



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

**TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**Sistema de comunicación para escenarios de emergencia y desastre  
usando un UAV y tecnologías de radio definida mediante software.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN.**

**AUTORES:** Chamba Agila, Paola Cecibel.  
Imaicela Ordóñez, Carlos Iván.

**DIRECTOR:** Ing. Manuel Fernando Quiñones Cuenca, Mgtr.

**LOJA – ECUADOR**

**2018**



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2018

## **APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Mgr.

Manuel Fernando Quiñones Cuenca.

### **DOCENTE DE LA TITULACIÓN**

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “Sistema de comunicación para escenarios de emergencia y desastre usando un UAV y tecnologías de radio definida mediante software” realizado por: Chamba Agila Paola Cecibel e Imaicela Ordóñez Carlos Iván, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, febrero de 2018

f) .....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Nosotros, Chamba Agila Paola Cecibel e Imaicela Ordóñez Carlos Iván, declaramos ser autores del presente trabajo de titulación: “Sistema de comunicación para escenarios de emergencia y desastre usando un UAV y tecnologías de radio definida mediante software”, de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo el Ing. Manuel Fernando Quiñones Cuenca director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f. ....

Autor: Chamba Agila Paola Cecibel

Cédula: 110461118

f. ....

Autor: Imaicela Ordóñez Carlos Iván

Cédula: 1105578486

## DEDICATORIA

A mis padres, por su comprensión, consejos y apoyo incondicional que me han permitido llegar hasta este momento de mi vida profesional y ver cumplida mi meta. A mi familia por siempre estar presente a lo largo de mi vida estudiantil y ser un pilar fundamental en el cumplimiento de este logro. A mi hermano quien ha sido causa de superación con el único fin de ser tu ejemplo a seguir y superar. Y finalmente a mi gran amiga y “compañera” de tesis Paola por su amistad, perseverancia, dedicación y por haberme soportado todo este tiempo en la realización y cumplimiento de este trabajo.

Carlos

A mis padres, por creer en mí, por su apoyo y todo su amor, por darme ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, y porque el orgullo que sienten por mí fue lo que me hizo ir hasta el final. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia y mi coraje para conseguir mis objetivos. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.

A mis hermanos y cuñada por siempre estar presentes, por ser como mis segundos padres, por depositar su confianza y creer en mí, por apoyarme en todo lo que hago, por ser mis alcahuetes y consentirme tanto. Siempre serán un gran ejemplo para mí. A mi sobrino Matías quien ha sido y es una de mis motivaciones, inspiración y felicidad, para que veas en mi un ejemplo a seguir.

A todos mis amigos, especialmente a: Karla, Nixon, Sarita, Becky, Dianita y Marlon, por estar ahí compartiendo momentos agradables y momentos tristes, porque han estado conmigo dándome consejos y llenando mi vida de diversión, con ustedes la vida es más amena. Gracias por depositar su confianza en mí, por más de 10 años de amistad, y convertirse en mis hermanos.

A Carlos, mi amigo y compañero de tesis, por su confianza al permitirme conformar este gran equipo de trabajo, por su esfuerzo, dedicación, y sobre todo por su paciencia en la realización de este trabajo. Hemos aguantado mal genios momentáneos el uno del otro, pero hemos sabido sobrellevarlos ya que los causantes han sido la desesperación y el estrés. Ha sido una experiencia maravillosa al considerarte un hermano más.

A todos, espero contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

Paola

## AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirnos llegar hasta esta instancia de nuestra vida, por darnos la sabiduría y la fortaleza para que fuera posible alcanzar este triunfo.

A nuestros padres y hermanos por apoyarnos en todo momento, por los valores inculcados, por darnos la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de nuestra vida y por todos los sacrificios que hicieron a lo largo de nuestra carrera, así como su comprensión y paciencia en momentos difíciles que tuvimos. Y sobre todo por ser nuestro ejemplo de vida.

A nuestro director de tesis, Mgtr. Manuel Quiñones quien, con su esfuerzo, dedicación, conocimientos, experiencia, sus relevantes aportes, críticas, comentarios, sugerencias y motivación supo guiarnos durante el desarrollo del presente trabajo de titulación.

A todos nuestros profesores, por sus enseñanzas, dedicación y tiempo, quienes además de impartirnos sus conocimientos hicieron que nuestro paso por la universidad fuera agradable.

A la empresa ThunderDrone, especialmente al Ing. Jonathan Villagómez por su valiosa colaboración, por el servicio prestado para alcanzar uno de los objetivos de este trabajo de titulación.

A nuestros amigos Leo, José y Josho por el apoyo, tiempo y la ayuda que dedicaron para las diferentes pruebas requeridas del presente trabajo. Esperamos que nuestra amistad perdure por muchos años sin importar que ya no estemos en la universidad.

Finalmente, a nuestra familia, compañeros de generación y todo aquel que de una u otra manera han sido parte de nuestra formación profesional y por los buenos momentos compartidos a lo largo de estos años.

Paola y Carlos.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA .....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
ACRÓNIMOS.....	3
INTRODUCCIÓN.....	4
1 CAPÍTULO I: ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.1 Objetivos.....	6
1.1.1 Objetivo general. ....	6
1.1.2 Objetivos específicos.....	6
1.2 Justificación. ....	6
1.3 Metodología.....	7
2 CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	9
2.1 Trabajos relacionados.....	10
2.2 Las telecomunicaciones en emergencias y catástrofes.....	11

2.2.1	Criterios en la selección de un sistema de comunicación.....	12
2.2.2	Sistemas de comunicación en emergencias.....	12
2.2.2.1	Radiodifusión.....	13
2.2.2.2	Telefonía móvil como solución.....	14
2.3	Sistema de radiodifusión FM.....	15
2.4	Sistema global de comunicaciones móviles GSM.....	15
2.4.1	Arquitectura de la red GSM.....	16
2.4.1.1	Estación móvil MS.....	16
2.4.1.2	Subsistema de estación base (BSS).....	17
2.4.1.3	Subsistema de conmutación y red (NSS).....	17
2.4.1.4	Subsistema de soporte operacional (OSS).....	19
2.4.2	Frecuencias y canales.....	19
2.5	Radio definido por software (SDR).....	21
2.5.1	Estructura SDR.....	22
2.6	Vehículo aéreo no tripulado.....	23
2.6.1	Tipos de UAV.....	23
2.6.2	Quad-rotors.....	23
2.6.3	UAV en situaciones de emergencia.....	24
3	CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE.....	25
3.1	Introducción.....	26
3.2	Especificaciones del sistema.....	26
3.3	Arquitectura hardware del sistema.....	27
3.4	Arquitectura software del sistema.....	27
3.5	Selección de componentes hardware del prototipo.....	28
3.5.1	Tarjeta de procesamiento.....	28
3.5.2	Dispositivo SDR.....	29
3.5.3	Módulo Wi-Fi.....	34
3.5.4	UAV "TAROT IRONMAN".....	35
3.5.4.1	Características del UAV "TAROT IRONMAN".....	35
3.6	Software del prototipo.....	36
3.6.1	Sistema operativo.....	36
3.6.2	GNURadio.....	37
3.6.3	OpenBTS.....	38
3.6.3.1	Arquitectura de OpenBTS.....	39
3.6.3.2	Asterisk.....	42

