



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL**

**TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE TRANSMISIÓN  
DE MENSAJES DE ALERTA EN FM SOBRE CINCO GRUPOS DE TRES  
FRECUENCIAS PORTADORAS PARA SU USO EN VEHÍCULOS DE  
EMERGENCIA UTILIZANDO USRP Y GNU RADIO”**

**AUTORES:**

**ALEXIS DE LA CRUZ PEÑAFIEL**

**RONALD MOREIRA SANDOVAL**

**DIRECTOR:**

**MSC. CARLOS BÓSQUEZ BÓSQUEZ**

**GUAYAQUIL, ABRIL 2018**

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Alexis Javier De La Cruz Peñafiel** con número de cédula de identidad de ciudadanía 0921971388 y **Ronald Kevin Moreira Sandoval** con número de cédula de identidad de ciudadanía 0922634415, estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica respectivamente, certificamos que los conceptos desarrollados, diseño realizado, resultados analizados y las ideas, así como los criterios en la totalidad del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, según lo establecido por la ley de la Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.

Guayaquil, Abril 2018

(f)\_\_\_\_\_

Alexis De La Cruz Peñafiel.

(f)\_\_\_\_\_

Ronald Moreira Sandoval.

## DECLARATORIA DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION A LA UPS

Nosotros, Alexis Javier De La Cruz Peñafiel con documento de identificación N°092197138-8, y Ronald Kevin Moreira Sandoval con documento de identificación N°092263441-5 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del proyecto de titulación intitulado: **“Diseño e implementación de un prototipo de transmisión de mensajes de alerta en FM sobre cinco grupos de tres frecuencias portadoras para su uso en vehículos de emergencia utilizando USRP y GNU Radio”**, el mismo que ha sido desarrollado para optar en la Universidad Politécnica Salesiana el título de Ingeniero Electrónico, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Abril 2018

(f) \_\_\_\_\_

Alexis De La Cruz Peñafiel.

(f) \_\_\_\_\_

Ronald Moreira Sandoval.

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

En calidad de DIRECTOR DEL PROYECTO TÉCNICO “Diseño e implementación de un prototipo de transmisión de mensajes de alerta en FM sobre cinco grupos de tres frecuencias portadoras para su uso en vehículos de emergencia utilizando USRP y GNU Radio”, elaborado por Alexis De La Cruz Peñafiel y Ronald Moreira Sandoval, declaro y certifico la aprobación del presente proyecto técnico basándose en la supervisión y revisión de su contenido.

Guayaquil, Abril 2018

(f) \_\_\_\_\_

MSc. Carlos Bósquez Bósquez.

## **DEDICATORIA**

A todas aquellas personas que en el pasado formaron parte de cada una de las experiencias que cosecharon en nosotros valiosos aprendizajes para la vida.

A aquellos que en el presente nos acompañan alentándonos a cada momento.

A quienes en el futuro conoceremos ya que son quienes verán sin duda el fruto de cada esfuerzo realizado.

Alexis De La Cruz Peñafiel

Ronald Moreira Sandoval

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, porque nos ha dado la sabiduría, inteligencia y las herramientas necesarias para que, con nuestro propio esfuerzo, cosechemos los dulces frutos de la perseverancia.

A nuestros padres y familiares, modelos a seguir y luz guía, que con dedicación y sacrificio nos han apoyado siempre, dando todo de sí por nosotros.

A nuestros compañeros de trabajos, por su constante apoyo, consejos y recomendaciones para realizar con éxitos nuestro proyecto técnico.

Alexis De La Cruz Peñafiel

Ronald Moreira Sandoval

## **AGRADECIMIENTO INSTITUCIONAL**

Al MSc. Carlos Bósquez, por su confianza y apoyo en nuestro proyecto, al compartir sus conocimientos y recomendaciones para lograr realizar un excelente trabajo académico en la obtención del título y permitir emprender en el área de las investigaciones tecnológicas.

A la Lic. Mariela Quispe, secretaria de la carrera de Ingeniería Electrónica por sus consejos y entusiasmo para continuar con esfuerzo con nuestro proyecto y concluir de manera satisfactoria.

A todos los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, por compartir sus experiencias y conocimientos durante todo el período de la carrera Ingeniería Electrónica.

Alexis De La Cruz Peñafiel

Ronald Moreira Sandoval

## RESUMEN

AÑO	ALUMNOS	DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	TEMA TRABAJO DE TITULACIÓN
2018	De La Cruz Peñafiel Alexis Javier  Moreira Sandoval Ronald Kevin	MSc. Carlos Bósquez Bósquez	"Diseño e implementación de un prototipo de transmisión de mensajes de alerta en FM sobre cinco grupos de tres frecuencias portadoras para su uso en vehículos de emergencia utilizando USRP y GNU radio"

El presente trabajo se basa en el diseño e implementación del prototipo de un sistema de alerta para vehículos de emergencia, el sistema emite señales de radio en las frecuencias portadoras de la radio comercial FM dentro del rango que va desde 88MHz hasta 108MHz utilizando Radio Definida por Software (RDS). Las señales emitidas por el sistema son moduladas en frecuencia y se transmiten mediante RDS sobre tres diferentes portadoras simultáneamente: una frecuencia central y dos frecuencias adyacentes separadas a +400KHz y -400KHz. Dicha simultaneidad es posible gracias al diseño de un transmisor FM que combina el audio de alerta modulado con la frecuencia central portadora, y con otras dos señales sinusoidales ubicadas a una distancia de +400KHz y -400KHz a través de un multiplicador, las tres señales son luego concatenadas mediante un sumador y finalmente transmitidas a través del hardware de RDS. El mensaje audible posee una longitud de aproximadamente 4 segundos y, al transmitirse en 3 frecuencias portadoras al mismo tiempo, permite su difusión en hasta un total de 45 de las 50 estaciones en un minuto, es decir, un 90% de las estaciones de radio comercial FM, esto es posible siempre y cuando la separación reglamentaria entre cada estación de radio sea de 400 KHz lo cual es el caso en Ecuador. Las señales a transmitirse contienen un mensaje audible de alerta y al ser emitidas en las mismas frecuencias portadoras de las estaciones de radio comercial interfieren en los receptores de radio de los vehículos cercanos notificando a los demás conductores de la presencia del vehículo de emergencia, permitiendo así despejar anticipadamente la vía lo cual representa una disminución en el tiempo de llegada de estos vehículos al punto donde se suscita la emergencia. Para el diseño de este prototipo se emplearon herramientas de software libre (GNU Radio, Python) sobre una plataforma Ubuntu, disminuyendo así sus costos de desarrollo e implementación.

**Palabras Clave:** Frecuencia Modulada, RDS, USRP, Vehículos de Emergencia, Sistema de Alerta, Frecuencia Portadora, Estaciones de Radio.



## ABSTRACT

Year	STUDENT/S	DIRECTOR OF WORKING TITLE	THESIS TOPIC
2018	De La Cruz Peñafiel Alexis Javier  Moreira Sandoval Ronald Kevin	MSc. Carlos Bósquez Bósquez	"Design and implementation of a prototype for the transmission of alert messages using FM on five groups of three carrier frequencies for use in emergency vehicles using USRP and GNU Radio"

The present work is based on the design and implementation of the prototype of an alert system for emergency vehicles, the system emits radio signals in the carrier frequencies of commercial FM radio within the range of 88MHz to 108MHz using Software Defined Radio (SDR). The signals emitted by the system are frequency modulated and transmitted via SDR on three different carriers simultaneously: one center frequency and two adjacent frequencies separated by +400 KHz and -400 KHz. This simultaneity is possible thanks to the design of an FM transmitter that combines the modulated alert audio with the carrier center frequency and with two other sinusoidal signals located at a distance of +400 KHz and -400 KHz through a multiplier, the three Signals are then concatenated by an adder and finally transmitted through the SDR hardware. The audible message has a length of approximately 4 seconds and, when transmitted on three carrier frequencies at the same time, can be broadcast in up to 45 of the 50 stations in one minute. That is, 90% of the commercial FM radio stations; this is possible as long as the regulatory separation between each radio station is 400 KHz, which is the case in Ecuador. The signals to be broadcast contain an audible alert message and, since they are transmitted on the same carrier frequencies of the commercial radio stations, they interfere with the radio receivers of the nearby vehicles, notifying the other drivers about the presence of the emergency vehicle, allowing early clearing of the road. The later represents a decrease in the time of arrival of these vehicles to the point where the emergency arises. For the design of this prototype, free software tools (Linux, GNU Radio, and Python) were used with the Lubuntu platform, thus reducing its development and implementation costs.

**Keywords:** Frequency Modulation, Software Defined Radio, SDR, USRP, Emergency Vehicles, Alert System, Carrier Frequency, Radio Stations.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>17</b>
2.1	Antecedentes .....	17
2.2	Importancia y alcances.....	18
2.3	Delimitación .....	19
2.4	Explicación del problema .....	19
<b>3</b>	<b>OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>20</b>
3.1	Objetivo general .....	20
3.2	Objetivos específicos .....	20
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>21</b>
4.1	Introducción a la radiación electromagnética.....	21
4.1.1	Espectro electromagnético .....	21
4.1.2	Frecuencias de transmisión.....	22
4.1.3	Propagación de radiofrecuencias .....	23
4.1.4	Propiedades de las ondas de radio .....	25
4.1.5	Interferencias electromagnéticas (EMI) .....	27
4.1.6	Interferencias de la radiofrecuencia (RFI) .....	28
4.1.7	Dificultades en la transmisión .....	28
4.2	Sistemas de comunicaciones .....	30
4.2.1	Modos de transmisión.....	30
4.2.2	Ancho de banda y capacidad de información.....	31
4.2.3	Modulación y demodulación .....	31
4.2.4	Frecuencia modulada FM .....	33
4.2.5	Receptores FM .....	33
4.2.6	Parámetros de un receptor .....	34
4.3	Antenas.....	35
4.3.1	Parámetros de una antena .....	35
4.3.2	Tipos de antenas .....	38
4.4	Amplificador de potencia RF .....	39
4.5	Conectores.....	40
4.6	Cable coaxial .....	41
4.7	Radiodifusión sonora en el Ecuador.....	42
4.8	La radiodifusión en frecuencia modulada .....	43
4.8.1	Ventajas de FM sobre AM .....	44
4.8.2	Limitaciones en radiodifusión FM .....	44
4.8.3	Radiodifusión FM en el Ecuador .....	44
4.8.4	Zonas geográficas establecidas para radiodifusión FM .....	45

4.8.5	Cobertura de la señal FM en el Ecuador .....	46
4.8.6	Programación de la radio FM en el Ecuador .....	47
<b>4.9</b>	<b>Radio definida por software (RDS) .....</b>	<b>48</b>
4.9.1	Definición y aspectos fundamentales del RDS.....	48
4.9.2	Arquitectura de hardware RDS.....	48
4.9.3	Plataformas de hardware para RDS.....	51
4.9.4	Plataformas de software para RDS .....	53
<b>5</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>55</b>
5.1	Modalidad de la investigación .....	55
5.2	Tipo de investigación.....	55
5.3	Procedimientos .....	55
5.3.1	Diagnóstico de la situación actual .....	55
5.3.2	Alternativas de solución.....	55
5.4	Propuesta.....	56
<b>6</b>	<b>DESARROLLO DE LA PROPUESTA .....</b>	<b>57</b>
6.1	Hardware .....	57
6.1.1	USRP NI 2920 de National Instruments.....	58
6.1.2	HackRF One de Great Scott Gadgets .....	59
6.1.3	Mini computador Intel NUC.....	60
6.1.4	Amplificador de potencia de transmisión.....	61
6.1.5	Antena utilizada para la transmisión.....	62
6.1.6	Otros periféricos .....	62
6.2	Software.....	63
<b>7</b>	<b>DISEÑO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE ALERTA .....</b>	<b>67</b>
7.1	Diagrama de bloques .....	67
7.2	Diseño del transmisor FM básico en GNU Radio .....	67
7.3	Diseño final del transmisor FM .....	74
7.4	Optimización del diseño GRC en Python.....	77
7.4.1	Interfaz de usuario .....	77
7.4.2	Modos de transmisión manual y automático .....	79
7.4.3	Guardar estaciones ingresadas por el usuario en modo manual.....	81
7.4.4	Inicio automático al arrancar el sistema operativo .....	81
<b>8</b>	<b>INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA EN UN VEHÍCULO DE EMERGENCIA .....</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>84</b>
9.1.1	Niveles de potencia emitidos por la estación de radio comercial.....	85
9.1.2	Niveles de potencia emitidos por el prototipo de sistema de alerta .....	86
<b>10</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>87</b>
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>95</b>
<b>12</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>

<b>13 ANEXOS.....</b>	<b>99</b>
13.1 Anexo 1: Tabla de grupos de frecuencias para distribución y asignación en el territorio nacional .....	99
13.2 Anexo 2: Diagrama de bloques de GNU Radio (para USRP 2920) .....	100
13.3 Anexo 3: Diagrama de bloques de GNU Radio (para HackRF One).....	101
13.4 Anexo 4: Fotografías .....	102

## ÍNDICE DE CUADROS Y/O TABLAS

<i>Tabla 1: Designaciones de banda del CCIR. [9].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2: Valores de potencia a la salida de un transmisor FM. [9].....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3: Zona geográficas para la concesión de estaciones en frecuencia modulada. [29].....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 4: Resumen de tipos de radios en el Ecuador. [31].....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 5: Comparación de alternativas para hardware RDS. [39].....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6: Características de transmisión del USRP NI 2920 de National Instruments. [50].....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 7: Características técnicas del HackRF One. [51].....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 8: Características del mini computador Intel NUC. [52].....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 9: Características del amplificador de potencia. ....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 10: Características principales de la antena utilizada para la transmisión. ....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 11: Comparación de requerimientos de hardware entre Lubuntu y Windows 7.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 12: Potencia de recepción medida para todas las estaciones de radio comercial FM en la ciudad de Guayaquil. ....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 13: Niveles de potencia medidos para el sistema de alerta comparados con los de la radio comercial FM.....</i>	<i>93</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Espectro electromagnético de frecuencias. [8].....	21
Figura 2: Espectro electromagnético de longitudes de onda. [8].....	22
Figura 3: Propagación de radiofrecuencias. [8] .....	23
Figura 4: Ejemplo de refracción de un medio menos denso a un medio más denso. [14].....	25
Figura 5: Ejemplo de onda totalmente reflejada. [14] .....	26
Figura 6: Fenómeno de dispersión de una onda electromagnética. [14] .....	26
Figura 7: Fenómeno de difracción en la esquina de un obstáculo. [14] .....	27
Figura 8: Fenómeno de la multitrayectoria. [17] .....	27
Figura 9: Representación de la absorción atmosférica debida al oxígeno y al vapor de agua frente a la frecuencia.[14].....	29
Figura 10: Diagrama simplificado de bloques de un sistema de comunicación electrónica. [8] .....	30
Figura 11: Ejemplos de modos de transmisión. [14].....	31
Figura 12: Diagrama a bloques de un sistema de comunicación. [8].....	32
Figura 13: Modulación de frecuencia de una onda portadora senoidal por una señal de onda senoidal: a) portadora no modulada; b) señal moduladora; c) onda con frecuencia modulada. [8].	33
Figura 14: Diagrama de bloque de un receptor de FM con doble conversión. [8].....	34
Figura 15: Radiación de una línea de transmisión: a) radiación de la línea de transmisión; b) conductores divergentes. [8].....	35
Figura 16: Diagrama de radiación en decibelios. [8] .....	35
Figura 17: Polarizaciones de antena: a) línea; b) elíptica; c) circular. [8].....	37
Figura 18: Abertura de haz de antena. [8] .....	37
Figura 19: Esquema genérico de un adaptador de impedancias. [14] .....	38
Figura 20: Distintos tipos de antenas de hilo. [25].....	38
Figura 21: Antena de Yagi-Uda: a) Yagi de tres elementos; b) gráfica de radiación. [8] .....	39
Figura 22: Productos de distorsión de un amplificador de potencia en RF. [26] .....	39
Figura 23: Diversos tipos de conectores para RF. [27] .....	40
Figura 24: Detalle de un conector tipo N. [14] .....	40
Figura 25: Detalles de varios conector SMA. [14] .....	41
Figura 26: Diversos tipos de adaptadores y latiguillos para RF. [27] .....	41
Figura 27: Estructura de un cable coaxial. [14].....	41
Figura 28: Clasificación de las estaciones de radiodifusión. [31] .....	42
Figura 29: Diagrama de un estación de radiodifusión. [29] .....	43
Figura 30: Número de estaciones concesionadas a nivel nacional y por tipo. [31].....	45
Figura 31: Zona geográficas establecidas para radiodifusión sonora FM. [29].....	45
Figura 32: Cobertura de radiodifusión FM en el Ecuador. [31].....	47
Figura 33: Diagrama de bloques funcionales de RDS.[38].....	48
Figura 34: Digital Down Converter. [40].....	50
Figura 35: Digital Up Converter. [40] .....	50
Figura 36: Dispositivo HackRF – Primera versión beta. [41].....	52

<i>Figura 37: Dispositivo de hardware Ettus Research USRP N210. [42]</i> .....	52
<i>Figura 38: Vista frontal dispositivo de hardware NI USRP N2920. [43]</i> .....	53
<i>Figura 39: Entorno de programación del Software GNU Radio</i> .....	54
<i>Figura 40: Entorno de programación del Software Labview</i> .....	54
<i>Figura 41: USRP NI 2920 de National Instruments. [50]</i> .....	58
<i>Figura 42: Dispositivo HackRF One en su contenedor plástico. [51]</i> .....	59
<i>Figura 43: NUC DN2820FYKH. [52]</i> .....	60
<i>Figura 44: Amplificador de potencia. [53]</i> .....	61
<i>Figura 45: Pantalla LCD Táctil HDMI IPS. [54]</i> .....	62
<i>Figura 46: Entorno de escritorio de Lubuntu</i> .....	63
<i>Figura 47: Interfaz gráfica de GNU Radio</i> .....	64
<i>Figura 48: Intérprete de comandos de Python 2.7.</i> .....	65
<i>Figura 49: Ejemplo de indentación adecuada en Python. [55]</i> .....	66
<i>Figura 50: Ejemplo de uso de la librería gráfica PyQt de Python.</i> .....	66
<i>Figura 51: Diagrama de bloques del prototipo</i> .....	67
<i>Figura 52: Diagrama de flujo de un transmisor FM básico conectado al USRP.</i> .....	67
<i>Figura 53: Bloque WAV File Source y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	68
<i>Figura 54: Bloque Throttle y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	69
<i>Figura 55: Bloque Low Pass Filter y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	69
<i>Figura 56: Bloque FM Preemphasis y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	70
<i>Figura 57: Bloque WBFM Transmit y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	71
<i>Figura 58: Bloque Rational Resampler y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	72
<i>Figura 59: Bloque Multiply Const y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	72
<i>Figura 60: Bloque UHD: USRP SINK y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	73
<i>Figura 61: Diagrama final utilizado en el prototipo de sistema de alerta.</i> .....	74
<i>Figura 62: Bloque Selector y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	75
<i>Figura 63: Bloque Signal Source y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	75
<i>Figura 64: Bloque Signal Source y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	76
<i>Figura 65: Bloque Signal Source y ventana de edición de propiedades del mismo.</i> .....	76
<i>Figura 66: Archivos generados por GNU Radio relacionados a un diagrama específico.</i> .....	77
<i>Figura 67: Interfaz gráfica generada por bloques de GNU Radio.</i> .....	78
<i>Figura 68: Interfaz gráfica codificada sobre el código fuente Python del sistema.</i> .....	78
<i>Figura 69: Diagrama de flujo que representa el modo de funcionamiento manual del sistema de alerta.</i> .....	79
<i>Figura 70: Diagrama de flujo que representa el modo de transmisión automático del sistema de alerta.</i> .....	80
<i>Figura 71: Ubicación de los elementos del prototipo de sistema de alerta en un camión cisterna.</i> ..	82
<i>Figura 72: Personal del cuerpo de bomberos haciendo una demostración del uso de la pantalla táctil del sistema de alerta.</i> .....	82
<i>Figura 73: Conexión de los elementos del sistema de alerta dispuestos en el laboratorio.</i> .....	83

<i>Figura 74: Niveles de recepción de la frecuencia 102.9 MHz. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 75: Interfaz gráfica del sistema de alerta configurado en modo manual para transmitir únicamente en la frecuencia de 102.9 MHz.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 76: Niveles de potencia referenciales de la radio comercial en la frecuencia 102.9 MHz. ...</i>	<i>85</i>
<i>Figura 77: Niveles de potencia emitidos por el sistema de alerta con el USRP 2920. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 78: Niveles de potencia emitidos por el sistema de alerta con el RDS HackRF One. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 79: Valores de potencia de recepción para cada estación de radio comercial FM de la ciudad de Guayaquil. ....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 80: Comparación entre los niveles de potencia medidos para las estaciones de radio comercial FM y el sistema de alerta para vehículos de emergencia. ....</i>	<i>92</i>



## 1 Introducción

El presente trabajo propone diseñar e implementar un prototipo de sistema de alerta para vehículos de emergencia, es decir vehículos de bomberos, policía, agentes de tránsito, ambulancias, etc. Mediante la transmisión de un mensaje audible de alerta sobre frecuencias en las que opera la radio comercial FM, se solicitará a los conductores que despejen un carril para que dicho vehículo de emergencia pueda circular con facilidad y llegar oportunamente a su destino. La principal característica del sistema propuesto es que posee un gran potencial de impacto debido a que utiliza un sistema de radio para transmitir un mensaje de alerta en las mismas frecuencias en las que se transmite la radio comercial FM, superponiéndose a éstas en niveles de potencia, lo cual permite que los receptores de radio instalados en los vehículos reciban inmediatamente la alerta, dando tiempo suficiente a los conductores en el tráfico para que puedan despejar un carril de modo que pueda circular el vehículo de emergencia. La transmisión en FM permite alcanzar una distancia mayor a la que puede llegar la alerta sonora de una sirena instalada, por ejemplo, en una ambulancia o vehículo de policía ya que el alcance de la transmisión aumenta en cuanto aumenta la potencia del amplificador utilizado para emitir las señales de radio.

Para el diseño del sistema, se ha utilizado únicamente herramientas de software libre, esto es, Ubuntu Linux como sistema operativo base, GNU Radio como herramienta de diseño de sistemas de radio, Python como lenguaje de programación, entre otras aplicaciones cuyo uso no implica gastos monetarios en licencias, disminuyendo significativamente el costo de implementación del prototipo. En cuanto al hardware, el prototipo es compatible al momento con dos plataformas de hardware de RDS: el USRP NI 2920 de National Instruments y la tarjeta HackRF ONE de Great Scott Gadgets; en la parte de control se utiliza un mini computador Intel NUC; para la parte de transmisión se sirve de una antena direccional tipo YAGI y un amplificador de potencia; la entrada de datos se realizará a través de una pantalla HDMI táctil y la alimentación de poder puede provenir directamente de la batería del vehículo sobre el que esté montado el prototipo aunque, en casos en los que esto no sea posible, se podría utilizar una batería adicional exclusiva para el sistema de alerta. El sistema permite escoger para la transmisión uno de entre 4 mensajes diferentes según el tipo de vehículo de emergencia (Ambulancia, Bomberos, Policía, Agente de tránsito) estos mensajes tienen una duración promedio de 4 segundos y al ser transmitidos en tres portadoras diferentes simultáneamente se puede alcanzar hasta 45 de las 50 estaciones de radio comercial FM en un minuto. Sin embargo, es posible también utilizar el modo de transmisión manual el cual utiliza solamente cinco frecuencias centrales definidas por el usuario sobre las cuales se realizará la transmisión de la alerta.

La principal motivación para realizar este trabajo es el hecho de que, aunque actualmente se conoce muy bien lo crítico que es el tiempo de llegada de un vehículo de emergencia al sitio donde se lo requiere, hasta ahora no existe un método que pueda realmente agilizar el traslado de estos vehículos a través de un tráfico vehicular denso, por ejemplo, en horas pico. Las alertas visuales, sirenas e incluso la ayuda de agentes de tránsito resultan insuficientes ante la gran concentración vehicular que existe en ciertos sectores urbanos a determinadas horas. Esto se suma al hecho de que los conductores poseen poco tiempo para reaccionar y reubicar su vehículo para dar el paso oportunamente y en ocasiones ni si quiera logran ser alcanzados por alguno de los métodos de alerta anteriormente descritos, ya sea porque se encuentran demasiado lejos, distraídos o escuchando la radio en volumen alto con los vidrios elevados.

## **2 Descripción del problema**

Se ha determinado que el tiempo de respuesta de un vehículo de emergencia (ambulancia, vehículo de policía, camión de bomberos, etc.) influye directamente y de forma crítica sobre el resultado final de la emergencia que se encuentre atendiendo, llegando a representar en ocasiones la diferencia entre la vida o la muerte de quien padece la emergencia. El crecimiento de las ciudades y la ampliación de zonas urbanas traen consigo un aumento significativo en la cantidad de vehículos que circulan en las calles, incrementando la densidad del tráfico en horas pico y zonas de abundante actividad comercial, lo cual genera dificultades para que los vehículos de emergencia puedan dirigirse a atender las situaciones en las que se los requiere.

El método convencional más utilizado para alertar a los conductores de la proximidad de un vehículo de emergencia es una sirena, que no es más que un instrumento acústico ya sea mecánico, electrónico o electro-neumático que emite un sonido intenso el cual es comúnmente acompañado de luces giratorias brillantes generalmente de color rojo, azul o amarillo aunque en ocasiones puede ser también verde; sin embargo uno de los problemas de este sistema es que no es direccional, es decir que se escucha en todas las direcciones alrededor del punto donde se emite el ruido lo cual puede resultar en dificultades para conocer la ubicación del vehículo de emergencia, otro aspecto negativo de la sirena es el hecho de que en ocasiones ésta puede no ser escuchada por aquellos conductores que circulan con los vidrios arriba y con la radio a un volumen alto de tal forma que éstos no logran acomodar su posición en la vía para que el vehículo de emergencia pueda avanzar con rapidez hacia su destino.

### **2.1 Antecedentes**

En Japón, según un reporte de la FDMA (Agencia de Manejo de Incendios y Desastres) el tiempo entre la llamada de un paciente y su llegada al hospital ha incrementado cada año llegando a ser 38 minutos en el año 2011 [1]. Un estudio llevado a cabo en el condado de King en Washington, Estados Unidos, determinó que la tasa de supervivencia disminuye en un 2.1% por cada minuto hasta que el paciente sea intervenido con soporte vital cardiovascular avanzado (ACLS) [2], así mismo, otros estudios han demostrado que el tiempo de respuesta y transporte se encuentran relacionados con la tasa de supervivencia de víctimas con heridas de bala, y que el tiempo total pre-hospitalario de servicios médicos era significativamente más bajo para aquellos que había sobrevivido a traumas que para los pacientes que no sobrevivieron [3] [4].

En el caso de Ecuador el panorama no es muy distinto, según lo que indica el Servicio de Atención Prehospitalaria del Ministerio de Salud Pública, las ambulancias del sistema ECU-911 tardan un promedio de 18 minutos en responder a una emergencia, esto sin contar un promedio de 7 minutos adicionales, tiempo que pasa entre el momento en el que el usuario realiza la llamada hasta que el operador da la orden de despacho a la ambulancia [5].

En definitiva, cualquier evento que genere un retraso en el tiempo de llegada de un vehículo de emergencia a su destino se convierte en causa de un potencial fracaso en la atención de la urgencia por la cual se le solicitó. Es por esto que resulta necesario implementar mecanismos que permitan disminuir este tiempo de llegada y aumentar las posibilidades de que se tenga éxito en la atención de la emergencia.

El presente trabajo propone disminuir el retraso que los vehículos de emergencia pudieran tener por causa de atascos de tráfico y alta densidad de automóviles en horas pico o zonas de elevada circulación vehicular, con esto se pretende llegar a obtener una mejora en el tiempo de reacción de la policía ante una emergencia de seguridad, aumentar las probabilidades de supervivencia de una víctima de accidente al recibir una ambulancia de forma oportuna, atender con celeridad asuntos críticos de tránsito e inclusive evitar la propagación de un peligroso incendio.

En un trabajo previo ya se ha propuesto realizar el envío de señales de alerta a través de FM para “Interferir en el espectro de frecuencias FM en radios receptores de automotores públicos y particulares” [6] sin embargo, éstos han sido desarrollados haciendo uso del software Labview sobre un sistema operativo Windows, dos herramientas de software cuyo costo en licencias incrementa el costo final de implementación del prototipo, además de que, únicamente permite transmitir en una sola frecuencia de radio a la vez.

Tomando como base lo anterior, se propone en el presente trabajo una serie de mejoras que pretenden incrementar sustancialmente la efectividad del principio de transmitir señales de alerta mediante señales de radio en FM, haciendo uso del mismo hardware pero diseñado, implementado y controlado en su totalidad con software libre, además de desarrollar un método que permita interferir simultáneamente tres estaciones de radio, aumentando así el alcance de la alerta a transmitir y con esto, mejorar la eficiencia del diseño.

## **2.2 Importancia y alcances**

El prototipo del sistema de alerta para vehículos de emergencia propone una nueva forma totalmente diferente de abordar el problema que genera la congestión vehicular en momentos en los que un vehículo de emergencia necesita presentarse a atender un incidente. Se ha demostrado en secciones anteriores que en definitiva el tiempo que tarda un vehículo de emergencia en llegar a su destino influye directamente sobre el resultado final de su intervención en el incidente, llegando en ocasiones a representar la diferencia entre la vida o la muerte de seres humanos.

Es por esto que se plantea conseguir que, mientras el vehículo de emergencia se desplaza por la vía, éste pueda alertar a los demás conductores de su paso con suficiente tiempo para que ellos a su vez despejen la calle. Esto no siempre se puede obtener mediante los métodos convencionales como sirenas, luces, altavoces, etc. Por tanto, al hacer uso de la banda de frecuencias de la radio comercial FM para transmitir un mensaje de alerta audible, éste puede llegar tan lejos como lo permita el sistema de propagación de la señal (antena + amplificador) además de que al transmitir la señal simultáneamente en tres frecuencias se obtiene un mayor alcance lo que permite interferir sobre 45 de las 50 estaciones de radio FM en un minuto (separación reglamentaria de 400KHz entre cada estación según la CONARTEL [7]) con un mensaje de alerta de unos 4 segundos de duración.

El prototipo de sistema de alerta para vehículos de emergencia poseerá dos modos de funcionamiento, un modo automático que permitirá enviar el mensaje de alerta audible a todas las emisoras de radio comercial FM empezando desde la frecuencia de 88.1 MHz hasta 108.1 MHz en grupos de tres en tres, y otro modo manual en el que el usuario ingresa cinco frecuencias centrales las cuales serán intervenidas por la transmisión junto con sus frecuencias adyacentes separadas a  $\pm 400\text{KHz}$  cubriendo un total de 15 estaciones de radio.

El primer método de transmisión cubriría el total de 49 emisoras comerciales de radio en un tiempo de 1.8 minutos, mientras que en el segundo método (ideado con la intención de que se transmita únicamente en las 5 emisoras más populares) se realizarían ciclos de 20 segundos en los que se cubriría un total de 15 emisoras (Cada frecuencia central ingresada por el usuario además de dos frecuencias adyacentes por cada una separadas a  $\pm 400$  MHz); el sistema poseerá además una interfaz amigable al usuario en la que será posible iniciar en cualquier momento la transmisión (modo automático por defecto) y también realizar configuraciones básicas; se colocará una pantalla táctil para disminuir el espacio que ocupa el prototipo y facilitar su manejo, además, el sistema podrá ser conectado directamente a la batería del vehículo o llevar batería propia.

Habiendo establecido lo anterior, se plantea la importancia de este trabajo en base a la necesidad existente de reducir el tiempo que tarda un vehículo de emergencia en llegar a su destino. Al implementar el sistema en el ambiente real de la atención de un incidente, el vehículo de ayuda podría alertar anticipadamente a los conductores de otros vehículos de su presencia en zonas donde el tráfico vehicular sea más denso y en consecuencia difícil de atravesar. Con esto, se espera que la atención de la emergencia se realice de forma oportuna y el servicio público en general dedicado a atender las urgencias sea más eficaz y confiable.

### **2.3 Delimitación**

El prototipo se implementará en el laboratorio de telecomunicaciones del bloque B de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, en el lapso de doce meses. Se utilizará como base el sistema operativo Ubuntu Linux en su versión 17.04, además de distintas herramientas de software libre tales como GNU Radio Companion y Python para diseñar las distintas fases de software del sistema. Se desarrollará la compatibilidad de hardware para la plataforma HackRF One de Great Scott Gadgets.

### **2.4 Explicación del problema**

El incremento en la cantidad de vehículos que circulan a nivel nacional y más específicamente en el área de Guayaquil provoca un aumento considerable en la densidad de tráfico que se presenta en las principales avenidas de la urbe, si se considera esto en horas pico, el problema se multiplica.

