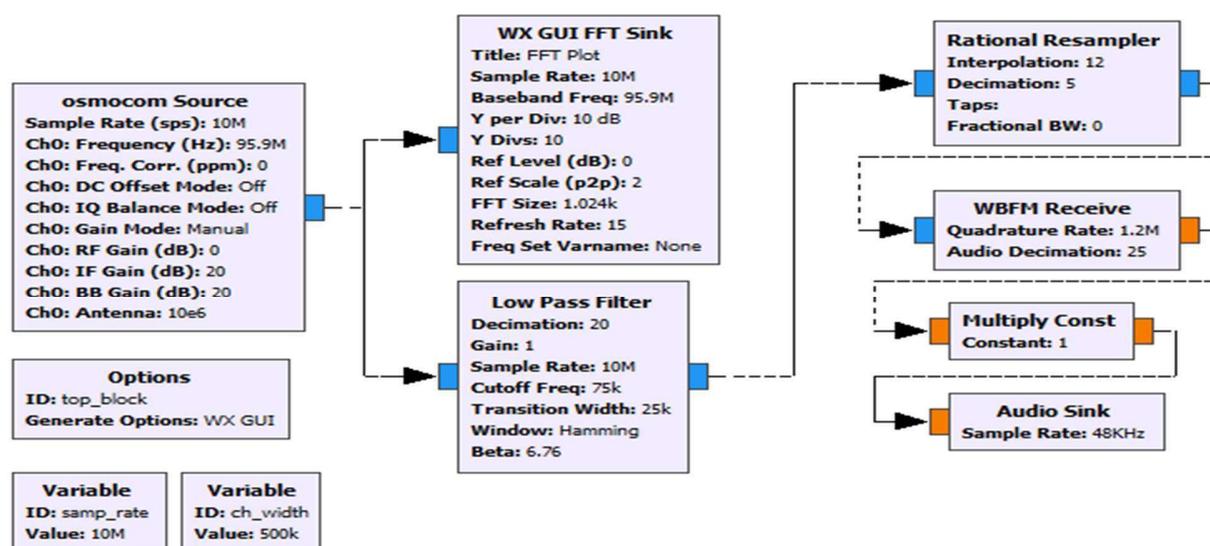


Figura 39. Multiply Const. GNU Radio (2019).

Para el bloque de la figura 39, se modifica el parámetro Constant, el cual permite especificar la constante para multiplicar con la entrada, se asigna un valor de 1.

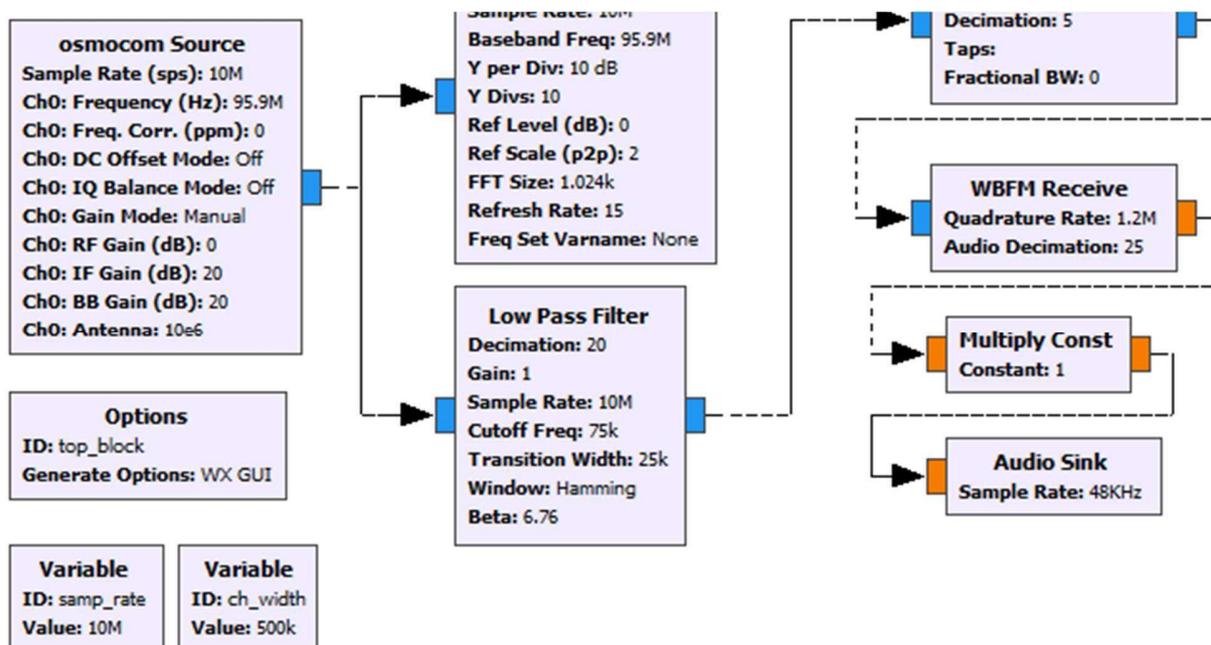


Figura 40. Audio Sink. GNU Radio (2019).

El bloque Audio Sink, figura 39 representa la salida de audio.

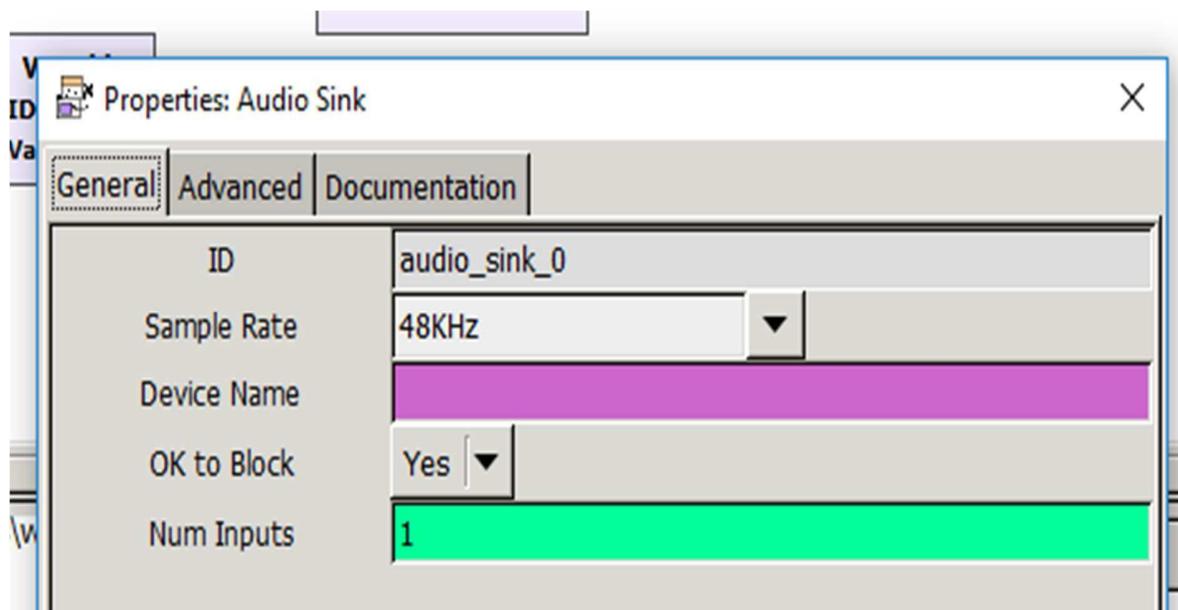


Figura 41. Parámetros Audio Sink. GNU Radio (2019).

En la figura 40, se muestra el parámetro que se modifica en el bloque Audio Sink, se asigna el valor de 48Khz.