3.7	Desarrollo del transmisor FM.....	42
3.8	Consumo de corriente del prototipo.....	44
3.9	Ensamblaje de componentes.....	49
3.9.1	Verificación de pesos.....	49
3.9.2	Implementación de hardware.....	49
3.9.2.1	Estructura para UAV.....	50
3.9.2.2	Estructura de protección del sistema.....	52
3.10	Interfaz gráfica de usuario.....	54
4	CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	56
4.1	Introducción.....	57
4.2	Pruebas de laboratorio de la red GSM.....	57
4.2.1	Prueba de servicios.....	59
4.2.1.1	Mensajes de prueba.....	59
4.2.1.2	Llamadas de prueba.....	60
4.2.2	Cobertura de la celda.....	62
4.2.3	Calidad del enlace.....	66
4.3	Pruebas de laboratorio de transmisión FM.....	68
4.4	Pruebas de campo.....	70
4.4.1	Cobertura y calidad del enlace.....	70
4.4.2	Mediciones usando el UAV.....	72
	CONCLUSIONES.....	78
	RECOMENDACIONES.....	80
	BIBLIOGRAFÍA.....	81
	ANEXOS.....	86
	ANEXO A: INSTALACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO.....	87
	ANEXO B: INSTALACIÓN DE GNURADIO.....	89
	ANEXO C: INSTALACIÓN DE OPENBTS.....	91

ANEXO C1: CONFIGURACIÓN DE OPENBTS.....	94
ANEXO D: BLOQUES UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DEL TRANSMISOR FM 95	
ANEXO E: VERIFICACIÓN DE PESOS.....	97
ANEXO F: RECEPCIÓN Y TRANSMISIÓN FM USANDO RASPBERRY PI Y EL DISPOSITIVO SDR HACKRF ONE .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fases de desarrollo del trabajo de titulación. ....	8
Figura 2.1 Principales sistemas usados en emergencias. ....	12
Figura 2.2 Arquitectura de una red GSM. ....	16
Figura 2.3 Arquitectura de hardware SDR. ....	22
Figura 2.4 Tipos de UAV. ....	23
Figura 2.5 (a) Configuración Plus y (b) Configuración X. ....	24
Figura 3.1 Esquema del sistema a implementar. ....	26
Figura 3.2 Arquitectura hardware del nodo móvil. ....	27
Figura 3.3 Arquitectura hardware de la estación terrena. ....	27
Figura 3.4 Arquitectura software del nodo móvil. ....	28
Figura 3.5 Arquitectura software de la estación terrena. ....	28
Figura 3.6 (a) Vista forntal tarjeta ODROID-XU4 y (b) Vista posterior tarjeta ODROID-XU4. ....	28
Figura 3.7 Vista frontal USRP B210. ....	31
Figura 3.8 Diagrama de bloques USRP B210. ....	31
Figura 3.9 (a) Antena VERT900 y (b) Antena TECHTOO. ....	32
Figura 3.10 (a) Adaptador Wi-Fi RNX-N180UBE y (b) Antena desmontable. ....	34
Figura 3.11 Tarot IRONMAN 650. ....	35
Figura 3.12 Entorno gráfico de GNURadio. ....	38
Figura 3.13 Arquitectura de OpenBTS. ....	39
Figura 3.14 Subscriptores de OpenBTS. ....	41
Figura 3.15 Diagrama del transmisor FM. ....	43
Figura 3.16 Nombres de los bloques del transmisor FM en GNURadio. ....	43
Figura 3.17 Diagrama del transmisor FM en GNURadio. ....	43
Figura 3.18 Visualización del espectro transmitido en banda base. ....	44
Figura 3.19 Multímetro digital KEYSIGHT 3446. ....	45
Figura 3.20 Consumo de corriente del ODROID-XU4. ....	45
Figura 3.21 Consumo de corriente del ODROID-XU4 y USRP B210. ....	46
Figura 3.22 Consumo de corriente al establecer una llamada. ....	46
Figura 3.23 Consumo de corriente del transmisor FM. ....	47
Figura 3.24 Batería TURNIGY de 4000 mAh. ....	47
Figura 3.25 Módulo regulador de voltaje y corriente. ....	48

Figura 3.26 Base para el sistema de comunicación. ....	50
Figura 3.27 Vista superior de ensamble de dispositivos.....	50
Figura 3.28 Ensamble final del sistema de comunicación. ....	51
Figura 3.29 Sistema de comunicación implementado en UAV. ....	51
Figura 3.30 Caja HI BOX IP67. ....	52
Figura 3.31 Ensamble de USRP B210 en la caja HI BOX IP67.....	53
Figura 3.32 Ensamble de dispositivos en la caja HI BOZ IP67.....	53
Figura 3.33 Vista superior del sistema de comunicación implementado.....	54
Figura 3.34 Interfaz gráfica de la aplicación.....	54
Figura 4.1 Red GSM operativa. ....	57
Figura 4.2 Redes disponibles: a) Samsung J7 b) Sony Xperia Z3 c) Nokia 1200.....	58
Figura 4.3 Mensaje de bienvenida. ....	59
Figura 4.4 Tabla TMSI. ....	59
Figura 4.5 Mensajes a través del CLI de OpenBTS. ....	60
Figura 4.6 Mensaje recibido en el dispositivo.....	60
Figura 4.7 Mensajes entre MS's: (a) Móvil emisor y (b) Móvil receptor. ....	60
Figura 4.8 (a) Marcado a usuario B, (b) Llamada entrante, (c) Llamada establecida con usuario B y (d) Llamada establecida con usuario A. ....	61
Figura 4.9 Terminal de Asterisk. ....	62
Figura 4.10 Potencia del canal utilizado.....	62
Figura 4.11 Ancho de banda de la señal GSM.....	63
Figura 4.12 Espectro GSM según estándar. ....	63
Figura 4.13 Espectro GSM medido. ....	64
Figura 4.14 Intensidad de la señal recibida.....	65
Figura 4.15 Ejecución comando <i>chans</i> . ....	67
Figura 4.16 Ejecución del script TX_FM.py. ....	68
Figura 4.17 Analizador de espectros diseñado en GNURadio. ....	69
Figura 4.18 Espectro de la señal FM. ....	69
Figura 4.19 Canales activos en Asterisk. ....	70
Figura 4.20 Sistema de comunicación en el UAV. ....	72
Figura 4.21 Estación de monitoreo y control.....	73
Figura 4.22 Conexión del USRP B210 para la recepción FM.....	73
Figura 4.23 (a) IMSI móvil A y (b) IMSI móvil B.....	74
Figura 4.24 Ubicación de los usuarios al origen dentro del área de cobertura de la BTS. .....	75