En áreas de alta circulación vehicular un conductor puede permanecer atrapado con su vehículo en el tráfico durante más de 10 minutos, tiempo que sobrepasa el mínimo establecido para que un vehículo de emergencia, por ejemplo, una ambulancia, atienda al usuario. Esto es un factor directo que tiene gran efecto sobre el resultado final que tendrá el incidente por el cual se solicitó en primer lugar el vehículo de emergencia; adicional a esto, Si los conductores que se encuentran atrapados en el tráfico no son alcanzados por ninguno de los métodos tradicionales de alerta de los vehículos de emergencia, entonces disminuye la posibilidad de que éstos cedan el paso al vehículo de emergencia, aumentado aún más el tiempo que éste debe permanecer en el atasco vehicular.

Habiendo establecido las posibles causas del problema y los antecedentes, alcance e importancia del proyecto propuesto, el problema se plantea entonces de la siguiente forma: *¿Cómo disminuir el tiempo que tarda un vehículo de emergencia en esperar que le sea cedido el paso mientras transita por zonas de tráfico denso?*

### **3 Objetivo general y objetivos específicos**

#### **3.1 Objetivo general**

Diseñar e implementar un prototipo para la transmisión de mensajes de alerta en FM sobre cinco grupos de tres portadoras en frecuencia modulada para su uso en vehículos de emergencia utilizando Radio Definida por Software y GNU Radio

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Diseñar y programar un sistema de transmisión de señales en Frecuencia Modulada utilizando el software libre GNU Radio 3.7 y Python 2.7 sobre una plataforma Linux Ubuntu 17.04.
2. Diseñar una interfaz gráfica que permita al usuario manipular el sistema con facilidad.
3. Implementar compatibilidad del sistema de transmisión diseñado para su uso con la plataforma de Radio Definida por Software Great Scott Gadgets HackRF One.
4. Transmitir el mensaje de alerta audible sobre una frecuencia portadora central y dos frecuencias portadoras adyacentes a  $\pm 400$  KHz simultáneamente, dentro del rango del espectro radioeléctrico para la banda FM (88.1 MHz - 107.9 MHz).

## 4 Fundamentos teóricos

### 4.1 Introducción a la radiación electromagnética

La radiación electromagnética es un conjunto de ondas de radio en frecuencias comprendidas entre algunos hercios hasta llegar a los gigahercios. Estas ondas se propagan en el espacio dando forma a las ondas electromagnéticas las cuales están formadas por la combinación de campos eléctricos y magnéticos. [8]

Para transferir información entre dos lugares, se consigue mediante la transmisión de ondas de radio, convirtiendo la información original a energía electromagnética, para transmitirla a continuación a una o más estaciones receptoras, donde se vuelve a convertir a su forma original. [8]

La energía electromagnética se puede propagar en forma de voltaje o corriente, a través de un conductor o hilo metálico o bien en forma de ondas de radio emitidas hacia el espacio libre, o como señales luminosas a través de una fibra óptica. [8]

#### 4.1.1 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce radiación electromagnética, y está distribuida a través de un rango de frecuencias casi infinito. [8]

El espectro de frecuencias electromagnéticas total que muestra las localizaciones aproximadas de varios servicios se enseña en la Figura 1, en donde el espectro de frecuencias se extiende desde las frecuencias subsónicas (unos cuantos Hertz) a los rayos cósmicos (10<sup>22</sup> Hz) cada banda de frecuencias tiene una característica única que la hace diferente de las otras bandas. [8]

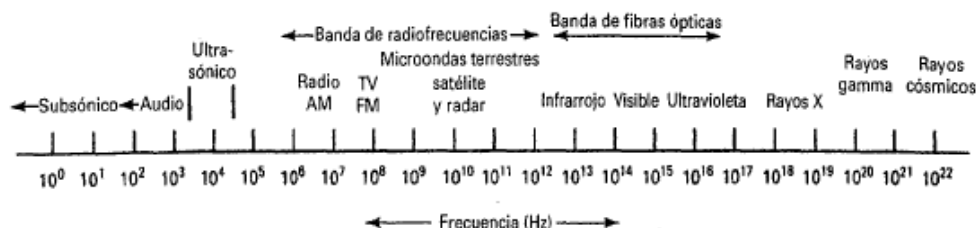


Figura 1: Espectro electromagnético de frecuencias. [8]

Cuando se trata de ondas de radio, es común usar las unidades de la longitud de onda en vez de la frecuencia. La longitud de onda es la distancia que un ciclo de una onda electromagnética ocupa en el espacio y es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda y directamente proporcional a la velocidad de propagación (la velocidad de propagación de la energía electromagnética en el espacio libre se asume que sea la velocidad de la luz (3 x10<sup>8</sup> m/s) [8]. La relación entre la frecuencia, velocidad y longitud de onda se expresa matemáticamente como:

$$\text{longitud de onda} = \frac{\text{velocidad}}{\text{frecuencia}} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  = longitud de onda (metros por ciclos)  
 $c$  = velocidad de la luz (300.00 Km por segundo)  
 $f$  = frecuencia (Hertz)

El espectro de longitudes de onda electromagnética en donde se indican los servicios dentro de la banda, se muestra en la Figura 2:

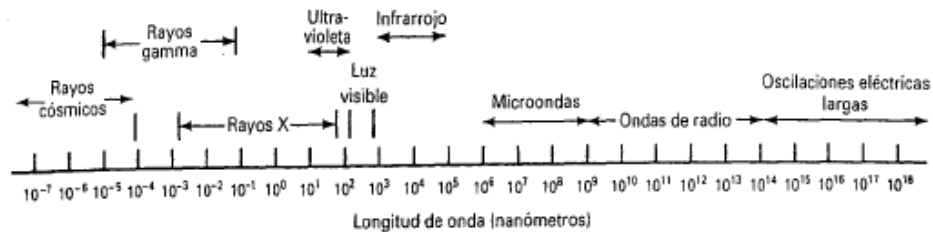


Figura 2: Espectro electromagnético de longitudes de onda. [8]

#### 4.1.2 Frecuencias de transmisión

El espectro total de la frecuencia electromagnética está dividido en subsectores o bandas, cada banda tiene un nombre y límites. Por ejemplo, la banda de radiodifusión FM Comercial se extiende de 88 a 108 MHz, la asignación y regulación es realizado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en Estados Unidos. [9]

Número de Banda	Rango de Frecuencia	Designaciones
2	30 - 300 Hz	ELF (frecuencias extremadamente bajas)
3	0.3 - 3 KHz	VF (frecuencias de voz)
4	3- 30 KHz	VLF (frecuencias muy bajas)
5	30 - 300 KHz	LF (frecuencias bajas)
6	0.3 - 3 MHz	MF (frecuencias medias)
7	3 - 30 MHz	HF (frecuencia altas)
8	30 - 300 MHz	VHF (frecuencias muy altas)
9	0.3 - 3 GHz	UHF (frecuencia ultras altas)
10	3 - 30 GHz	SHF (frecuencias super altas)
11	30 - 300 GHz	EHF (frecuencias extremadamente altas)
12	0.3 - 3 THz	Luz infrarroja
13	3 - 30 THz	Luz infrarroja
14	30 - 300 THz	Luz infrarroja
15	0.3 - 3 PHz	Luz visible
16	3 - 30 PHz	Luz ultravioleta
17	30 - 300 PHz	Rayos X
18	0.3 - 3 EHz	Rayos gamma
19	3 - 30 EHz	Rayos cósmicos

\*\* KHz =  $10^3$  | MHz =  $10^6$  | GHz =  $10^9$  | THz =  $10^{12}$  | PHz =  $10^{15}$  | EHz =  $10^{18}$

Tabla 1: Designaciones de banda del CCIR. [9]

Las frecuencias exactas asignadas a transmisores específicos funcionando en las diversas clases de servicios están constantemente actualizándose y alterándose, para cubrir las necesidades de comunicaciones de la nación. Sin embargo, la división general del espectro de frecuencia totalmente utilizable se decide en las Convenciones Internacionales de Telecomunicaciones, las cuales son realizadas aproximadamente cada 10 años. [9]

El espectro de frecuencias de radio (RF) totalmente utilizable se divide en bandas de frecuencias más angostas, las cuales son asignadas con nombres descriptivos y números de bandas. Las designaciones de banda del Comité Consultivo Internacional de Radio (CCIR), como se observa en la Tabla 1.

Las bandas se dividen en varios y diferentes tipos de servicios, como un satélite, microondas, búsqueda a bordo de un barco, navegación de barcos, radares, telefonía móvil y muchos más. [9]

#### 4.1.3 Propagación de radiofrecuencias

La comunicación por medio de radio frecuencias tiene lugar cuando una señal, en el rango de 30 KHz a 300 GHz, se propaga de transmisor al receptor, en el cual puede o no existir lo que se conoce como Línea de Vista o LOS (line-of-sight) y la señal sufre diversos efectos antes de llegar a su destino. [10]

La propagación permite en los sistemas de radiodifusión que las ondas procedentes de las antenas emisoras, se dispersen en todas las direcciones, viajando en línea recta, y mientras exista línea de vista entre el emisor y el receptor se establecerá una comunicación factible y sin la posibilidad de pérdidas o distorsión en la transmisión de información. [8] [9]

#### Características de propagación

La propagación de las ondas electromagnéticas por el espacio libre se suele llamar propagación de radiofrecuencia (RF), o simplemente radio propagación. Aunque el espacio libre implica al vacío, con frecuencia la propagación por la atmósfera terrestre se llama propagación por el espacio libre. La diferencia principal es que la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal las cuales no son consideradas en el vacío. [8] [9]

Es importante considerar la distancia entre el emisor y el receptor para una propagación de radiofrecuencia, debido a que si los valores de potencia de transmisión en el emisor no son los adecuados puede existir pérdida de información, o en ocasiones la transmisión no arriba al receptor por lo que será necesario acoplar o utilizar equipos amplificadores de potencia al emisor para establecer factibilidad en la comunicación. [8] [9]

#### Aspectos de propagación de radiofrecuencias

En una propagación, si no existen obstáculos en el camino entre las antenas transmisora y receptora, la señal puede alcanzar al receptor a través de una trayectoria con línea de vista directa (LOS, Line of Sight). En caso contrario, es decir, trayectoria sin línea de vista directa (NLOS, Non Line of Sight), la señal puede completar el recorrido hasta el receptor mediante los mecanismos de reflexión, difracción, dispersión y múltiple trayectoria. [8] [11]



Figura 3: Propagación de radiofrecuencias. [8]



## Pérdidas de propagación

La señal pierde energía cuanto más se aleja de la fuente o transmisor. Ello se debe a que a medida que la señal se aparta de la antena transmisora el área de la superficie del frente de onda, que es esférico, incrementa, por lo que, de acuerdo a la ley de conservación de la energía, al aumentarse la mencionada área, la energía contenida en el frente de onda debe disminuir. [8]

## Pérdidas en el espacio libre

En el espacio libre se considera la menor pérdida de propagación que padece la señal en un sistema inalámbrico de comunicaciones en su recorrido hasta el transmisor, además de aumentar con el cuadrado de la distancia respecto a la fuente, también se aumenta con el cuadrado de la frecuencia de operación del sistema, "f". [8] [12]

La ecuación 2 permite hallar las pérdidas de propagación en espacio libre ( $L_p$ ), en decibelios. [8]

$$L_{p(dB)} = 32.4 + 20 \log f_{(MHz)} + 20 \log d_{(Km)} \quad (2)$$

Donde  $d$  = distancia en (kilómetros)  
 $f$  = frecuencia (MHz)

Cuando las ondas electromagnéticas se encuentran en el vacío, se dispersan y se reduce la densidad de potencia, lo que se conoce como atenuación. La atmósfera terrestre no se le considera vacío debido a que contiene partículas que pueden absorber la energía electromagnética y a este tipo de reducción de potencia se le llama pérdidas por absorción, la cual no se presenta cuando las ondas viajan afuera de la atmósfera terrestre. [12] [13]

## Margen de desvanecimiento

Al propagarse una onda electromagnética por la atmósfera terrestre, la señal puede presentar pérdidas intermitentes de intensidad, además de la pérdida normal en la trayectoria. Esas pérdidas se pueden presumir a diversos fenómenos, que incluyen efectos de corto y de largo plazo. Esta alteración en la pérdida de la señal se llama desvanecimiento y se puede otorgar a perturbaciones meteorológicas como lluvia, nieve, granizo, etc.; a trayectorias múltiples de transmisión y a una superficie terrestre irregular. [8]

En el desvanecimiento temporal, se añade una pérdida adicional de transmisión a la pérdida en trayectoria normal, llamada margen de desvanecimiento. [8]

Al resolver las ecuaciones de confiabilidad de Barnett-Vignand para una disponibilidad anual especificada en un sistema no protegido sin diversidad se obtiene la siguiente expresión matemática: [8]

$$F_m = 30 \log D + 10 \log(6ABf) + 10 \log(1 - R) - 70 \quad (3)$$

La ecuación 3 se puede escribir como:

$$F_m = \text{Efecto de trayectoria múltiple} + \text{Sensibilidad del Terreno} \\ + \text{Objetivos de confiabilidad} - \text{Constante}$$

Donde  $F_m$  = margen de desvanecimiento (decibeles)  
 $D$  = distancia (kilómetros)  
 $f$  = frecuencia (GHz)  
 $R$  = confiabilidad en tanto por uno (es decir, 99.99% = 0.9999)  
 $1 - R$  = objetivos de confiabilidad para una ruta de 400 Km en un sentido  
 $A$  = factor de rugosidad  
     = 4 sobre agua o sobre un terreno muy liso  
     = 1 sobre un terreno promedio  
     = 0.25 sobre un terreno muy áspero y montañoso  
 $B$  = factor para convertir la peor probabilidad mensual en una anual  
     = 1 para pasar una disponibilidad anual a la peor base mensual  
     = 0.5 para áreas calientes y húmedas  
     = 0.25 para áreas continentales promedio  
     = 0.125 para áreas muy secas o montañosas

#### 4.1.4 Propiedades de las ondas de radio

La forma en que las ondas se propagan por la atmósfera puede ser distinta de su comportamiento en el espacio libre debido a diversos fenómenos ópticos como son la reflexión, refracción, difracción, entre otros. [14]

##### Refracción

La refracción de una onda consiste en el cambio de dirección que experimenta una onda electromagnética conforme pasa de un medio a otro, con diferentes velocidades de propagación. En las comunicaciones inalámbricas de corto alcance este fenómeno ocurre, pero no es de gran consideración, mientras en las comunicaciones inalámbricas de largo alcance es muy importante para estudios de factibilidades considerando en la trayectoria de las ondas. [8] [14]

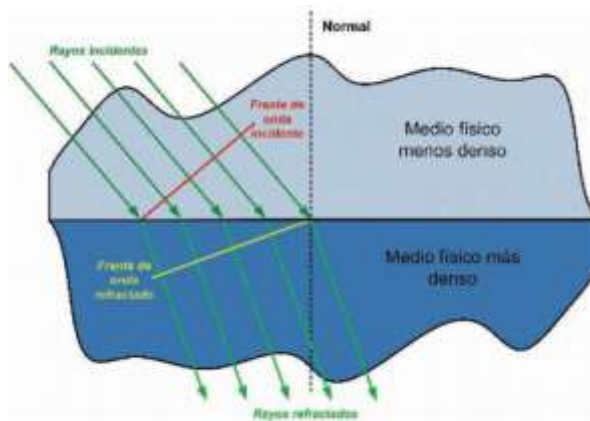


Figura 4: Ejemplo de refracción de un medio menos denso a un medio más denso. [14]

##### Reflexión

Una onda reflejada es producida cuando la señal electromagnética alcanza una superficie de separación entre dos medios diferentes desde el punto de vista eléctrico; en consecuencia, al menos parte de la energía de la señal incidente no pasa al otro medio, sino que se propaga en su medio original, aunque en otra dirección distinta a la inicialmente. [14]

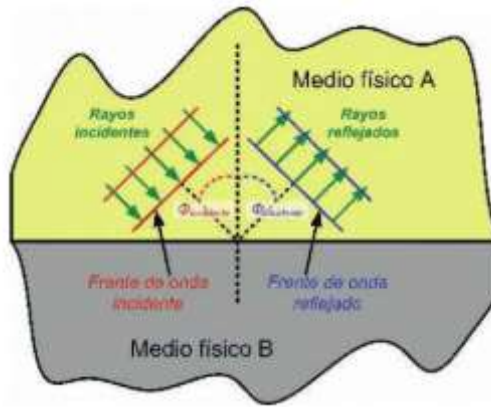


Figura 5: Ejemplo de onda totalmente reflejada. [14]

La dirección perpendicular es en relación a la superficie de separación de los dos medios, mientras que ángulo incidente y el ángulo reflejado son los ángulos que forman las ondas incidentes y reflejadas con dicha dirección, respectivamente. Las mencionadas ondas están contenidas en un mismo plano y de acuerdo a la primera ley de Snell, los ángulos incidente y reflejado deben ser iguales. [14]

### Dispersión

El fenómeno de dispersión que experimenta una onda electromagnética puede ocurrir en su camino hacia el receptor cuando la onda se encuentra con un medio eléctricamente diferente, lo que conduce a una descomposición de la trayectoria original en diversas direcciones que, en general, se dirigen hacia atrás, hacia adelante y hacia los lados. En esa situación, parte de la señal puede alcanzar al receptor. [8] [14]

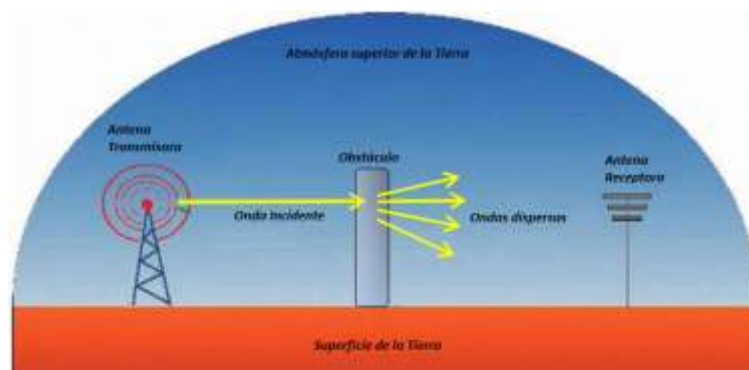


Figura 6: Fenómeno de dispersión de una onda electromagnética. [14]

La dispersión de la señal puede ser causada por obstáculos tales como árboles, postes de alumbrado público, avisos de señalización, entre otros, así como irregularidades en la tropósfera y rugosidades en la superficie en la cual incide la onda. [8] [14]

### Difracción

Cuando una onda electromagnética incide en el borde de un obstáculo, parte de la señal continúa su trayectoria y la parte restante se dirige hacia la parte posterior del obstáculo.

Este fenómeno, conocido como difracción, es explicado por el principio de Huygens, según el cual un frente de onda (esférico) cualquiera de la onda electromagnética que se está propagando, puede ser considerado como un conjunto de frentes de onda secundarios, también esféricos. Por tanto, la porción de frentes de onda secundarios del frente principal que está por arriba del obstáculo es la responsable de irradiar energía atrás de dicho obstáculo. [14]

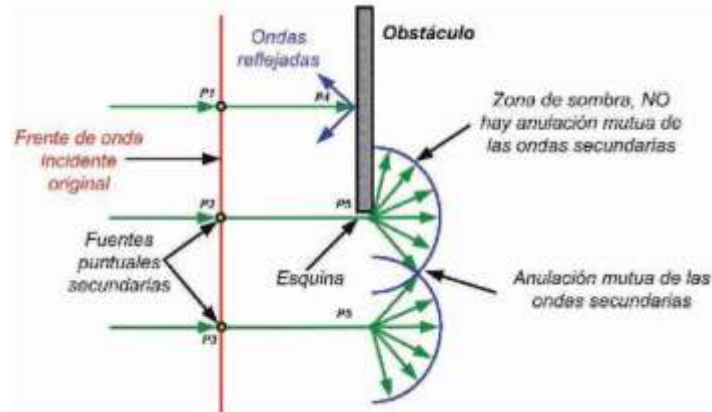


Figura 7: Fenómeno de difracción en la esquina de un obstáculo. [14]

### Efecto de la múltiple trayectoria

Como consecuencia de los fenómenos de reflexión, difracción, dispersión y otros que puedan modificar la trayectoria de la señal en su ruta hacia el receptor, en la mayoría de los sistemas inalámbricos de comunicaciones, la señal resultante en el receptor está conformada por diversas señales que arriban al mismo provenientes de múltiples trayectorias, con diversos tiempos de llegada. El campo eléctrico total en el receptor es la suma vectorial de todos los campos eléctricos correspondientes a las respectivas trayectorias. [15] [16]

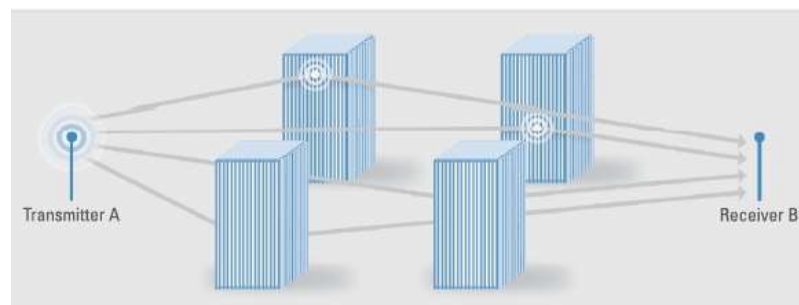


Figura 8: Fenómeno de la multitrayectoria. [17]

El efecto de la múltiple trayectoria es el desvanecimiento de la potencia de la señal recibida en relación a su valor de medio. En ese sentido, la reflexión es responsable por el desvanecimiento de larga escala, mientras que la difracción y la dispersión son responsables del desvanecimiento de pequeña escala. [15] [16]

### 4.1.5 Interferencias electromagnéticas (EMI)

Las interferencias electromagnéticas se pueden definir como señales de tipo electromagnéticas que influyen no intencionalmente el normal funcionamiento de un sistema eléctrico o electrónico, provocando modificaciones a las magnitudes eléctricas o magnéticas (tensión, corriente o campo electromagnético) de sus circuitos, aunque no lleguen a apreciarse sus efectos externamente. [18] [19]

Existen excepciones a esta definición, son la distorsión provocada por las alinealidades en un circuito y los ruidos térmicos en los componentes. Cuando la interferencia altera o modifica el funcionamiento de cualquier equipo electrónico o sistema, incapacitándolo para realizar la misión para la que fue diseñado, con riesgos para la seguridad de instalaciones y persona en caso de fallos, plantea un grave problema, tanto técnico como comercial. La interferencia electromagnética se define como el “deterioro de una señal electromagnética deseada a causa de una perturbación electromagnética”. [18] [19]

#### **4.1.6 Interferencias de la radiofrecuencia (RFI)**

La interferencia para un usuario de un sistema inalámbrico podría ser entretenimiento o comunicación esencial para otros. La existencia de otros sistemas inalámbricos puede interferir entre si distancias de hasta 500 metros o más, otra fuente de interferencia son los armónicos de las estaciones de radio FM y los transmisores de comunicaciones. Los grandes transmisores de estaciones de FM comúnmente tienen una pequeña cantidad de salida al doble de su frecuencia operativo (el “segundo armónico”), y este puede ser una fuente de interferencia para los sistemas inalámbricos que operan en banda VHF. [20]

Los transmisores de comunicaciones también tienen salidas armónicas que pueden interferir potencialmente con los sistemas inalámbricos. Los transmisores de comunicaciones desajustados o mal mantenidos pueden tener una salida armónica o salida espuria excesiva. La interferencia de esta fuente probablemente solo sucederá cuando el transmisor de comunicaciones este cerca. En ocasiones, las antenas para los transmisores de comunicaciones se ubican sobre edificaciones, si el transmisor es potente y la antena está cerca, la interferencia con el sistema inalámbrico se convertirá en una posibilidad. [20]

Las señales espurias de un transmisor con falta de ajuste o defectuoso pueden causar la interferencia y en algunos casos, la fuerte señal del transmisor puede cargar excesivamente el receptor inalámbrica y provocar interferencia debido a la intermodulación. [20]

#### **4.1.7 Dificultades en la transmisión**

En el diseño de un sistema de comunicación enfrenta dos clases generales de restricciones; por un lado, los factores tecnológicos, es decir, los factores vitales de la ingeniería y, por otra parte, las limitaciones físicas fundamentales impuestas por el propio sistema. [8]

##### **Atenuación**

La atenuación se define como la disminución progresiva de su potencia conforme se aumenta la distancia de la fuente. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí. [14]

Se debe recalcar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez más sobre un área mayor lo que hace una pérdida de potencia, que se suele llamar atenuación de onda, la cual se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda. [8] [14]

## Absorción

Una onda electromagnética cuando se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas. La absorción de onda por la atmósfera es similar a una pérdida de potencia  $I^2R$ . Cuando se produce la absorción de una onda, la energía se pierde para siempre, y causa una atenuación en las intensidades de voltaje y campo magnético, y una reducción correspondiente de densidad de potencia. [8] [14]

La atenuación de ondas debida a la absorción no depende de su frecuencia de la distancia a la fuente de radiación, sino a la distancia total que la onda se propaga a través de la atmosfera. Las condiciones atmosféricas anormales, como lluvias intensas o neblinas densas, absorben más energía que una atmósfera normal. [8] [14]

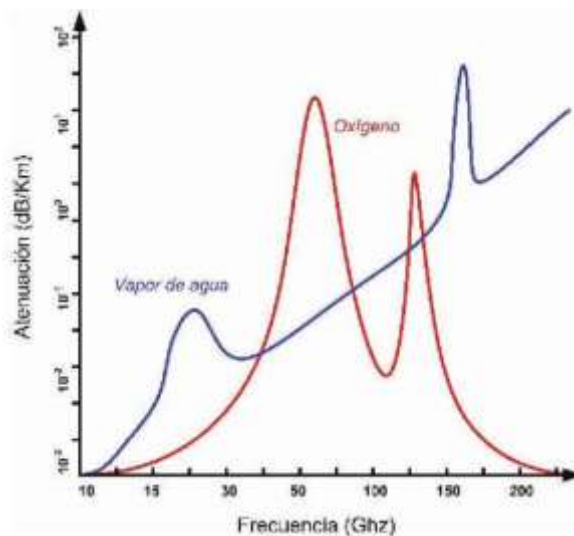


Figura 9: Representación de la absorción atmosférica debida al oxígeno y al vapor de agua frente a la frecuencia.[14]

## Ruido

Todos los sistemas de comunicación están sujetos al ruido tanto en el canal de comunicación como en el receptor. El ruido es una energía aleatoria indeseable que entra a los sistemas de comunicación vía el medio de comunicación e interfiere con el mensaje transmitido. El ruido puede ser correlacionado o no correlacionado. Correlación es una relación entre la señal y el ruido. El ruido no correlacionado es la energía que hay, por ejemplo, ruido térmico, en ausencia de una señal. El ruido correlacionado es energía no deseada que se presenta como resultado directo de la señal. [10]

## Distorsión

Se considera distorsión a la perturbación de la señal debida a la respuesta imperfecta del sistema de comunicación a ella misma [8]. Si un componente de un sistema de comunicación altera la forma de la señal, entonces le produce una distorsión. La distorsión por intermodulación es la generación de cualquier frecuencia de producto cruzado no deseada, cuando se mezclan dos o más frecuencias en un dispositivo no lineal. [8] [14]

Existe distorsión armónica, cuando se producen las armónicas no deseadas de una señal, debido a una amplificación no lineal (mezclado). Las armónicas son múltiplos enteros de la señal original de entrada. [8] [14]

### Diferencia entre ruido e interferencia

Se determina que el ruido es una condición en la mayoría de casos es propio de los materiales y de la temperatura, el cual se puede determinar que la presencia de ruido en el equipo no necesariamente implica un mal funcionamiento del mismo, dependerá de los materiales que el fabricante considera al momento de elaborar los dispositivos. La interferencia implica un funcionamiento anormal del sistema producido por alguna fuente externa de interferencia. [19]

## 4.2 Sistemas de comunicaciones

En esencia las comunicaciones electrónicas son: la transmisión, la recepción y el procesamiento de la información, con el uso de circuitos electrónicos la información se define como conocimiento o clase de información comunicada o recibida. [8]

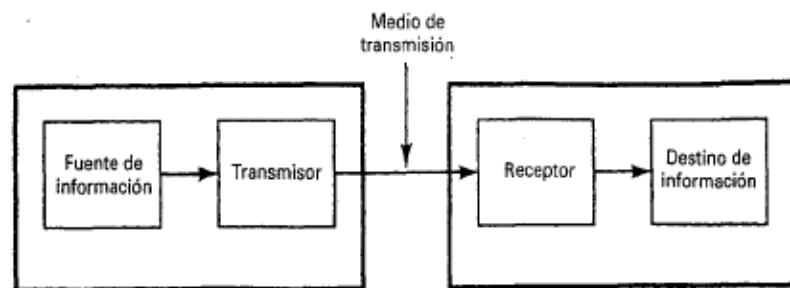


Figura 10: Diagrama simplificado de bloques de un sistema de comunicación electrónica. [8]

La información se propaga a través de un sistema de comunicación en la forma de símbolos, que puede ser analógico (proporcional). Sin embargo, con frecuencia la información fuente no es apropiada para ser transmitida, en su forma original, y se debe convertir a una forma más apropiada, antes de la transmisión. [8]

### 4.2.1 Modos de transmisión

Los sistemas de comunicaciones electrónicas pueden diseñarse para manejar la transmisión solamente en una dirección, en ambas direcciones, pero sólo uno a la vez, o en ambas direcciones al mismo tiempo. [8]

#### Simplex (SX)

Es un canal en el cual la información únicamente circula desde un origen (emisor) hasta un destino (receptor). Los sistemas simplex son, algunas veces, llamados sistemas de un sentido, sólo para recibir o sólo para transmitir. Un ejemplo de la transmisión simplex es la radiodifusión de la radio comercial o de televisión. [8] [14]

#### Semidúplex o half-duplex (HDX)

Las transmisiones pueden ocurrir en ambas direcciones, pero no al mismo tiempo. Los walkies-talkies, por ejemplo, puede tener comunicaciones bidireccionales, pero no cuando uno habla el otro debe esperar y a la inversa. [8] [14]

### Full-dúplex (FDX)

Las transmisiones pueden ocurrir en ambas direcciones al mismo tiempo. A los sistemas de full-dúplex o en ambos sentidos. La estación a la que está transmitiendo también debe ser la estación de la cual está recibiendo. Un sistema telefónico estándar es un ejemplo de una transmisión full-dúplex. [8] [14]



Figura 11: Ejemplos de modos de transmisión. [14]

#### 4.2.2 Ancho de banda y capacidad de información

En los sistemas de comunicaciones las dos limitaciones más significativas para el funcionamiento del mismo son: el ancho de banda y el ruido. El ancho de banda de un sistema de comunicaciones es la banda de paso mínima (rango de frecuencias) requerida para propagar información de la fuente a través del sistema. [8] [14]

La capacidad de información de un sistema de comunicación es una medida de cuanta información de la fuente puede movilizarse por el sistema, en un período dado de tiempo. La cantidad de información que puede propagarse a través de un sistema de transmisión es una función del ancho de banda del sistema y el tiempo de transmisión. [8]

La relación entre el ancho de banda, tiempo de transmisión y capacidad de información fue desarrollada en 1920 por R. Hartley de los laboratorios telefónicos Bell, de manera sencilla, la ley de Hartley. [8]

$$I \propto B \times t \quad (4)$$

Donde

- I = capacidad de información
- B = ancho de banda del sistema (hertz)
- t = tiempo de transmisión (segundos)

La ecuación muestra que la capacidad de información es una función lineal y directamente proporcional al ancho de banda del sistema y al tiempo de transmisión. Si se modifica el ancho de banda o el tiempo de transmisión, ocurrirá un cambio directamente proporcional en la capacidad de información. [8] [21]

#### 4.2.3 Modulación y demodulación

En los sistemas de comunicaciones electrónicas analógicas, la información de la fuente (señal de inteligencia) actúa sobre o modula una señal sinusoidal de frecuencia sencilla. [22]



La información de la fuente de frecuencia relativamente baja se llama señal de modulación, la señal de frecuencia relativamente alta, sobre la cual se actúa (modulada) se la llama la portadora, y la señal resultante se llama onda modulada o señal. [22]

La modulación es el espectro de variar o cambiar alguna propiedad de una portadora analógica de acuerdo con la información original de la fuente. Recíprocamente, la demodulación es el proceso de convertir los cambios en la portadora analógica de la información original de la fuente de modulación se realiza en el transmisor, en un circuito llamado modulador, y la demodulación se realiza en el receptor, en el transmisor en un circuito llamado demodulador. La señal de información que modula la portadora principal se llama señal de banda base o simplemente banda base. [23]

La ecuación 5 es la expresión general para una onda sinusoidal variante con el tiempo de voltaje, tal como una portadora analógica. Tres propiedades de una onda sinusoidal pueden ser variadas: en amplitud ( $V$ ), la frecuencia ( $f$ ), la fase ( $\theta$ ), o cualquier combinación de dos o más de estas propiedades. Si la amplitud de la portadora es variada proporcionalmente a la información de la fuente, resulta la amplitud modulada (AM). Si la frecuencia de la portadora varía en proporción a la información de la fuente, resulta la frecuencia modulada (FM). Si la fase de la portadora varía proporcionalmente a la información de la fuente, resulta la fase modulada (PM). [8]

$$V(t) = V * \text{sen}(2\pi ft + \theta) \quad (5)$$

En donde  $V(t)$  = Voltaje variable senoidalmente en el tiempo  
 $V$  = Amplitud máxima (volts)  
 $f$  = Frecuencia (Hertz)  
 $\theta$  = Desplazamiento de fase (radianes)

La Figura 12 es un diagrama a bloques simplificado de un sistema de comunicaciones que muestra la relación entre la señal de modulación (información), la señal modulada (portadora), la onda modulada (resultante) y el ruido del sistema. [8]

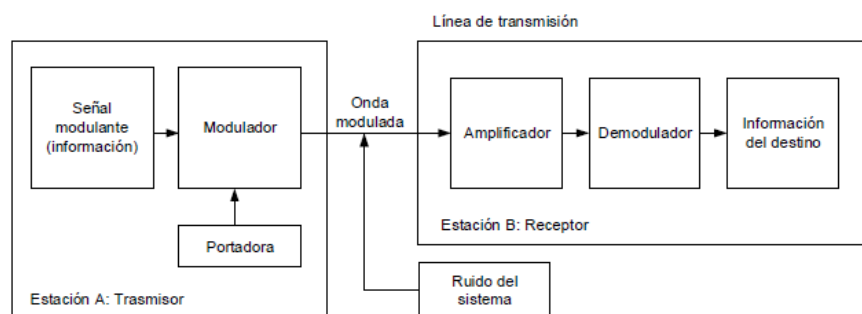


Figura 12: Diagrama a bloques de un sistema de comunicación. [8]

#### 4.2.4 Frecuencia modulada FM

La modulación de frecuencia es una técnica de modulación que permite transmitir información a través de una onda portadora variando su frecuencia. En aplicaciones analógicas, la frecuencia instantánea de la señal modulada es proporcional al valor instantáneo de la señal moduladora. [24]

En este caso la señal modulada mantendrá fija su amplitud y el parámetro de la señal portadora que variará es la frecuencia, y lo hace de acuerdo a como varíe la amplitud de la señal moduladora. [24]

$$V_p(t) = V_p \sin(2\pi f_p t) \quad (6)$$

Donde  $V_p$  es el valor pico de la señal portadora y  $f_p$  es la frecuencia de la señal portadora [24]. Mientras que la expresión matemática de la señal moduladora está dada por:

$$V_m(t) = V_m \sin(2\pi f_m t) \quad (7)$$

Siendo  $V_m$  el valor pico de la señal moduladora y  $f_m$  su frecuencia. [24]

De acuerdo a la expresión anterior, la frecuencia  $f$  de la señal modulada variará alrededor de la frecuencia de señal portadora de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f = f_p + \Delta f_p \sin(2\pi f_m t) \quad (8)$$

Por lo tanto, la expresión matemática de la señal modulada resulta:

$$V_p(t) = V_p \sin[2\pi(f_p + \Delta f_p \sin(2\pi f_m t))t] \quad (9)$$

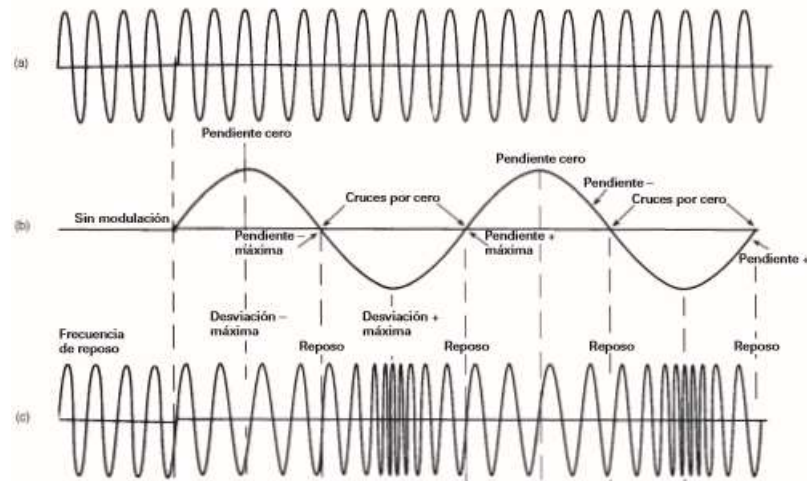


Figura 13: Modulación de frecuencia de una onda portadora senoidal por una señal de onda senoidal: a) portadora no modulada; b) señal moduladora; c) onda con frecuencia modulada. [8]

#### 4.2.5 Receptores FM

Los receptores para señales con modulación angular son muy parecidos a los que se usan para recepción de AM convencional o de banda lateral única, a excepción del método que se usa para extraer la información de audio de la forma de onda compuesta de FI. En los receptores de FM, el voltaje a la salida del detector de audio es directamente proporcional a la desviación de frecuencia en su entrada.