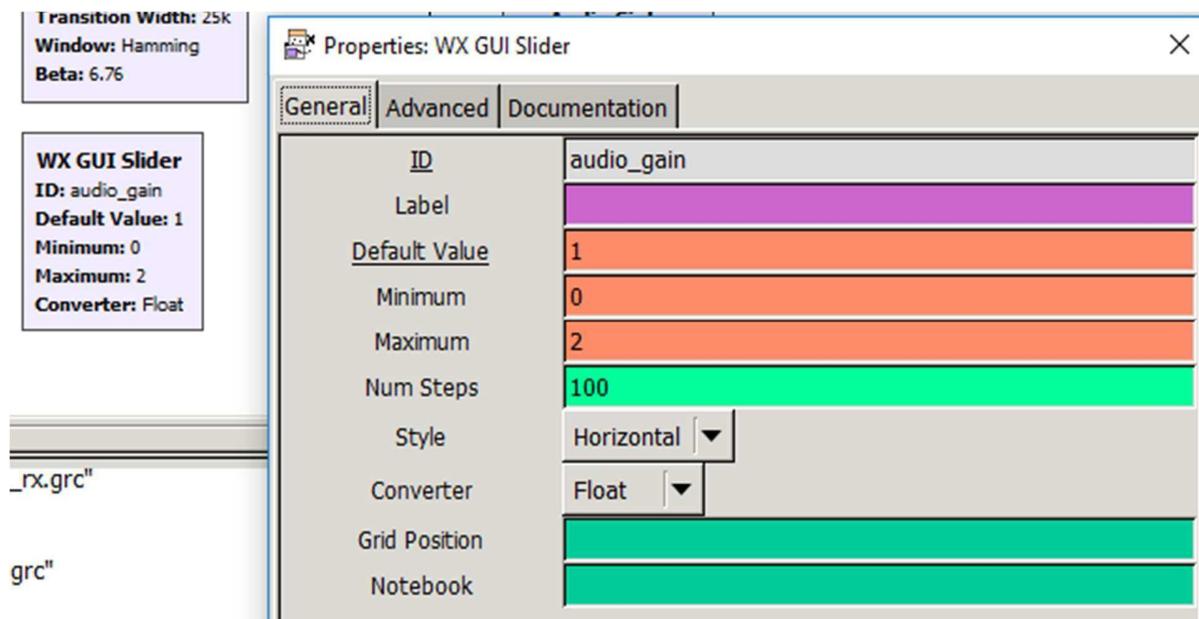


Figura 42. WX GUI Slider, audio\_gain. GNU Radio (2019).

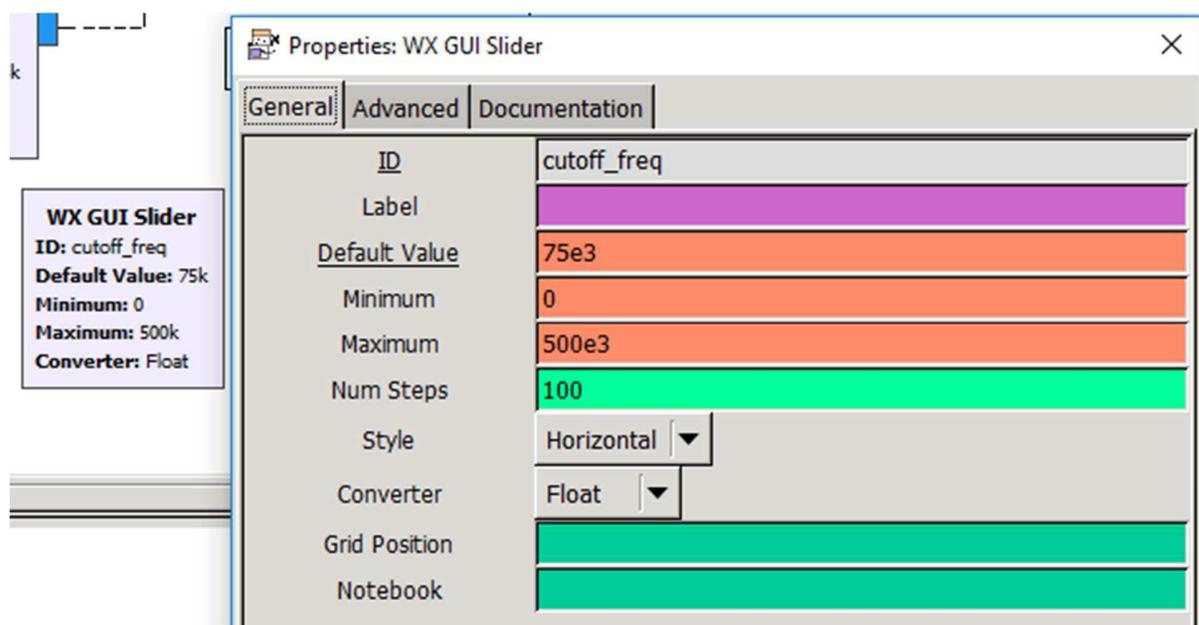


Figura 43. WX GUI Slider, cutoff\_freq. GNU Radio (2019).

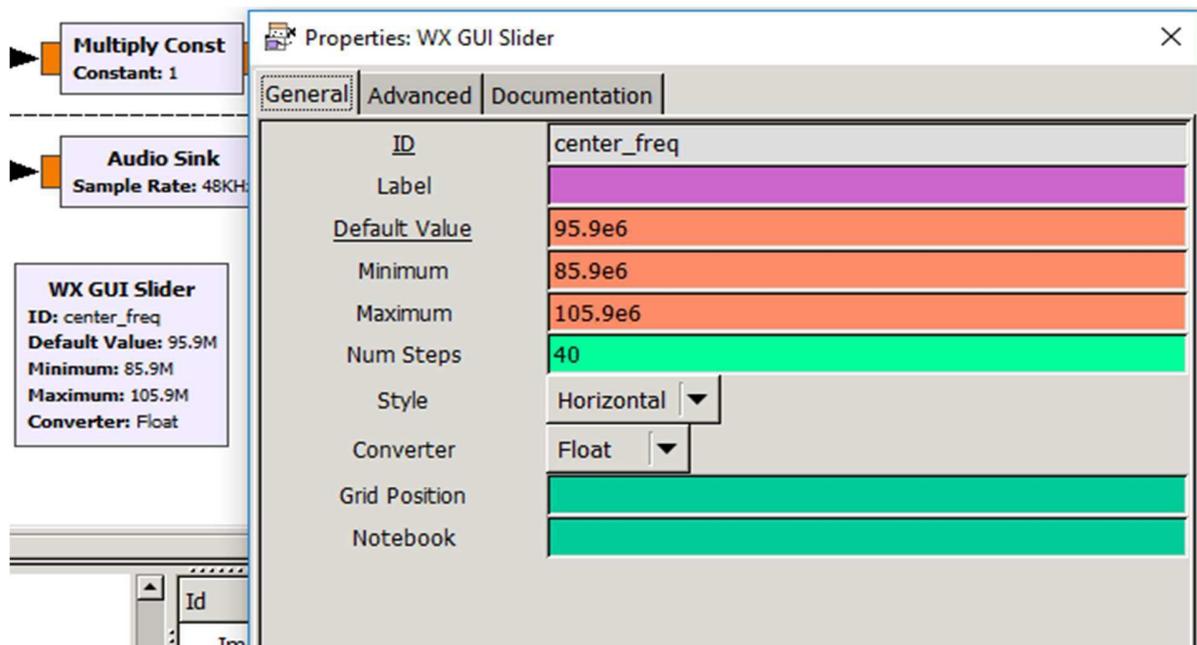


Figura 44. WX GUI Slider, center\_freq. GNU Radio (2019).

Las propiedades deslizantes GUI WX, se observan en las figuras 41, 42, 43. Por medio del parámetro ID, se establece el nombre que controlará esa variable, es decir, en la figura 40 se controlará la ganancia de audio, en la figura 41, la frecuencia de corte y en la figura 43, la frecuencia central.

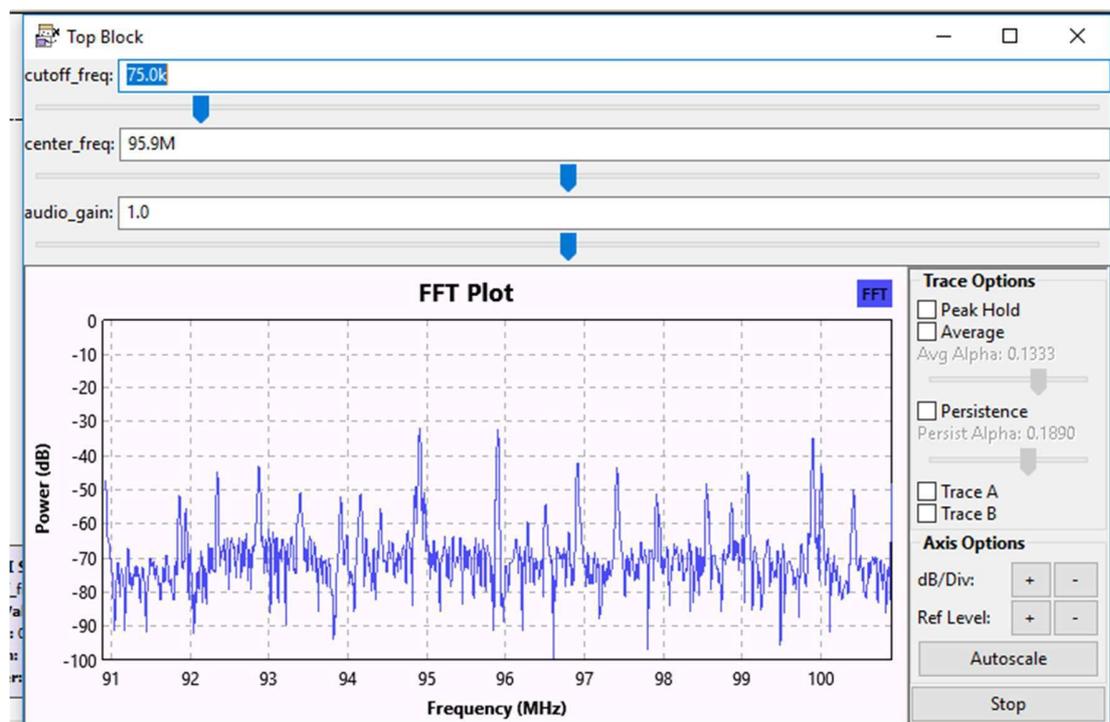


Figura 45. FFT PLOT. GNU Radio (2019).