Figura 4.25 Características del enlace.....	76
Figura 4.26 Monitoreo de dos usuarios registrados desde la terminal de Asterisk. ....	76
Figura 4.27 Espectro FM. ....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Bandas de frecuencia para la familia GSM.....	19
Tabla 2.2 Canales de tráfico GSM. ....	20
Tabla 2.3 Canales de control GSM. ....	20
Tabla 2.4 Características de SDR.....	21
Tabla 3.1 Comparativa de procesadores. ....	29
Tabla 3.2 Comparativa modelos SDR.....	29
Tabla 3.3 Comparativa de antenas. ....	32
Tabla 3.4 Datos del enlace. ....	33
Tabla 3.5 Características de RNX-N180UBE.....	34
Tabla 3.6 Características del UAV “TAROT IRONMAN”. ....	35
Tabla 3.7 Tabla comparativa entre GSM convencional y OpenBTS.....	39
Tabla 3.8 Pesos de dispositivos.....	49
Tabla 3.9 Peso del sistema de comunicación. ....	52
Tabla 4.1 Medición del alcance máximo de la cobertura.....	64
Tabla 4.2 Medición de la cobertura. ....	65
Tabla 4.3 Marcadores de llamadas de voz.....	66
Tabla 4.4 Medidas de la calidad de la señal. ....	67
Tabla 4.5 Medición del alcance máximo de la cobertura en espacio libre. ....	70
Tabla 4.6 Medición de la intensidad de señal de la red en espacio libre. ....	71
Tabla 4.7 Marcadores de llamadas de voz en espacio libre.....	71
Tabla 4.8 Medidas de la calidad de la señal en espacio libre.....	71

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se describe el desarrollo e implementación de un sistema de comunicación orientado a situaciones de emergencia y desastres para la cobertura de GSM y FM mediante la tecnología SDR. Este sistema está integrado sobre un UAV para cubrir una cierta zona afectada. Está equipado de un miniordenador que se encarga del procesamiento de los datos, un dispositivo SDR para el envío y recepción de las señales de radio y un módulo Wi-Fi. En lo que respecta a software, utiliza el sistema operativo Ubuntu sobre el cual se encuentra instalado OpenBTS, que para el caso del sistema GSM, genera una interfaz de aire y la plataforma Asterisk que permite el control y conmutación de las llamadas entre terminales móviles. En lo concerniente al transmisor FM se encuentra desarrollado sobre la herramienta GNURadio mediante bloques de procesamiento. Finalmente, el sistema puede ser controlado mediante una conexión remota a través del software MobaXterm para su gestión y monitoreo desde una estación base terrena.

**PALABRAS CLAVE:** Asterisk, comunicaciones en desastres, FM, GSM, ODROID-XU4, OpenBTS, SDR, software libre, UAV, USRP B210.

## **ABSTRACT**

In the present degree work, it describes the development and implementation of a system of communication oriented to situations of emergency and disasters for the coverage of GSM and FM by means of the technology SDR. This system is integrated on a UAV to cover an affected area. It is equipped with a minicomputer that is responsible for data processing, an SDR device for sending and receiving radio signals and Wi-Fi module. With regard to software, it uses the Ubuntu operating system on which OpenBTS is installed, which, in the case of the GSM system, generates an air interface and an Asterisk platform that allows the control and switching of calls between mobile terminals. Regarding the FM transmitter, it is developed on the GNURadio tool by processing blocks. Finally, the system can be controlled by a remote connection through the MobaXterm software for its management and monitoring from an earth base station.

**KEYWORDS:** Asterisk, communications in disasters, FM, GSM, ODROID-XU4, OpenBTS, SDR, open source, UAV, USRP B210.

## ACRÓNIMOS

<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>SDR</b>	Software Defined Radio
<b>FM</b>	Frecuencia modulada
<b>GSM</b>	Global System for Mobile
<b>PSTN</b>	Public Switched Telephone Network
<b>USRP</b>	Universal Software Radio Peripheral
<b>SMS</b>	Short Message Service
<b>IMSI</b>	International Mobile Subscriber Identity
<b>SIP</b>	Session Initiation Protocol
<b>MS</b>	Mobile Station
<b>BTS</b>	Base Transceiver Station
<b>BSC</b>	Base Station Controller
<b>MSC</b>	Mobile Switching Centre
<b>ARFCN</b>	Absolute Radio-Frequency Channel Number
<b>CCH</b>	Control Channel
<b>TCH</b>	Traffic Channel
<b>UHD</b>	USRP Hardware Driver
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>VoIP</b>	Voice over Internet Protocol
<b>SIM</b>	Subscriber Identity Module
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio

## INTRODUCCIÓN

En situaciones de emergencia las redes de comunicaciones tienen una alta posibilidad de colapsar o de no poseer la cobertura necesaria para ser utilizadas en la zona del acontecimiento. En desastres como terremotos, tsunamis, inundaciones, etc., no se cuenta con una red de respaldo para su uso inmediato, en estos casos se necesita disponer rápidamente de los servicios de telecomunicaciones para coordinar actividades de rescate entre los diferentes organismos.