Con los receptores de PM, el voltaje a la salida del detector de audio es directamente proporcional a la desviación de fase en su entrada. Como se presentan la modulación de frecuencia y de fase al mismo tiempo con cualquiera de los sistemas de modulación angular, las señales de FM se pueden demodular con los receptores de PM, y viceversa. [8]

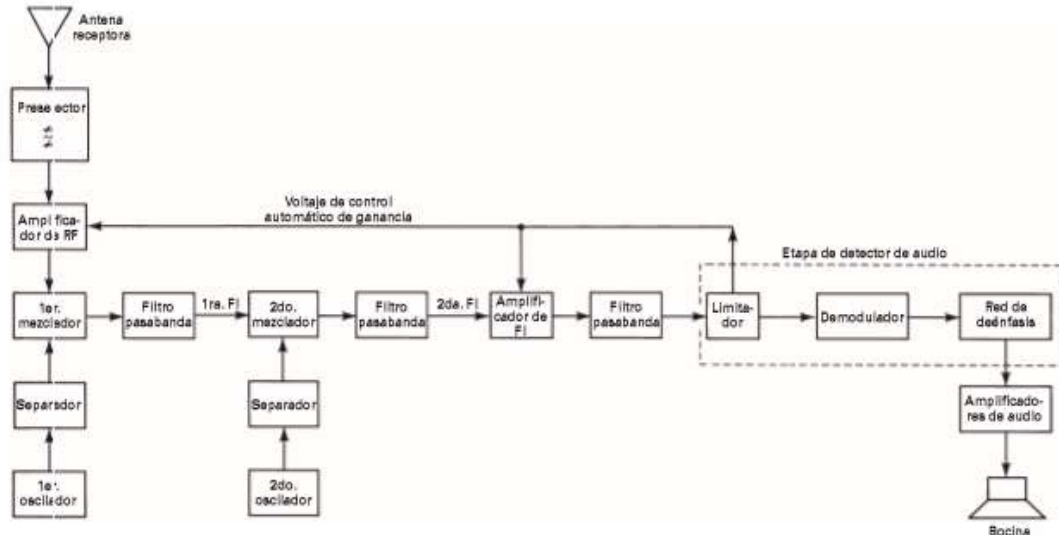


Figura 14: Diagrama de bloque de un receptor de FM con doble conversión. [8]

#### 4.2.6 Parámetros de un receptor

Existen varios parámetros de uso común para evaluar las posibilidades de un receptor para demodular bien una señal de radio. Los más importantes son la selectividad y la sensibilidad, que se usan con frecuencia para comparar la calidad de dos radorreceptores. [8]

##### Selectividad

La selectividad es un parámetro del receptor con el que se mide la capacidad de éste para aceptar una determinada banda de frecuencias y rechazar las demás. Por ejemplo, en la banda comercial de emisión de AM, a cada estación transmisora se le asigna un ancho de banda de 10 kHz. [8]

##### Sensibilidad

La sensibilidad de un receptor es el nivel mínimo de la señal de RF que se puede detectar a la entrada del receptor y producir una señal útil de información demodulada. En general, se usan la relación de señal a ruido y la potencia de la señal a la salida de la sección de audio, para determinar la calidad de una señal recibida, y determinar si es útil. [8]

##### Margen dinámico

El margen dinámico de un receptor se define como la diferencia en decibeles entre el nivel de entrada mínimo necesario para discernir una señal, y el valor de entrada que sobreexcita, o satura, al receptor, y produce distorsión. En términos sencillos, el margen dinámico es el intervalo de potencias de entrada dentro del cual el receptor es útil. [8]

## Fidelidad

La fidelidad es una medida de la capacidad de un sistema de comunicaciones para producir, a la salida del receptor, una réplica exacta de la información de la fuente original. [8]

### 4.3 Antenas

En un sistema de comunicación inalámbrico, para que exista comunicación entre dispositivo transmisor y receptor, ambos deben utilizar antenas, las cuales permiten conectar las líneas de transmisión con el espacio libre, el espacio libre a líneas de transmisión, o ambas cosas. En el extremo transmisor de un sistema de radiocomunicaciones con el espacio libre, una antena convierte la energía eléctrica que viaja por una línea de transmisión en ondas electromagnéticas que se emiten al espacio. En el extremo receptor, una antena convierte las ondas electromagnéticas en el espacio en energía eléctrica en una línea de transmisión. [8]



Figura 15: Radiación de una línea de transmisión: a) radiación de la línea de transmisión; b) conductores divergentes. [8]

#### 4.3.1 Parámetros de una antena

Una antena básica es un dispositivo recíproco pasivo, porque en realidad no puede amplificar una señal, al menos no en el sentido verdadero de la palabra. Las antenas de transmisión deben poder manejar potencias grandes y, en consecuencia, deben ser de materiales que soporten altos voltajes y grandes potencias, por ejemplo, de tubo metálico. [8] [14]

#### Diagrama de radiación

Un diagrama de radiación es un diagrama o gráfica polar que representa intensidades de campo o densidades de potencia en diversas posiciones angulares en relación con una antena. El campo de radiación cercano a una antena no es igual que el que está a una gran distancia. [8] [14]

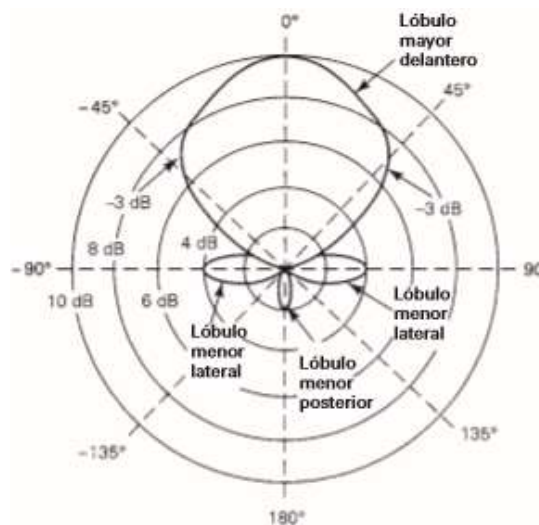


Figura 16: Diagrama de radiación en decibelios. [8]

**Lóbulo principal**

Es el lóbulo que contiene la máxima intensidad de radiación. [14]

**Lóbulos laterales**

Ninguna antena es capaz de irradiar la energía en su totalidad en una sola dirección deseada, por lo cual una parte de la energía es radiada en otras direcciones, esos picos más pequeños son denominados lóbulos laterales. [14]

**Lóbulo secundario**

En algunos diagramas de radiación, lo constituye un lóbulo lateral de mayor amplitud. [14]

**Lóbulo posterior**

Es el lóbulo que forma 180 grados respecto al lóbulo principal, y aquel que representa radiación en direcciones no deseadas. [14]

**Resistencia de radiación**

No toda la potencia que se suministra a una antena se irradia. Algo de ella se convierte en calor y se disipa. La resistencia de radiación es un poco “irreal”, porque no se puede medir en forma directa. La resistencia de radiación es una resistencia de antena a la corriente alterna, y es igual a la relación de la potencia irradiada por la antena entre el cuadrado de la corriente en su punto de alimentación. [8]

La ecuación que define la resistencia de radiación es:

$$R_r = \frac{P_{rad}}{i^2} \quad (10)$$

En donde  $R_r$  = resistencia de radiación (ohms)  
 $P_{rad}$  = potencia irradiada por la antena (watts)  
 $i$  = corriente en el punto de alimentación de la antena (amperes)

**Ganancia directiva y ganancia de potencia**

La ganancia directiva es la relación de la densidad de potencia irradiada en una dirección particular entre la densidad de potencia irradiada al mismo punto por una antena de referencia, suponiendo que ambas antenas estén irradiando la misma cantidad de potencia. La ganancia directiva máxima se llama directividad. [8]

La ganancia de potencia es lo mismo que la ganancia directiva, excepto que se usa la potencia total alimentada a la antena; es decir, se toma en cuenta la eficiencia de la antena. Se supone que la antena dada y la antena de referencia tienen la misma potencia de entrada, y que la antena de referencia no tiene pérdidas ( $\eta=100\%$ ). [8]

La EIRP (Potencia Radiada Isotrópica Efectiva) está dada por el producto de la potencia radiada y la ganancia directiva de la antena. Representa la densidad de potencia máxima que tiene que emitir una antena isotrópica en la dirección de máxima ganancia de la antena. [8]

$$EIRP = P_{rad} D_t \text{ (watts)} \quad (11)$$

En donde  $P_{rad}$  = potencia total irradiada (watts)  
 $P$  = ganancia directiva de la antena de transmisión (adimensional)

## Polarización

La polarización de una antena no es más que la orientación del campo eléctrico que se irradia de ella. Una antena puede estar polarizada linealmente (en general, horizontal o verticalmente, suponiendo que los elementos de la antena están en un plano horizontal o en uno vertical), elípticamente o circularmente. [8]

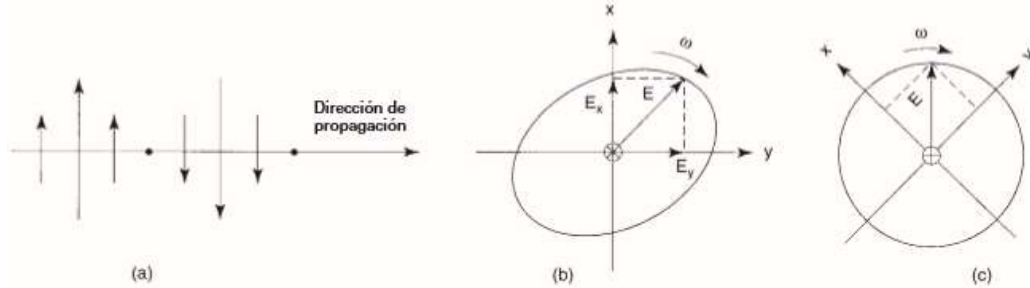


Figura 17: Polarizaciones de antena: a) línea; b) elíptica; c) circular. [8]

## Abertura del haz

La abertura (angular) del haz de una antena es la separación angular entre dos puntos de media potencia (-3 dB) en el lóbulo mayor de la gráfica de radiación de una antena, que se suele tomar en uno de los planos “principales”. [8]

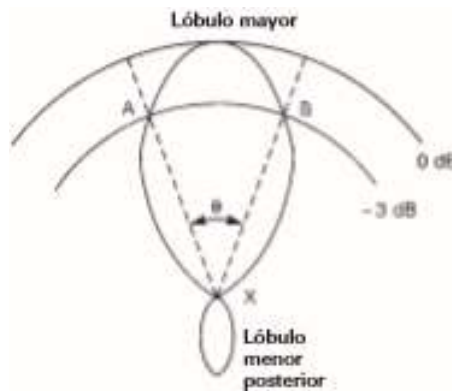


Figura 18: Abertura de haz de antena. [8]

## Ancho de banda

El ancho de banda de una antena se define, como el intervalo de frecuencias dentro del cual el funcionamiento de la antena es “satisfactorio”. [8]

$$\text{Ancho de banda } [\%] = \frac{f_H - f_L}{f_C} \times 100 \quad (12)$$

En donde  $f_H$  = frecuencia mayor de la banda  
 $f_L$  = frecuencia menor de la banda  
 $f_C$  = frecuencia central u óptima de operación.

## Impedancia de entrada

La impedancia de entrada de una antena es sólo la relación del voltaje de entrada a la antena a la corriente de entrada a la misma y se mide en el punto de la antena donde se conecta la línea de transmisión. Si la impedancia de salida del transmisor y la impedancia de entrada de la antena son iguales a la impedancia característica de la línea de transmisión, no habrá ondas estacionarias en la línea y se transmitirá una potencia máxima a la antena, potencia que será irradiada. [8]

$$Z_{ent} = \frac{V_t}{I_t} \quad (13)$$

En donde:

$Z_{ent}$  = impedancia de entrada a la antena (ohms)  
 $V_t$  = voltaje de entrada a la antena (volts)  
 $I_t$  = corriente de entrada a la antena (amperes)

### Teorema de máxima transferencia de potencia

En el sector de las comunicaciones, y en la electrónica en general, los acopladores o adaptadores de impedancia son fundamentales para permitir que se produzca la máxima transferencia de potencia entre los subsistemas (amplificadores, mezcladores, osciladores, PPL, líneas de transmisión, antenas, etc.) [14]



Figura 19: Esquema genérico de un adaptador de impedancias. [14]

La finalidad del teorema, consiste en aplicar o acoplar correctamente los conectores desde los terminales de los dispositivos de un sistema de comunicación, para conseguir que se transmita la máxima potencia posible a la carga de un ancho de banda determinado. [14]

### 4.3.2 Tipos de antenas

Existe una gran diversidad de tipos de antena, dependiendo del uso a que van a ser destinadas. El tamaño de las antenas está relacionado con la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la señal de radiofrecuencia transmitida o recibida, debiendo ser, en general, un múltiplo o submúltiplo exacto de esta longitud de onda y es por eso que, a medida que se van utilizando frecuencias mayores, las antenas disminuyen su tamaño. [14]

#### Antenas de hilo

Las antenas de hilo están formadas por hilos conductores, eléctricamente delgados, cuyos diámetros  $\ll \lambda$ . Se modelan como un conductor de sección infinitesimal. Pueden estar formadas por hilos rectos (dipolos, rombos), espirales (circular, cuadrada o cualquier forma arbitraria) y hélices. [25]

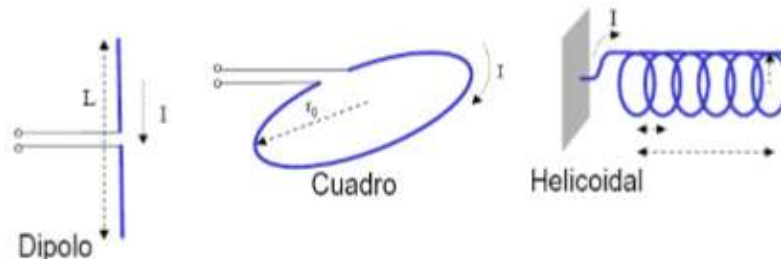


Figura 20: Distintos tipos de antenas de hilo. [25]

El tipo más común son las antenas de dipolo. Esta clase de antena es la más sencilla de todas. Suelen estar fabricados de aluminio o cobre. [25]



## Antena Yagui-Uda

Una antena muy usada, es un conjunto lineal formado por un dipolo y dos o más elementos parásitos: un reflector y uno o más directores. En la Figura 21 se ve una antena Yagi sencilla de tres elementos. El elemento excitado es un dipolo doblado de media onda. A este elemento se le llama elemento excitado, porque está conectado con la línea de transmisión; sin embargo, se suele usar sólo para recibir. El reflector es una barra recta de aluminio, 5% más larga que el dipolo, y el director se corta un 5% más corto que el elemento excitado. La distancia entre los elementos suele ser de 0.1 a 0.2 longitudes de onda. [8]

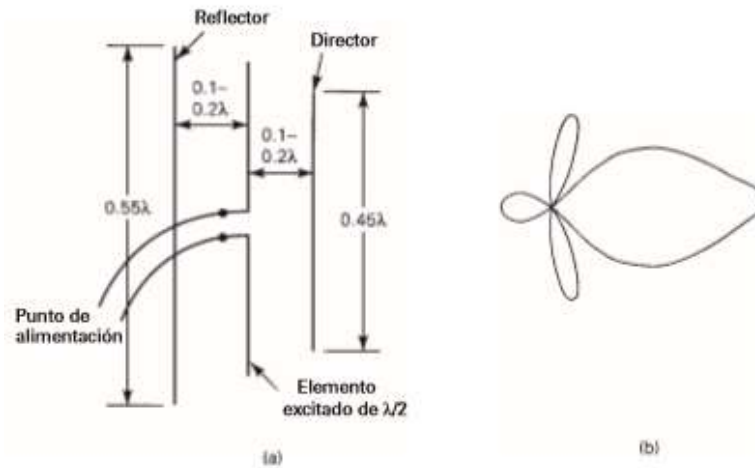


Figura 21: Antena de Yagi-Uda: a) Yagi de tres elementos; b) gráfica de radiación. [8]

## 4.4 Amplificador de potencia RF

En los sistemas de comunicación inalámbrica, requieren de equipos amplificadores de potencia los cuales permitan transmitir la información a los receptores que se encuentren a una distancia considerable a la que el sistema por sí solo no puede abarcar. El amplificador de potencia es la última etapa del emisor, tiene la funcionalidad de amplificar la potencia de la señal (no necesariamente la tensión) y transmitirla a la antena con la máxima eficiencia. [26]

Los amplificadores de potencia de RF lineales, es decir fundamentalmente aquellas denominadas clases A y B, tienen una ganancia de potencia apreciable, producen una réplica amplificada de la tensión de entrada. La falta de linealidad del amplificador produce dos tipos de señales no deseadas; productos armónicos y productos de distorsión por intermodulación (IMD). [26]

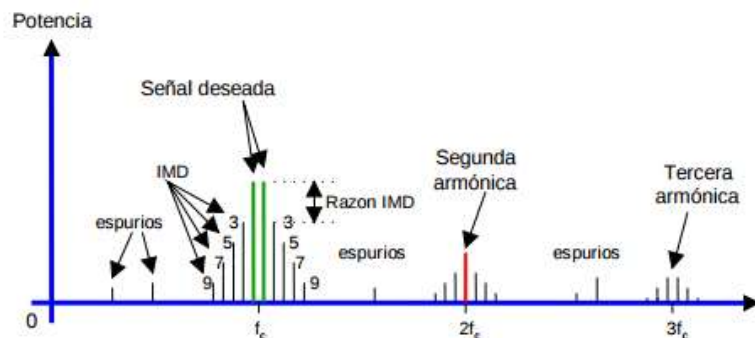


Figura 22: Productos de distorsión de un amplificador de potencia en RF. [26]



## 4.5 Conectores

Los conectores vienen en una gran variedad de formas y tamaños, dependiendo de los cables que se utilicen. Además de los modelos estándares, los conectores pueden tener polaridad inversa (géneros intercambiados) o roscas invertidas. [27]



Figura 23: Diversos tipos de conectores para RF. [27]

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos trata de evitar que el usuario final pueda cambiar la antena en los equipos de telecomunicaciones, para minimizar la posibilidad de interferencia con otros usuarios. [27]

### Conector N

El Tipo N ofreció el primer rendimiento real de microondas, N fue desarrollado para satisfacer la necesidad de un conector de RF de tamaño mediano resistente a la intemperie y duradero con un rendimiento consistente. El conector tiene una impedancia de  $50 \Omega$ . [28]

Hay dos familias de conectores tipo N: Estándar N (cable coaxial) y Helicoidal N (Cable corrugado). Las aplicaciones principales son la terminación del cable coaxial de tamaño medio a miniatura: RG-8 y RG-225; RG-58 y RG-141. [28]



Figura 24: Detalle de un conector tipo N. [14]

### Conector SMA

Son conectores de RF coaxiales de semi-precisión desarrollados como una interfaz de conector mínima para cable coaxial con un mecanismo de acoplamiento de tipo tornillo o rosca. El conector tiene una impedancia de  $50 \Omega$  y está diseñado para trabajar en un rango de frecuencias que puede llegar a los 30 GHz, aunque normalmente dejan de emplearse a partir de los 18 GHz, es decir, pueden operar en la banda de las microondas, pero se usa con mayor frecuencia para sistemas de antena Wifi y dongles de radio definidos por software USB. [14]

Las aplicaciones principales son la terminación del cable coaxial de tamaño medio a miniatura: RG-58 y RG-141. [14]



Figura 25: Detalles de varios conector SMA. [14]

### Adaptadores y latiguillos

Los adaptadores (transiciones) y pigtaills se usan para interconectar diferentes clases de cables y dispositivos. [27]



Figura 26: Diversos tipos de adaptadores y latiguillos para RF. [27]

Un pigtail es un cable flexible que se usa para reducir el esfuerzo mecánico que un cable rígido impondría en un conector pequeño, se usan para efectuar la transición entre diferentes tipos de conectores con diferentes tamaños y roscas. [27]

### 4.6 Cable coaxial

El cable coaxial básico consiste en un conductor central rodeado por un conductor externo concéntrico, a distancia uniforme del centro. A frecuencias de trabajo relativamente altas, el conductor externo coaxial proporciona un excelente blindaje contra la interferencia externa. Sin embargo, no es económico usar un blindaje con frecuencias relativamente bajas. También, casi siempre el conductor externo de un cable coaxial se conecta a tierra, y eso limita su empleo a aplicaciones desbalanceadas o asimétricas. [8]

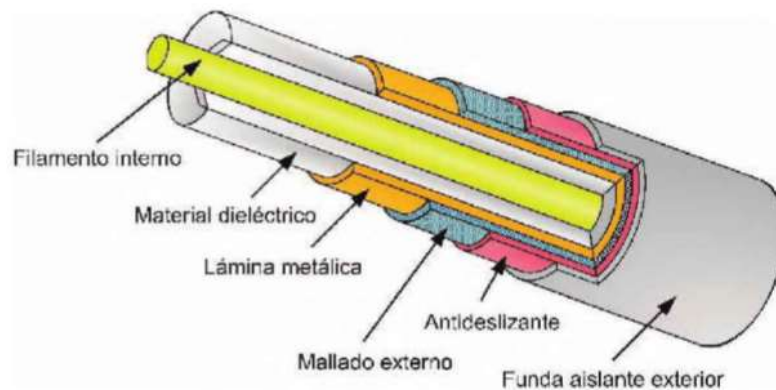


Figura 27: Estructura de un cable coaxial. [14]

## 4.7 Radiodifusión sonora en el Ecuador

Considerada como la tecnología que posibilita la transmisión de señales mediante la modulación de ondas electromagnéticas, en sus inicios no tuvo mayor interés ni aplicaciones, pero al poco tiempo se fortaleció y hoy en día ha logrado expandirse en casi todos los países del mundo, es considerado como el medio de comunicación más versátil, democrática y universal. La ventaja más grande que tiene la radiodifusión es el bajo costo que presenta, el fácil acceso al él y, la capacidad de comunicación entre los oyentes en tiempo real. [29] [30]

Una estación de radiodifusión es un transmisor con su antena e instalaciones necesarias para asegurar un servicio de radiodifusión en un área de operación autorizada. [29] [30]

Las estaciones de radiodifusión se clasifican en:

- ✓ Servicio público
- ✓ Comercial privada
- ✓ Comunitarias

Por la programación que transmiten son:

- ✓ Estaciones matrices
- ✓ Estaciones repetidoras

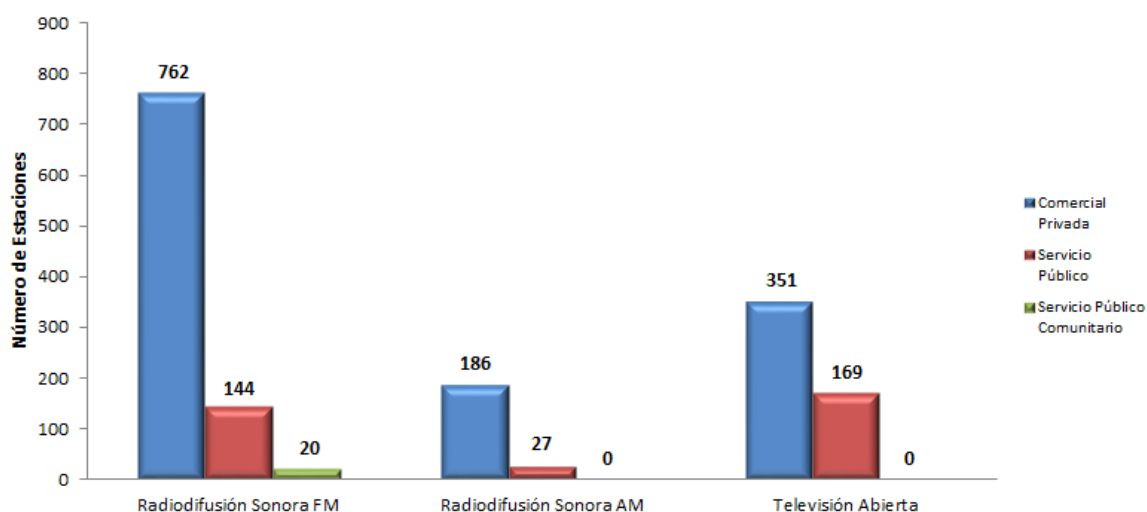


Figura 28: Clasificación de las estaciones de radiodifusión. [31]

### Estación matriz

Aquella que transmite programación generada en su propio estudio y que dispone de tres instalaciones básicas.