En la figura 45 se observa la señal recibida además tres controles deslizantes horizontalmente, los cuales permiten cambiar las variables mencionadas en las figuras 42, 43, 44.

### 12.3. Aplicación de la transmisión y recepción

Inicialmente se ejecutará el diagrama de bloques de la figura 6, pero con la diferencia de que se transmitirá en la frecuencia de 746 MHz, se conecta el HackRF one al amplificador de señales GRF330 WIRELESS SYSTEM y la antena Broadband Omni, figura 45, la alimentación del amplificador será proporcionada por una fuente, como se muestra en la figura 46.



Figura 46. Antena Broadband Omni. GNU Radio (2019).



Figura 47. Montaje de transmisión. GNU Radio (2019).

El transmisor estará ubicado en el edificio Fray Rubén Buitrago de la universitaria Agustiniiana, en las coordenadas 4.653327,-74.145257, como se observa en la figura 47.



Figura 48. coordenadas 1. GNU Radio (2019).

En la figura 48, se observa que el transmisor está en funcionamiento y como se muestra en la figura 49, se procede a medir la potencia real de transmisión, conectando el analizador de espectro.

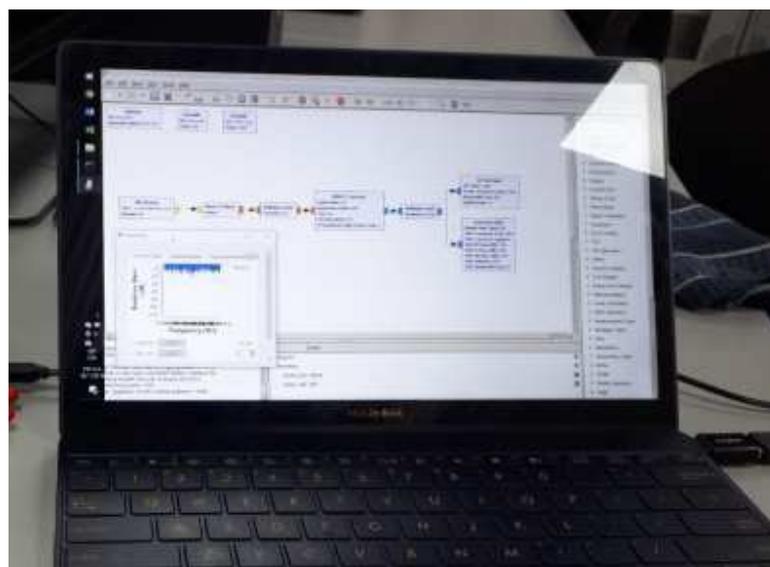


Figura 49. transmisor. GNU Radio (2019).



Figura 50. Medición potencia de transmisión. GNU Radio (2019).

Para calcular la potencia real de transmisión se debe sumar la potencia entregada por el analizador de espectro, es decir,  $-32.2$  dBm, con la ganancia de la antena, esto es  $5$  dBi.

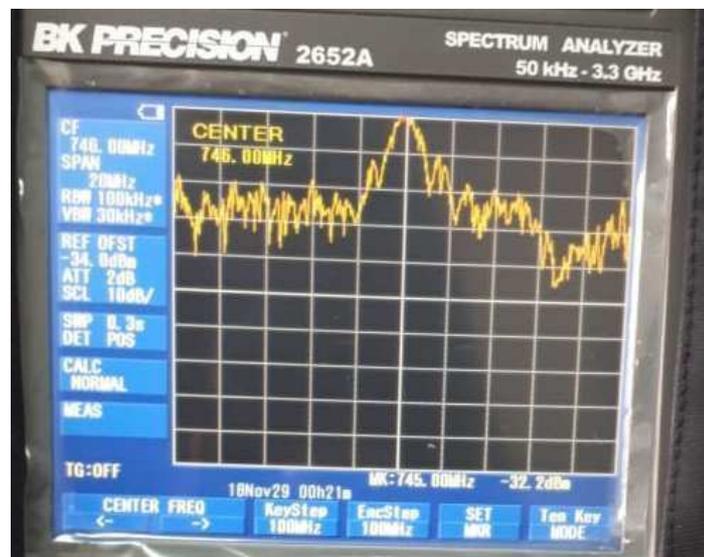


Figura 51. Medición potencia. GNU Radio (2019).

$$3 Pt = Pi + G \quad (4)$$

Ecuación 4 cálculo de potencia transmitida

Pi: potencia del transmisor, entregada por el analizador de espectro

G: Ganancia de la antena

Pt: Potencia total transmitida

Primero se debe convertir los valores a unidades de medidas iguales.

- dBm a dB

$$dB \text{ a } dB = -32.2 - 30 = -62.2 \text{ dB} \quad (5)$$

Ecuación 5

- dBi a dB

$$dBi \text{ a } dB = 5 - 2.14 = 2.86 \text{ dB} \quad (6)$$

Ecuación 6

Potencia transmitida

$$-62.2 + 2.86 = -59.34 \text{ dB} \quad (7)$$

Ecuación 7

$$-59.34 + 30 = -29.34 \text{ dBm} \quad (8)$$

Ecuación 8

El receptor estará ubicado en las coordenadas 4.652794, -74.144526, como se muestra en la figura 51.



Figura 52. Coordenadas 1. GNU Radio (2019).

Se ejecuta el diagrama de recepción de la figura 26, se conecta al HackRF one y a la antena Broadband, omni como se observa en la figura 52.



Figura 53. Montaje del receptor. GNU Radio (2019).

En la figura 54, se puede observar el receptor en funcionamiento en la frecuencia de 746 MHz.

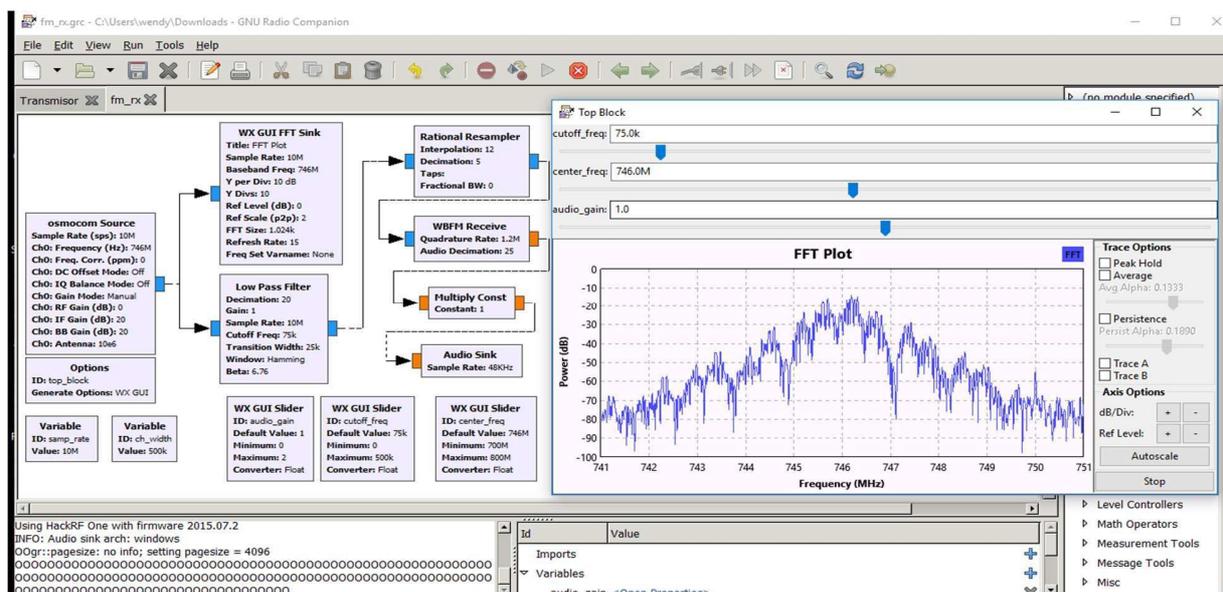


Figura 54. Receptor. GNU Radio (2019).

Para poder medir la potencia de recepción usaremos el programa SDR Consolé el cual para este ejercicio funciona como analizador de espectro, figura 54, como se observa en la figura 55, este programa permite visualizar la potencia de recepción.



Figura 55. SDR Console. GNU Radio (2019).