Las operadoras de telefonía celular existentes por lo general funcionan bajo el modelo de oferta-demanda que impide prestar servicios gratuitos en casos de emergencia, por lo que se considera necesario que los organismos gubernamentales y de rescate cuenten con una red de telefonía celular suplementaria autónoma, portátil, de pronta instalación y sin tarificación, que permita la comunicación con los afectados.

La solución que se propone en este trabajo de titulación, es el desarrollo de un prototipo de estación celular GSM portátil que permite una comunicación para organismos institucionales de atención a desastres o emergencias, así como también un transmisor FM que proporcionará la distribución de mensajes de alertas, operaciones de socorro como coordinación de actividades planificadas por los equipos de rescate y divulgándolas entre la población afectada.

El presente trabajo de titulación tiene la siguiente estructura:

En el primer capítulo se establecen los objetivos, la justificación, la metodología empleada para cumplir con los objetivos propuestos y los trabajos relacionados publicados en revistas científicas, tesis, documentos técnicos, acerca de sistemas de comunicación FM, uso de tecnología SDR, y sistemas de comunicación para escenarios de emergencia.

En el segundo capítulo se incluyen conceptos de los temas que forman parte de este trabajo de titulación para tener una visión más clara de las estructuras que componen el mismo.

En el tercer capítulo se describe la arquitectura y diseño del prototipo, detallando los componentes hardware y software utilizados para el desarrollo del sistema.

En el cuarto capítulo se muestra la implementación del sistema y el funcionamiento de hardware y software que lo compone.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones a partir de las pruebas realizadas para comprobar la funcionalidad del sistema.

## **CAPÍTULO I: ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1 Objetivos.**

### **1.1.1 Objetivo general.**

Diseñar e implementar un prototipo de sistema de comunicación para escenarios de emergencia y desastre usando un UAV y SDR.

### **1.1.2 Objetivos específicos.**

- Diseñar la arquitectura funcional del sistema de comunicación para escenarios de emergencia y desastre usando un UAV y SDR.
- Implementar el prototipo de sistema de comunicación usando SDR, configurando el equipamiento e instalando el software requerido según las especificaciones técnicas y operativas.
- Integrar sistemas de comunicación en la plataforma del UAV.
- Evaluar resultados (tiempo respuesta y cobertura del sistema) del sistema para verificar su funcionamiento.

## **1.2 Justificación.**

Los desastres ocurren en cortos periodos de tiempo y suelen ser inesperados, dejando en su estela un número de víctimas y graves daños de infraestructura. Estos desastres pueden ser debidos a causas naturales o artificiales en donde la característica común que se presenta es la interrupción de los principales sistemas de comunicación, ya sea mediante el daño parcial o total de la infraestructura de telecomunicaciones, y como principal consecuencia la pérdida inevitable de vidas. Ante estos eventos es necesario un sistema de comunicación de emergencia donde su rapidez para dar una respuesta depende principalmente del intercambio de información en tiempo real entre los diferentes organismos de socorro. Esto a su vez permite una mejor gestión de la ayuda necesaria para las diferentes zonas donde ocurrió el desastre [1].

Las comunicaciones son instrumentos indispensables para la gestión de operaciones de emergencia por lo que existen grupos de investigación que se encuentran desarrollando tecnologías y sistemas de comunicación para escenarios de desastre y emergencias; así como: sensores para detectar y localizar dispositivos móviles celulares, sistemas de comunicación empleando Plataformas de comunicación de Gran Altura (HAP) y Baja Altura (LAP) de rápido despliegue., las cuales emplean Wi-Fi para proporcionar una red de banda ancha [2].

Cuando finalmente se produce un desastre, las telecomunicaciones contribuyen a coordinar las operaciones de rescate ya sea por organismos locales, nacionales o

internacionales. Una constatación en este sentido tuvo lugar en Turquía en la provincia de Van en el año 2011 donde se produjo un fuerte terremoto de magnitud 7.2 donde más de 600 personas perdieron la vida. La Administradora Adjunto del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo destacó el papel de la compañía Turkcell por su papel en la transmisión de mensajes ya que facilitó el envío de más de 10.000 mensajes pidiendo ayuda de emergencia [3]. Así también en muchas partes del mundo ya existen sistemas de alerta, por lo general basados en la difusión por radio y televisión como, por ejemplo, los esquemas de advertencia de huracanes en el Caribe.

En la actualidad en nuestro país no existe un plan para combatir este tipo de situaciones, en lo referente a comunicaciones. Es por ello que en el último desastre suscitado en abril del 2016 en la provincia de Manabí el terremoto dejó 673 fallecidos y más de 12 mil heridos [4]. Sin embargo, se produjo un caso especial donde el Sr Pablo Córdova fue rescatado tras 48 horas de estar bajo los escombros del hotel en el cual trabajaba donde el servicio de telefonía móvil se logró restablecer y gracias a esto pudo realizar una llamada de auxilio [5].

En base a los antecedentes en estos entornos, se requiere de un sistema de rápida implementación entre las partes involucradas, es decir, grupos de socorro, seguridad de las personas, que sea portable para ser ubicado en el sitio adecuado por un número reducido de personas donde el principal desafío que se presenta es la utilización de tecnologías inalámbricas.

En el presente proyecto se plantea la implementación de un prototipo de sistema de comunicación usando tecnologías inalámbricas con alta penetración como GSM y FM para que se integren en un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT o UAV en inglés), para la difusión de mensajes, empleando tecnologías de hardware y software abiertos basado en el uso de SDR. Además, este sistema puede ser instalado en unidades vehiculares como ambulancias, helicópteros entre otros empleando baterías recargables para el abastecimiento de energía y la posibilidad de utilizar fuentes alternativas que garanticen su funcionamiento continuo.

### **1.3 Metodología.**

La metodología de trabajo que se ha adoptado para el desarrollo del presente proyecto de titulación se divide en las siguientes fases:

**Fase de investigación:** consiste en la búsqueda y recolección de la información donde es necesario delimitar el problema, enfocado en el área de interés que son los sistemas de comunicación para situaciones emergentes. Seguidamente se hace un compendio

de información objetiva relacionada al tema de investigación, es decir todas aquellas soluciones existentes que se han desarrollado ya sea nacional o internacionalmente con el fin de hacer un análisis en cuanto a hardware y software utilizado, lo que permite establecer por medio de comparaciones, las soluciones más viables y que pueden servir de guía. Además, se definen conceptos necesarios para el desarrollo del presente trabajo de titulación.