- ✓ Estudio
- ✓ Sistema de transmisión
- ✓ Enlace estudio-transmisor

### Estación repetidora

Aquella que recepta la totalidad de la programación de la estación matriz y la transmite simultáneamente para ser recibida por el público en general. [29]

### Sistema de radiodifusión

Conjunto de una estación matriz y sus repetidoras que emiten simultáneamente la misma programación, incluidas las frecuencias auxiliares de radiodifusión. [29]

### Potencia y cobertura

El rango de potencia en el que puedan operar las estaciones de Radiodifusión será determinado por el Consejo sobre la base de estudios técnicos de interferencia y calidad de servicio en el área de cobertura de la estación que para el efecto realizará la Superintendencia de Telecomunicaciones. [29]

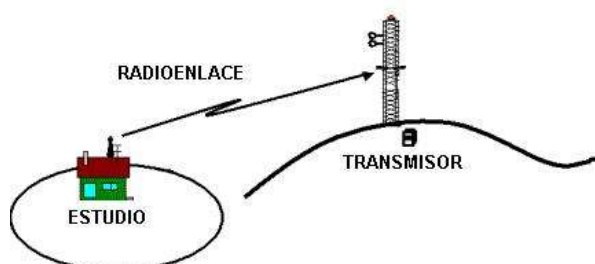


Figura 29: Diagrama de una estación de radiodifusión. [29]

## 4.8 La radiodifusión en frecuencia modulada

El servicio de radiodifusión en frecuencia modulada es un sistema de transmisión de radio en el que la onda portadora se modula de forma que su frecuencia varíe según la señal de audio transmitida. La modulación en frecuencia es de mayor calidad que la modulación en amplitud porque la información está contenida en la variación de la frecuencia y esta característica es más inmune al ruido y a las interferencias; esto por lo general tiende a variar la amplitud de la señal y no la frecuencia de la misma. [30] [32]

A diferencia de la AM, la modulación en frecuencia crea un conjunto de complejas bandas laterales cuya profundidad (extensión) dependerá de la amplitud de la onda moduladora. Como consecuencia del incremento de las bandas laterales, el ancho del canal de la FM será más grande que el tradicional de la onda media, siendo también mayor el ancho de banda de sintonización de los aparatos receptores. [30] [32]

La potencia máxima de salida de un transmisor FM está en función de la ganancia máxima de la antena (máxima radiación respecto a la antena isotrópica [dB]); donde la potencia isotrópica radiada equivalente máxima no debe exceder de 16 [dB]. [30] [32]

Potencia del Transmisor [KW]	Ganancia Máxima de la Antena [dB]
16	0
8	3
4	6
2	9
1	12
0,5	15
0,25	18

Tabla 2: Valores de potencia a la salida de un transmisor FM. [9]

#### **4.8.1 Ventajas de FM sobre AM**

Entre las ventajas que presenta la frecuencia modulada respecto a la modulación de amplitud AM se puede señalar que al sistema FM casi no le afectan las interferencias y algunas perturbaciones eléctricas como descargas estáticas, las originadas por los sistemas de encendido de los automóviles o las tormentas eléctricas, las cuales sí afectan en gran medida a las señales de radio de amplitud modulada puesto que se captan como ruido en los receptores AM. [30] [33]

Las emisoras de FM pueden trabajar en bandas de frecuencias muy altas, en las que la amplitud modulada se vería seriamente afectada por las interferencias; el alcance en estas bandas está limitado para que puedan existir emisoras que trabajen en la misma frecuencia situadas a unos cientos de kilómetros sin que se interfieran entre ellas. [30] [33]

Las radios FM requieren potencias menores que las de AM, dado que si su propagación es de carácter local o regional no es necesario un alto índice de potencia, pero si se quiere que una emisora FM sea de carácter nacional, por lo que se requieren de repetidoras en las zonas donde existen obstáculos, que podrían ser las cordilleras u otros accidentes geográficos. [30] [33]

Las estaciones o emisoras FM comerciales poseen índices de audiencia más elevados que las emisoras AM. [30]

#### **4.8.2 Limitaciones en radiodifusión FM**

Su pequeña cobertura convierte a la frecuencia modulada en un servicio de radio fundamentalmente local, donde el empleo de repetidores puede incrementar su cobertura. La escasa longitud de onda de esta banda de frecuencia hace que las antenas sean de pequeñas dimensiones y consecuentemente tengan una polarización horizontal. [30]

Con la radiodifusión FM se tiene un uso ineficiente del espectro electromagnético, cuando el receptor se traslada más de unas decenas de kilómetros hay que volver a sintonizar la emisora generalmente en una nueva banda de frecuencia. [30]

La propagación de la señal en la banda de VHF se caracteriza por su direccionalidad y su limitada cobertura donde las ondas directas se pierden en el espacio cuando confluyen con la línea del horizonte; esta direccionalidad hace que las señales de FM puedan ser absorbidas o apagadas por los obstáculos que encuentra en su trayectoria. [30]

#### **4.8.3 Radiodifusión FM en el Ecuador**

La banda FM, en el Ecuador, está distribuida en 100 canales con ancho de banda cada uno de 200 kHz. Para la asignación de canales consecutivos (adyacentes), destinados a servir a una misma zona geográfica, deberá observarse una separación mínima de 400 KHz entre cada estación de la zona. [29] [31]

La potencia mínima de las estaciones de frecuencia modulada, en el Ecuador, será, en general, 250 W, con excepción de las que se encuentren en las ciudades donde su población sobrepase los doscientos mil habitantes. En estas será la potencia de 500W. Las estaciones de baja frecuencia son usadas para cubrir cabeceras cantorales o sectores de baja población, cuya frecuencia pueda ser reutilizada por diferente concesionario, en otro cantón de la misma provincia o zona geográfica. [29] [31]

Tienen un máximo de potencia de 250 W, su transmisor se ubica en áreas periféricas de la población que irá a cubrir y el sistema radiante se encuentra a una altura máxima de 36 m sobre la altura promedio de la superficie de la población a ser servida. [29] [31]

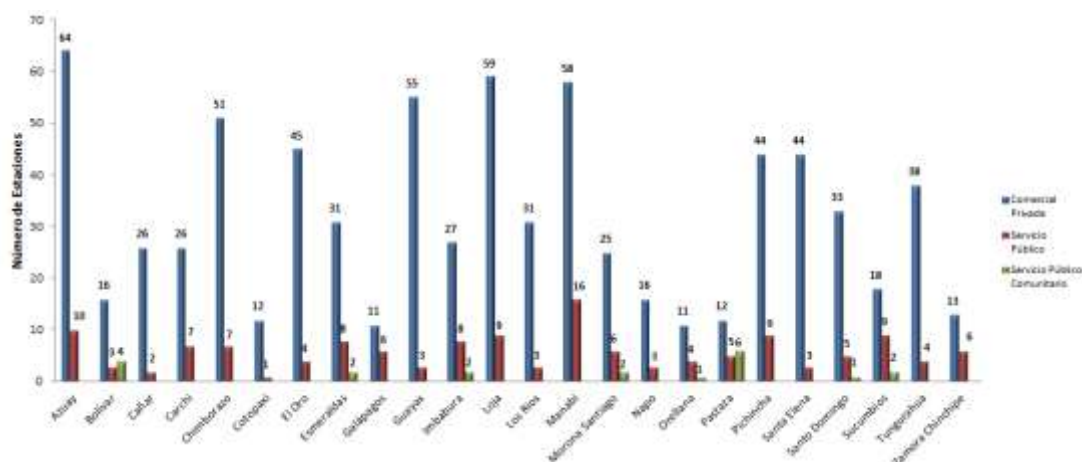


Figura 30: Número de estaciones concesionadas a nivel nacional y por tipo. [31]

#### 4.8.4 Zonas geográficas establecidas para radiodifusión FM

La Norma Técnica Reglamentaria para Radiodifusión en Frecuencia Modulada Analógica, publicada en Registro Oficial N° 074 del 10 de mayo del 2000 y sus modificaciones publicada en el Registro Oficial N° 103 de 13 de junio de 2003 en su anexo B, determina la Cobertura de las Zonas Geográficas para Radiodifusión FM en el Ecuador: [29]



Figura 31: Zona geográficas establecidas para radiodifusión sonora FM. [29]

<b>Zonas Geográficas</b>	<b>Cobertura de las Zonas Geográficas (Incluye Grupos de Frecuencias)</b>
FA001	Azuay Cañar. Grupos de frecuencia 1, 3 y 5
FB001	Provincia de Bolívar excepto las estribaciones occidentales del ramal occidental de, la Cordillera de los Andes. Grupo de frecuencia 6
FC001	Provincia del Carchi. Grupos de frecuencias 1 y 3
FD001	Provincia de Orellana. Grupo de frecuencia 1
FE001	Provincia de Esmeraldas, excepto Rosa Zárate y La Concordia que P1. Grupos de frecuencias 4 y 6 pertenecen a la zona P, subgrupo
FG001	Provincia del Guayas, Sub-zona 1 (independiente de la Sub-zona 2), excepto las ciudades de El Empalme, Balzar, Colimes, Palestina, Santa Lucía, Pedro Carbo, Isidro Ayora, Lomas de Sargentillo, Daule, El Salitre, Alfredo Baquerizo Moreno, Simón Bolívar, Milagro, Naranjito, Maridueña, El Triunfo, Naranjal, Balao y Bucay. Grupos de frecuencias 1, 3 y 5
FG002	Provincia del Guayas, subzona 2, (independiente de la subzona 1), comprende las ciudades de la Península de Santa Elena y General Villamil. Grupos de Frecuencias 1, 3 y 5
FJ001	Provincia de Imbabura. Grupos de frecuencias 2 y 6
FL001	Provincia de Loja. Grupos de frecuencias 2 y 5
FM001	Provincia de Manabí, excepto los cantones El Carmen y Pichincha. Grupos de frecuencias 1, 3 y 5
FN001	Provincia de Napo. Grupo de frecuencia 1
FO001	Provincia de El Oro, e incluye Milagro, Naranjito, Bucay, Maridueña, El Triunfo, Naranjal y Balao de la provincia, del Guayas, La Troncal y las estribaciones del ramal occidental de la Cordillera de los Andes de las provincias de Chimborazo, Cañar y Azuay. Grupos de frecuencias 2, 4 y 6
FR001	Provincia de Los Ríos, e incluye El Empalme, Balzar, Colimes, Palestina, Santa Lucía, Pedro Carbo, Isidro Ayora, Lomas de Sargentillo, Daule, El Salitre, Alfredo Baquerizo Moreno y Simón Bolívar de la provincia del Guayas, cantón Pichincha de la provincia de Manabí y las estribaciones occidentales del ramal occidental de la Cordillera de los Andes de las provincias de Cotopaxi y Bolívar. Grupos de frecuencias 2, 4 y 6
FP001	Provincia de Pichincha, subzona 1 (independiente de la subzona 2). Grupos de frecuencias 1, 3 y 5
FP002	Provincia de Pichincha, subzona 2 (independiente de la subzona 1), comprende: Santo Domingo de los Colorados e incluye los cantones aledaños: El Carmen (de la provincia de Manabí), Rosa Zárate y la Concordia (de la provincia de Esmeraldas). Grupos de frecuencias 1, 3 y 5
FS001	Provincia de Morona Santiago. Grupo de frecuencia 1
FT001	Provincias de Cotopaxi y Tungurahua, excepto las estribaciones occidentales del ramal occidental de la Cordillera de los Andes de la provincia de Cotopaxi y el cantón Baños de la provincia de Tungurahua. Grupos de frecuencias 1, 3 y 5
FH001	Provincia de Chimborazo, excepto las estribaciones occidentales del ramal occidental de la Cordillera de los Andes de esta provincia. Grupos de frecuencias 1, 3 y 5
FU001	Provincia de Sucumbíos. Grupos de frecuencias 1 y 3
FX001	Provincia de Pastaza, incluido Baños (provincia de Tungurahua). Grupo de frecuencia 6
FY001	Provincia de Galápagos. Grupo de frecuencia 4

Tabla 3: Zona geográficas para la concesión de estaciones en frecuencia modulada. [29]

#### 4.8.5 Cobertura de la señal FM en el Ecuador

La gran cantidad de radiodifusores y concesionarios en FM ha producido que la banda se encuentre saturada en las principales ciudades en el país como son Quito y Guayaquil. En la Figura 32 se observa las ciudades que cuentan con por lo menos una estación FM. [30] [31]

Como se puede observar, la radiodifusión FM es utilizada por las ciudades principales de cada una de las provincias. Los cantones de menor tamaño poblacional y geográfico no utilizan el servicio FM debido a la menor cobertura que brinda, en comparación con las señales AM. [30] [31]



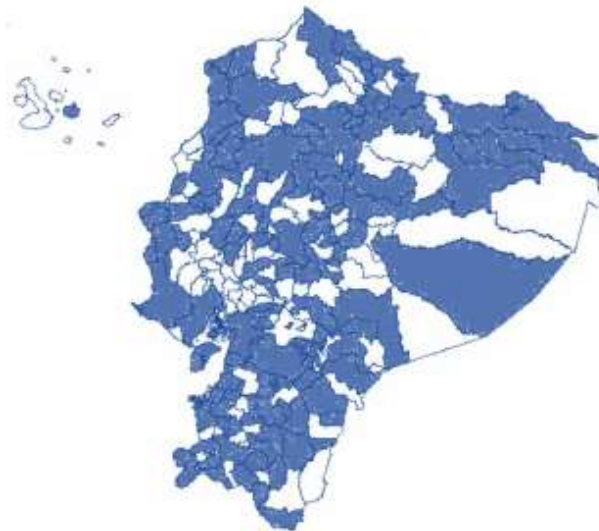


Figura 32: Cobertura de radiodifusión FM en el Ecuador. [31]

#### 4.8.6 Programación de la radio FM en el Ecuador

La tercera parte de la radio emite programas específicos para públicos divididos, por ejemplo, el 37% de las emisoras FM tratan de entrar a una audiencia en concreto. La tabla 4 presentada muestra los tipos de radio en el Ecuador dados por la programación que emiten, diversidad de conceptos, funciones y utilización del medio radiofónico del país. [30] [31]

Tipo de Radio	Descripción
<b>Radio Comercial</b>	Financiada por cuñas comerciales con fines de lucro. Puede ser una emisora pagada por una institución estatal, religiosa o particular que vende sus programas y espacios. Busca la masificación de audiencia.
<b>Radio Cultural</b>	Originalmente es una radio no comercial. Pero con la aparición de las categorías ha vuelto a caracterizar un radio para la élite o para pequeños grupos, distinto de la cultura popular.
<b>Radio Pública</b>	Los canales no comerciales tienen menos del 10% de emisiones y de la audiencia. Pero todos los países de América Latina cuenta con al menos una cadena pública.
<b>Radio Educativa</b>	Programas pedagógicos sobre temas como salud, técnicas cultivas, historia, etc. Ahora incursiona en la educación no formal abierta.
<b>Radio Popular</b>	El pueblo mismo es el protagonista. Énfasis en el cambio social y participación de los oyentes y así ganar audiencia.
<b>Radio Campesina</b>	Trabaja en áreas rurales y toca intereses y problemas específicos del pueblo campesino.
<b>Radio Indígena</b>	Habla en un idioma nativo, respaldada por un marco de referencias y una historia común.
<b>Radio Escuelas</b>	Difunden programas dedicados a la educación de adultos, alfabetización, desarrollo y educación permanente de los sectores marginados.
<b>Radio Comunitaria</b>	No es lucrativa, e intenta diversificar su financiación para evitar la dependencia.

Tabla 4: Resumen de tipos de radios en el Ecuador. [31]



## 4.9 Radio definida por software (RDS)

El término 'Software Radio' fue acuñado por Joseph Mitola III, en su tesis doctoral en el año 1999, para referirse a un tipo de equipos de radio reprogramables o reconfigurables, en donde un mismo hardware es capaz de desarrollar distintas y variadas funciones, en diferentes instantes de tiempo, realizando ciertos cambios o modificaciones en su configuración de software. [34]

RDS es una tecnología de comunicación de radio basada en el desarrollo de distintas funciones a nivel de software en lugar de su implementación en hardware, un equipo RDS es capaz de ser reprogramado y reconfigurado con el fin de operar con diferentes formas de onda y protocolos. La tecnología RDS proporciona una solución eficiente y de bajo costo ante implementaciones que requieran construir o desarrollar dispositivos inalámbricos multimodo, multiportadora, cultivando y multifuncionales que puedan ser actualizados o mejorados a través de optimizaciones de software. [35]

### 4.9.1 Definición y aspectos fundamentales del RDS

Los desarrollos en radios inteligentes y adaptativos convergen hoy a lo que se denomina Radio Definido por Software, y según "SDR Forum Special Interest Group for Cognitive Radio", el cual se centra en el desarrollo de aplicaciones, lo define como: "Una radio (sistema) autónoma, adaptativa y multidimensional, que aprende de sus experiencias a razonar, planificar y decidir acciones futuras para satisfacer las necesidades de los usuarios". [36]

La tecnología RDS permite entre otras cosas mejorar la interoperabilidad entre diferentes servicios. Está compuesta de software y hardware, pudiendo ser reconfigurada dinámicamente a nivel de software para habilitar comunicaciones entre una amplia variedad de normas de comunicaciones, protocolos y radio enlaces. RDS permite crear dispositivos inalámbricos y equipos de red multibanda y multifuncionales, que pueden ser mejorados a través de actualizaciones de software y reconfiguraciones de hardware. [37]

### 4.9.2 Arquitectura de hardware RDS

La arquitectura de transmisores basados en software consiste en un subsistema digital y un subsistema analógico. Las funciones analógicas son restringidas a aquellas que no pueden ser mejoradas digitalmente, que son: antena, filtrado RF, combinación RF, pre-amplificación en recepción, transmisión de potencia de amplificación y generación de frecuencia de referencia [38].

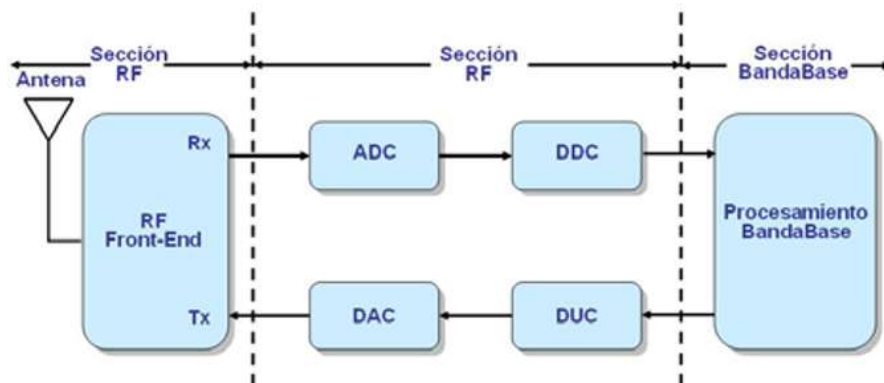


Figura 33: Diagrama de bloques funcionales de RDS.[38]

La parte analógica es la encargada de realizar todas aquellas operaciones como: alimentación a la antena, filtrado y combinación en RF, preamplificación, amplificación, y generación de la frecuencia de referencia. La idea de la arquitectura es que las etapas de conversión analógico/digital estén lo más cercanas posible a la antena, de hecho, la separación de portadoras y la conversión de frecuencias up/down son desempeñadas por los recursos de procesamiento digital, al igual que la codificación de canal y las modulaciones [39].

### **Antena**

La transmisión de la información se realiza mediante ondas electromagnéticas que son transmitidas al espacio, el aire y otros medios no conductores. El elemento que genera estas ondas se denomina antena, puede considerarse como un transductor y un adaptador de impedancia al medio de transmisión. [37] [40]

### **Front end de RF**

Este bloque cuenta con dispositivos electrónicos de estado sólido que adaptan el nivel de las señales de entrada para que sea adecuado en las siguientes etapas del RDS. En el transmisor, se produce una amplificación de la señal entregada por las etapas de procesamiento hasta el nivel de potencia suficiente para su transmisión por el medio físico. [37] [40]

### **Bloque de frecuencia intermedia (FI)**

En este bloque se realiza la selectividad y ganancia del receptor, se procesa la señal para la transmisión a una frecuencia inferior para luego convertirla al valor final y amplificarla hasta el nivel de aplicación a la antena. [37] [40]

### **Oscilador local**

Genera las frecuencias apropiadas para convertir la frecuencia de RF en la frecuencia intermedia FI, mediante una mezcla no lineal que produce frecuencias imagen. Se selecciona la frecuencia deseada mediante filtros analógicos para su amplificación en los amplificadores de frecuencia intermedia correspondientes. [37] [40]

### **AD/DA**

Al realizar una transmisión por el medio físico. Se realiza mediante señales analógicas, pero el procesamiento en el transceiver es de índole digital, se hace imprescindible realizar una conversión analógica/digital en el receptor y digital/analógica en el transmisor. [37] [40]. El conversor analógico/digital (ADC) es un dispositivo que es capaz de ofrecer un valor binario de salida a partir de una entrada analógica de voltaje. El dispositivo que realiza el proceso contrario es el conversor digital/analógico (DAC). Esta definición involucra los siguientes procesos:

- Muestreo: consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de la señal analógica. La velocidad en que se toman las muestras se llama frecuencia de muestreo.
- Cuantificación: mide el nivel de voltaje de cada muestra y le asigna un valor numérico de salida. Cuando no coincide el valor de salida con el de entrada, se dice que existe ruido de cuantificación.
- Codificación: la codificación consiste en traducir los valores obtenidos durante la cuantificación en código binario.
- DDC: El conversor digital down converter se encarga de convertir una señal digital de FI en una señal de banda base.

El DDC se compone de un mezclador digital, un oscilador local digital y un filtro digital pasabajos. El mezclador y el oscilador trasladan las muestras digitales de FI en banda base. El filtro limita el ancho de banda de la señal realizando la función de decimación de muestras a un rango menor de muestreo. [37] [40]

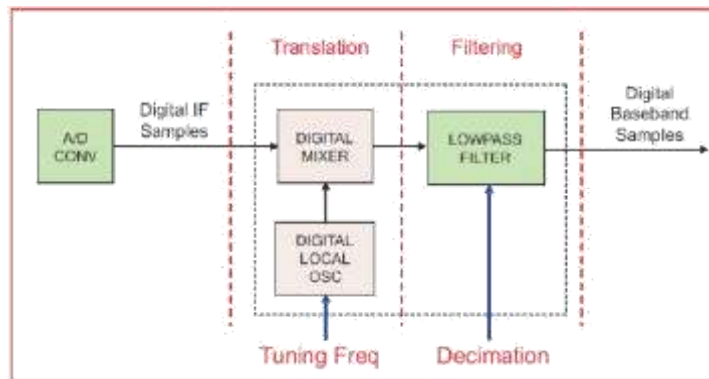


Figura 34: Digital Down Converter. [40]

DUC es un conversor que traslada la señal de banda base en frecuencia digital intermedia IF. Esta señal es transformada en FI analógica por el convertidor digital analógico (DAC) y esta señal es a su vez convertida en señal RF por el transmisor. [37] [40]

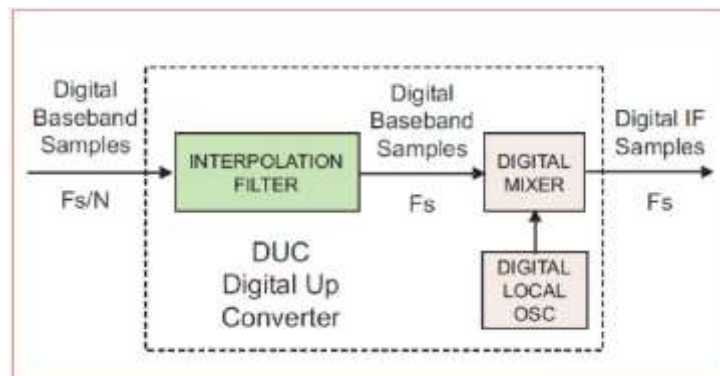


Figura 35: Digital Up Converter. [40]

El mezclador y el oscilador local trasladan las muestras de banda base a frecuencia FI. El filtro de interpolación resuelve la diferencia entre la frecuencia de muestreo del oscilador ( $F_s$ ) y la frecuencia de entrada de la señal en banda base ( $F_s/N$ ). [30] [33]

### Modulador/Demodulador

Una información útil para que pueda transmitirse y propagarse mediante la onda electromagnética, es necesario imprimir de algún modo esta información sobre una señal portadora. Esto se logra modificando alguno de los parámetros que la definen de acuerdo con el valor de la información a transmitir. Este proceso se denomina modulación y el proceso inverso para recuperar la información es la demodulación, es por eso que algunos llaman a este bloque modem. [37] [40]

### 4.9.3 Plataformas de hardware para RDS

La capa de hardware presente en un elemento de RDS es la que otorga toda la flexibilidad y configurabilidad al sistema. Por lo general el hardware está constituido por dispositivos DSP (Procesamiento Digital de Señales), pero cada vez es más común encontrar implementaciones que combinan DSP con FPGA (Matriz de Puertas Programable) y ASIC (Circuito integrado de aplicación específica) para el desarrollo de las diversas funciones que puede desempeñar un sistema RDS. Cada tipo de dispositivo ofrece ventajas y desventajas significativas en su elección como plataforma de hardware de implementación. [39]

La configuración y modificación del comportamiento del hardware presente en el subsistema digital se realiza a través de la capa de software. Este software se desarrolla utilizando distintas metodologías y herramientas de programación además de sistemas de simulación con los cuales se ejecutan pruebas y validaciones a los componentes desarrollados. [39]

Para realizar el procesamiento de las señales basándose en software existen diversas alternativas diferenciadas principalmente por dos parámetros como consumo de potencia y costo. Aunque el tamaño de los componentes también puede ser una variable importante a considerar en ciertas aplicaciones. [39] Kensington presenta algunos de los factores más determinantes en el costo de las alternativas hardware para RDS:

- El costo directo de los dispositivos en sí mismos.
- El costo asociado a los componentes adicionales y complementarios. Costos no recurrentes (asociados más con soluciones basadas en ASIC).
- Inversiones en herramientas y entrenamiento para el desarrollo.
- Costos relacionados con consumo de potencia, refrigeración y tecnologías de alimentación.
- El ciclo de vida del producto RDS y sus diferencias con el ciclo de vida de las aplicaciones/servicios sobre él implementadas.
- Grado de flexibilidad requerido.

De esta manera, los actuales requerimientos de flexibilidad en el procesamiento multimodo y multibanda imponen serios retos a los esquemas de implementación física de RDS, y las cuatro alternativas para ello se resumen en la Tabla 5. [39]

Características	Consumo de Potencia	Tamaño	Costo	Campo Actualizable	Evolución del Chip	Herramientas
DSP de alta velocidad	Muy Alta	Moderado	Moderado	Alto	Fácil	Muchas
Múltiples ASIC	Muy Alta	Grande	Alto	Ninguno	Difícil	Muchas
Hardware Parametrizado	Alta	Bajo	Moderado	Medio	Moderado	Algunas
Lógica Reconfigurable (FPGA)	Moderada	Bajo	Bajo	Alto	Fácil	Algunas

Tabla 5: Comparación de alternativas para hardware RDS. [39]

## HackRF

Es un proyecto de hardware abierto para construir periféricos RDS, el cual puede operar en el rango de frecuencias desde 30MHz hasta 6GHz, pudiendo ser usado para transmitir o recibir señales de radio. [41]

Se desempeña en modo semi-dúplex (es decir se puede transmitir o recibir, pero no puede hacer ambas cosas en el mismo instante de tiempo). El máximo ancho de banda del HackRF es 20MHz, alrededor de 10 veces el ancho de banda de sintonizadores de TV que son populares para RDS. [41]

Este dispositivo puede ser alimentado a través de la interface USB y es lo suficientemente pequeño para llevarlo junto con el computador personal. Este equipo es compatible en las plataformas Linux, OSX y Windows. [40] [41]



Figura 36: Dispositivo HackRF – Primera versión beta. [41]

## USRP ETTUS N210

Ettus Research es un proveedor innovador de RDS, incluyendo la familia original de productos USRP. La compañía fue fundada en el 2004 y se encuentra ubicada en Mountain View, California. A partir del 2010 Ettus Research es en su totalidad propiedad de National Instruments. [40] [42]

El hardware USRP N210 permite diseñar e implementar sistemas de radio de software flexible siendo ideal para aplicaciones que requieren alto rendimiento en RF y gran ancho de banda. Estas aplicaciones incluyen prototipos de capa física, acceso dinámico de espectro y radio cognitiva, monitoreo del espectro, grabación, reproducción e incluso despliegue del dispositivo conectado a la red. [40] [42]



Figura 37: Dispositivo de hardware Ettus Research USRP N210. [42]

El USRP hardware driver es el controlador oficial para todos los productos de Ettus Research y soporta los sistemas operativos Linux, Mac OSX y Windows. [42]

Algunas de sus principales características son las siguientes:

- Se puede usar con GNU Radio, LabVIEW y Simulink.
- Dual 100MS/s, 14-bit ADC.
- Interfaz Gigabit Ethernet para conectar hacia la PC.
- DDC/DUC con 25 MHz de resolución

### USRP NI 2920

Los transceptores de radio definidos por software NI USRP-292x y 293x están diseñados para la enseñanza e investigación en comunicaciones inalámbricas, son programable con el software LabVIEW, el USRP 2920 es una plataforma de RF asequible y fácil de usar para aplicaciones de prototipo rápido como grabación y reproducción, comunicación de capa física, monitorización del espectro y más. [40] [43]

Dispone de la capacidad de transmitir y recibir señales RF a través de una amplia gama de frecuencias con hasta 20 MHz de ancho de banda en tiempo real y soporte MIMO plug-and-play, el NI USRP permite una amplia gama de aplicaciones de RF / comunicaciones que cubren estándares comunes tales como radiodifusión, TV digital, GSM Celular, GPS Y 802.11 (Wifi). [40] [43]

LabVIEW aporta una mayor productividad con un enfoque de programación gráfica intuitivo y la compatibilidad de secuencias de comandos m-file permitiendo el desarrollo de algoritmos para capas. [40] [43]



Figura 38: Vista frontal dispositivo de hardware NI USRP N2920. [43]

## 4.9.4 Plataformas de software para RDS

### GNU radio

GNU Radio es un software de desarrollo de herramientas de código libre y abierto que proporciona bloques de procesamiento de señales para implementar software radio. Este puede ser usado con hardware de RF externo de bajo costo para crear radios definidos mediante software o sin hardware utilizando el entorno de simulación. Es ampliamente utilizado en entornos de aficionados, académicos y comerciales para contribuir tanto en la investigación de comunicaciones inalámbricas como en sistemas de radio del mundo real. [40] [44]

Las aplicaciones de GNU Radio son escritas a principio utilizando el lenguaje de programación Python, mientras que el suministro de herramientas críticas de procesamiento de señales que requieren alto rendimiento son implementados en C++ usando extensiones de procesamiento de punto flotante, cuando este está disponible. Así, el desarrollador es capaz de implementar, de manera simple, sistemas de radio de alto rendimiento funcionando a tiempo real aprovechando el ambiente de desarrollo de aplicaciones de manera inmediata. [40] [45]



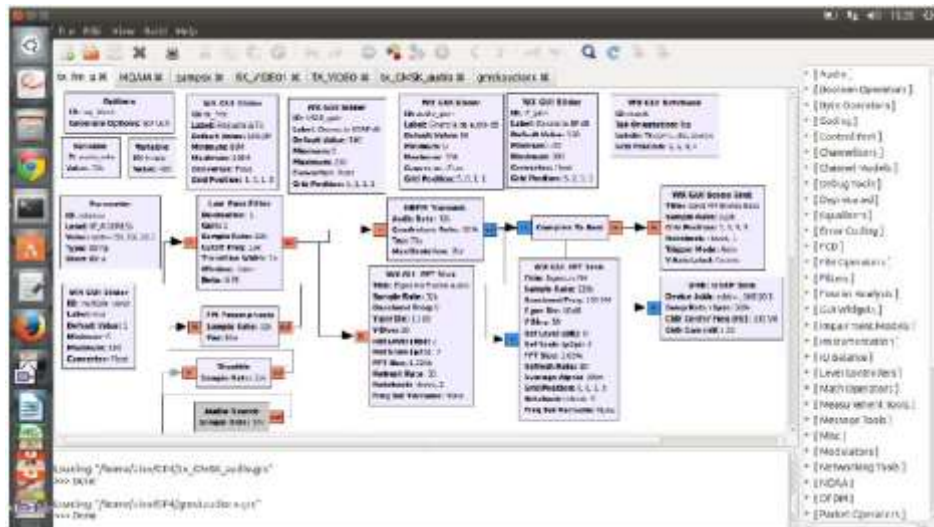


Figura 39: Entorno de programación del Software GNU Radio

Aunque no es una herramienta principalmente de simulación, GNU Radio complementa el desarrollo de algoritmos de procesamiento de señales a partir de datos previamente grabados o generados, evitando la necesidad de hardware de RF. [40] [45]

### Software de desarrollo de sistemas NI LabVIEW

El entorno de programación de LabVIEW simplifica la integración de hardware para aplicaciones de ingeniería, así usted tiene una manera consistente de adquirir datos desde hardware de NI y de terceros. LabVIEW reduce la complejidad de la programación, así usted puede enfocarse en su problema de ingeniería. LabVIEW le permite visualizar resultados inmediatamente con la creación integrada de interfaces de usuario de clic-y-arrastre y visualizadores de datos integrados. Para convertir sus datos adquiridos en resultados del negocio reales, usted puede desarrollar algoritmos para análisis de datos y control avanzado con IP de matemáticas y procesamiento de señales o reutilizar sus propias bibliotecas desde una variedad de herramientas. Para garantizar la compatibilidad con otras herramientas de ingeniería, LabVIEW puede interactuar o reutilizar bibliotecas de otros software y lenguajes de fuente abierta. [46]

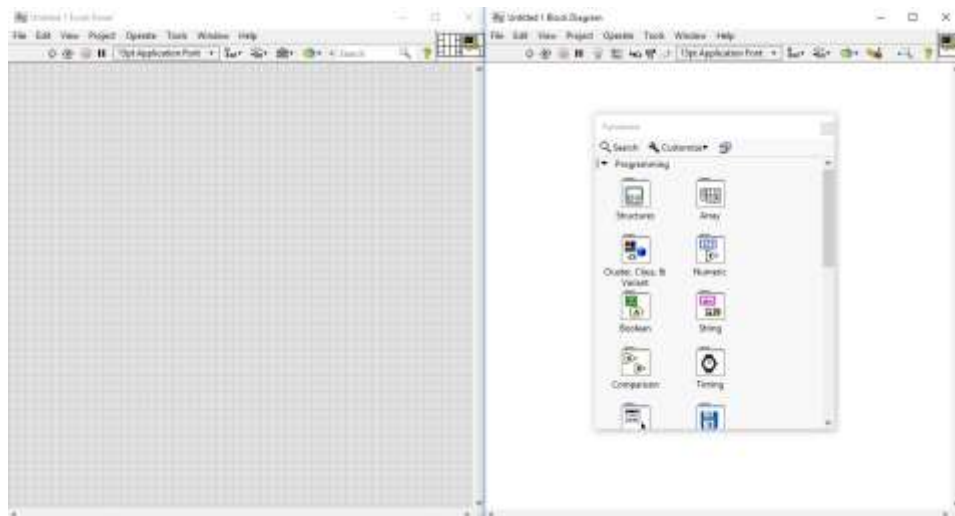


Figura 40: Entorno de programación del Software Labview

## **5 Marco Metodológico**

### **5.1 Modalidad de la investigación**

Debido a que el presente trabajo representa una propuesta viable orientada a solucionar un problema específico, se toma como modalidad de investigación la de Proyecto factible [47]. Determinándose la sociedad civil como objeto del beneficio adquirido en el desarrollo de este trabajo.

### **5.2 Tipo de investigación**

De acuerdo a la finalidad, esta investigación se define como aplicada puesto que tiene como propósito la solución de problemas, de acuerdo a su naturaleza el presente trabajo se enmarca como una investigación experimental [48].

### **5.3 Procedimientos**

#### **5.3.1 Diagnóstico de la situación actual**

Según un artículo publicado por diario EL COMERCIO, en el año 2015, las ambulancias aumentan su tiempo de traslado debido al irrespeto y la congestión vehicular. Mientras lo ideal sería que la ambulancia tarde 5 minutos en llegar a su destino, en horas pico este tiempo puede incrementarse hasta el triple [49]. En un estudio generado durante la implementación del proyecto “Radio Ambulancia”, se evidenció que, durante la hora pico matutina (8:00) en una avenida importante de la ciudad de Guayaquil, alrededor de un 56.37% de los vehículos circulaba con los vidrios elevados, cifra que se incrementa a 59.25 % en horas de la tarde (18:00). La misma investigación arrojó también que, de entre 500 personas a las que se les preguntó qué escuchaban en sus vehículos en ese momento, 345 personas se encontraban sintonizando la radio FM, es decir un 69% [6].

Los sistemas de alerta utilizados actualmente por los vehículos de emergencia incluyen sirenas, luces giratorias e incluso altoparlantes mediante los cuales el conductor de estos vehículos da aviso a los demás conductores de su presencia. En ocasiones los agentes de tránsito prestan su servicio ayudando a descongestionar el tráfico para que circule el vehículo de emergencia, sin embargo, esta situación no es dable en todo momento debido a que no siempre se cuenta con la presencia de estos agentes en el momento indicado.