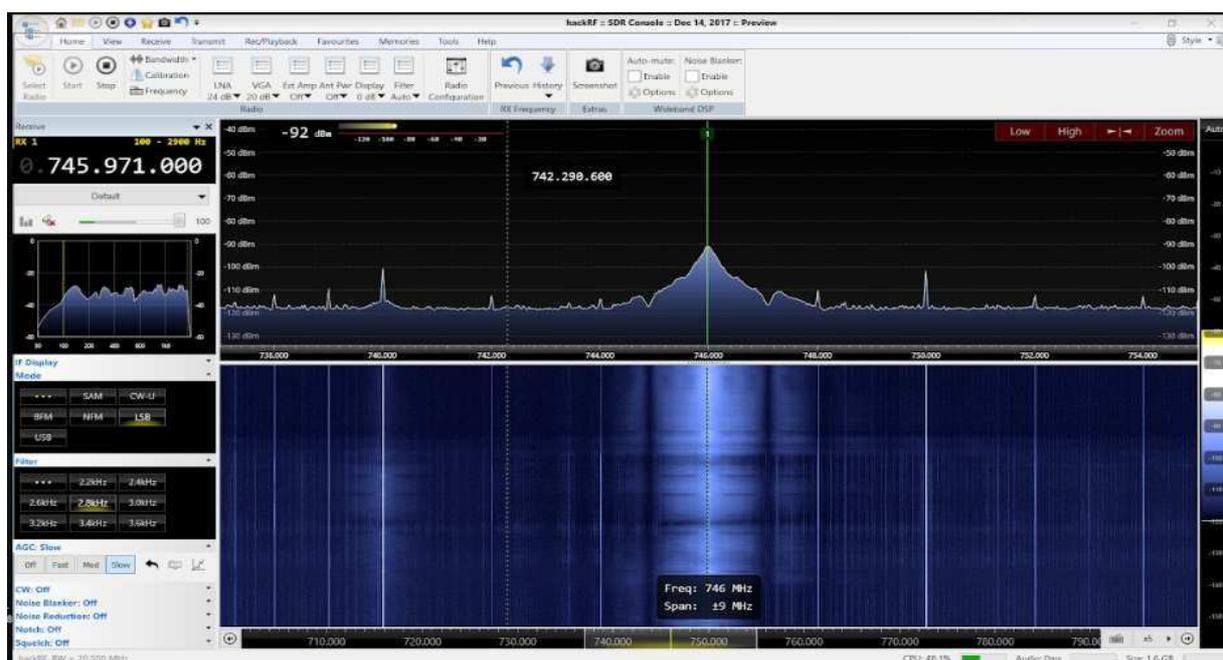


Figura 56. potencia de recepción. GNU Radio (2019).

La potencia recibida fue de -92 dBm, ahora se procede a calcular la potencia perdida en la transmisión y recepción de la señal.

$$P = P_t - P_x$$

Ecuación 9

P: pérdida de potencia

Pt: potencia transmitida

Px: potencia recibida

$$P = (-29.34 \text{ dBm}) - (-92 \text{ dBm}) = 62.66 \text{ dBm}$$

## 12.4. Simulación

La simulación de la prueba anterior se realizará entre los puntos que se observan en la figura 56.



Figura 57. Puntos de simulación. GNU Radio (2019).

A través del programa Radio Mobile, se realizará la simulación, en la figura 57 se observa la línea de vista entre los puntos ya mencionados.

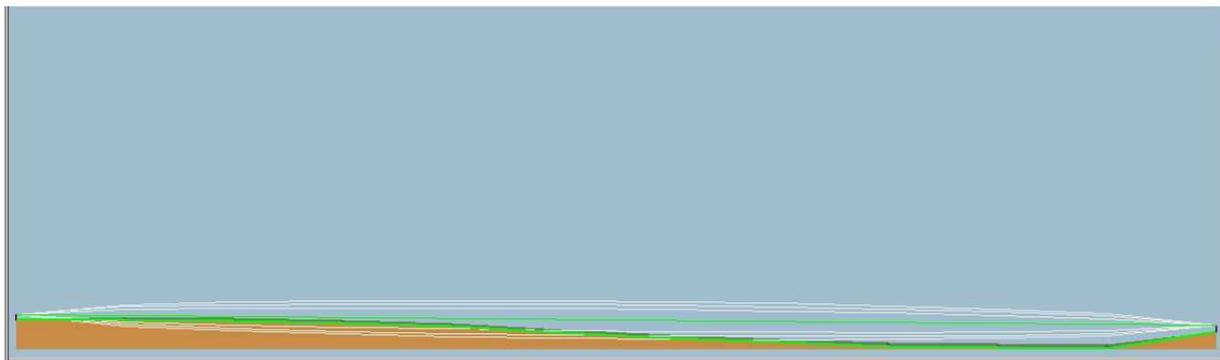


Figura 58. Línea de vista. GNU Radio (2019).

Observamos los datos que proporciona el programa en la figura 58.

Transmisor (1)		(2) Receptor	
Latitud	4.653327 °	Latitud	4.652794 °
Longitud	-74.145257 °	Longitud	-74.144526 °
Elevación del terreno	2549.0 m	Elevación del terreno	2546.0 m
Altura de la antena	1.6 m	Altura de la antena	1.6 m
Azimuth	126.19 TN   133.22 MG °	Azimuth	306.19 TN   313.22 MG °
Inclinación	-1.71 °	Inclinación	1.71 °
Sistema de radio		Propagation	
Potencia TX	-32.20 dBm	Pérdida en espacio libre	71.54 dB
Pérdida en cable TX	3.00 dB	Pérdida por obstrucción	0.31 dB
Ganancia de antena TX	5.00 dBi	Pérdida por bosque	1.00 dB
Ganancia de antena RX	5.00 dBi	Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida en cable RX	0.50 dB	Pérdida estadística	5.28 dB
Sensibilidad RX	-113.02 dBm	Pérdida total	78.14 dB
Performance			
Distance			0.100 km
Precisión			9.1 m
Frecuencia			902.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente			0.000 W
Ganancia del sistema			87.32 dB
Fiabilidad requerida			70.000 %
Señal recibida			-103.84 dBm
Señal recibida			1.44 µV
Márgen de escucha			9.19 dB

Figura 59. Datos de la simulación. GNU Radio (2019).

En la figura 59, se puede observar el punto de transmisión y recepción.



Figura 60. Puntos de transmisión y recepción. GNU Radio (2019).

### 13. Practicas implementando SDR

El diseño de las prácticas de laboratorio 01 y 02, se basan en el libro, ejercicios y prácticas de laboratorio de análisis de circuitos y sistemas de Beatriz del Castillo, Antonio García Zambrana, Antonio Puerta, las practicas están conformadas por un objetivo, el cual servirá para evaluar el resultado de la práctica también contienen un listado de palabras claves, las cuales ayudaran al interesado en desarrollar las practicas a estar en contexto con lo que se planea hacer, se especifican los materiales necesarios para el desarrollo de la práctica además se incluye una sección denominada organización de la práctica, la cual establece una serie de pasos para lograr solucionar las prácticas.

La practica 01, busca evaluar las pérdidas de potencia en un entorno donde son evidentes obstáculos como, muros, escaleras, puertas, vidrios, entre otros materiales que son comunes de encontrar en un ambiente urbano. Con la practica 02, se planea determinar cómo se debilita la señal, respecto a potencia, en un campo abierto. Para las prácticas en mención, se usarán las antenas tipo omnidireccional broadband en un rango de frecuencias de 700Mhz a 3Ghz y 4Ghz a 6Ghz con una ganancia de 5dBi y la antena tipo omnidireccional en la banda de 138 a 174Mhz y una ganancia de 4.5dB.

Cabe resaltar que la universitaria Agustiniiana cuenta con otras antenas, las cuales manejan bandas diferentes a las ya mencionadas, con las cuales se podrían desarrollar las mismas prácticas, pero con la diferencia de transmitir en otra frecuencia, esto con el fin de observar el efecto que tienen las antenas en la transmisión y cómo además de otros factores se puede debilitar una señal respecto a su potencia.

#### 13.1. Practica 01

##### 13.1.1 Objetivo.

Evaluar las pérdidas de potencia en una transmisión RF, teniendo en cuenta los obstáculos en zonas urbanas.

##### 13.1.2 Conceptos claves.

**13.1.2.1 La atenuación.** Al propagar ondas estas se alejan entre sí y se extienden sobre una mayor área esto causa que se reduzca la densidad de potencia, Fig. 1, lo que es equivalente a la atenuación, la cual está expresada en dB, donde su definición matemática

es  $y=10 \log (P1/P2)$ , el comportamiento de las ondas puede ser alterado en el espacio libre debido a los efectos ópticos, como lo es el cambio de dirección al momento de pasar de un medio a otro, a diferentes velocidades de propagación, esta velocidad es inversamente proporcional a la densidad del medio, lo que lleva a concluir que siempre y cuando una onda se traslade de un medio a otro y estos cuenten con distinta densidad se evidenciara el efecto de refracción. Se presenta también el efecto de difracción, donde las ondas se deforman al atravesar un orificio lo que causa que esta se disperse.