**Fase de desarrollo:** se enfoca en el diseño y programación de la red de telefonía celular GSM y del transmisor FM a implementar, el desarrollo de la aplicación para que el usuario interactúe con el sistema de comunicación final.

**Fase de documentación:** comprende las pruebas de funcionamiento del sistema, documentando y realizando un análisis de resultados obtenidos como tiempos de respuesta y cobertura del sistema para verificar su funcionamiento, para así establecer las conclusiones y recomendaciones obtenidas. Las pruebas se realizan en laboratorio, como también en un entorno real en la ciudad.

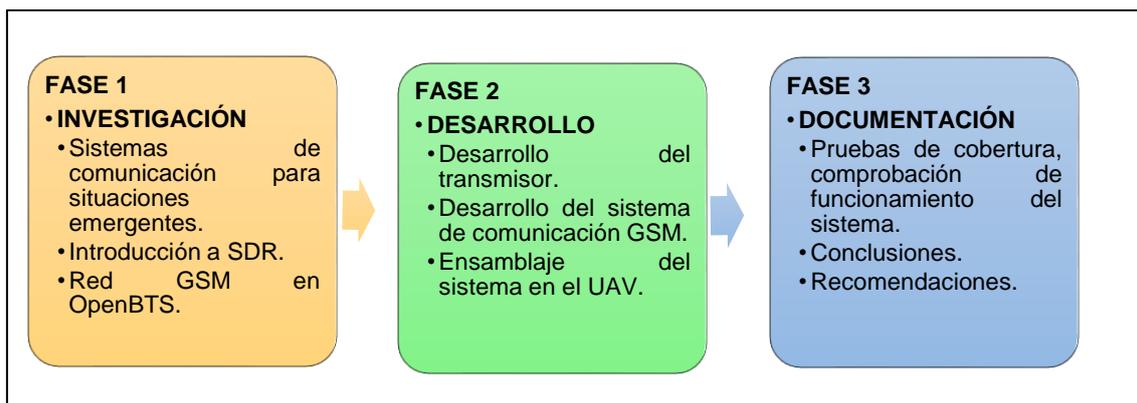


Figura 1.1 Fases de desarrollo del trabajo de titulación.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

## **CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE**

## 2.1 Trabajos relacionados.

Existen investigaciones que se centran en sistemas de comunicaciones para escenarios de desastres utilizando plataformas de baja altura empleando UAV, como el trabajo propuesto en [6], presenta un UAV basado en la plataforma SDR el cual puede ser desplegado rápidamente para su uso en escenarios de emergencia. Los UAVs sirven como una estación base GSM móvil capaz de proporcionar cobertura de una red celular a los usuarios de una cierta zona. En el USRP opera el software OpenBTS para efectuar la tecnología GSM.

Similar al trabajo anterior, existen investigaciones experimentales actuales que han centrado su atención en una solución para implementar una red móvil que incorpore teléfonos móviles como en [7], donde los autores proponen el desarrollo de un prototipo de estación celular portátil de cobertura limitada mediante el proyecto OpenBTS que genera una interfaz de aire GSM "Um" para establecer la comunicación entre la MS y la BTS haciendo uso del hardware USRP que es un periférico SDR y como software GNURadio sobre un computador, más el software Asterisk que verifica el plan de marcado para realizar el control y conmutación de las llamadas.

La diferencia radica en la utilización de un UAV para el establecimiento de esta red, por lo que la zona de cobertura se verá reducida con relación a la presentada en [6].

En [8] se describe un sistema de comunicación para desastres naturales donde el SDR actúa como una pequeña estación base. Para transmitir y recibir señales, se utiliza un (USRP), actuando como un dispositivo transceptor. En este sistema propuesto se desarrolla la técnica de detección de sonido para monitorear y grabar la señal de audio de la persona afectada en un área invisible. Lo cual implica implementar un sistema de procesamiento de señales para la detección de audio mediante el uso de una red de sensores de audio. Debido al problema de disponibilidad de la red que presentará el área de desastre, se implementa un UAV, el cual grabará la información de los sensores de audio.

Otro trabajo relacionado es el propuesto en [9], donde se desarrolla una estación base de telefonía móvil GSM haciendo uso de un equipo SDR y la plataforma OpenBTS, permitiendo desplegar una red de telefonía de bajo coste con múltiples utilidades, desde docencia hasta comunicaciones en zonas remotas.

En [10] se usa el dispositivo SDR portable USRP E310 de código abierto para la implementación de GSM. También se hace uso de los componentes como: SIPAuthServe, Osmo-TRX, OpenBTS y Asterisk, los cuales permiten emular una red

GSM. En un ordenador externo se instala un softphone para las comunicaciones VoIP y también el programa Wireshark, para capturar los paquetes GSM de señalización que viajan entre el terminal móvil y la estación base. Este trabajo muestra un previo estudio de las diversas configuraciones que se pueden realizar en el estándar GSM, para evaluar las ventajas que ofrece su implementación sobre la plataforma SDR.

Considerando que en la mayoría de los sistemas descritos anteriormente utilizan la plataforma USRP, que es uno de los dispositivos SDR más conocidos, robusto, potente y flexible. En este trabajo de titulación se presenta una solución a un sistema de comunicación para escenarios de emergencia y desastres, haciendo la integración de un UAV siendo una plataforma de mayor desarrollo en proyectos relacionados a eventos de esta naturaleza debido principalmente a su tamaño y autonomía, así mismo se hace la integración de un transmisor FM ejecutado en la misma plataforma USRP.

## **2.2 Las telecomunicaciones en emergencias y catástrofes.**

Durante situaciones de desastre como terremotos, atentados terroristas y otras catástrofes es muy importante estar comunicado por nuestro bienestar y el de los demás, pero es común que en estos casos las infraestructuras de comunicación terrestre colapsen parcial o completamente. En algunos sitios por sus condiciones geográficas o económicas las reparaciones pueden tardar mucho tiempo, mientras los afectados permanecen incomunicados y se encuentran expuestos a condiciones de peligro. En situaciones como éstas el no tener infraestructura de comunicación, retrasa y dificulta mucho las actividades de los organismos de atención de desastres y las personas afectadas no tienen forma de pedir auxilio o recibir ayuda [11].