#### **5.3.2 Alternativas de solución**

El problema del aumento del tiempo que tardan los vehículos de emergencia en llegar a su destino está ligado a aspectos de carácter logístico y socio-culturales, la falta de respeto por las leyes de tránsito sumada a una administración del tráfico muchas veces ineficiente nos indican los puntos sobre los cuales el problema puede ser atacado, pudiéndose entonces generalizar las alternativas de solución a dos propuestas:

a) Mejorar con políticas públicas la gestión del tránsito urbano, y promover con la ciudadanía programas de familiarización y reconocimiento de las leyes de tránsito para que exista mejor control en bloques de tráfico grandes y facilitar el despeje de las vías en casos de emergencia.

b) Desarrollar sistemas de alerta más eficientes que permitan a los ciudadanos anticipar la llegada del vehículo de emergencia y ceder oportunamente el paso, incluso en escenarios en los que el tráfico vehicular presenta mayor densidad.



## 5.4 Propuesta

La propuesta de este proyecto se ubica dentro del grupo de alternativas de solución que apuntan a mejorar los medios por los cuales los ciudadanos pueden ser alertados de la presencia de un vehículo de emergencia en estado operativo.

Se plantea diseñar e implementar un prototipo de sistema de alerta que, haciendo uso de la tecnología de Radio Definida por Software, permita transmitir señales audibles a los receptores FM instalados en vehículos particulares para que los conductores, al escuchar esta señal de alerta, puedan ceder el paso a los vehículos de emergencia ciudadana en operación.

Para diseñar el prototipo antes mencionado se ha tomado en cuenta el uso de herramientas de software libre y hardware de bajo costo que otorguen viabilidad al proyecto para su posible implementación a nivel general en los vehículos de emergencia ciudadana.

El prototipo propuesto contará con una interfaz gráfica amigable al usuario que permitirá que el sistema sea fácilmente operable una vez que se haya implementado en un vehículo de emergencia ciudadana. La plataforma de Sistema Operativo utilizada para el desarrollo de este sistema es Linux, en su distribución Ubuntu 17.04

En cuanto al software de control para el equipo USRP, se ha tomado como punto de partida un transmisor FM básico desarrollado por los autores en GNU Radio y se ha modificado su código fuente en Python 2.7 para incluir las siguientes características:

- Transmisión simultánea sobre tres portadoras adyacentes.
- Modos de transmisión manual y automático.
- Guardado de lista de estaciones para modo manual.
- Interfaz gráfica basada en PyQt.
- Mejoras en el consumo de recursos del sistema.

Además, el prototipo se diseña modularmente, de forma que pueda ser montado fácilmente sobre cualquier vehículo de emergencia ciudadana.

## **6 Desarrollo de la propuesta**

### **6.1 Hardware**

Un elemento clave en el desarrollo de esta propuesta es el hardware a utilizar puesto que, como se estableció en la propuesta de solución, uno de los objetivos de ésta es disminuir en lo posible sus costos de implementación. El elemento más importante de hardware es el hardware de RDS, dado que es este equipo el cual provee la plataforma necesaria para desplegar todo el sistema de transmisión del prototipo. Si bien es cierto se ofrecen varias alternativas en cuanto a hardware RDS, sin embargo, fue necesario determinar qué opción presenta la mejor relación calidad/precio/funcionalidad para la implementación del prototipo, manteniendo sus características de viabilidad y economía; es por esto que se escogió a dos plataformas como hardware RDS base de este prototipo: el USRP 2920 de National Instruments y la placa HackRF One de Great Scott Gadgets. El primero de ellos se presenta como la opción más idónea en cuanto a desarrollo de sistemas de telecomunicación experimentales, aunque su precio puede ser un poco elevado debido al amplio rango de funcionalidades que ofrece; el HackRF One sin embargo es una opción más económica, aunque se trata de una plataforma que aún se encuentra en fase de desarrollo por lo que sus futuras ediciones podrían ser un tanto distintas de la edición “One” con la cual se compatibiliza este prototipo. cabe destacar que a nivel comercial existen otras alternativas de hardware de costo menor a las que se podría tomar en cuenta más adelante conforme se vaya mejorando la compatibilidad y funcionalidad del sistema.

Otro elemento de hardware a considerar es el equipo de computación encargado de realizar el procesamiento necesario para el funcionamiento del sistema RDS. En este aspecto, se consideró utilizar plataformas de hardware libre en sistemas embebidos tales como Raspberry y Banana PI, sin embargo éstos no presentan las características de hardware necesarias para ejecutar las tareas de procesamiento antes mencionadas por lo cual se desestimó su uso, aunque es importante destacar que estos sistemas embebidos representarían una opción ideal para el despliegue de esta propuesta de solución siempre y cuando sean liberadas a nivel comercial versiones más potentes de estos elementos. Se decidió utilizar por tanto un mini computador Intel NUC cuyas características en cuanto a funcionalidad y costos se apegan a los criterios preestablecidos para el desarrollo de la propuesta.

Otros elementos de hardware tales como amplificador de potencia de transmisión, antena, y periféricos en general dependerán del alcance de implementación que se le dé al prototipo, de los esquemas de diseño de radio y, en el caso específico del amplificador de potencia, del alcance que se le quiera dar a la transmisión efectuada por el mismo.

A continuación, se muestran las principales características de los elementos de hardware que se escogió para implementar el prototipo.

### 6.1.1 USRP NI 2920 de National Instruments

Este dispositivo se presenta como la mejor opción para el estudio de sistemas de comunicación a nivel educativo y de desarrollo de prototipos experimentales de telecomunicaciones. Trabaja junto con la suite Labview de National Instruments, aunque también puede ser utilizado bajo plataformas de software libre como GNU Radio.

El USRP 2920 cuenta con una tarjeta de TX y una tarjeta de RX además de un puerto para conexión MIMO Plug and Play. La conexión entre el USRP y la PC se realiza a través de cable Ethernet (GbE).



Figura 41: USRP NI 2920 de National Instruments. [50]

En la siguiente tabla se muestran las principales características de transmisión de este equipo.

Especificaciones	
Modelo	USRP 2920
Rango de frecuencias	50 MHz a 2.2 GHz
Rango de Ganancias	0 dB a 31 dB
Máximo ancho de banda instantáneo en tiempo real	Muestreo de 16-bit: 20 MHz Muestreo de 8-bit: 40 MHz
Muestreo en cuadratura I/Q	Muestreo de 16-bit: 25 MS/s Muestreo de 8-bit: 40 MS/s
Fuente de poder	Adaptador DC 6V 3A
DAC	2 canales, 400MS/s, 16 bit
Dimensiones (L x H x A)	15.875 cm x 4.826 cm x 21.209 cm

Tabla 6: Características de transmisión del USRP NI 2920 de National Instruments. [50]

### 6.1.2 HackRF One de Great Scott Gadgets

El HackRF One es una plataforma de hardware 'open source', se trata de un periférico de radio definida por software, desarrollado a partir de un proyecto de crowdfunding en el año 2009. Es un periférico conectado a un ordenador a través de USB, es capaz de transmitir señales de radio en el rango desde 1MHz hasta 6GHz y está orientado al desarrollo y prueba de las diferentes tecnologías de radio ya sea en el ámbito educativo, así como científico y comercial. Representa una alternativa potente y de bajo costo para generar nuevos sistemas en tecnologías de radio.



Figura 42: Dispositivo HackRF One en su contenedor plástico. [51]

El tipo de transmisión que realiza es semi-dúplex, para ejecutar ciertas aplicaciones puede ser programado también como un dispositivo independiente de un computador, aunque por lo general necesita de éste para que ahí sean realizadas las funciones de procesamiento digital de señales. En la siguiente tabla se muestran las principales características de este dispositivo.

Especificaciones	
Modelo	HackRF One
Rango de frecuencias	1 MHz hasta 6 GHz
Tipo de transceptor	Semi-Dúplex
Tasa máxima de muestreo	20M de muestras por segundo
Muestreo en cuadratura	Muestreo en cuadratura de 8 bit (8-bit I y 8-bit Q)
Tipo de conexión	USB 2.0 de alta velocidad
Fuente de poder	Desde USB
Potencia de operación	La potencia de operación depende de la frecuencia de trabajo: 10 MHz a 2150 MHz: 5 dBm a 15 dBm 2150 MHz a 2750 MHz: 13 dBm a 15 dBm 2750 MHz a 4000 MHz: 0 dBm a 5 dBm 4000 MHz a 6000 MHz: -10 dBm a 0 dBm
Dimensiones	120 mm x 75 mm (PCB)

Tabla 7: Características técnicas del HackRF One. [51]

### 6.1.3 Mini computador Intel NUC

Para el computador base del prototipo implementado, se escogió al sistema Intel NUC (Next Unit Computer - DN2820FYKH), el cual posee un procesador Intel Celeron de doble núcleo con una velocidad de procesamiento máxima de 2.4GHz y tarjeta de video integrada Intel HD Graphics que trabaja a 756MHz. Este equipo presenta un consumo de potencia muy bajo (aproximadamente 7.5W TDP) lo que lo hace ideal debido a la movilidad y economía energética que demanda el diseño del prototipo. El NUC posee un disco duro estándar de 2,5 pulgadas, puerto HDMI, puertos USB y conexión Gigabit Ethernet, siendo esta última muy importante puesto que es indispensable para la conexión del computador con el equipo USRP.



Figura 43: NUC DN2820FYKH. [52]

Las características principales del Intel NUC se muestran en la siguiente tabla:

Especificaciones	
Modelo	Intel NUC DN2820FYKH
CPU	Intel Celeron N2820 Dual Core a 2.4GHz
GPU	Intel HD Graphics @ 756MHz
Chipset	Intel Atom ValleyView
BIOS	Intel Visual BIOS
RAM	4GB DDR3L 1066MHz
Almacenamiento	250GB SATA 2,5"
Bluetooth	4.0
Wifi	Intel Wireless-N 7260BN PCIe 802.11 bgn
Conexiones externas	2x USB 2.0 1x USB 3.0 1x RJ45 Gigabit 1x Audio (Línea in y out) 1x HDMI 1x receptor IR
Dimensiones	116.6mm x 112.0mm x 51.5mm

Tabla 8: Características del mini computador Intel NUC. [52]

#### 6.1.4 Amplificador de potencia de transmisión

Tal como se indicó anteriormente, el amplificador de potencia es un factor clave en cuanto al alcance que se le quiera dar a la transmisión del sistema de alerta. Para implementar el prototipo, se escogió un amplificador para sistemas de radio de alcance medio. El modelo escogido es el **ZHL-50W** desarrollado por la empresa Mini-Circuits.



Figura 44: Amplificador de potencia. [53]

A continuación, se muestra una tabla con las principales características técnicas del amplificador de potencia.

Especificaciones	
Modelo	ZHL-50W
Rango de frecuencias	50 MHz a 500 MHz
Ganancia	47 a 52 dBm
Salida de potencia a compresión de 1dB	De 200 a 300 MHz: 46.0 a 47.5 dBm De 50 a 500 MHz: 44.0 a 46.5 dBm
Salida saturada a compresión de 3dB	De 200 a 300 MHz: 47.0 a 49.0 dBm De 50 a 500 MHz: 45.5 a 48.0 dBm
Figura de ruido	4.5 a 7.0 dBm
VSWR (entrada)	1.75
VSWR (salida)	2.5
Alimentación de poder	24VDC 9.3A

Tabla 9: Características del amplificador de potencia.  
Fuente: Mini Circuits [53].

### 6.1.5 Antena utilizada para la transmisión

Se escogió una antena construida en aleación de aluminio, y soldada con sistema Tig (atmósfera de argón). El elemento irradiante es un dipolo plegado alimentado con un balún encapsulado en resina epoxi. Las conexiones son totalmente soldadas, lo que garantiza la ausencia de corrosión e intermodulación.

Especificaciones	
Modelo	Antena Yagui
Impedancia nominal	50 ohm
Ancho lóbulo horizontal (-3dB)	110°
Ancho lóbulo vertical (-3dB)	65°
Ganancia (sobre media onda)	5dB
Relación frente espalda	19dB
Potencia máxima	350W
Protección contra rayos	Dipolo a masa
Terminación standard	"N" hembra
Pérdida de retorno	>21dB

Tabla 10: Características principales de la antena utilizada para la transmisión.

### 6.1.6 Otros periféricos

#### Pantalla táctil LCD HDMI

La pantalla escogida para la implementación del prototipo es de tipo LCD IPS, con función táctil capacitiva lo cual elimina la necesidad de otros periféricos de entrada y el espacio requerido para instalar el equipo. Las características principales de esta pantalla se muestran a continuación.

- Control táctil capacitivo.
- Display de 7" IPS 1024x600 pixeles, gráficos claros, mayor ángulo de visión.
- Protocolo HID estándar, Plug & Play a través de interfaz USB mini y HDMI.
- No necesita fuente de poder externa



Figura 45: Pantalla LCD Táctil HDMI IPS. [54]

## 6.2 Software

Los recursos de software que se decidió utilizar para el desarrollo de la plataforma base de este proyecto son todos herramientas de software libre, y fueron escogidos tomando como referencia criterios similares a los que se aplicó para seleccionar el hardware, sobre todo en el aspecto económico. El uso de software libre, es decir, sin licencias con valor comercial, disminuye notablemente el impacto en el costo final de implementación de un sistema, a la vez que ofrece amplias posibilidades de escalabilidad y compatibilidad al mismo. En consecuencia, tanto el sistema operativo, como las herramientas de desarrollo utilizadas en el diseño de este prototipo han representado cero costos en el proceso de implementación del mismo, ofreciendo sin embargo las mismas opciones y características que otras herramientas de pago, permitiendo así un desarrollo eficaz y óptimo de la plataforma operativa del sistema de alerta sin requerir mayor inversión económica.

### Lubuntu

Lubuntu es una versión oficial del sistema operativo Ubuntu, basada en el entorno de escritorio 'Lightweight X11 Desktop Environment' (LXDE). La finalidad de esta versión es proporcionar un sistema ligero y funcional, orientado a su uso en máquinas antiguas o de bajos recursos optimizando el rendimiento gracias a que se simplifica el entorno gráfico, sin embargo, Lubuntu se ejecuta también sin problemas en hardware más actual.

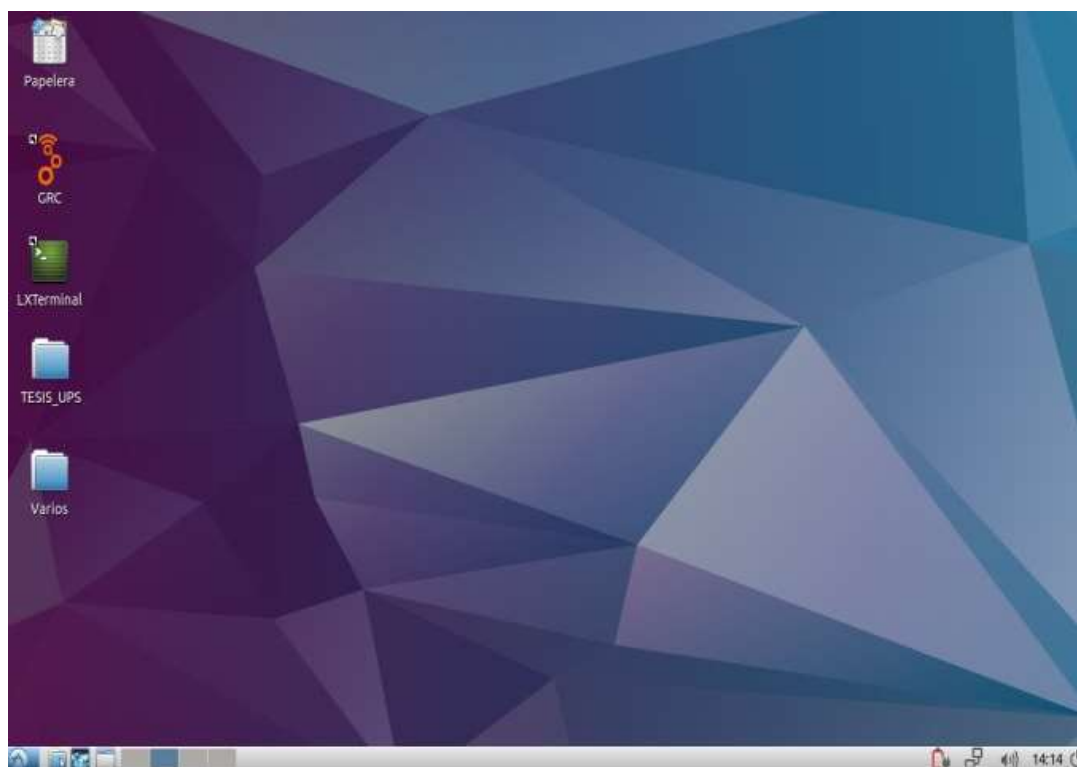


Figura 46: Entorno de escritorio de Lubuntu.

Esta distribución o “Flavor” de Ubuntu se acopla perfectamente al esquema de funcionamiento del sistema de alerta, que entre otras cosas se requiere que inicie rápidamente puesto que, en la ocasión de una emergencia, el sistema de alerta debería estar listo para funcionar desde que el momento en que el vehículo de emergencia sale de su origen para dirigirse a atender el incidente por el cual se le solicitó.



Para presentar una idea clara del extremadamente bajo nivel de recursos de hardware que necesita Ubuntu, se muestra a continuación una tabla comparativa contra los requerimientos de hardware de Windows 7.

Lubuntu	Windows 7
Procesador de 512 MHz o superior 32 o 64 bit	Procesador de 1GHz o superior, 32 o 64 bit
512 MB de memoria RAM	1GB de RAM para la versión de 32 bit 2GB de RAM para la versión de 64 bit
6 GB de espacio en disco duro	16 GB de espacio en disco para la versión de 32 bit 20 GB de espacio en disco para la versión de 64 bit
No requiere características especiales de tarjeta gráfica	Tarjeta gráfica con soporte para DirectX9 con controlador WDDM 1.0 o superior

Tabla 11: Comparación de requerimientos de hardware entre Lubuntu y Windows 7.

## GNU Radio

GNU Radio es una herramienta de desarrollo de software o SDK que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por software para lo cual puede ser usado con hardware de RF externo de bajo costo, o sin hardware en un ambiente de simulación. Es utilizado en el ambiente académico, de hobbies y comercial en investigación de sistemas de comunicaciones y sistemas de radio reales.

GNU Radio se encarga de realizar todo el procesamiento de señales. Puede ser usado para desarrollar aplicaciones para recibir datos desde fuentes reales o enviar datos en ráfagas digitales, las cuales son luego transmitidas a través del hardware. GNU Radio posee filtros, códigos de canal, elementos de sincronización, ecualizadores, demoduladores, vocoders, decodificadores y muchos otros elementos conocidos como bloques, además, incluye también el método para conectar estos bloques y controlar cómo la información pasa entre éstos. También es posible crear bloques según la necesidad del usuario.

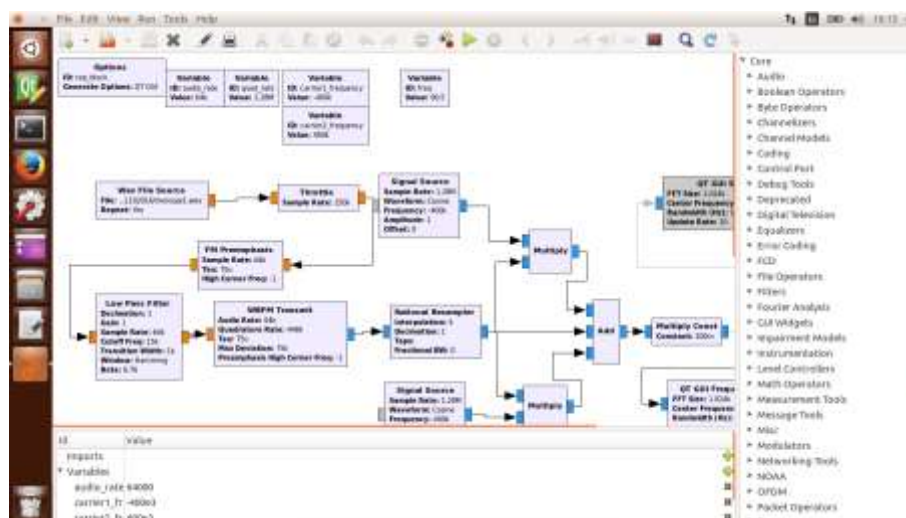


Figura 47: Interfaz gráfica de GNU Radio.

Las aplicaciones de GNU Radio son principalmente escritas usando el lenguaje de programación Python, mientras que la trayectoria de procesamiento de señales críticas está implementada en C++ utilizando extensiones de punto flotante del procesador siempre que sea posible. Por lo tanto, el desarrollador es capaz de implementar sistemas de radio en tiempo real de alto rendimiento en un ambiente de desarrollo fácil de utilizar.

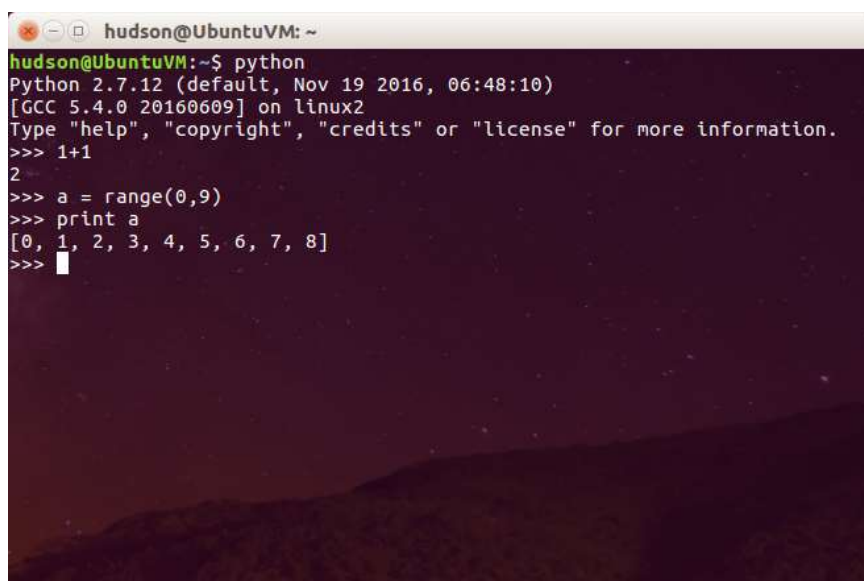
Los sistemas diseñados en GNU Radio generan un archivo escrito en lenguaje Python 2, el cual puede ser editado para agregar características de funcionamiento e incluso apariencia visual, extendiendo aún más las posibilidades de implementación y desarrollo de las aplicaciones de GNU Radio.

## Python 2.7

Python es un lenguaje de programación con licencia de código abierto, de tipo intérprete lo cual significa que, a diferencia de los lenguajes compiladores o ensambladores, sólo realiza la traducción del lenguaje de programación a lenguaje de máquina de bajo nivel a medida que éste se va ejecutando. Python es un lenguaje multiparadigma, ya que permite al usuario adoptar diferentes estilos de programación tales como programación orientada a objetos, programación funcional y programación imperativa, entre otros.

Otra característica de este lenguaje de programación es su facilidad de extenderse. Es posible añadir nuevos módulos escritos en lenguaje C o C++ e integrarlos sin problemas al código escrito en Python. Entre los programadores de Python, existen ciertos lineamientos denominados Filosofía Python, la cual implica que todo código escrito en Python debe seguir principios de legibilidad y transparencia; a esto se le llama un código 'pythónico'. Estos principios son planteados en lo que se denomina 'El Zen de Python'.

Python posee un intérprete de comandos o modo interactivo en el cual se pueden escribir las expresiones una a una e ir viendo el resultado de su evaluación de forma instantánea, lo cual permite probar porciones de código antes de integrarlo en el programa completo. Esto es especialmente útil para los usuarios nuevos del lenguaje de programación, aunque es utilizado incluso por sus usuarios más avanzados.



```
hudson@UbuntuVM: ~  
hudson@UbuntuVM:~$ python  
Python 2.7.12 (default, Nov 19 2016, 06:48:10)  
[GCC 5.4.0 20160609] on linux2  
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.  
>>> 1+1  
2  
>>> a = range(0,9)  
>>> print a  
[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]  
>>> 
```

Figura 48: Intérprete de comandos de Python 2.7.

El contenido de los bloques de código en Python debe obligatoriamente ser delimitado usando espacios o tabuladores (nunca ambos combinados), a diferencia de otros lenguajes en los que esta delimitación o indentación es opcional o se realiza usando caracteres específicos. Esto contribuye a que cada aplicación escrita en Python sea más legible y sea apegada a los principios de pitonicidad establecidos en el denominado 'Zen de Python'.

```
def fib(n):
    print 'n =', n
    if n > 1:
        return n * fib(n - 1)
    else:
        print 'fin de la línea'
        return 1
```

Figura 49: Ejemplo de indentación adecuada en Python. [55]

## PyQt

PyQt es la adaptación o 'binding' para el lenguaje de programación Python de la biblioteca gráfica Qt. PyQt posee una versión libre bajo licencia GNU GPL versión 3. Inicialmente, durante el desarrollo del esquema básico en GNU Radio del sistema de alerta, se utilizó las herramientas basadas en Qt que éste provee, sin embargo, debido a que GNU Radio está enfocado en el desarrollo de los sistemas de radio como tal sin ahondar mucho en posibilidades de diseño de interfaces gráficas, se decidió utilizar esta biblioteca para desarrollar dentro del código generado en GNU Radio los elementos de la interfaz visual del sistema de alerta que no era posible integrar a través de GNU Radio. Algunos de estos elementos son cuadros de texto, etiquetas, ventanas emergentes, formato de texto en etiquetas, botones, etc.

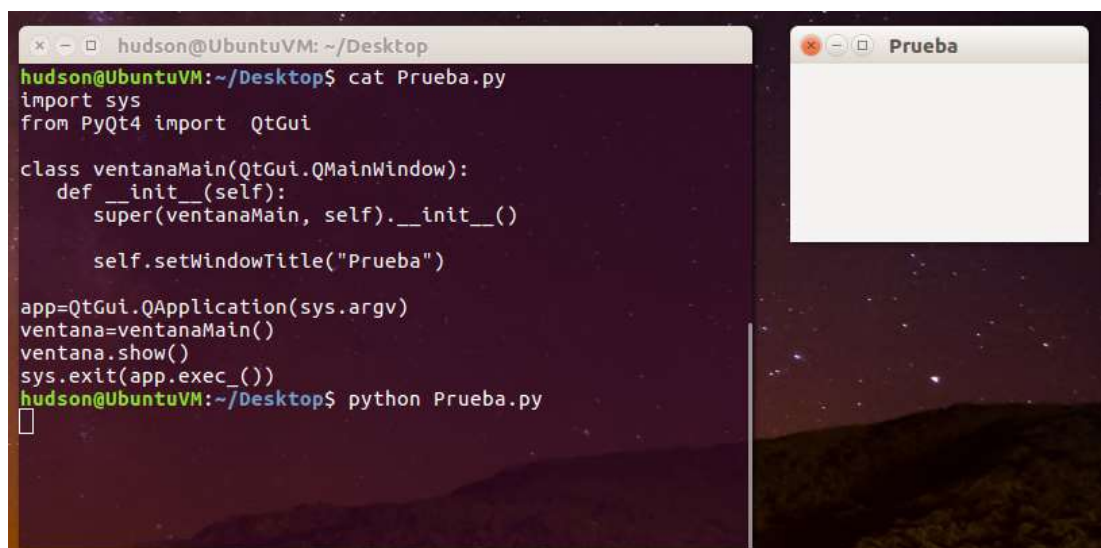


Figura 50: Ejemplo de uso de la librería gráfica PyQt de Python.

## 7 Diseño del prototipo del sistema de alerta

### 7.1 Diagrama de bloques

El sistema de alerta para vehículos de emergencia posee un esquema funcional bastante simple visto desde la perspectiva de un diagrama de bloques, sin embargo, su efectividad radica en que, a pesar de tener un diseño simple, su funcionalidad presenta un amplio espectro de posibilidades de uso y beneficios. A continuación, se muestra las diferentes etapas del sistema y sus bloques funcionales.



Figura 51: Diagrama de bloques del prototipo.

El computador principal es el encargado de ejecutar el programa base en el cual se realizan las funciones de procesamiento digital de señales las cuales serán luego enviadas al hardware USRP para que éstas a su vez sean amplificadas y finalmente transmitidas a través de la antena.

### 7.2 Diseño del transmisor FM básico en GNU Radio

La primera fase del desarrollo del sistema de alerta se realizó en GNU Radio. Como se ha mencionado anteriormente, este software permite diseñar sistemas de radiotransmisión que pueden ser aplicados con equipos de RDS. Por esto, se tomó como base un típico transmisor FM al cual se le agregaron bloques adicionales para soportar las funcionalidades específicas del sistema de alerta. A continuación, se muestra el diagrama del transmisor FM básico.

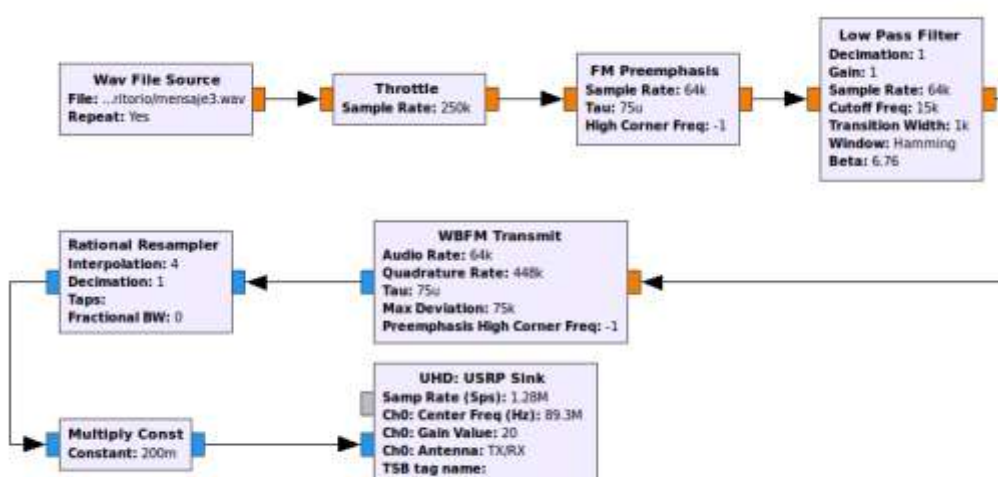


Figura 52: Diagrama de flujo de un transmisor FM básico conectado al USRP.

El diagrama mostrado en la Figura 52 realiza la tarea básica de enviar la señal modulada en frecuencia de un archivo de audio hacia el dispositivo USRP para que ésta sea transmitida sobre una frecuencia específica. Se utiliza distintos bloques que cumplen funciones específicas las cuales serán detalladas a continuación.

### WAV file source

Este bloque recibe como argumento un archivo de audio tipo WAV y lo convierte en datos de tipo flotante. Posee la opción de volver a reproducir automáticamente el archivo una vez que este llega al final de su duración, además de también permitir escoger cuántos canales serán leídos desde archivo WAV. En el prototipo desarrollado, este bloque es utilizado para leer el archivo de audio que contiene el mensaje de alerta a transmitir a través del sistema de alerta.

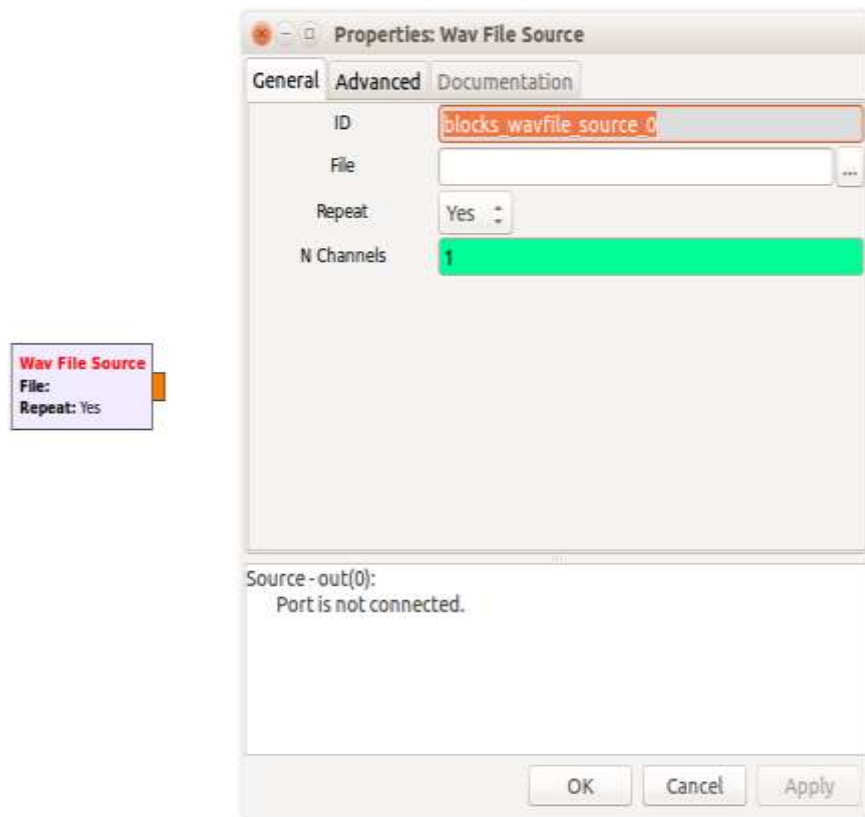


Figura 53: Bloque WAV File Source y ventana de edición de propiedades del mismo.