Tomasi, W (2003)

**13.1.2.2 SDR.** Radio definido por software, un radio en donde todas las funciones de la capa física se definen por software, la radio como medio inalámbrico entre dos puntos ha venido presentando mejoras en su diseño electrónico, lo cual ha permitido mejorar la emisión y recepción de datos pero no fue hasta mediados de los años 90 cuando se realizaron investigaciones para poder crear sistemas que no tuvieran que depender de su hardware, es decir, que muchas de sus partes físicas pudieran ser controladas a través de un ordenador, en conclusión SDR, permite que un software realice las tareas complejas en un equipo de radio en lugar de grandes cantidades de circuitos que estarían en capacidad de ejecutar la misma tarea. A través de estos se pueden crear transmisores y receptores para todo tipo de señales, filtros, moduladores y demoduladores, entre muchos otros.

**13.1.2.3 Los HackRF one.** Son periféricos de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1 MHz a 6 GHz diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, el HackRF one es una plataforma de hardware de código abierto que puede usarse como un periférico USB o programarse para una operación independiente. (greatscottgadgets, 2009-2016)

### 13.1.3 Materiales necesarios.

- Computador
- Analizador de espectro
- HackRF One
- Antena tipo broadband omnidireccional, 700Mhz-3Ghz, 4Ghz-6Ghz, 50 Ohms, 5dBi, 50 watts
- Software GNU RADIO
- Software SDR CONSOLE

### 13.1.4 Organización de la practica.

Esta práctica se desarrollará en 4 pasos, el primero será la implementación de la transmisión, el segundo la recepción de la señal con el programa SDR Console, el tercero indicará la ubicación de los equipos y el cuarto la medición de la perdida de potencia.

**13.1.4.1. Paso 1.** El computador debe tener instalado el programa GNU RADIO, el cual se puede descargar en [wiki.gnuradio.org/index.php/InstallingGR](http://wiki.gnuradio.org/index.php/InstallingGR), existe la versión para Linux, Windows, Mac Os X.

En este programa se realizará el diagrama de bloques de la figura 01, el cual permitirá la transmisión, cabe resaltar que el formato de la señal que se desee enviar debe ser WAV, la frecuencia de transmisión debe de estar dentro del rango de frecuencia según las características de la antena.

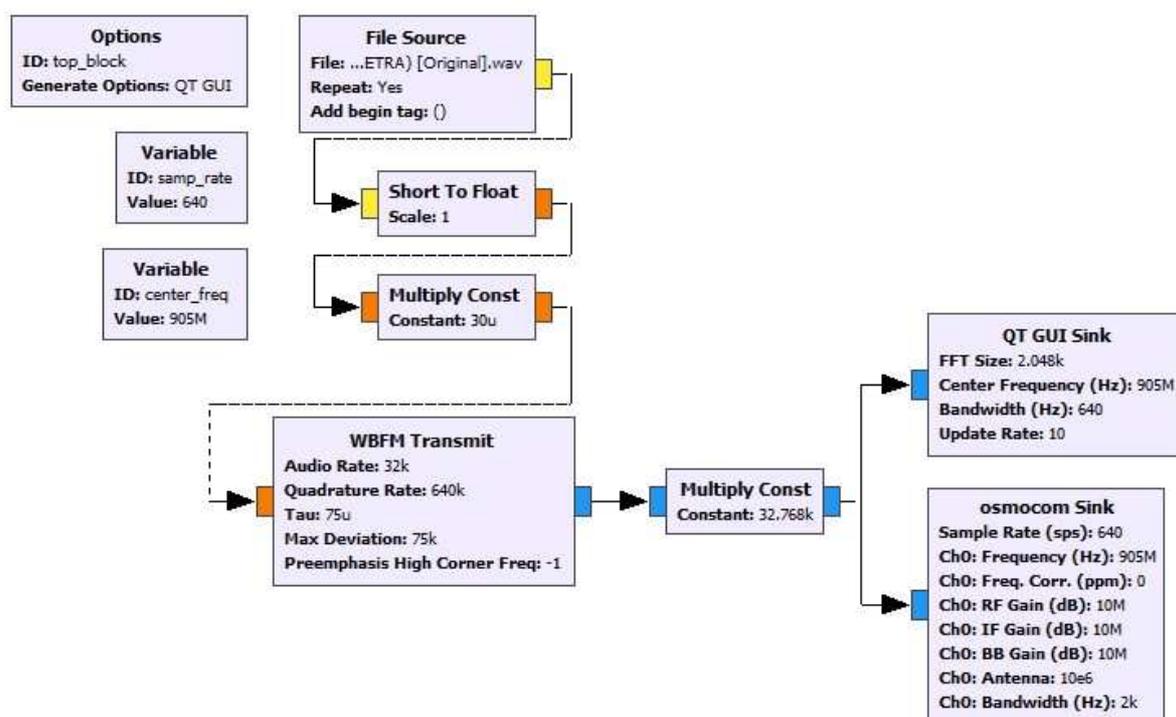


Figura 61. Diagrama de bloques para la transmisión. GNU Radio (2019).

**13.1.4.2. Paso 2.** En otro computador se instalará el programa SDR Console, el cual se muestra en la figura 02 y se puede descargar desde [www.sdr-radio.com/Console](http://www.sdr-radio.com/Console)

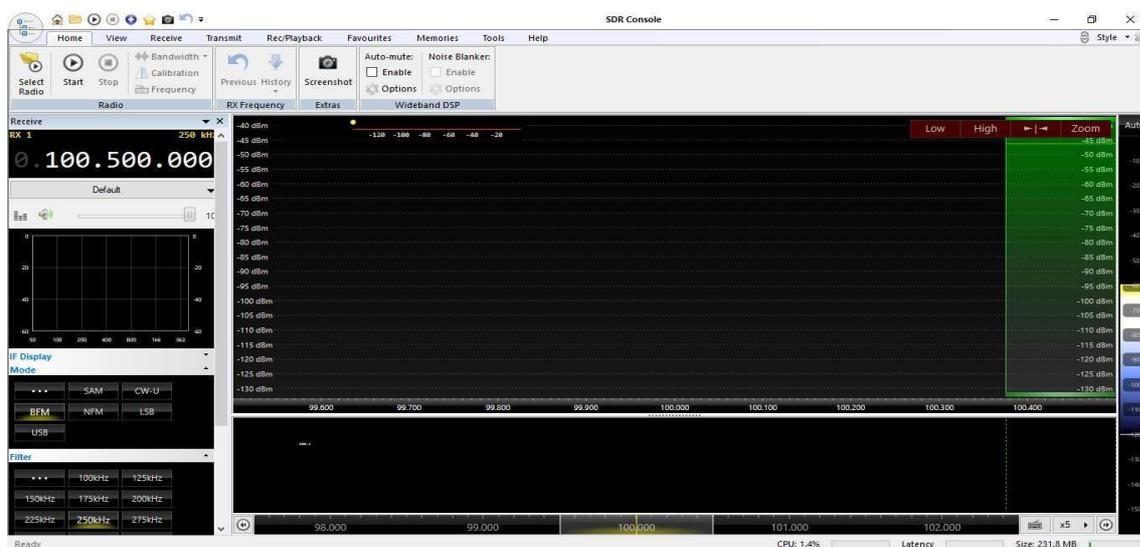


Figura 62. SDR Console. SDR Console (2019).

Como se observa en la figura 03, en la sección del recuadro rojo se debe usar la frecuencia con la que se transmitió, es decir la variable `center_freq` de la figura 01. Por otro lado, el recuadro azul muestra la opción que se debe seleccionar en la sección mode.

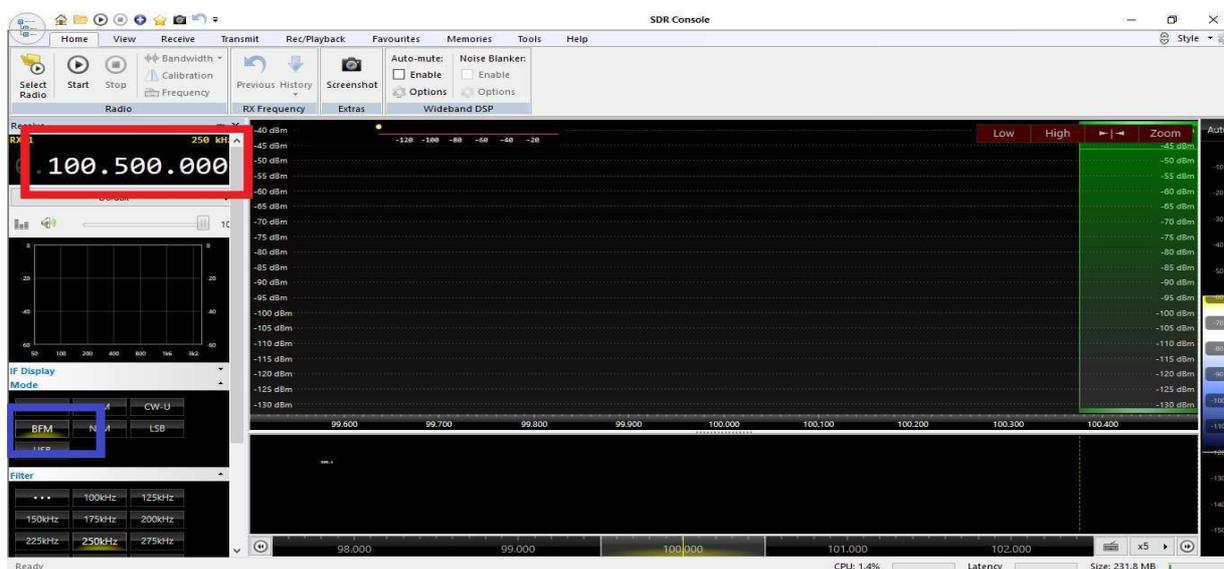


Figura 63. SDR Console\_1. SDR Console (2019).