Es preciso ofrecer soluciones que permitan superar las dificultades de las telecomunicaciones en áreas afectadas por desastres. La magnitud de una situación de emergencia exigirá una movilización de recurso a escala regional e incluso internacional. Es por ello, que las telecomunicaciones forman parte integral en la reducción y gestión del riesgo de catástrofes. Después de un desastre, garantizan un flujo de información vital, necesario para los organismos gubernamentales y para organismos involucrados en operaciones de rescate y prestación de ayuda médica para heridos [12].

La disponibilidad y aplicabilidad de los medios de telecomunicaciones más idóneos en situaciones de emergencia son el resultado de una estrecha cooperación entre los organismos que se dedican a la labor humanitaria, los fabricantes de equipo y los proveedores de servicio que administran las distintas redes. Esta relación permitirá evaluar con objetividad qué pueden o no aportar estas tecnologías en diversas situaciones [13].

### 2.2.1 Criterios en la selección de un sistema de comunicación.

No siempre aquellos dispositivos más sofisticados son los que darán la mejor respuesta a la emergencia. Existen algunas recomendaciones para seleccionar el sistema de comunicación acorde a la emergencia [14], entre ellos se encuentran:

- **Sencillez del medio:** en la mayoría de los casos, los sistemas de radiocomunicación suelen funcionar mejor en situaciones de emergencia, ya que se trata de equipos que se han mejorado y son resistentes, por lo que responden satisfactoriamente a ambientes difíciles y ruidos, ambientes donde exista mucho ruido, polvo, agua o en situaciones que se requiere manos libres. Siempre se debe valorar las condiciones de la emergencia y no olvidar que aquellos sistemas más sofisticados, generalmente necesitan de personal capacitado específicamente para su manejo, produciéndose así un inconveniente.
- **Capacidad de transporte y movilidad:** se debe considerar usar equipos portátiles, fáciles de instalar y que se adapten en diversas zonas de desastre, sin que su desplazamiento requiera de grandes despliegues en medios, es decir, adaptarse a ser trasladados por carreteras, aun cuando estén bastante deterioradas.
- **Intercomunicación:** los equipos deben ser capaces de establecer comunicaciones con los organismos locales y con los diferentes grupos que intervienen en la gestión de la catástrofe.

### 2.2.2 Sistemas de comunicación en emergencias.

Es necesario conocer las limitaciones que cada sistema presenta, de manera que se seleccionen los sistemas de comunicación más adecuados a cada caso. En la Figura 2.1 se muestra los sistemas que se pueden usar en emergencias.



Figura 2.1 Principales sistemas usados en emergencias.  
Fuente: Imagen tomada de [14].  
Elaboración: Elaborado por [14].

Las transmisiones más frecuentes en emergencias son las que se producen ante accidentes o incidentes, en donde hay una llamada de emergencia captada por el centro coordinador de emergencias, y en donde no existe dificultad en utilizar las comunicaciones tradicionales, suelen establecerse mediante el uso de la telefonía fija y móvil. En situaciones donde la cobertura de telefonía móvil es deficiente, se adquiere la transmisión por radio [14].

En cambio, si se trata de situaciones de desastre o catástrofes, la posibilidad de que colapse la infraestructura de telefonía hace necesario la utilización de los denominados sistemas desplegados en donde se integran redes de comunicaciones permanentes con la capacidad de ser ubicados en la zona de emergencia [14].

### **2.2.2.1 Radiodifusión.**

En situaciones de desastre, los sistemas de radio son una forma ideal de comunicación, de hecho, es un medio insustituible. Sin embargo, aporta con ciertas ventajas, pero también con determinados inconvenientes, lo que hace que sea adecuada en situaciones concretas, y complementada en otros casos, por sistemas que asuman las dificultades que se puedan presentar [14].

Los radios permiten una comunicación instantánea ya que son sencillas, fáciles de emplazar, utilizar y mantener, de bajo costo y que no necesitan de un soporte fijo para realizar transmisiones. Por su naturaleza, los equipos de radiodifusión están diseñados para trabajar en ambientes difíciles, donde exista ruido, humedad, polvo, agua. A diferencia de otros servicios de telecomunicación, en la que la infraestructura no está diseñada para que todos los usuarios usen el servicio al mismo tiempo, los radios no se ven afectados de incrementos de demanda en situaciones emergentes. Una de las principales ventajas son las llamadas de grupo mediante un único canal que es difundido a varios usuarios de una zona al mismo tiempo [15].

Los equipos de radio utilizados en emergencias operan en dos tipos de frecuencias, las de ondas cortas de alta frecuencia (HF) y las de muy alta frecuencia (VHF), en ambos casos con un ancho de banda muy corto [14].

- **Equipos de radio de alta frecuencia HF:** trabajan a frecuencias entre 3 y 30 MHz. Dependiendo de la frecuencia que se module, permite distancias cortas, medias o largas. Permiten la transmisión de voz, aunque la calidad de la conexión depende de factores como el estado meteorológico, la distancia, etc. Una de las limitaciones más importantes es que tienen una gran demanda de energía.

- **Equipos de radio de muy alta frecuencia VHF:** utilizan frecuencias más altas, entre 30 y 300 MHz, que permiten un alcance menor, por lo que se utilizan para comunicaciones locales por voz. Para maximizar sus funciones se utilizan repetidoras que permiten conectar diferentes estaciones de radio, ampliando así la cobertura.

Existen diferentes tipos de estaciones que pueden usarse para las comunicaciones en casos de catástrofes: [14]

- **Estaciones fijas:** son equipos que están ubicados en un espacio fijo, dependiendo de la fuente de energía de esa misma ubicación. Utilizan antenas para emitir y recibir señales, debido a su gran tamaño no tienen aplicación móvil.
- **Estaciones móviles:** se instalan en los vehículos, cuentan con una antena de diferente tamaño dependiendo de la frecuencia a la que opere la emisora, dando un alcance de 30 Km de distancia.
- **Estaciones portátiles:** son equipos completamente autónomos que cuenta con receptor, emisor, fuente de alimentación, antena.
- **Repetidores:** son equipos que sirven de enlace entre otros equipos que operen en la misma frecuencia, lo que amplía la cobertura.

#### **2.2.2.2 Telefonía móvil como solución.**

Muchos de los desastres podrían haberse evitado con una mejor información y comunicación. Los teléfonos móviles tienen la capacidad para distribuir la información y mejorar el proceso de obtener los recursos adecuados para las personas y las zonas donde son más requeridos luego de un desastre.