### Throttle

El bloque Throttle es utilizado para limitar la salida de datos a una tasa de muestreo específica. Su uso es recomendado cuando no existe una fuente externa que regule dicha tasa de muestreo, evita que el programa consuma todos los recursos de procesamiento del computador. Es aplicado en el diagrama esquemático del prototipo de sistema de alerta debido a que no existe una fuente externa que regule la tasa de muestreo de los datos generados por el bloque anterior (Wav File Source).

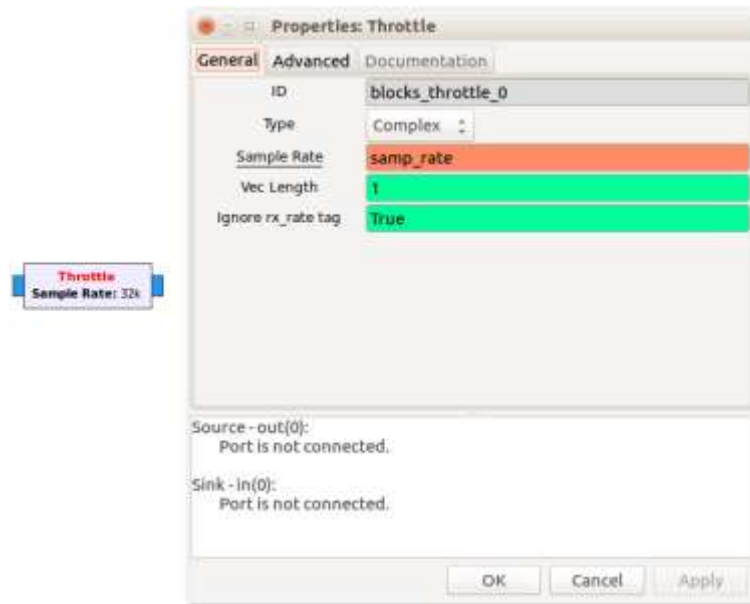


Figura 54: Bloque Throttle y ventana de edición de propiedades del mismo.

## Low pass filter

Como su nombre lo indica, se trata de un filtro pasa bajos, es necesario luego de aplicar el filtro FIR del bloque de preénfasis y sirve entre otras cosas para atenuar armónicos y evitar el aliasing.

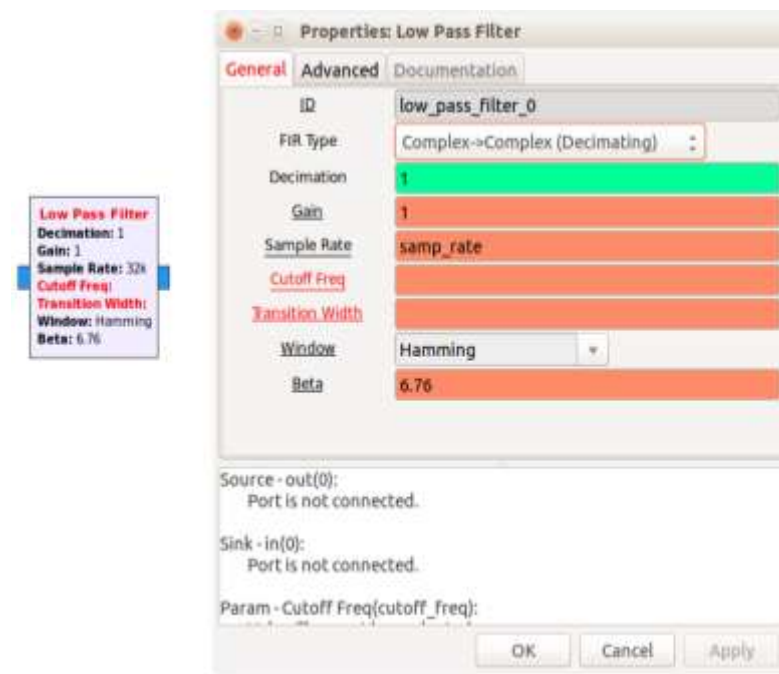


Figura 55: Bloque Low Pass Filter y ventana de edición de propiedades del mismo.

## FM Preemphasis

En este bloque se realiza la tarea de multiplicar la entrada por una función de transferencia (En este caso un filtro IIR de primer orden) la cual arroja valores según la frecuencia de la señal que llega al bloque, los valores son más bajos si la frecuencia es baja y más altos si la frecuencia es alta. Este bloque recibe entre sus parámetros el valor de tau, la cual es una constante de tiempo generalmente de un circuito RC utilizado para implementar énfasis/de-énfasis a nivel de hardware. Valores más grandes de tau representan valores altos de la función de transferencia en frecuencias altas. Por lo general se utiliza un estándar de  $75\mu$  o  $50\mu$  como valor para tau.

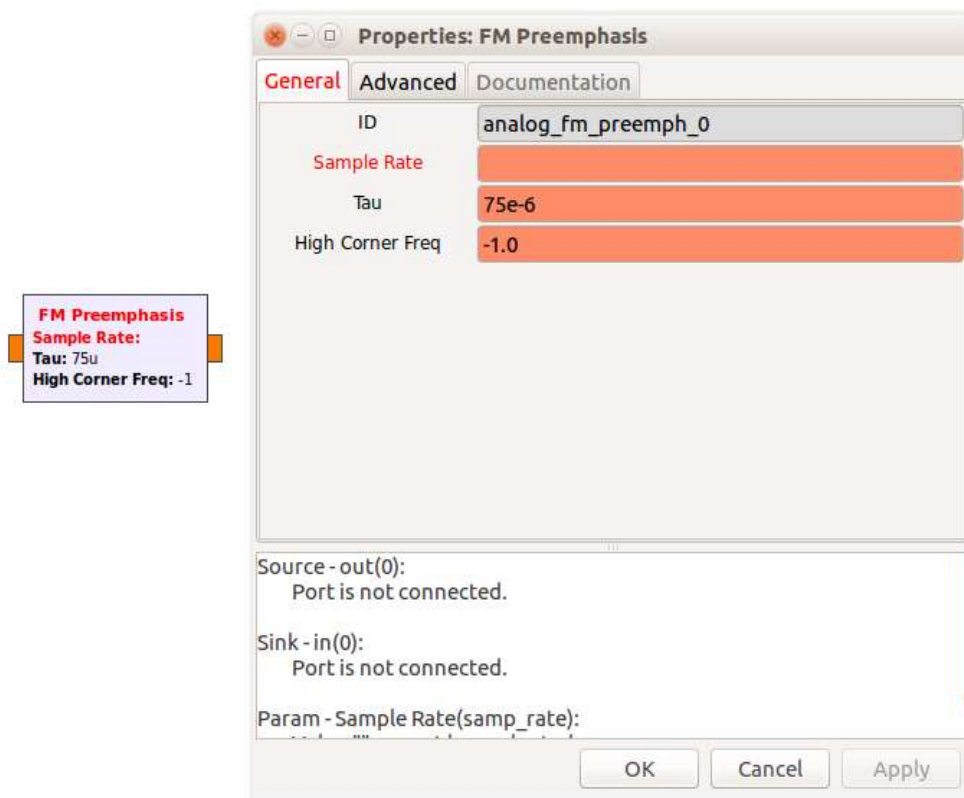


Figura 56: Bloque FM Preemphasis y ventana de edición de propiedades del mismo.

El bloque de preénfasis es necesario para amplificar manualmente los componentes de alta frecuencia de la señal a transmitir, de modo que en los receptores se pueda realizar las operaciones de conversión necesarias para recuperar la distribución de potencia original de la señal. Esto da como resultado una mejora en la relación señal-ruido del sistema.



## WBFM transmit

Este bloque toma la señal de entrada y entrega la misma señal modulada en frecuencia como salida, sus parámetros de Audio Rate y Quadrature Rate son las tasas de muestreo de las señales de entrada y salida respectivamente. El valor de Max Deviation puede ser cualquiera siempre y cuando esté por encima de los 20kHz (el componente más alto de frecuencia de un sonido audible).

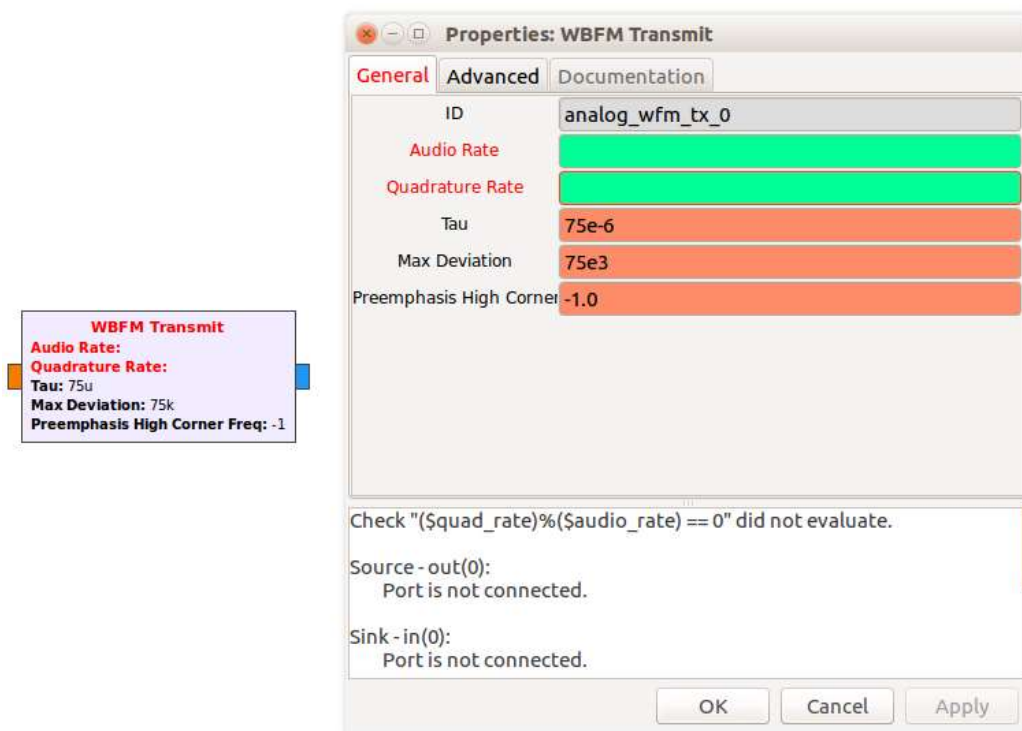


Figura 57: Bloque WBFM Transmit y ventana de edición de propiedades del mismo.

## Rational resampler

Es utilizado cuando dos bloques trabajan a diferentes frecuencias de muestreo, está compuesto internamente de un decimador y un interpolador (para disminuir o incrementar una determinada frecuencia de muestreo, respectivamente). Básicamente este bloque convierte una frecuencia de muestreo en otra, siempre y cuando ambas puedan relacionarse a una tasa específica: frecuencia de salida = frecuencia de entrada \* valor de interpolación / valor de decimación.

Todos los bloques ubicados después del bloque Rational Resampler deben configurarse para recibir la frecuencia de muestreo de salida de éste.



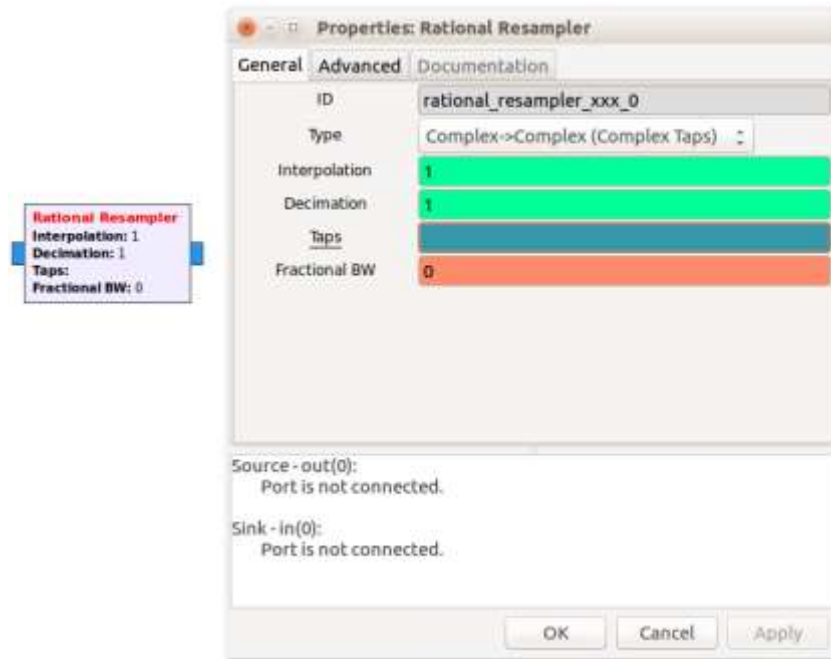


Figura 58: Bloque Rational Resampler y ventana de edición de propiedades del mismo.

## Multiply const

Multiplica a la señal de entrada por una constante específica la cual se determina en los parámetros del bloque. En el diagrama del prototipo de sistema de alerta se utiliza para llevar la señal a transmitir con una mayor amplitud hasta el bloque USRP.

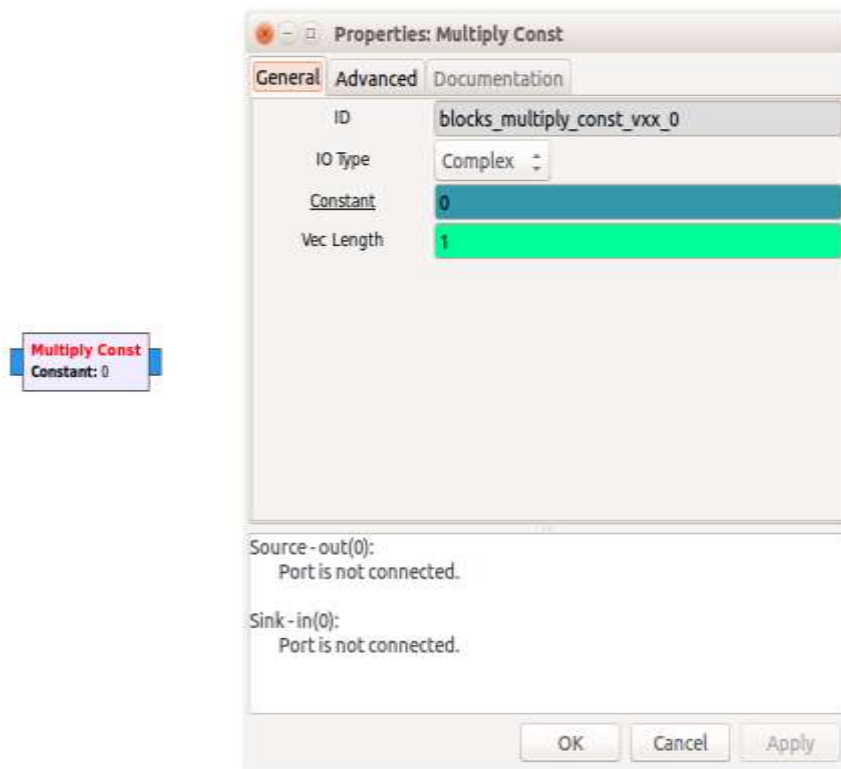


Figura 59: Bloque Multiply Const y ventana de edición de propiedades del mismo.

## UHD: USRP sink

El bloque USRP SINK cumple la función de comunicarse con el hardware de radio definida por software, específicamente con hardware USRP (Ettus Research, National Instrument). Es el bloque final de la etapa de procesamiento de la señal, posee varios parámetros de configuración entre ellos algunos para definir aspectos como tasas de muestreo, sincronización con reloj externo, opciones de RF, etc. Sin embargo, no todos estos parámetros son mandatorios puesto que responden a diferentes funciones del bloque dependiendo del hardware que se utilice.

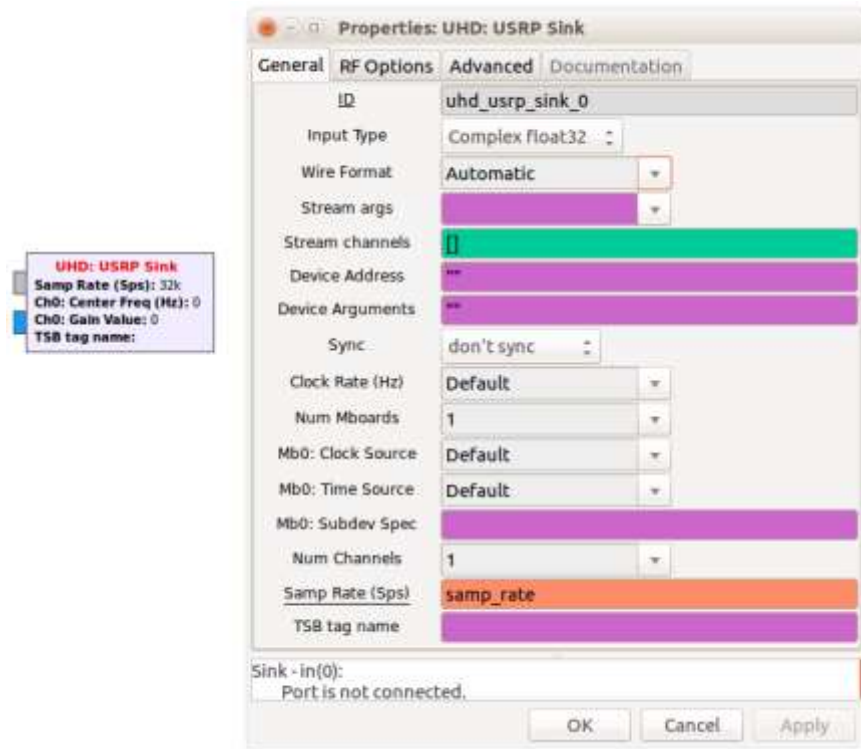


Figura 60: Bloque UHD: USRP SINK y ventana de edición de propiedades del mismo.

### 7.3 Diseño final del transmisor FM

Sobre el diagrama esquemático básico de transmisor FM fueron agregadas algunas modificaciones de tal forma que la transmisión pueda realizarse en tres portadoras simultáneamente, además de incluir un selector del mensaje de audio a utilizar sea este para anunciar vehículos de bomberos, policía, agente de tránsito o ambulancia.

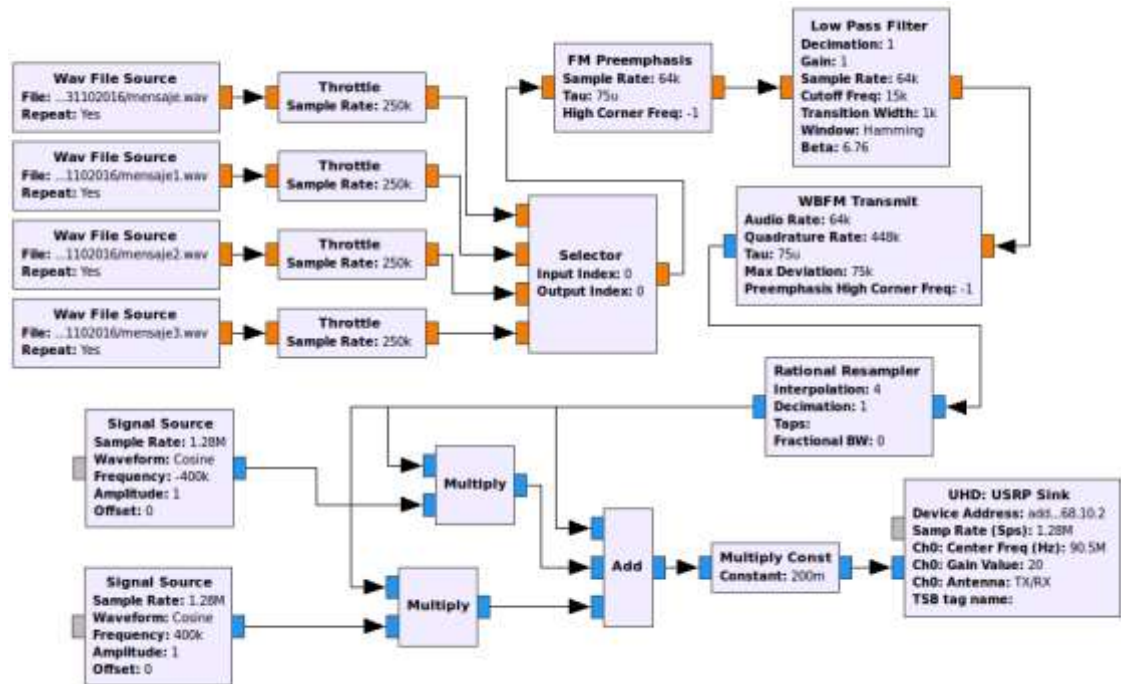


Figura 61: Diagrama final utilizado en el prototipo de sistema de alerta.

En la figura 61 se muestra el esquema final utilizado en el prototipo de sistema de alerta. En este esquema se puede apreciar la integración de varios bloques adicionales a los ya establecidos en el diseño del transmisor básico. La función de cada uno de estos bloques adicionales se detalla a continuación.

#### Selector

Este bloque con número de entradas y salidas configurable permite indicar en tiempo de ejecución, mediante una caja de opciones de GUI, qué bloques de entre los que se conectan a su entrada serán direccionados a su salida. En el diseño del prototipo de sistema de alerta se utiliza este bloque para poder permitir al usuario escoger qué tipo de mensaje de alerta se transmitirá, esto es, según el tipo de vehículo de emergencia con el que se utilice el sistema.

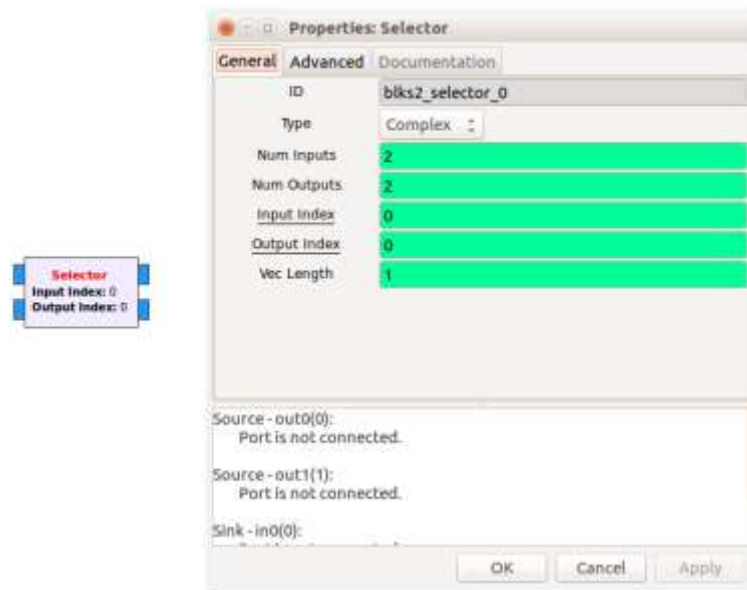


Figura 62: Bloque Selector y ventana de edición de propiedades del mismo.

## Signal source

Este bloque considera un conjunto de variables tales como frecuencia de muestreo, amplitud y frecuencia para producir una señal, además, es posible determinar el tipo de señal a generar sea esta un coseno, seno, lineal, onda cuadrada, triangular e incluso diente de sierra. En el diseño del prototipo se establecieron dos bloques Signal Source los cuales generan las señales portadoras adyacentes a la frecuencia de transmisión central, la frecuencia de estas portadoras adicionales está determinada en función de la frecuencia de la portadora central añadiéndole +400 KHz y -400 KHz (el espacio reglamentario entre estaciones de radio para la zona de Guayaquil según la CONARTEL)

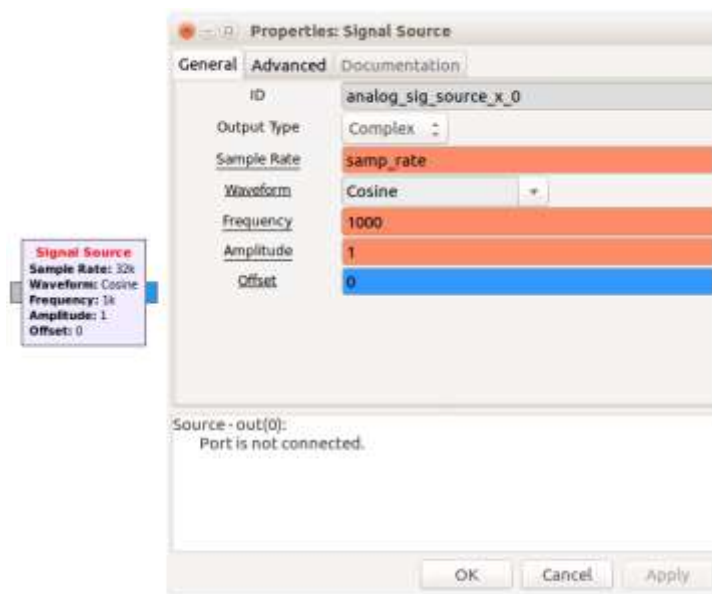


Figura 63: Bloque Signal Source y ventana de edición de propiedades del mismo.

## Multiply

Implementa la función **Salida = Entrada 0 x Entrada 1 x ... x Entrada (N-1)** con tipos de dato entero, flotante, complejo y short. En el diseño del prototipo es utilizado para combinar la señal de audio modulada en frecuencia con las señales generadas por cada bloque Signal Source, siendo estas últimas las señales portadoras.

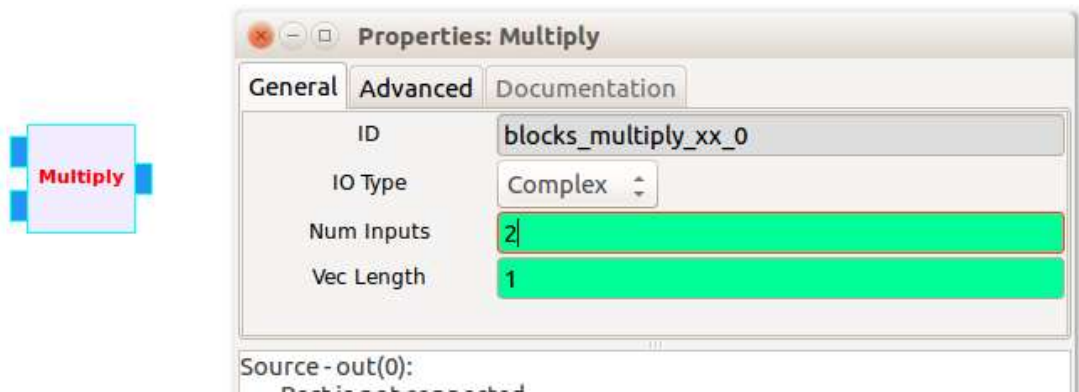


Figura 64: Bloque Signal Source y ventana de edición de propiedades del mismo.

## Add

Implementa la función **Salida = Entrada 0 + Entrada 1 + ... + Entrada (N-1)** con tipos de dato entero, flotante, complejo y short. En el diseño del prototipo es utilizado para sumar la señal portadora central con las portadoras adyacentes antes de ser enviadas al bloque USRP Sink.

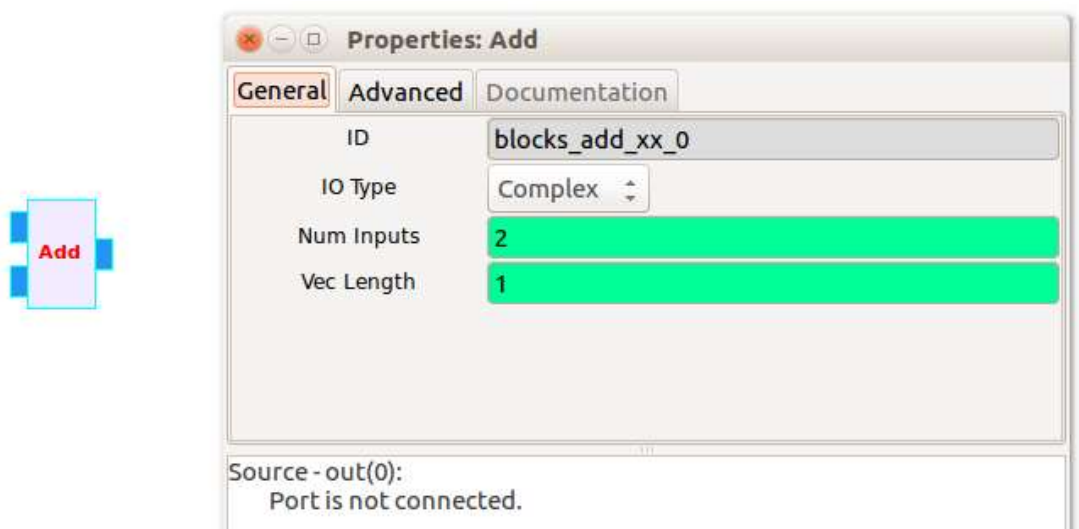


Figura 65: Bloque Signal Source y ventana de edición de propiedades del mismo.

## 7.4 Optimización del diseño GRC en Python

El diagrama final generado en GNU Radio (GRC) cumple con la función de transmitir la señal de audio deseada en tres portadoras simultáneamente, sin embargo, el marco de trabajo o framework de GNU Radio no resulta ser la opción más óptima al momento de otorgar al prototipo una funcionalidad completa orientada a los objetivos del presente trabajo, esto es debido a que GNU Radio no es un software cuya finalidad sea entregar un sistema totalmente terminado listo para ser aplicado en una interfaz de usuario para su uso en escenarios cotidianos sino más bien permitir al diseñador esquematizar un prototipo y probarlo dentro de un ambiente de desarrollo, es por esto que fue necesario modificar a nivel de estructura lógica, mediante el lenguaje de programación Python, el diseño generado en GRC.



Figura 66: Archivos generados por GNU Radio relacionados a un diagrama específico.

Una vez que un diagrama de GNU Radio se guarda y ejecuta por primera vez desde la ventana principal de edición del programa se generan dos archivos relacionados entre sí (Fig. 66). El primero de ellos almacena el diagrama como tal y es posible abrirlo desde la interfaz de GNU Radio, mientras que el otro es un script de código Python el cual es un recurso utilizado para poder ejecutar dicho diagrama. Este script de Python puede ser editado libremente por el programador, lo cual permite la posibilidad de expandir la funcionalidad del diagrama diseñado en GNU Radio, en el caso del presente trabajo, se modificó el código fuente Python del diseño de bloques del prototipo de sistema de alerta para incluir las funciones mostradas a continuación.

### 7.4.1 Interfaz de usuario

Muchos de los bloques existentes dentro del marco de trabajo de GNU Radio incorporan una interfaz gráfica la cual se muestra al momento de ejecutar un diagrama que los contenga, tal es el caso del bloque de botones de selección del tipo de mensaje, el deslizador para indicar la potencia de transmisión del USRP o el bloque de gráfico de señales, tal como se muestra en la Figura 67.

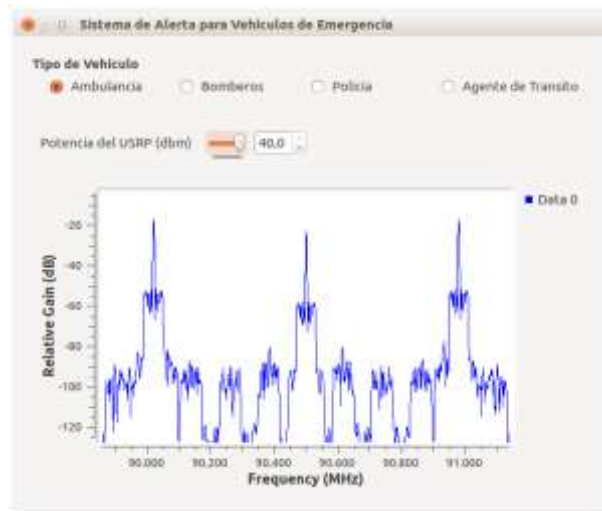


Figura 67: Interfaz gráfica generada por bloques de GNU Radio.

No obstante, por lo general este tipo de gráficos muestra únicamente información referente al bloque específico al cual pertenecen, por lo cual no podrían ser utilizados como un medio para implementar una interfaz gráfica de usuario totalmente interactiva y de fácil manejo.

A partir de realizar un análisis exhaustivo del código fuente Python generado al ejecutar el diagrama del prototipo, se logró identificar los diferentes objetos, métodos y demás elementos con los cuales interactúa cada función del programa, permitiendo así complementar dicho código fuente con una interfaz de usuario acoplada totalmente al funcionamiento del prototipo. La interfaz de usuario desarrollada se muestra a continuación en la Figura 68.