**13.1.4.3. Paso 3.** El transmisor mencionado en el módulo 1, se ubicará en el edificio FRAY ABEL SALAZAR DE LA UNIVERSITARIA AGUSTINIANA como indica la figura 04, específicamente en el segundo piso, el receptor mencionado en el paso 2, se localizará en el edificio FRAY RUBEN BUITRAGO, figura 05, exactamente en el primer piso, salón 113 laboratorio de telecomunicaciones, figura 06.



Figura 64. Edificio Fray Abel Salazar. Rojas, W (2019).



Figura 65. Edificio Fray Rubén Buitrago. Rojas, W (2019).



Figura 66. Laboratorio de telecomunicaciones. Rojas, W (2019).

**13.1.4.4. Paso 4.** Se debe conectar la antena tipo broadband omni y el SDR HackRF one al amplificador, se ejecuta el diagrama de bloques en el programa GNU Radio y procede a medir la potencia de la transmisión como se observa en figura 08.

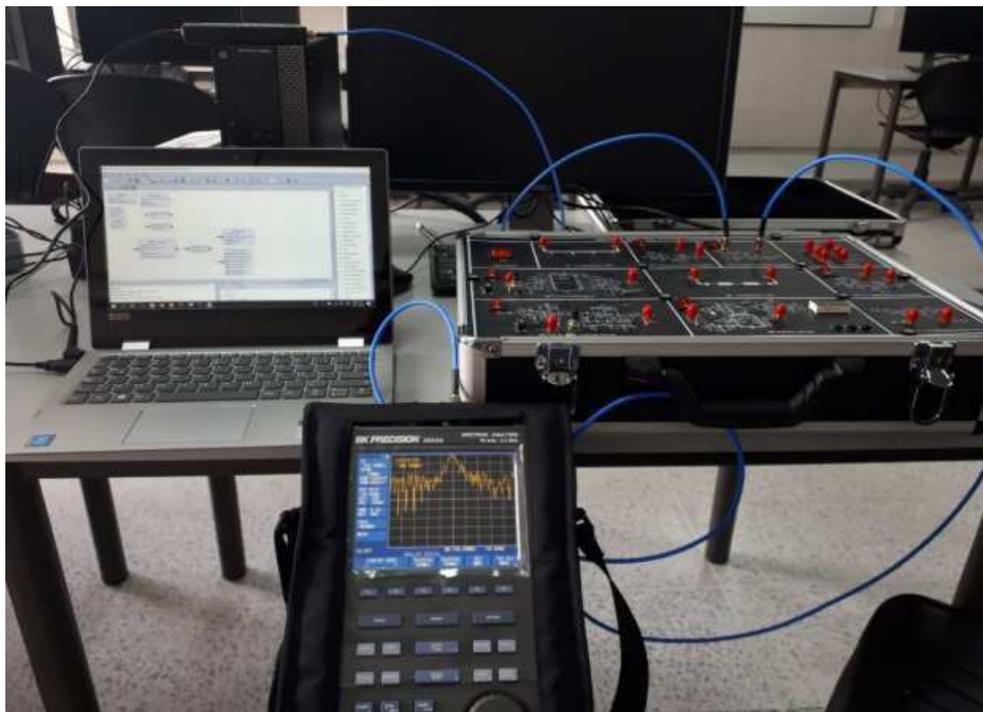


Figura 67. Amplificador, analizador de espectro y HackRF one. Rojas, W (2019).

- Una vez medida la potencia del transmisor con el analizador de espectro se aplica la ecuación 1.

$$P_t = P_i + G$$

#### **Ecuación 1**

P<sub>i</sub>: potencia del transmisor, entregada por el analizador de espectro

G: Ganancia de la antena

P<sub>t</sub>: Potencia total transmitida

- Se procede a medir la potencia del receptor, una de las ventajas del programa SDR Console es que actúa como analizador de espectro, es decir, este en su interfaz proporcionará la potencia con de la recepción.
- Se procede a hallar la diferencia entre la potencia de la transmisión y la potencia de la recepción, según la ecuación 2.

$$P = P_t - P_x$$

### **Ecuación 2**

P: pérdida de potencia

P<sub>t</sub>: potencia transmitida

P<sub>x</sub>: potencia recibida

#### **13.1.5. Cuestionario.**

1. ¿Cómo influye la frecuencia de transmisión en la pérdida de potencia?
2. Diga si la siguiente afirmación es falsa o verdadera.  
La atenuación es un fenómeno natural que se produce al realizar una transmisión a grandes distancias. \_\_\_\_\_
3. ¿Es necesario que la señal recibida tenga un nivel más alto que el ruido para ser interpretada correctamente?
4. ¿La atenuación es mayor en altas o bajas frecuencias? Explique.

#### **13.2. Practica 02**

##### **13.2.1. Objetivo.**

Visualizar la pérdida de potencia en un campo abierto teniendo en cuenta obstáculos naturales y características del entorno.

##### **13.2.2. Conceptos claves.**

**13.2.2.1. Atenuación.** Al propagar ondas estas se alejan entre sí y se extienden sobre una mayor área esto causa que se reduzca la densidad de potencia, lo que es equivalente a la atenuación, la cual está expresada en dB, donde su definición matemática es  $y = 10 \log (P_1/P_2)$ , el comportamiento de las ondas puede ser alterado en el espacio libre debido a los efectos ópticos, como lo es el cambio de dirección al momento de pasar de un medio a otro, a diferentes velocidades de propagación, esta velocidad es inversamente proporcional a la densidad del medio, lo que lleva a concluir que siempre y cuando una onda se traslade de un medio a otro y estos cuenten con distinta densidad se evidenciara el efecto de refracción. Se presenta también el efecto de difracción, donde las ondas se deforman al atravesar un orificio lo que causa que esta se disperse. Tomasi, W (2003)

**13.2.2.2 Atenuación por gases atmosféricos.** En trayectos troposféricos las moléculas de absorben energía electromagnética produciendo atenuación la cual puede ser elevada

dependiendo de la frecuencia, es decir mayores a 10GHz. Riera J, et al, (2013)

**13.2.2.3 Atenuación por lluvia.** En los radioenlaces troposféricos y por satélite, existe la componente de atenuación debida a la absorción y dispersión por hidrometeoros es decir lluvia, nieve y granizo. Riera J, et al, (2013)

**13.2.2.4 SDR.** Radio definido por software, un radio en donde todas las funciones de la capa física se definen por software, la radio como medio inalámbrico entre dos puntos ha venido presentando mejoras en su diseño electrónico, lo cual ha permitido mejorar la emisión y recepción de datos pero no fue hasta mediados de los años 90 cuando se realizaron investigaciones para poder crear sistemas que no tuvieran que depender de su hardware, es decir, que muchas de sus partes físicas pudieran ser controladas a través de un ordenador, en conclusión SDR, permite que un software realice las tareas complejas en un equipo de radio en lugar de grandes cantidades de circuitos que estarían en capacidad de ejecutar la misma tarea. A través de estos se pueden crear transmisores y receptores para todo tipo de señales, filtros, moduladores y demoduladores, entre muchos otros.

**13.2.2.5 Hackrf one.** Es un periférico de radio definido por software capaz de transmitir o recibir señales de radio de 1 MHz a 6 GHz diseñado para permitir la prueba y el desarrollo de tecnologías de radio modernas y de próxima generación, el HackRF one es una plataforma de hardware de código abierto que puede usarse como un periférico USB o programarse para una operación independiente. (greatscottgadgets, 2009-2016)

### **13.2.3 Materiales necesarios.**

- Computador
- HackRF one
- Antena tipo omnidireccional, banda 138-174Mhz, 50 Ohms, 4.5dB
- Software GNU RADIO
- Software SDR Console
- Amplificador GRF-3300S

### **13.2.4. Organización de la practica .**

Se plantean 4 pasos, los cuales indican como implementar la transmisión a través del programa GNU Radio, para luego relacionar la potencia transmitida y la potencia recibida y así lograr evaluar la atenuación.