Los móviles pueden lograr que la información fluya hacia donde se necesita, debido a la velocidad respectiva con la que se puede instalar una red de emergencia o restaurar redes preexistentes. Pueden ofrecer el primer canal de comunicación operativa para las comunidades y las personas que necesitan transmitir información sobre sus necesidades concretas y coordinar entre sí y con otros que les puedan ayudar. Ampliar el acceso móvil en las regiones que son vulnerables a los desastres naturales sería de gran ayuda a su capacidad de recuperación en caso de desastre [16].

Existe un interés en el uso de sistemas de comunicación adicionales para complementar los sistemas existentes, aunque son incapaces de igualar el alcance. El sistema TurkCell de comunicación de emergencia y organizaciones como Ericsson Response y TSF son proyectos que tienen como objetivo principal la restauración rápida de la red. Ericsson Response ocupa el cuarto lugar en la lista de respuesta de emergencia internacional y

en colaboración con el Programa Mundial de Alimentos, la oficina para la Coordinación de Asuntos Humanitarios y la Federación Internacional de la Cruz Roja ofrece equipos móviles y personal para operar en zonas afectadas por desastres naturales [7].

En base a lo anteriormente descrito, la telefonía móvil en casos de emergencia tiene como ventajas que sus redes se pueden reponer rápidamente, permiten el flujo inmediato de información que es importante para el proceso de recuperación, permite la interconectividad entre todos los operadores y cooperan con los sistemas de alertas tempranas.

### **2.3 Sistema de radiodifusión FM.**

Los sistemas de radiodifusión se definen como medios de comunicación social que prestan el servicio público de comunicación masiva, transmitiendo señales de audio que son recibidas por el público de manera libre y gratuita.

Los sistemas FM necesitan un ancho de banda mayor y se ha demostrado que la relación señal a ruido de la señal transmitida aumenta, así como aumenta la calidad de señal. Por ser una modulación de frecuencia, el ruido e interferencia afecta menos debido a que varía la amplitud y no la frecuencia [17]. Un sistema FM se encuentran los siguientes elementos:

- **Frecuencia central:** es la frecuencia de portadora del transmisor FM.
- **Desviación de frecuencia:** magnitud de frecuencia por encima o por debajo de la frecuencia central, cuando es aplicada la señal moduladora.
- **Oscilación de portadora:** variación total entre los valores máximo y mínimo de frecuencia.

La frecuencia máxima de la señal moduladora para radiodifusión FM comercial es de 15 kHz y el máximo incremento de frecuencia portadora es de  $\pm 75$  kHz [18].

En el Ecuador, FM se encuentra dividido en 100 canales con un ancho de banda de 200 kHz respectivamente. Para la asignación de canales sucesivos, deberán separarse mínimo 400 kHz entre cada estación de la zona [19].

La potencia mínima para estaciones de baja potencia es de máximo 250 W, a excepción de las ciudades donde su población sobrepasa los doscientos mil habitantes, que será de 500 W [18].

### **2.4 Sistema global de comunicaciones móviles GSM.**

GSM es un sistema de telecomunicaciones digitales celulares normalizado por el Instituto Europeo para la Normalización en Telecomunicaciones (ETSI). GSM es una

tecnología digital inalámbrica de segunda generación que presta servicios de voz de alta calidad, así como servicios de datos conmutados por circuitos en una amplia gama de bandas de espectro. Es un sistema de comunicación basado en el uso de células digitales que se desarrolla para crear un sistema para móviles único que sirva de estándar para todo el mundo y compatible con los servicios existentes y futuros sobre una red digital de servicios integrados [20].

Una función única de GSM que no existe en los sistemas analógicos anteriores es el servicio de mensajes cortos (SMS, Short Message Service), que es bidireccional para enviar mensajes alfanuméricos hasta de 160 bytes de longitud. Estos mensajes SMS son transportados por el sistema en forma de almacenar y enviar [21].

### 2.4.1 Arquitectura de la red GSM.

La arquitectura de una red GSM se puede subdividir en tres unidades principales, como se indica en la Figura 2.2. El subsistema de estación base (BSS), el subsistema de conmutación y red (NSS), y el subsistema de soporte operacional (OSS).

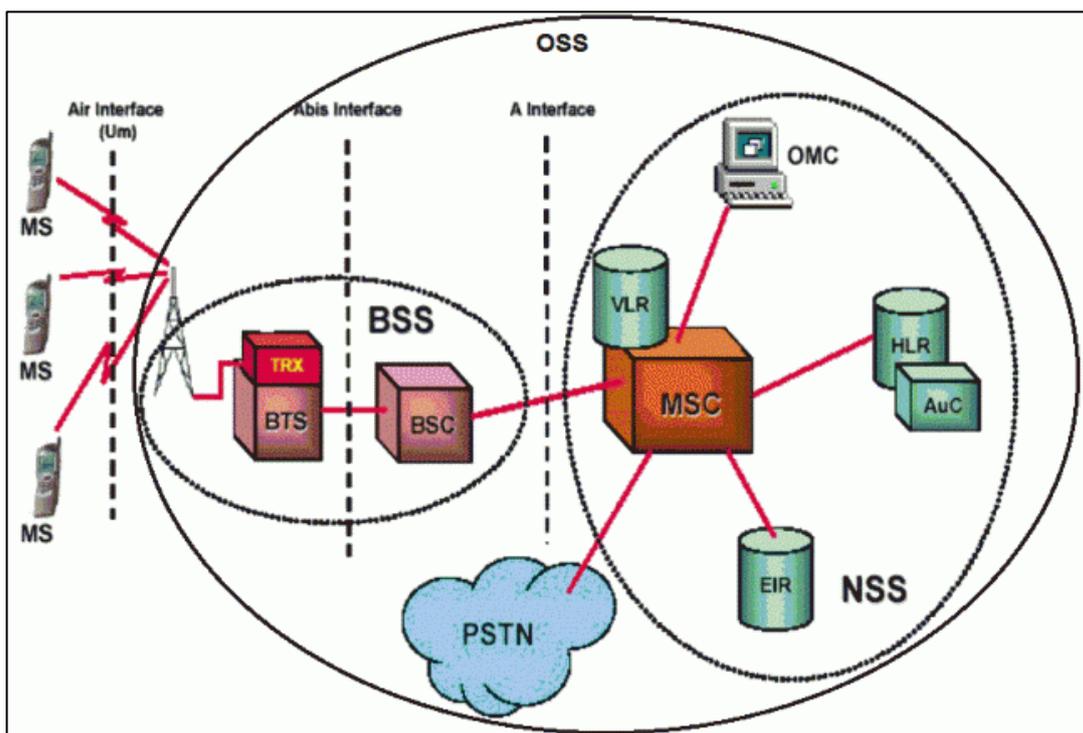


Figura 2.2 Arquitectura de una red GSM.