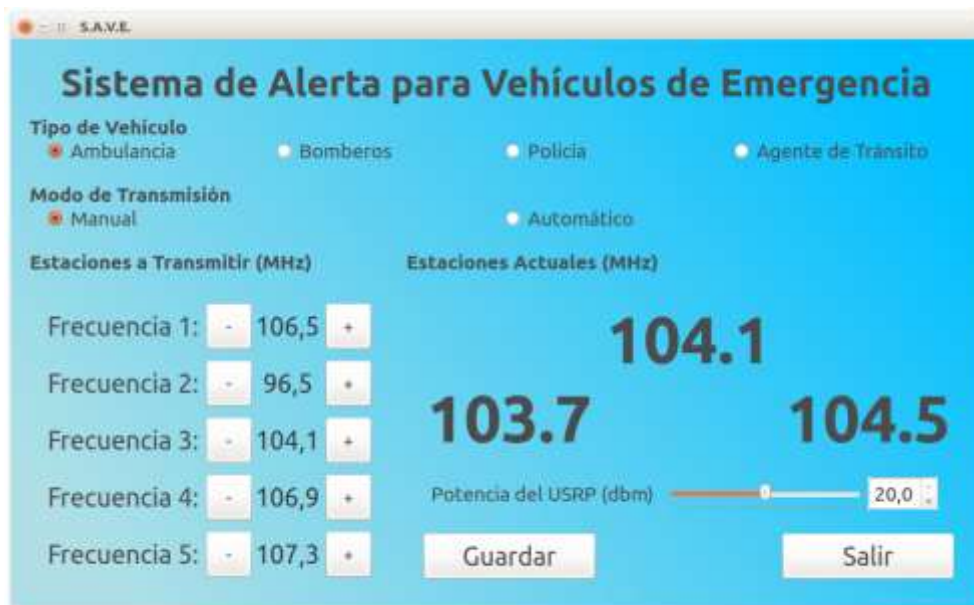


Figura 68: Interfaz gráfica codificada sobre el código fuente Python del sistema.

Los nuevos elementos correspondientes a la interfaz gráfica fueron codificados junto con el código ya existente, sin que existan problemas de compatibilidad de ningún tipo debido a que cada elemento se programó en base a la biblioteca gráfica

PyQT, la cual es utilizada nativamente por GNU Radio, además, la incorporación de esta interfaz no alteró el comportamiento de la transmisión lograda hasta ahora.

#### 7.4.2 Modos de transmisión manual y automático

Tal como se indicó anteriormente, las modificaciones realizadas para incorporar funcionalidades adicionales al diagrama generado en GNU Radio fueron posibles gracias a un estudio y análisis detallado del código fuente Python del mismo. Inicialmente se identificaron los diferentes elementos del código que intervienen directamente con cada función del programa, así como sus relaciones y dependencias en una suerte de proceso de ingeniería inversa, esto permitió inclusive modificar aspectos de tan bajo nivel como el manejo de procesos en segundo plano (o daemons) que realiza GNU Radio, punto clave para lograr que el programa, como se encontraba hasta el momento, pueda ser modificado desde sus aspectos más superficiales hasta los más fundamentales.

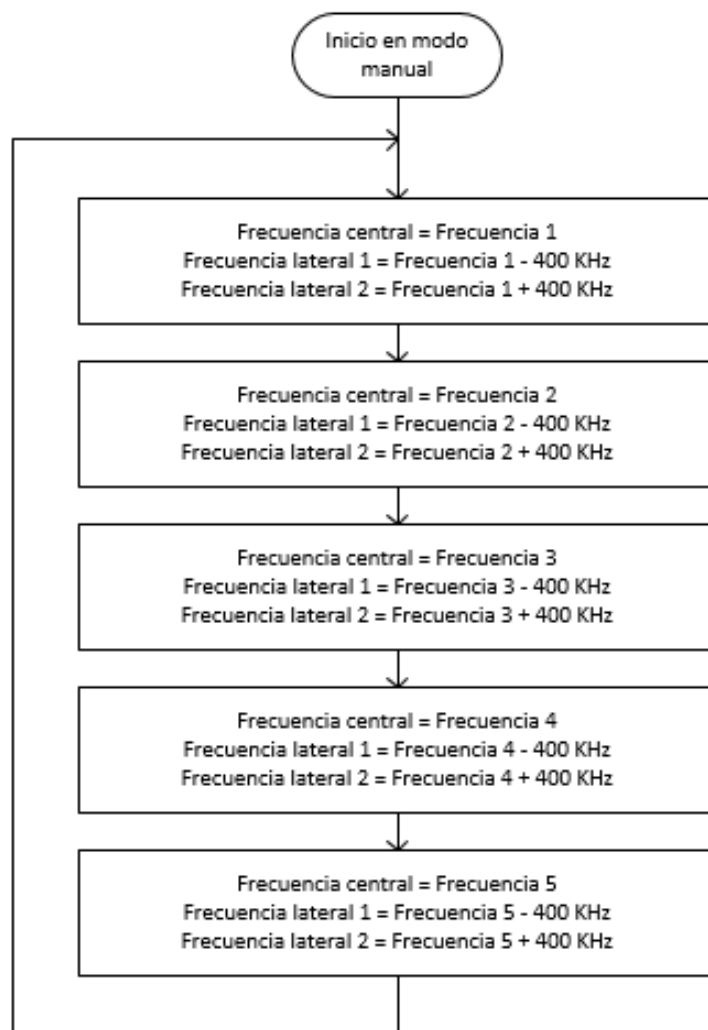


Figura 69: Diagrama de flujo que representa el modo de funcionamiento manual del sistema de alerta.

Se decidió desarrollar el prototipo con dos modos de transmisión: manual y automático, el modo de transmisión manual permite realizar la emisión del mensaje de alerta audible de forma secuencial únicamente en cinco frecuencias centrales indicadas por el mismo usuario a través de la interfaz gráfica; la transmisión del mensaje de alerta se realiza a la vez en dos frecuencias laterales adyacentes



ubicadas en el canal inmediato siguiente y anterior (+400 KHz y -400KHz), cubriendo así no cinco, sino un total de hasta 15 estaciones de radio en cada ciclo de funcionamiento de 20 segundos. Para lograr implementar esta función se añadió al código un bloque de repetición que cambia automáticamente la frecuencia de funcionamiento para la transmisión del dispositivo de RDS, asignándole cada cierto tiempo específico una de las frecuencias indicadas por el usuario en la lista de la interfaz gráfica tal como se puede apreciar en el diagrama de flujo de la Figura 69.

El modo de transmisión automático realiza en esencia el mismo proceso que se ejecuta en el modo manual, a diferencia de que este modo permite cubrir secuencialmente todas las estaciones de radio existentes dentro del espectro de frecuencias desde 88.1 MHz hasta 108.1 MHz siguiendo el flujo lógico mostrado en la Figura 70.

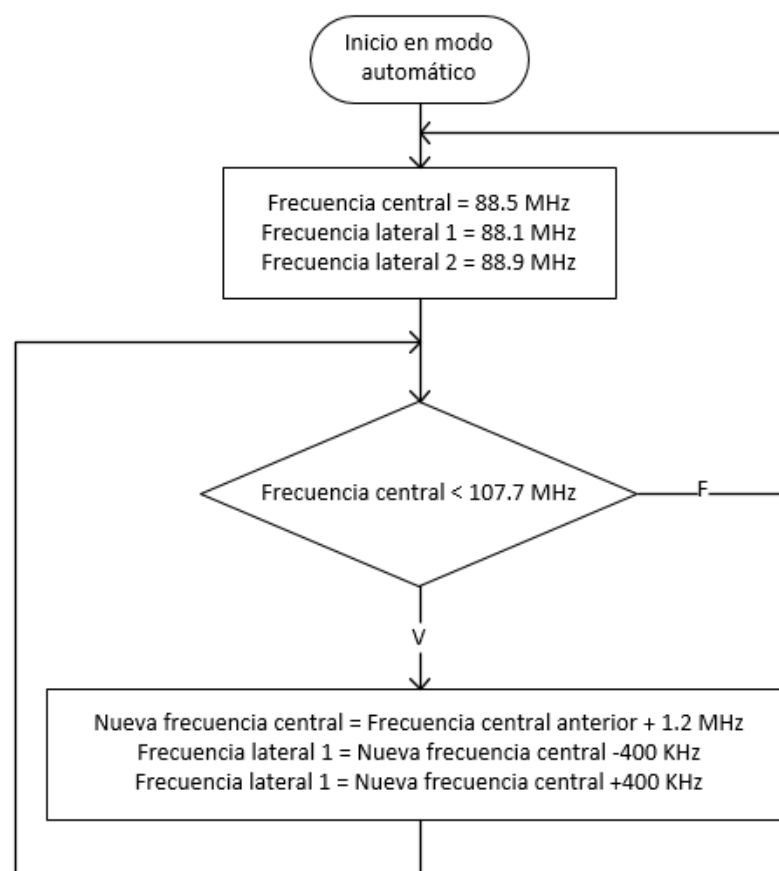


Figura 70: Diagrama de flujo que representa el modo de transmisión automático del sistema de alerta.

El tiempo que permanece cada frecuencia central asignada en el dispositivo de RDS es de 4 segundos, lo que permite terminar un ciclo completo de trabajo (esto es, haber transmitido en todas las estaciones desde 88.1 MHz hasta 108.1 MHz) en un total de 68 segundos.

### **7.4.3 Guardar estaciones ingresadas por el usuario en modo manual**

Como se ha mencionado anteriormente, durante la ejecución del sistema en modo manual es posible para el usuario ingresar cinco estaciones o frecuencias de radio sobre las cuales se transmitirá el mensaje de alerta. Para complementar esta funcionalidad, se agregó a la interfaz la opción de poder guardar en un archivo de texto plano una lista con las estaciones ingresadas manualmente.

Este archivo de texto se ubica en la misma ruta donde se encuentra el script de Python que contiene el programa y se carga automáticamente al iniciar el sistema. De no existir dicha lista, o si ésta ha sido eliminada, el programa genera un archivo automáticamente y carga las cinco primeras frecuencias de radio disponibles para la transmisión en FM.

### **7.4.4 Inicio automático al arrancar el sistema operativo**

Otro beneficio que se obtiene al trabajar con el archivo de código Python (.py) de un diseño en vez de manejarlo a través del entorno de trabajo de GNU Radio es que, una vez que se encuentra terminado, se puede ejecutar el archivo *py* directamente desde la línea de comandos o a través de un script que llame a su ejecución, eliminando la necesidad de iniciar un programa adicional para poder colocar en funcionamiento el sistema de alerta.

Dada la necesidad de que el sistema de alerta pueda ser iniciado de forma rápida en cualquier momento, se decidió que lo mejor sería ejecutarlo inmediatamente después que arranque el sistema operativo. Dejando el sistema listo para su funcionamiento en aproximadamente 2 minutos desde que es encendido.

## **8 Instalación del sistema de alerta en un vehículo de emergencia**

En principio podría establecerse que existe un tipo de vehículo específico para cada fuerza pública destinada a atender emergencias, sin embargo, en la realidad se puede verificar con facilidad que esta diferenciación se extiende a un nivel inferior de granularidad puesto que dentro de un tipo de servicio público destinado a atender emergencias pueden existir distintos tipos de vehículo según las actividades a las cuales dicho vehículo está destinado. Por citar un ejemplo, dentro del cuerpo de bomberos de Guayaquil pueden existir, dependiendo del tamaño de la compañía, los siguientes tipos de vehículo:

- Tanquero
- Camión escalera
- Camión canasta
- Unidad de bomberos
- Vehículos de movilización para Jefes

Los cuales poseen distintas configuraciones de espacio, unos son más amplios mientras que otros son más pequeños y angostos, esto genera la necesidad de poder adaptar el sistema de alerta en cada caso según la disponibilidad del espacio dentro del vehículo

Por esto, cada elemento que conforma el prototipo diseñado puede ser instalado en distintas ubicaciones del vehículo de emergencia. Por ejemplo, en la Figura 71 se puede apreciar que el USRP, el amplificador de potencia, la computadora y la fuente de voltaje DC han sido ubicadas bajo el asiento del copiloto, mientras que la pantalla táctil se ubica directamente sobre el tablero, tal como se muestra en la Figura 72.



Figura 71: Ubicación de los elementos del prototipo de sistema de alerta en un camión cisterna.



Figura 72: Personal del cuerpo de bomberos haciendo una demostración del uso de la pantalla táctil del sistema de alerta.

La configuración anterior es posible gracias a que la unidad sobre la que se instaló es un camión cisterna del cuerpo de bomberos, el cual posee gran espacio bajo los asientos de la cabina del copiloto, no obstante, en otros vehículos de menor tamaño, tales como ambulancias, vehículos de policía, etc. Se puede variar la posición de cada elemento del sistema de acuerdo al espacio del que se disponga gracias a que el prototipo presenta una configuración modular con elementos independientes para cada etapa. En la Figura 73 se muestra una vista general de la conexión de los elementos que conforman el prototipo de sistema de alerta.



Figura 73: Conexión de los elementos del sistema de alerta dispuestos en el laboratorio.

## 9 Resultados

Se realizaron pruebas de transmisión de tal forma que se pueda visualizar la interferencia realizada por el prototipo de alerta sobre la efectuada por las estaciones comerciales de radio FM. Para esto, se tomó como referencia la estación de radio con mayor potencia en el área donde se realizaron las pruebas, la cual resultó ser 102.9MHz.

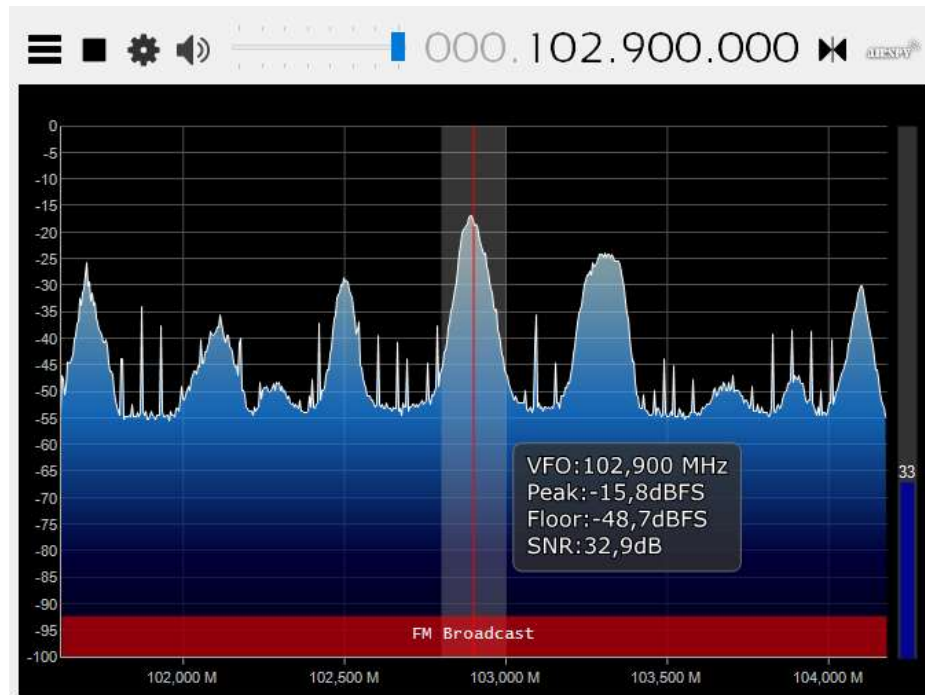


Figura 74: Niveles de recepción de la frecuencia 102.9 MHz.

Se configuró el sistema de alerta para utilizarlo en modo manual de manera que se mantenga únicamente transmitiendo en la frecuencia antes mencionada.



Figura 75: Interfaz gráfica del sistema de alerta configurado en modo manual para transmitir únicamente en la frecuencia de 102.9 MHz.

A continuación, se muestran los gráficos comparativos indicando niveles de potencia de transmisión que se tienen tanto para la estación de radio comercial FM, así como para la señal emitida por el prototipo de alerta en la frecuencia de 102.9MHz; esto tomando en cuenta las dos plataformas de hardware USRP 2920 y HackRF One.

### 9.1.1 Niveles de potencia emitidos por la estación de radio comercial

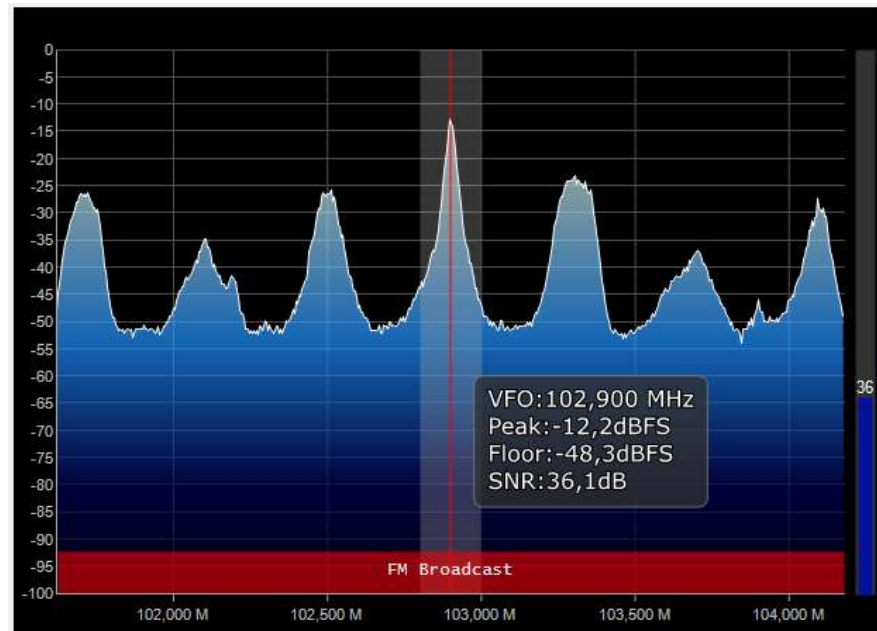


Figura 76: Niveles de potencia referenciales de la radio comercial en la frecuencia 102.9 MHz.

Como se puede apreciar, El nivel de potencia de la frecuencia central presenta un pico promedio de -12.2dBFS y las frecuencias de los canales adyacentes aproximadamente -25dBFS. Todo esto tomando en cuenta un piso de -48.3dBFS.

### 9.1.2 Niveles de potencia emitidos por el prototipo de sistema de alerta

#### Prueba realizada con el hardware US RP NI 2920

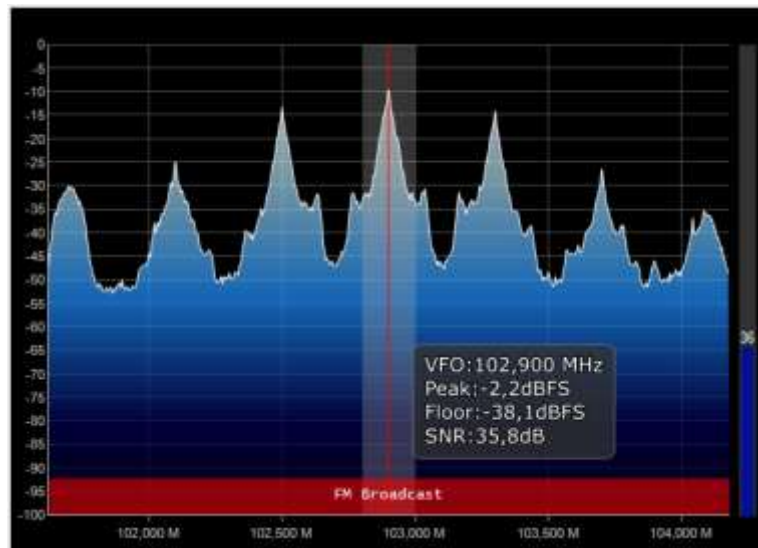


Figura 77: Niveles de potencia emitidos por el sistema de alerta con el USRP 2920.

#### Prueba realizada con el hardware HackRF One

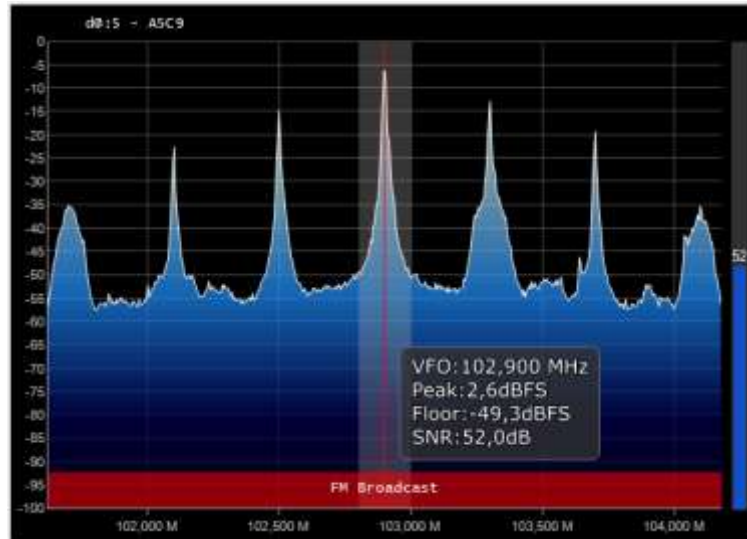


Figura 78: Niveles de potencia emitidos por el sistema de alerta con el RDS HackRF One.

Como se evidencia en las capturas antes mostradas, se ha logrado superponer la transmisión realizada por el prototipo de sistema de alerta por sobre la señal de la estación de radio comercial en la frecuencia antes escogida para objeto de esta prueba, además también se puede verificar que los niveles de potencia de las estaciones de radio de los canales adyacentes ubicados inmediatamente antes y después de la frecuencia central son de igual manera superados por los niveles de transmisión del prototipo de sistema de alerta en estas mismas frecuencias.



## 10 Análisis de resultados

Las pruebas iniciales realizadas con el prototipo han generado resultados satisfactorios según lo planteado en cuanto a funcionalidad y eficiencia del prototipo. A continuación, se muestra un análisis de estos resultados de manera detallada relacionándolos de forma directa con cada uno de los objetivos específicos planteados al inicio del presente trabajo.

En el primero de los cuatro objetivos específicos se propone “Diseñar y programar un sistema de transmisión de señales en Frecuencia Modulada utilizando el software libre GNU Radio 3.7 y Python 2.7 sobre una plataforma Linux Ubuntu 17.04”. La intención reflejada en este punto responde a la necesidad de lograr que la plataforma del sistema de alerta para vehículos de emergencia sea un producto cuya implementación resulte factible en el aspecto económico y logístico, por tanto, se propuso con este objetivo disminuir o eliminar por completo los costos de implementación relacionados al pago de licencias de software, ya sean éstas de sistema operativo, utilidades, herramientas de desarrollo, etc.

Tomando como referencia trabajos anteriores de enfoque similar en los cuales se ha hecho uso de sistemas operativos licenciados y herramientas de diseño y desarrollo de elevados costos, se ha podido lograr que, para el presente trabajo, estos rubros sean eliminados por completo gracias a la utilización de herramientas de software de libre acceso. Una de estas herramientas es el sistema operativo Linux, más precisamente Ubuntu, la cual es una versión que requiere escasos recursos para su implementación y, al ser de libre distribución, no representa gastos monetarios en licencias para poder ser utilizado, no así el sistema operativo Microsoft Windows cuyo costo es de 289 dólares americanos para la versión Pro según la tienda Windows Store (a la fecha, 7 de noviembre de 2017).

Adicional a esto, también se utilizó dos herramientas de diseño y desarrollo, también de software libre, para el desarrollo integral del sistema de alerta: GNU Radio y Python, los cuales son completamente gratis en su total funcionalidad en contraste con el software de LabView utilizado en trabajos anteriores, cuyo costo en licencias puede llegar a ser de hasta 5500 dólares americanos en la versión profesional.

El hecho de que se haya podido desarrollar la totalidad del prototipo de sistema de alerta sin necesidad de utilizar software de pago lleva a la conclusión de que la compra de este software con costosas licencias de pago, tanto para desarrollar o para implementar el sistema de alerta generado en el presente trabajo resulta ser innecesario. En el caso del software Labview, este está orientado para ser usado más precisamente en el ámbito educativo o científico, debido a que contiene una amplia gama de funcionalidades aplicables al diseño en varias ramas de la ingeniería y de la ciencia en general, por esto terminaría siendo infrautilizado dado el alcance del proyecto desarrollado en el presente trabajo. Es similar en el caso del sistema operativo Microsoft Windows, un sistema operativo multipropósito, diseñado para ejecutar las tareas cotidianas que pudiera necesitar un usuario común en un ordenador promedio. El uso de un sistema operativo ligero, como lo es la distribución Ubuntu de Linux, disminuye la cantidad de poder de procesamiento que se desperdicia en tareas y procesos que son ajenos al funcionamiento del sistema de alerta y que en realidad resultan innecesarios. Basados en este hecho, se puede afirmar que Ubuntu Linux permite también extender las posibilidades en cuanto al hardware que se puede utilizar para la etapa de procesamiento de la señal, reduciendo drásticamente los requerimientos del sistema lo cual permite utilizar computadores de más bajo costo.



Se espera que a futuro existan sistemas embebidos con una capacidad de procesamiento suficiente como para que puedan ejecutar las tareas que requiere el control y procesamiento de las señales, lo cual de ser posible reduciría aún más el costo de implementación del sistema de alerta. A modo de referencia, se conoce que por el momento el sistema embebido Raspberry Pi, uno de los más desarrollados, no presenta suficiente poder de procesamiento como para desempeñar las tareas requeridas por el sistema de alerta, por lo que se optó por utilizar un computador en formato mini (cubo de 12 x 12 centímetros) de bajo costo y prestaciones suficientes como lo es el sistema NUC de Intel Corporation, cuyo valor no supera los \$300 dólares americanos y sus características cumplen con lo requerido por el sistema de alerta.

En cuanto a la eficacia e idoneidad de los elementos de software que se decidió utilizar para el presente trabajo, cabe destacar que representan una opción más que suficiente para lograr las funcionalidades desarrolladas para el sistema, y en algunos casos incluso presentan mejores características que sus contrapartes de pago. Tal es el caso del software GNU Radio, el cual permite realizar cualquier tipo de modificaciones al código fuente de los diagramas esquemáticos generados, gracias al uso del lenguaje de programación Python, esto es un factor clave puesto que la gran mayoría de funciones que fueron desarrolladas para el sistema de alerta han sido producto de realizar dichas modificaciones al código fuente del esquemático para un transmisor FM básico.

La operatividad del sistema de transmisión de señales en frecuencia modulada desarrollado completamente en GNU Radio y Python ha quedado también demostrada a través de las pruebas realizadas en las que se puede apreciar gracias a los gráficos obtenidos que es posible realizar la superposición de la señal emitida por el sistema de alerta sobre la señal emitida por las estaciones de radio comercial FM.

Como segundo punto entre los objetivos específicos considerados para el presente trabajo, se propone “Diseñar una interfaz gráfica que permita al usuario manipular el sistema con facilidad”. Esto fue incluido entre los planteamientos puntuales principales debido a que se quiere presentar el sistema de alerta como un producto cuya implementación sea factible y para esto es necesario que dicho producto tenga un enfoque orientado al usuario lo cual por consiguiente implica que éste sea de fácil manejo, esto es primordial dada la naturaleza del medio en el cual se pretende dar uso al sistema de alerta, esto es, que el usuario del sistema será casi siempre personal de servicio público atendiendo una emergencia y en esta situación no debe existir contratiempo alguno que pueda ser generado por dificultades en la operación del sistema de alerta o de ningún otro elemento o herramienta de esta índole.

Se ha diseñado una interfaz gráfica amigable al usuario, de simple manejo, pero completamente funcional, sin elementos innecesarios y con información clara sobre cada aspecto que interesa conocer al operador en cuanto al sistema en ejecución. Para empezar, se tiene una pantalla táctil de 7 pulgadas, con tecnología IPS la cual otorga mejor visibilidad del contenido en ángulos más abiertos de visión lo que permite más posibilidades al momento de ubicar la pantalla dentro de la cabina del vehículo de emergencia; además, al ser táctil, se elimina la necesidad de agregar dispositivos de entrada adicionales (teclado, ratón u otros).

En cuanto a la interfaz gráfica en sí, se ha diseñado de tal manera que incluya seis elementos interactivos los cuales son:

- Selector de botones radiales para el tipo de audio de alerta a transmitir según el vehículo de emergencia en donde se esté utilizando el sistema de alerta (ambulancia, bomberos, policía, agente de tránsito). Es posible seleccionar solo una de estas opciones pudiendo escogerse y tomar acción al instante en cualquier momento de la ejecución del programa. Por defecto la opción seleccionada al arrancar el programa es la primera (ambulancia).
- Selector de botones radiales para el modo de funcionamiento (manual o automático) la selección puede realizarse en cualquier momento de la ejecución del programa y tomará acción al instante luego de ser escogido el modo de funcionamiento.
- Botones para ingresar las cinco frecuencias de radio sobre las cuales se va a transmitir mientras el sistema se encuentre en el modo de funcionamiento manual. Para cada uno de los cinco espacios disponibles para ingresar dichas frecuencias se tienen dos botones: uno para incrementar y otro para disminuir la frecuencia directamente de canal en canal sin pasar por frecuencias intermedias, y con función de 'mantener presionado' para acelerar la búsqueda de la frecuencia deseada. Cabe indicar que estos botones se desactivan automáticamente cuando se selecciona el modo de funcionamiento automático.
- Selector de tipo 'slider' para elegir la potencia de transmisión que se aplicará a la salida del dispositivo de RDS (rango de 0 a 40 dBm). Por lo general este valor debe mantenerse en 0, sin embargo, esto depende más bien de si el amplificador de potencia que se quiera utilizar lo requiere o no.
- Botón de guardar, que permite almacenar las frecuencias ingresadas por el usuario en el modo de funcionamiento manual, de forma que la próxima vez que se inicie el programa no haya necesidad de volver a seleccionar las frecuencias deseadas para la transmisión en este modo. Este botón puede ser utilizado y su acción se ejecuta en cualquier momento de la ejecución del programa e independientemente del modo de funcionamiento en el que se encuentre el sistema.
- Botón de salir que incluye una pregunta adicional de confirmación para evitar que el usuario salga accidentalmente del programa y detenga la transmisión.

Adicional a los elementos mencionados, también se tienen tres indicadores visuales o 'labels' no interactivos que muestran las frecuencias en las cuales se está transmitiendo en cada momento de la ejecución del programa. Estas frecuencias de transmisión se muestran de izquierda a derecha en forma secuencial, es decir, la frecuencia del canal lateral a -400KHz de la frecuencia central, luego la frecuencia central, y finalmente la frecuencia del canal lateral a +400KHz de la frecuencia central.

Otro de los objetivos planteados para el desarrollo del presente proyecto fue "Implementar compatibilidad del sistema de transmisión diseñado para su uso con las plataformas de Radio Definida por Software National Instruments USRP 2920 y Great Scott Gadgets HackRF One" Este objetivo se planteó con miras a cubrir dos escenarios diferentes en cuanto al uso del dispositivo de alerta para vehículos de emergencia.

Inicialmente, el desarrollo del sistema de transmisión en frecuencia modulada se realizó utilizando como elemento de hardware de radio definida por software (RDS) al USRP 2920 de National Instruments, esto debido a que se tenía la facilidad de trabajar con este dispositivo en las instalaciones de la Universidad, en el laboratorio de telecomunicaciones, además de que existía mayor información sobre cómo trabajar con este elemento de hardware desde el software de GNU Radio, facilitando la tarea de desarrollar la etapa de transmisión en frecuencia modulada del sistema de alerta. Más adelante, se desarrolló la compatibilidad del sistema con el dispositivo HackRF One, fabricado por la empresa Great Scott Gadgets. Este dispositivo fue seleccionado debido a que, de entre las diferentes opciones de hardware para radio definida por software, es el que presenta las mejores características en relación a su precio; mientras que un USRP 2920 tiene un precio aproximado de \$3500 dólares americanos, el HackRF One tiene un costo de \$317 (ambos precios consultados a la fecha del 7 de noviembre de 2017). El HackRF One no presenta problemas de rendimiento durante la ejecución del programa del sistema de alerta y su funcionamiento es prácticamente igual al del USRP 2920, a diferencia de que éste se conecta vía USB y no por Gigabit Ethernet.

La idea de mantener la compatibilidad con el hardware USRP 2920, es que a futuro se pueda seguir desarrollando y mejorando la plataforma del sistema de alerta para vehículos de emergencia, de esta manera, los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana podrán utilizar dicho dispositivo de RDS en los laboratorios de esta institución para agregar nuevas funcionalidades o mejoras sobre lo que se tiene actualmente, sin necesidad de adquirir nuevos dispositivos de radio definida por software. Por otro lado, el desarrollo de compatibilidad con la plataforma HackRF One apunta a disminuir los costos de implementación del sistema de alerta, haciéndolo aún más factible sumado a la eliminación de costos por licencias en software mencionada anteriormente en esta sección.

Para manejar la compatibilidad con ambas plataformas de hardware se han generado dos scripts ejecutables distintos para el programa del sistema de alerta, cada uno según el hardware de RDS con el que vaya a ser utilizado. Esto se decidió así puesto que, a pesar de poder implementar la funcionalidad con ambos dispositivos dentro de un mismo programa ejecutable, esto no tendría un propósito práctico real dado el hecho de que el producto final debería ser implementado en los vehículos de emergencia con el hardware de menor costo y que, además, como se indicó anteriormente, la compatibilidad con el USRP 2920 responde únicamente a propósitos de desarrollo a futuro de la plataforma del sistema de alerta.