**13.2.4.1. Paso 1.** El computador debe tener instalado el programa GNU RADIO, el cual se puede descargar en [wiki.gnuradio.org/index.php/InstallingGR](http://wiki.gnuradio.org/index.php/InstallingGR), existe la versión para Linux, Windows, Mac Os X, con el cual se realizará la transmisión, usando el diagrama de bloques que se muestra en la figura 01, en donde la frecuencia de transmisión será elegida según las características de la antena tipo omnidireccional.

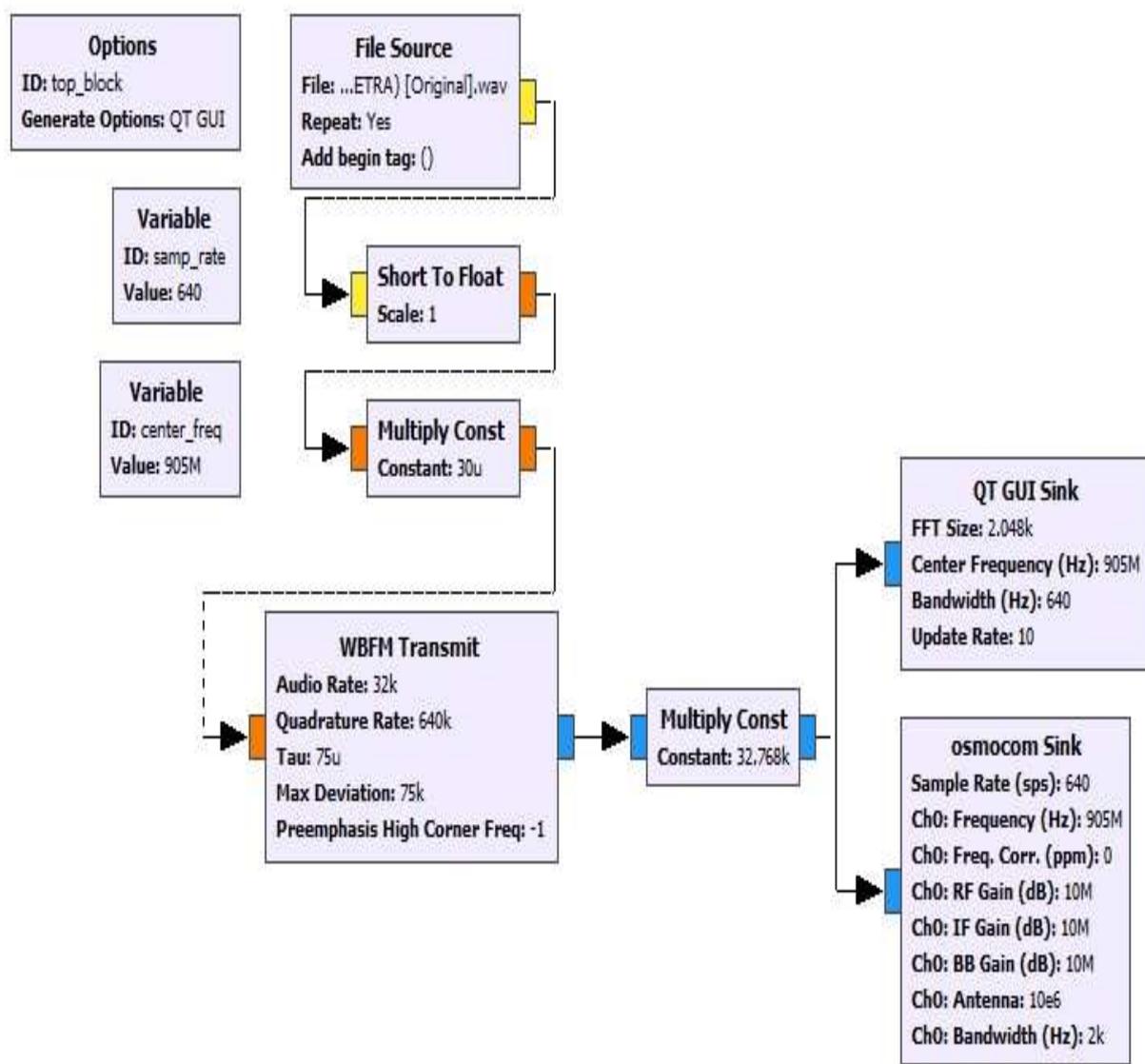


Figura 68. Diagrama de bloques para la transmisión en GNU RADIO. GNU Radio (2019).

**13.2.4.2. Paso 2.** La recepción de la señal se hará por medio del programa SDR console, figura 02.

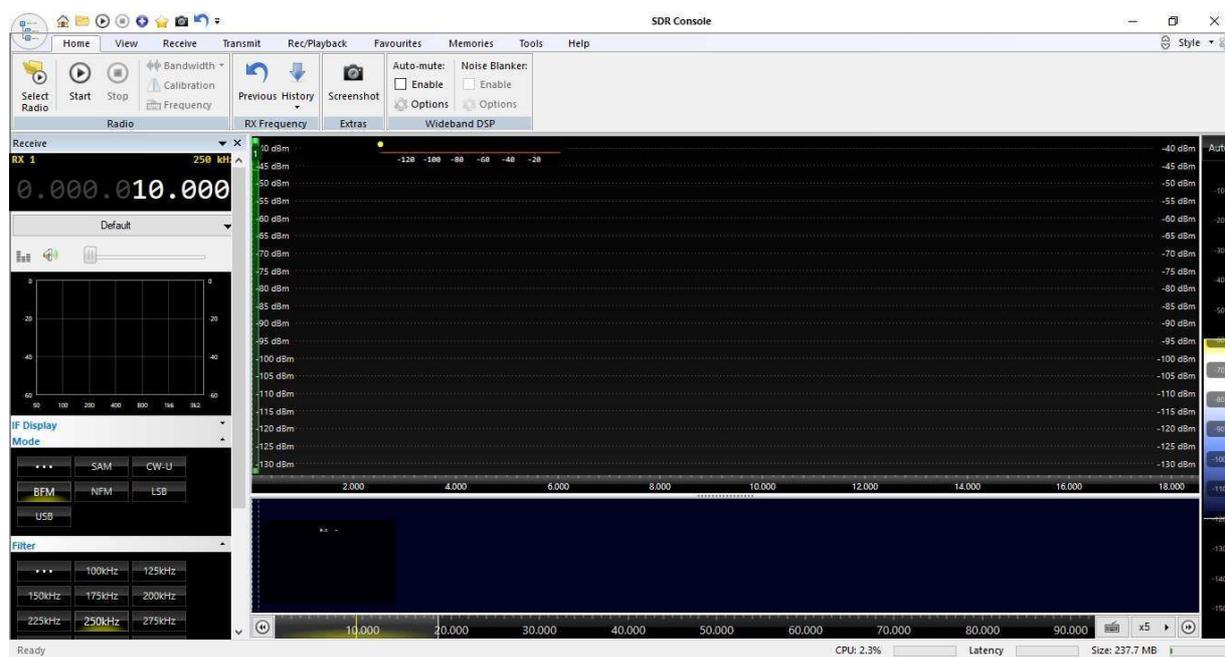


Figura 69. SDR console. SDR Console (2019).

**13.2.4.3. Paso 3.** El transmisor mencionado en el paso 1, se ubicará en la cancha de futbol, frente al claustro de la UNIVERSITARIA UNIAGUSTINIA, figura 03, mientras que el equipo receptor mencionado en el paso 2, se localizara en el otro costado de la cancha de futbol, es decir, frente a la plazoleta, figura 04.



Figura 70. Cancha de futbol. Rojas, W (2019).



Figura 71. Plazoleta. Rojas, W (2019).

**13.2.4.4. Paso 4.** Luego de ser conectada la antena tipo omnidireccional y el SDR HackRF one al amplificador, se ejecuta el diagrama de bloques en el programa GNU Radio y se procede a medir la potencia de la transmisión según la figura 05.