Finalmente, el último de los objetivos específicos plantea “Transmitir el mensaje de alerta audible sobre una frecuencia portadora central y dos frecuencias portadoras adyacentes a  $\pm 400$  KHz simultáneamente, dentro del rango del espectro radioeléctrico para la banda FM (88.1 MHz - 107.9 MHz)” Esto responde a la necesidad de incrementar en lo mayor posible el rango de alcance de la alerta audible emitida por el sistema. En trabajos anteriores similares se ha logrado realizar la interferencia sobre las estaciones de radio comercial FM en una sola frecuencia específica a la vez, lo cual disminuye las posibilidades de alcance del sistema de alerta puesto que no todos los usuarios de la radio comercial sintonizan la misma emisora al mismo tiempo y realizar un barrido entre todas las emisoras de una en una representaría emplear un tiempo significativamente alto, poco práctico para los fines que se pretende alcanzar. En la tabla 12 se muestran los valores promedio obtenidos a partir de la medición, con un analizador de espectro de radio, de la potencia de recepción que se tiene para cada una de las estaciones de radio comercial FM en la ciudad de Guayaquil. Estas mediciones son representadas visualmente en la Figura 79.

Frecuencia (MHz)	Piso de ruido (dBm)	Valor pico promedio (dBm)
88,1	-51,5	-18,8
88,5	-51,5	-27,5
88,9	-51,5	-36
89,3	-51,5	-23,3
89,7	-49,2	-20,5
90,1	-49,8	-20,6
90,5	-51,2	-16,5
90,9	-52,2	-26,9
91,3	-51,8	-27,9
91,7	-51,9	-22,1
92,1	-52,3	-22,2
92,5	-51,7	-20,1
92,9	-50,3	-26,9
93,3	-50,5	-36,9
93,7	-51,4	-32,3
94,1	-50,3	-21,5
94,5	-51,3	-18,5
94,9	-51,3	-23,3
95,3	-49,5	-22,6
95,7	-49,5	-17,6
96,1	-47,3	-14,2
96,5	-50,2	-24,5
96,9	-50,8	-28,1
97,3	-49,8	-28,5
97,7	-40,3	-20,4
98,1	-51,2	-40,1
98,5	-47,2	-18,7
98,9	-45,5	-27,8
99,3	-49,4	-16,6
99,7	-51,1	-23,5
100,1	-52,1	-35,2
100,5	-53,2	-35,1
100,9	-49,3	-22,2
101,3	-50,4	-14,5
101,7	-50,5	-21,2
102,1	-52,5	-23,5
102,5	-50,2	-15,2
102,9	-50,9	-17,3
103,3	-50,3	-21,2
103,7	-52,2	-44,8
104,1	-51,2	-29,4
104,5	-51,2	-20,9
104,9	-50,9	-33,8
105,3	-50,8	-21,5
105,7	-52,4	-29,5
106,1	-51,4	-13,2
106,5	-49,3	-18,5
106,9	-50,5	-33,3
107,3	-52,2	-27,2
107,7	-52,7	-26,6

Tabla 12: Potencia de recepción medida para todas las estaciones de radio comercial FM en la ciudad de Guayaquil.

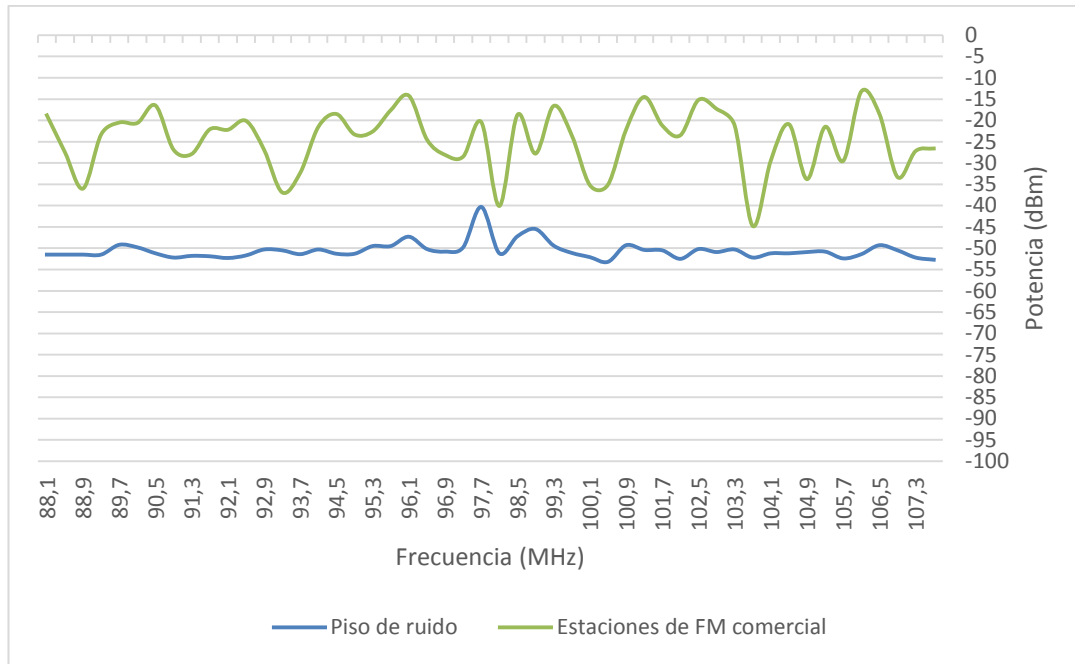


Figura 79: Valores de potencia de recepción para cada estación de radio comercial FM de la ciudad de Guayaquil.

La potencia de transmisión emitida por el dispositivo de alerta es más alta que el promedio de la potencia medida para las estaciones de radio, lo cual le permite que los receptores capten esta señal en vez de la emitida por las estaciones de FM comercial. Esto se muestra en la Figura 80, donde se puede apreciar que las mediciones de potencia del sistema de alerta superan en todo momento a las de las estaciones de radio comercial.

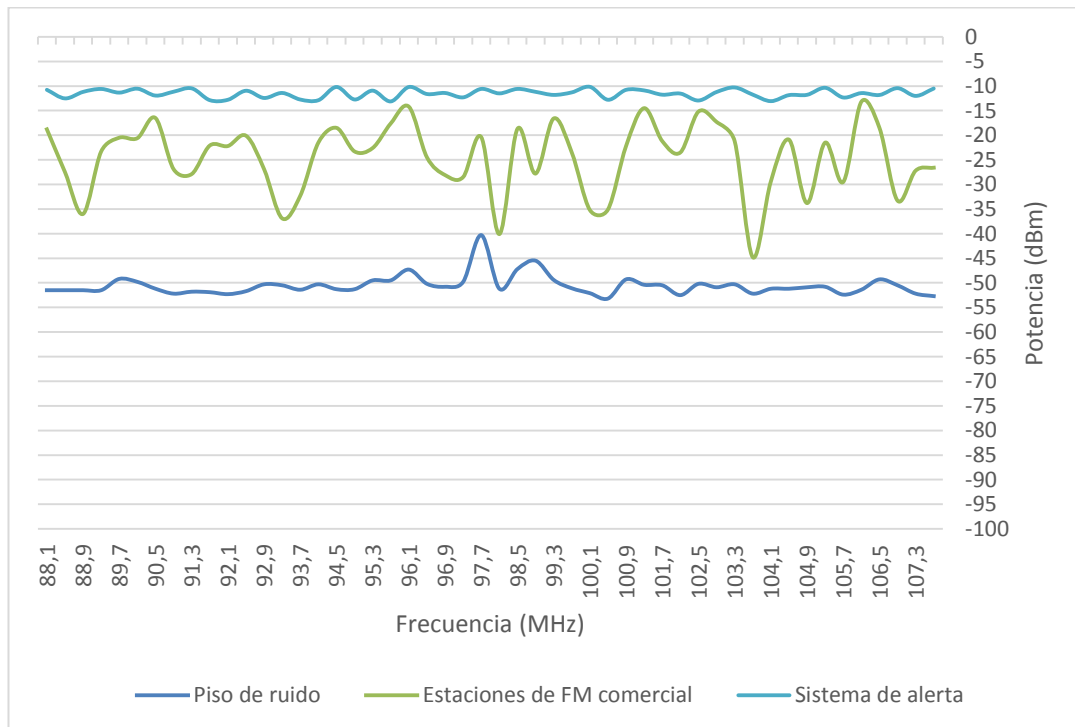


Figura 80: Comparación entre los niveles de potencia medidos para las estaciones de radio comercial FM y el sistema de alerta para vehículos de emergencia.

Frecuencia (MHz)	Piso de ruido (dBm)	Potencia medida (FM Comercial) (dBm)	Potencia medida (Sistema de alerta) (dBm)
88,1	-51,5	-18,8	-10,77
88,5	-51,5	-27,5	-12,52
88,9	-51,5	-36	-11,19
89,3	-51,5	-23,3	-10,60
89,7	-49,2	-20,5	-11,34
90,1	-49,8	-20,6	-10,54
90,5	-51,2	-16,5	-11,94
90,9	-52,2	-26,9	-11,16
91,3	-51,8	-27,9	-10,47
91,7	-51,9	-22,1	-12,87
92,1	-52,3	-22,2	-12,80
92,5	-51,7	-20,1	-10,96
92,9	-50,3	-26,9	-12,43
93,3	-50,5	-36,9	-11,41
93,7	-51,4	-32,3	-12,75
94,1	-50,3	-21,5	-12,88
94,5	-51,3	-18,5	-10,19
94,9	-51,3	-23,3	-12,74
95,3	-49,5	-22,6	-10,94
95,7	-49,5	-17,6	-13,13
96,1	-47,3	-14,2	-10,20
96,5	-50,2	-24,5	-11,63
96,9	-50,8	-28,1	-11,41
97,3	-49,8	-28,5	-12,30
97,7	-40,3	-20,4	-10,58
98,1	-51,2	-40,1	-11,50
98,5	-47,2	-18,7	-10,59
98,9	-45,5	-27,8	-11,18
99,3	-49,4	-16,6	-11,80
99,7	-51,1	-23,5	-11,30
100,1	-52,1	-35,2	-10,16
100,5	-53,2	-35,1	-12,80
100,9	-49,3	-22,2	-10,78
101,3	-50,4	-14,5	-10,90
101,7	-50,5	-21,2	-11,77
102,1	-52,5	-23,5	-11,54
102,5	-50,2	-15,2	-12,95
102,9	-50,9	-17,3	-11,22
103,3	-50,3	-21,2	-10,30
103,7	-52,2	-44,8	-11,75
104,1	-51,2	-29,4	-13,07
104,5	-51,2	-20,9	-11,85
104,9	-50,9	-33,8	-11,79
105,3	-50,8	-21,5	-10,36
105,7	-52,4	-29,5	-12,33
106,1	-51,4	-13,2	-11,44
106,5	-49,3	-18,5	-11,83
106,9	-50,5	-33,3	-10,44
107,3	-52,2	-27,2	-12,01
107,7	-52,7	-26,6	-10,51

Tabla 13: Niveles de potencia medidos para el sistema de alerta comparados con los de la radio comercial FM.

Tomando como base lo anterior, y tal como se demostró para el caso puntual de la frecuencia 102.9 MHz estudiado en la sección de pruebas, se determina que ha sido posible realizar una superposición de la señal emitida por el sistema de alerta sobre la que transmiten las estaciones de radio comercial FM. Esto se realiza además en tres frecuencias simultáneamente, lo que permite realizar la transmisión de un mensaje de alerta audible de cuatro segundos de duración en todas las frecuencias de radio comercial (desde 88.1 MHz hasta 107.7 MHz) en tan solo 68 segundos, tarea que tardaría en completarse 3,33 minutos si se tuviera que transmitir el mismo mensaje, con la misma duración de 4 segundos, pero pasando por las frecuencias de una en una. Esta mejora en el tiempo de difusión de la alerta permite alcanzar a una mayor cantidad de potenciales radioescuchas en un tiempo más corto, aumentando la efectividad del sistema de alerta, y se consigue gracias a que la transmisión del mensaje de alerta se realiza simultáneamente en tres canales y no sólo en uno.

### **Consideraciones sobre el efecto Doppler**

El efecto Doppler es el cambio aparente en la frecuencia que experimenta un observador cuando existe un movimiento relativo entre éste y la fuente que produce las ondas. Cabe aclarar que, para efectos de análisis con ondas de radio, el efecto Doppler no representa un mayor inconveniente puesto que las velocidades relativas entre el observador y la fuente de las ondas son despreciables con respecto a la velocidad de propagación de las ondas de radio, las cuales viajan a la velocidad de la luz. Entonces, por citar un ejemplo, un observador estacionario, séase un vehículo privado en un atasco de tráfico, no experimentará un cambio significativo en la frecuencia de las ondas de radio que llegan a su receptor de FM transmitidas desde el sistema de alerta para vehículos de emergencia instalado en una ambulancia que se mueve con una velocidad de 90Km/h hacia el punto en el que se encuentra el atasco de tráfico. La variación aparente en la frecuencia percibida por el conductor estacionario existe sin duda, pero se calcula que dicha variación sería de aproximadamente 10 Hz tomando en cuenta la velocidad a la que podría moverse una ambulancia o cualquier otro vehículo de emergencia en estado operativo, esta mínima diferencia en la frecuencia percibida por el receptor es completamente despreciable en comparación con las frecuencias utilizadas para la transmisión, las cuales se ubican en el orden de decenas de millones a cientos de millones de ciclos por segundo.

### **Armónicos de las frecuencias de transmisión**

Durante las pruebas realizadas, se pudo evidenciar que la transmisión del mensaje de alerta se realiza no solo en las tres frecuencias indicadas para este fin, sino que también existen réplicas de esta transmisión en frecuencias de canales más lejanos, fenómeno que se atribuye a las condiciones intrínsecas de los dispositivos USRP 2920 y HackRF One los cuales al no ser dispositivos diseñados específicamente para ser utilizados en escenarios de transmisión en frecuencia modulada carecen de algunos elementos necesarios para regular la transmisión y limitarla a las frecuencias especificadas. Un elemento de este tipo podría ser un equipo de filtro pasa bajos, el cual se encargaría de evitar la generación de este tipo de señales armónicas. Estos filtros se utilizan en forma de equipos físicos ubicados en las estaciones de radio y en las bases repetidoras. Cabe aclarar, sin embargo, que las frecuencias armónicas sobre las cuales se realiza esta transmisión adicional están ubicadas exactamente en los canales en los que se ubican otras estaciones de radio comercial, por lo cual resultaría en algunos casos provechoso, puesto que la transmisión del mensaje de alerta audible se realizaría también en estas frecuencias, aumentando así el alcance global de la transmisión de alerta.

No obstante, al tener esta transmisión sobre armónicos una baja potencia, no siempre será posible superponerse a la señal emitida por las estaciones de radio comercial, más precisamente en aquellas que presentan altos niveles de potencia de transmisión como lo son las estaciones de radio más populares o las más cercanas al punto desde el cual se esté realizando la transmisión del sistema de alerta instalado en el vehículo de emergencia. A diferencia de lo expuesto anteriormente, existen canales del espectro designado para transmisiones en frecuencia modulada que no han sido aún asignados a estaciones de radio comercial y se encuentran vacíos, es decir que no se realiza transmisión alguna de señales sobre ellos, así también existen estaciones de radio que no presentan una buena potencia de transmisión en algunas áreas de la ciudad, en estos casos, la transmisión efectuada por el sistema de alerta sobre las frecuencias armónicas se recibiría sin problemas por los receptores de FM.

## **11 Conclusiones y recomendaciones**

El sistema desarrollado en el presente trabajo representa una importante mejora en los medios de alerta que poseen actualmente los vehículos de emergencia, al ser estos últimos prácticamente los mismos desde hace décadas, se concluye por tanto que, aplicar dicho sistema resultaría beneficioso para las diferentes instituciones públicas encargadas de atender emergencias de toda índole puesto que con esto es posible brindar atención más oportuna a los requerimientos de la ciudadanía.

Se concluye que la distribución modular de cada uno de los elementos que componen el prototipo de sistema de alerta para vehículos de emergencia desarrollado en el presente trabajo permite que su instalación sea relativamente sencilla y acoplable a cada tipo de vehículo en el cual se desee implementar, esto incrementa la factibilidad de incluir este sistema de alerta en los vehículos de emergencia de la ciudad.

Los dispositivos de hardware de radio definida por software (RDS) utilizados para la creación del prototipo desarrollado en el presente trabajo resultan ser las mejores opciones al momento. Sin embargo, se recomienda mantener el sistema actualizado en cuanto a este aspecto, puesto que con el tiempo se pueden ir generando nuevos dispositivos con mejores prestaciones y aún más económicos que los actuales, lo cual disminuiría el costo de implementación del sistema de alerta.

El trabajo actual ha sido desarrollado tomando en cuenta que el espacio entre cada frecuencia utilizada por las estaciones de radio comercial es de 400KHz. Se recomienda revisar las condiciones y normativas para la transmisión en frecuencia modulada si se pretende extender el uso del dispositivo en otra localidad que no sea en la cual se desarrolló el prototipo.

Se recomienda revisar las consideraciones legales actuales que de alguna u otra forma entran en conflicto con el modelo de funcionamiento y el alcance que tiene el sistema desarrollado en el presente trabajo. Sería oportuno incluir a los sistemas de alerta basados en la transmisión de mensajes de alerta en frecuencia modulada como una excepción en las prohibiciones de interferencia en las señales de radio, puesto que su único fin es el de otorgar un beneficio a la comunidad.



## 12 Referencias bibliográficas

- [1] Fire and Disaster Management Agency of Japan, *Effect of First Aid for Cardiopulmonary Arrest*, Tokyo, 2012.
- [2] Center for Evaluation of Emergency Medical Services, Emergency Medical Services Division, «Predicting survival from out-of-hospital cardiac arrest: a graphic model,» *Annals of Emergency Medicine*, nº 22, pp. 1652-1658, 1993.
- [3] F. MD, J. LM, M. SF y F. RK, «A correlation of response time and results of abdominal gunshot wounds,» *Archives of Surgery*, nº 121, pp. 902-904, 1986.
- [4] F. S, H. JR, S. E y I. L, «Does out-of-hospital EMS time affect trauma survival?,» *American Journal of Emergency Medicine*, nº 13, pp. 133-135, 1995.
- [5] Diario La Hora, «Ambulancias aún no cumplen el tiempo óptimo de respuesta,» Quito, 2015.
- [6] M. Balseca y L. Lucas Jurado, *Diseño e implementación de un sistema prototipo en vehículos de emergencia ciudadana para la transmisión de mensajes de alerta de voz hacia radio receptoras FM en vehículos públicos y privados mediante el uso de USRP y Software de control programable*, Guayaquil, 2014.
- [7] Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión (CONARTEL), *Reglamento De Radiodifusión en Frecuencia Modulada Analógica*, Quito, 2000.
- [8] T. Wayne, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, México: Pearson, 2003.
- [9] L. W. Couch, *Sistemas de Comunicación Digital y Analógico*, Séptima ed., México: Pearson, 2008.
- [10] L. E. Frenzel, *Sistemas Electrónicos de Comunicación*, México: Alfaomega, 2003.
- [11] J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [12] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Segunda ed., Londres: John Wiley & Sons, 2000.
- [13] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Segunda ed., Prentice Hall, 2002.
- [14] S. Gallardo, *Elementos de sistemas de telecomunicaciones*, Primera ed., Madrid: Paraninfo, 2015.
- [15] S. R. Saunders, *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*, West Sussex: Wiley, 1999.
- [16] S. Winder y J. Carr, *Newnes Radio and RF Engineer's Pocket Book*, 2002.
- [17] D. Hall, *Testing Wireless Receivers with Recorded RF Spectrum*, National Instruments, 2012.
- [18] J. Balcells, *Interferencias Electromagnéticas En Sistemas Electrónicos*, Madrid, 1992.

- [19] J. Beltrán, *Estudio de la interferencia entre la red inalámbrica de área local y el equipo médico de un hospital*, Quito, 2007.
- [20] Audio-Technica, «Tipos de Interferencias,» [En línea]. Available: <http://www.audio-technica.com/cms/site/26971e97bf9429d3/index.html>.
- [21] A. Bateman, *Digital Communication*, New York: Addison-Wesley, 2003.
- [22] T. Aoyama y G. Daumen, «Special Issue on Voice Coding for Communications,» *IEEE*, vol. 6, pp. 13-24, 1988.
- [23] R. Anderson y J. Salz, «Spectra of Digital FM,» *Bell System Technical Journal*, pp. 1165-1189, 1965.
- [24] Textos Científicos, *Modulación de Frecuencia – FM*, 2005.
- [25] J. M. Huidobro, «Antenas de Telecomunicaciones,» 2013.
- [26] Universidad Tecnológica Nacional de Mendoza, «Electrónica Aplicada III,» de *Amplificadores Lineales de Potencia RF*, 2014.
- [27] Fundación Escuela Latinoamericana de Redes, *Antenas y Líneas de Transmisión*, Caracas, 2010.
- [28] Amphenol Corporation, *Catalog No.1 - Type N*, Wallingford, 2014.
- [29] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), *Norma técnica para el servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica*, Quito, 2015.
- [30] F. Sanchez y F. Sagbay, *Estudio y Análisis de la Estandarización y Regulación para la migración del Sistema Analógico al Digital en el Ecuador*, Cuenca, 2007.
- [31] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), *Radiodifusión*, Quito.
- [32] M. Delgado, *Sistemas de Radio y Televisión*, Madrid: Thomson Learning, 2001.
- [33] T. Perales, *Radio y Televisión Digitales*, México: Limusa, 2006.
- [34] S. Minor y J. Speta, *Telecommunications Law and Policy*, Durham: Carolina Academic Press, 2015.
- [35] J. Mitola, «Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications,» de *IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, San Diego, CA, 1999.
- [36] J. Aguilar y A. Navarro, «Radio Cognitiva,» *Sistemas y Telemática*, vol. 9, nº 16, pp. 31-53, 2011.
- [37] H. Arslan, *Cognitive Radio Software Defined Radio and Adaptative Wireless Systems*, Florida: Springer, 2007.

- [38] B. Fette, *Cognitive Radio Technology*, Burlington, MA: Elsevier, 2006.
- [39] A. Quinteros, *SDR: La alternativa a la evolución inalámbrica a nivel físico*, Medellín, 2017.
- [40] M. Peralta y A. Sócolo, *Desarrollo de Sistemas de Comunicaciones usando tecnología libre de Radio Definida mediante Software*, Loja, 2014.
- [41] M. Ossmann, «Kickstarter,» [En línea]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/mossmann/hackrf-an-open-source-sdr-platform>. [Último acceso: 2017].
- [42] Ettus Research, *USRP N200/N210 Networked Series*, Mountain View, CA, 2012.
- [43] National Instrument, *Out-of-the-Box Video With NI USRP*, 2017.
- [44] M. Mueller, *What is GNU Radio and why do I Want it*, 2017.
- [45] GNU Radio, *Guided GNU Radio Tutorials*, 2017.
- [46] National Instrument, *Labview*.
- [47] U. P. E. Libertador, *Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría en Tesis Doctorales*, Caracas, 2003.
- [48] M. Balestrini, *Cómo se Elabora el Proyecto de Investigación*, Caracas: Consultores y asociados, 1998.
- [49] Diario El Comercio, «Ambulancias triplican su tiempo de traslado por congestión e irrespeto,» Quito, 2015.
- [50] National Instrument, *Specifications - USRP 2920*, 2017.
- [51] Great Scott Gadgets, «HackRF One - An open source SDR platform,» 2016. [En línea]. Available: <https://greatscottgadgets.com/hackrf/>. [Último acceso: 24 10 2017].
- [52] Intel Corporation, «Kit de Intel NUC DN2820FYKH,» [En línea]. Available: <https://ark.intel.com/es/products/78953/Intel-NUC-Kit-DN2820FYKH>. [Último acceso: 24 10 2017].
- [53] Mini-Circuits (Scientific Components Corporation), *Coaxial High Power Amplifier - ZHL-50W-52+*, Brooklyn.
- [54] Waveshare Electronics, *7inch HDMI LCD*.
- [55] Recursos Python, *Guía de estilo para el código Python – PEP 8 en Español*.

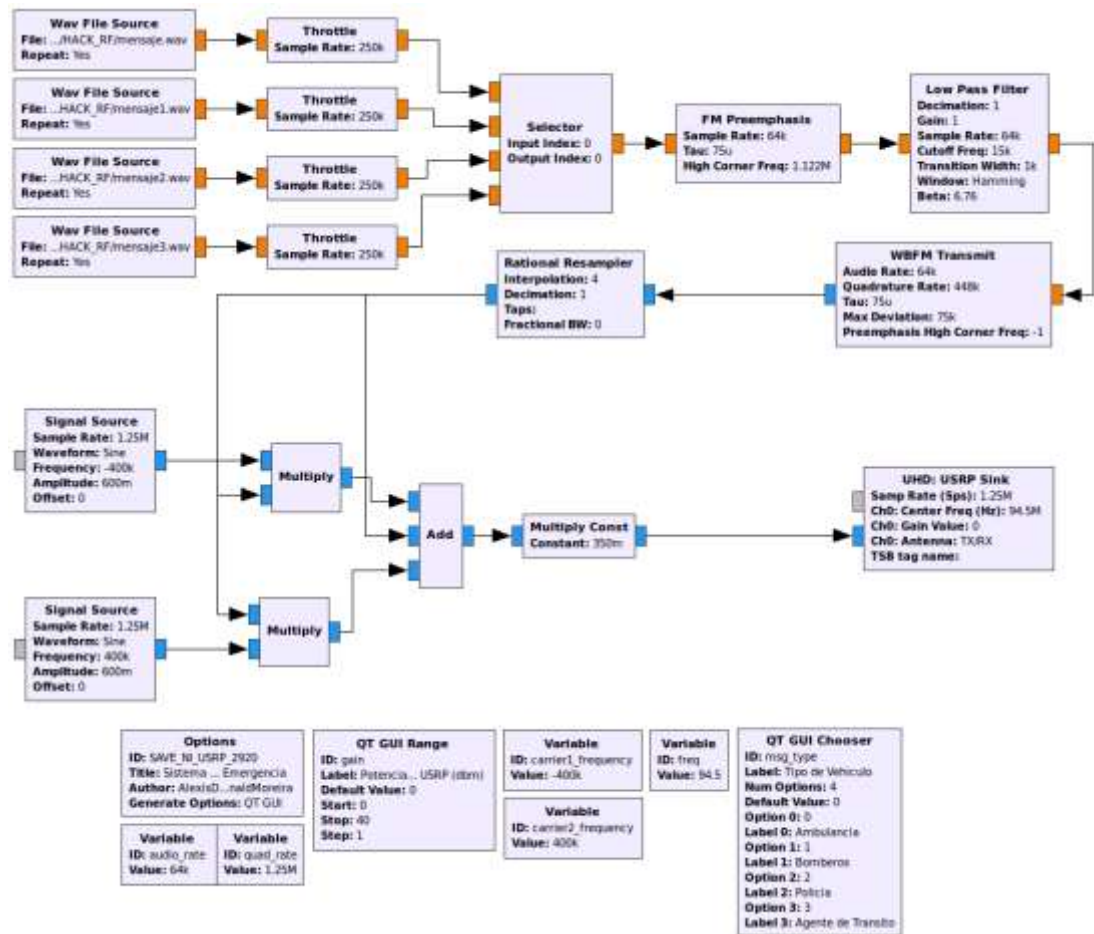
## 13 Anexos

### 13.1 Anexo 1: Tabla de grupos de frecuencias para distribución y asignación en el territorio nacional

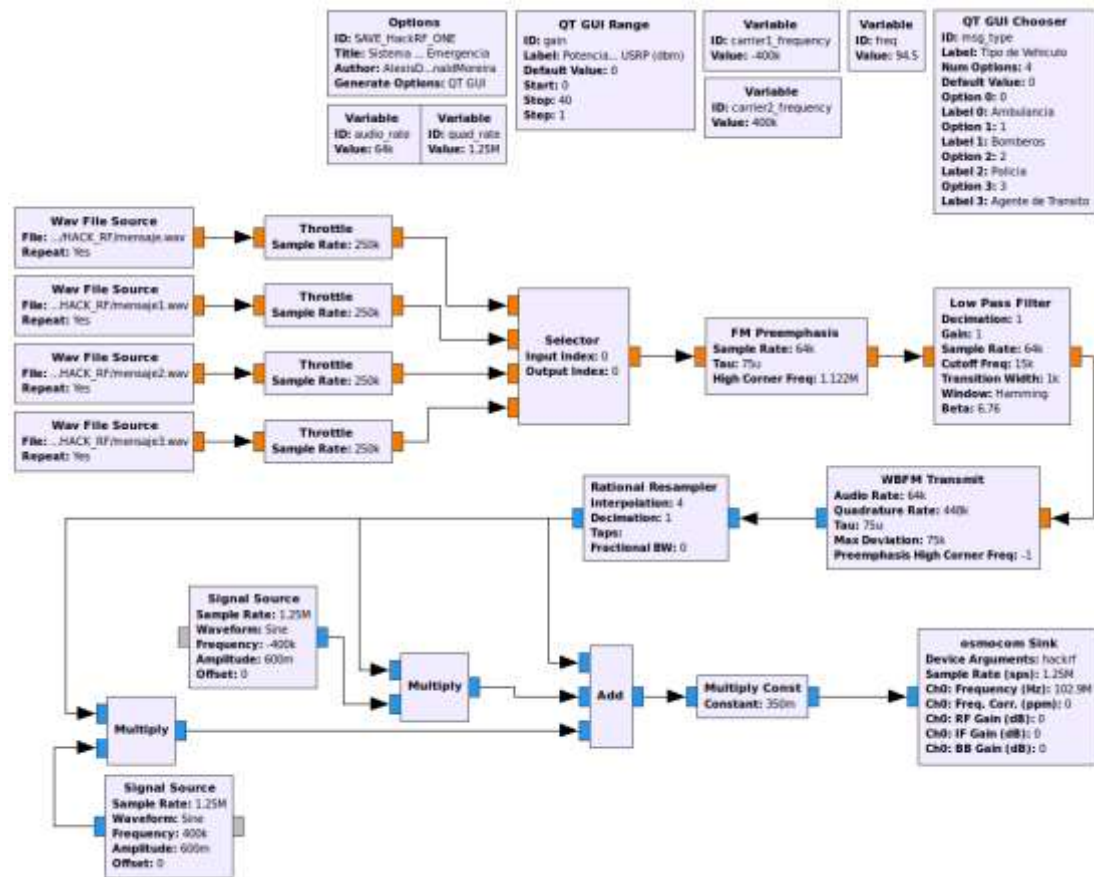
GRUPO 1 [G1]		GRUPO 2 [G2]		GRUPO 3 [G3]	
Nº	FRECUENCIA [MHz]	Nº	FRECUENCIA [MHz]	Nº	FRECUENCIA [MHz]
1	88.1	2	88.3	3	88.5
7	89.3	8	89.5	9	89.7
13	90.5	14	90.7	15	90.9
19	91.7	20	91.9	21	92.1
25	92.9	26	93.1	27	93.3
31	94.1	32	94.3	33	94.5
37	95.3	38	95.5	39	95.7
43	96.5	44	96.7	45	96.9
49	97.7	50	97.9	51	98.1
55	98.9	56	99.1	57	99.3
61	100.1	62	100.3	63	100.5
67	101.3	68	101.5	69	101.7
73	102.5	74	102.7	75	102.9
79	103.7	80	103.9	81	104.1
85	104.9	86	105.1	87	105.3
91	106.1	92	106.3	93	106.5
97	107.3	98	107.5	99	107.7

GRUPO 4 [G4]		GRUPO 5 [G5]		GRUPO 6 [G6]	
Nº	FRECUENCIA [MHz]	Nº	FRECUENCIA [MHz]	Nº	FRECUENCIA [MHz]
4	88.7	5	88.9	6	89.1
10	89.9	11	90.1	12	90.3
16	91.1	17	91.3	18	91.5
22	92.3	23	92.5	24	92.7
28	93.5	29	93.7	30	93.9
34	94.7	35	94.9	36	95.1
40	95.9	41	96.1	42	96.3
46	97.1	47	97.3	48	97.5
52	98.3	53	98.5	54	98.7
58	99.5	59	99.7	60	99.9
64	100.7	65	100.9	66	101.1
70	101.9	71	102.1	72	102.3
76	103.1	77	103.3	78	103.5
82	104.3	83	104.5	84	104.7
88	105.5	89	105.7	90	105.9
94	106.7	95	106.9	96	107.1
100	107.9				

## 13.2 Anexo 2: Diagrama de bloques de GNU Radio (para USRP 2920)



### 13.3 Anexo 3: Diagrama de bloques de GNU Radio (para HackRF One)



### 13.4 Anexo 4: Fotografías



Figura anexo 1: Disposición de la antena en el techo de un camión cisterna de bomberos.



Figura anexo 2: Elementos del prototipo de sistema de alerta conectados en el laboratorio.





Figura anexo 3: Elementos del prototipo de sistema de alerta dispuestos bajo el asiento de la cabina de un camión cisterna de bomberos.



Figura anexo 4: Ubicación del display táctil sobre el tablero de la cabina de un camión cisterna de bomberos.





Figura anexo 5: Elementos del prototipo de sistema de alerta distribuidos en módulos.