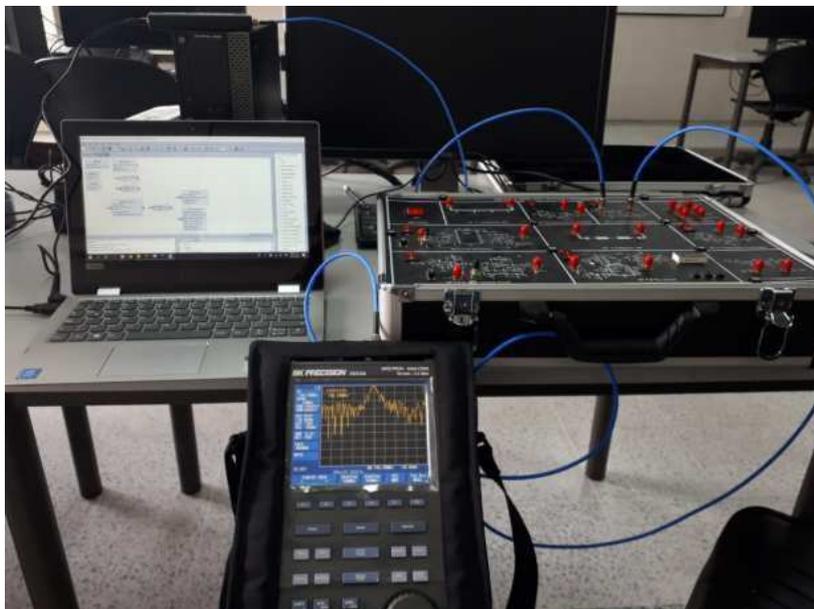


Figura 72. Analizador de espectro, antena tipo omnidireccional y HackRF one. Rojas W (2019).

- Una vez medida la potencia del transmisor con el analizador de espectro se aplica la ecuación 1.

$$P_t = P_i + G$$

#### **Ecuación 1**

Pi: potencia del transmisor, entregada por el analizador de espectro

G: Ganancia de la antena

Pt: Potencia total transmitida

- Se procede a medir la potencia del receptor en el programa SDR Console, este al ser un programa que funciona como analizador de espectro, proporciona la potencia de recepción en su interfaz gráfica.
- Luego se halla la diferencia entre la potencia de la transmisión y la potencia de la recepción, según la ecuación 2.

$$P = P_t + P_x$$

## Ecuación 2

P: pérdida de potencia

Pt: potencia transmitida

Px: potencia recibida

### 13.2.4. Cuestionario.

1. ¿Explique la relación entre frecuencia y la pérdida de potencia al momento de realizar una transmisión?
2. ¿Cómo influye la ganancia de la antena al momento de transmitir una señal?
3. Explique qué factores pueden influir en el debilitamiento de la señal, respecto a potencia, según el terreno sugerido en la presente práctica.
4. Realice la transmisión en otra frecuencia que este dentro del rango sugerido en las características de la antena y explique qué sucede con la potencia.

## 14. Conclusiones

El fenómeno de la atenuación se puede presentar en cualquier tipo de señal, la cual al recorrer una gran distancia lo más probable, es que al ser recibida sea difícil de interpretar. Las atenuaciones en las ondas de radio dependen de la frecuencia de transmisión y las características del entorno, el alcance de estas ondas está delimitado por la potencia de emisión y la sensibilidad del receptor, entre otros factores.

A través de un software es posible la ejecución de tareas que anteriormente solo eran posibles de realizar por medio de un equipo, tal es el caso del transmisor que se implementó en el presente proyecto, por medio del HackRF one, este periférico que está en capacidad de recibir y transmitir señales de radio en el rango de 1MHz hasta 6MHz, el diseño e implementación se realizó través del programa GNU radio, la plataforma de software basada en Linux pero que también cuenta con una versión para Windows, este periférico permite no solo la creación de transmisores y receptores, sino que también de sistemas de procesamiento de señales, analizadores, generadores de señales, entre otros elementos.

Según la prueba realizada en el desarrollo del segundo objetivo, se evidencio la necesidad de utilizar un amplificador para lograr transmitir a una distancia de 100m, se observó cómo los diferentes obstáculos, para el caso de este ejercicio, la poca vegetación dentro de la universidad, la distancia ya mencionada, la frecuencia de transmisión, según el rango de la antena y diferentes objetos que se encontraban en esta área, contribuyeron al debilitamiento de señal aun cuando se trató de elegir un sitio con la menor cantidad de barreras.

## 15. Referencias

- ANE. (2016). ANE. Recuperado de ANE: <https://www.ane.gov.co/index.php/2015-12-08-19-09-44/13-preguntas-y-respuestas-frecuentes/133-clasificacion-tematica-banda-450mhz?s=9D88A47C8AC3E9F1E1797B8C237964EC5E3D06FD>
- BC, M. (26 de 4 de 2014). *Monitor BC*. Recuperado de <http://www.monitorbc.info/nota.php?nta=4164&sec=pltc>
- Bruno, S. (2010). Comparison between known propagation models using least squares tuning algorithm on 5.8 GHz in Amazon region cities, *Journal of Microwaves*,.
- CRC. (2016). ANE. Recuperado de ANE: [https://normograma.info/crc/docs/pdf/resolucion\\_ane\\_0711\\_2016.pdf](https://normograma.info/crc/docs/pdf/resolucion_ane_0711_2016.pdf)
- Duarte, C. (01 de 04 de 2017). *Hacia el espacio*. Recuperado de <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=498>
- Duarte, C. (01 de 04 de 2017). *Hacia el espacio* . Recuperado de Hacia el espacio : <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=498>
- Fernandez, R. (01 de 09 de 2015). *IPN-UPITA*. Recuperado de IPN-UPITA: <http://www.boletin.upiita.ipn.mx/index.php/ciencia/639-cyt-numero-51/1191-sistemasde-comunicaciones-utilizando-gnu-radio>
- Ficoseco, F. (2012). *estudio de insercion de una radio definida por software en proyectos satelitales*. Buenos Aires.
- Ficoseco, F. (2012). *Repositorio ITBA* . Recuperado de [https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/579/FFicoseco\\_ITBA\\_TELCO\\_SD\\_R.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/579/FFicoseco_ITBA_TELCO_SD_R.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Giordano, J. L. (25 de octubre de 2009). *profisica*. Recuperado de <http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=48> greatscottgadgets. (2009-2016). *greatscottgadgets.com*. Recuperado de greatscottgadgets.com: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>

- HackRF ONE*. (2009). Recuperado de HackRF ONE: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>
- Huidobro, J. (2015). *Telecomunicaciones tecnologías, redes y servicios*. Ra-Ma .
- ITU. (2017). , a method to predict the statistics of clutter loss for earth-space and aeronautical paths. Radiowave propagation.
- ITU. (2017). Prediction of clutter loss., Radiowave propagation.
- LOPEZ, B. (2012 de Revista cubana de ingeniería ). *Revista cubana de ingeniería* . Recuperado de Revista cubana de ingeniería : <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/67/html>
- MINTIC. (2015). *mintic.gov.co*. Recuperado de mintic.gov.co: [https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-8460\\_documento.pdf](https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-8460_documento.pdf)
- Molina, C. E. (s.f.). *Red Tauros* . Recuperado de Red Tauros : [http://www.redtauros.com/Clases/Telecomunicaciones\\_I/07\\_Factores\\_Afectan\\_TX.pdf](http://www.redtauros.com/Clases/Telecomunicaciones_I/07_Factores_Afectan_TX.pdf)
- Molina, C. E. (s.f.). *Redtauros*. Recuperado de Redtauros: [http://www.redtauros.com/Clases/Telecomunicaciones\\_I/07\\_Factores\\_Afectan\\_TX.pdf](http://www.redtauros.com/Clases/Telecomunicaciones_I/07_Factores_Afectan_TX.pdf)
- Molina, C. (s.f.). *redtauros*. Recuperado de redtauros: [http://www.redtauros.com/Clases/Telecomunicaciones\\_I/07\\_Factores\\_Afectan\\_TX.pdf](http://www.redtauros.com/Clases/Telecomunicaciones_I/07_Factores_Afectan_TX.pdf)
- MONITORBC. (26 de 04 de 2014). *MONITOR BC*. Recuperado de <http://www.monitorbc.info/nota.php?nta=4164&sec=pltc>
- Muñoz, C. D. (01 de 04 de 2017). *Hacia el espacio* . Recuperado de Hacia el espacio : <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=498>
- N, F. (2006). Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo. *Universidad de Oviedo* .
- NEOTEO*. (5 de ABRIL de 2012). Recuperado de NEOTEO: <https://www.neoteo.com/sdr-radiodefinida-por-software/>
- Raez, M. A. (s.f.). *Principios básicos de transmisión por radio*. Recuperado de redeya: <http://redeya.bytemaniacos.com/electronica/tutoriales/radio/radio.htm>
- Riera J, e. a. (2013). Transmisión por radio. *Centro de estudios Ramon Areces*.
- Rodriguez, J. (2016/2017). *analisis software y hardware del SDR HackRF ONE*.
- Technologies, B. (s.f.). *birdrf*. Recuperado de birdrf:

[https://www.birdrf.com/Products/Test%20and%20Measurement/Power-Meters/Wattmeters-Line-Sections/RF-Wattmeters/43\\_General-Purpose-Wattmeter.aspx](https://www.birdrf.com/Products/Test%20and%20Measurement/Power-Meters/Wattmeters-Line-Sections/RF-Wattmeters/43_General-Purpose-Wattmeter.aspx)

Wayne, T. (1996). *Sistemas de comunicaciones electronicas* . Mexico: Pearson Educación de Mexico .