Fuente: Imagen tomada de [22].

Elaboración: Elaborado por [22].

#### 2.4.1.1 Estación móvil MS.

Es el equipo comúnmente conocido como “celular” o “teléfono móvil”. Tiene 2 elementos principales. El hardware, que es el que provee las interfaces necesarias para que usuario interactúe con él (teclado, pantalla, etc.), y la electrónica necesaria para poder

acceder a la red celular (antenas, filtros, etc.). Contiene un número único de identificación (IMEI) que se utiliza al registrarse el equipo en la red. El otro elemento importante es el “módulo de identidad del suscriptor” (SIM), que contiene información asociada al usuario, incluyendo el “número de identificación del suscriptor” (IMSI) que es asociado al número telefónico en la red core [23], entre sus funciones está proporcionar la información de servicios e identificación en la red, también tiene la capacidad de guardar información y garantizar la confidencialidad [24].

#### **2.4.1.2 Subsistema de estación base (BSS).**

Es un conjunto de dispositivos encargados de manejar el tráfico y la señalización desde los terminales móviles hacia el subsistema de conmutación y red. Está constituido por:

**Estación base transceptora (BTS):** La estación base transceptora está constituida por los transmisores y receptores de radio, las antenas asociadas a ellos, utilizadas para comunicarse con cada estación móvil. La interfaz aire en GSM se conoce como “interfaz Um”. Es el área de cobertura de cada una de las BTS la que define la “célula” de la telefonía móvil GSM [23].

**Estación base controladora (BSC):** La estación base controladora provee los sistemas de control para varios BTS. Es en el BSC donde se definen las frecuencias a utilizar por los distintos BTS, dependiendo de las diferentes licencias que tenga el carrier de telefonía móvil. También realiza en control del handover que se realiza entre 2 BTS bajo su control [23].

#### **2.4.1.3 Subsistema de conmutación y red (NSS).**

También conocida como la red “core” de un sistema GSM. En este se llevan a cabo las funciones de conmutación de las llamadas y administración de las estaciones móviles, para permitir el movimiento de los terminales en los diferentes BTS, para poder hacer este trabajo la NSS se divide en diferentes sistemas, cada uno con una misión dentro de la red [25].

**Centro de conmutación de servicios móviles (MSC):** es el elemento principal del NSS. Es responsable del control de llamadas, funciones de control del BSS, funciones de interfuncionamiento, tarificación, estadísticas y señalización de los interfaces A y PSTN [25]. Una categoría especial dentro de los MSC es la del MSC “pasarela” (Gateway MSC), que tiene la función de determinar bajo que MSC se encuentra la estación móvil al momento de establecer una llamada. Además, es este el que rutea las llamadas que provienen desde los terminales móviles hacia redes externas, como por ejemplo la PSTN [23].

**Registro de ubicación para usuarios (VLR):** es una base de datos de almacenamiento temporal asociados a los MSCs que almacenan los datos de identificación, tipos de abono, permisos, y localizaciones en la red de todos los usuarios activos situados en el área de servicio de un determinado MSC, por lo que ayuda a mantener los datos de localización de una forma más precisa controlando todas las llamadas dentro de la red móvil y hacia y desde el PSTN [26].

Al registrarse un usuario en la red, el VLR al que está conectado el usuario se contacta con el HLR de origen y comprueba si puede o no realizar llamadas. Esta información se almacena en el VLR mientras el terminal de usuario está activo y se actualiza constantemente para evitar fraudes [27].

**Registro de ubicación para usuarios domésticos (HLR):** es una base de datos que almacena los datos de identidad y los derechos de acceso de servicio que tiene los usuarios, así como la posición dentro de la red permitiendo el roaming. Es de carácter permanente, ya que cada número de teléfono móvil esta agregado a un único HLR, que administra su operador móvil [27].

Sirve para averiguar el estado de disponibilidad del usuario y su ubicación, cuando un usuario realiza una llamada el MSC pregunta al HLR correspondiente si el número marcado está disponible o no y su ubicación, para que una BSC proceda a enrutar la llamada a tal terminal, en caso de no estar disponible emite un mensaje de error de conexión [24].

**Centro de autenticación (AuC):** trabaja conjuntamente con el HLR, contiene la información por medio de la cual se comprueba la autenticidad de las llamadas con el fin de evitar posibles fraudes, SIM's robadas o utilización del servicio por los abonos que no han realizado sus pagos correspondientes. Es utilizada para autenticar al suscriptor y se encarga del cifrado de la información que será transmitida por medio de radio frecuencia [27].

**Registro de identificación de equipos (EIR)** es una base de datos que almacena la lista de estaciones móviles que tienen uso autorizado dentro de la red, mediante la identificación de su número de serie o IMEI [28] [29]. Se definen tres registros:

- La lista blanca se compone de todos los equipos que son autorizados para su funcionamiento.
- La lista gris contiene equipos que no son bloqueados, pero son rastreados por la red para evaluación y otros propósitos.

- La lista negra contiene equipos robados o utilizados de forma ilegal y también equipos que no pueden acceder al sistema porque podrían causar graves problemas técnicos.

#### 2.4.1.4 Subsistema de soporte operacional (OSS).

Es la parte de la red que se encarga de la operación y mantenimiento de la red, de la gestión de los equipos móviles y de la gestión y cobro de cuota. Proporciona los medios para que el operador controle las MS, BSS y la NSS que forman la parte operacional del sistema GSM [30].

Los OSS ofrecen a los clientes apoyo para la administración centralizada, regional y local, teniendo como función principal proporcionar una visión general de la red y apoyar las actividades de mantenimiento de la operación y organizaciones de mantenimiento que requiere la red GSM [24].

#### 2.4.2 Frecuencias y canales.

La red GSM utiliza dos bandas de 25 MHz para transmitir y recibir (FDD). La banda de frecuencia para transmitir desde la MS hasta el BTS (UPLINK) es de 890-915 MHz y la banda que se usa para transmisiones entre BTS y la MS (DOWNLINK) es de 935-960 MHz. GSM usa duplexación por división de frecuencia (FDD) que significa que el transmisor y receptor operan en diferentes frecuencias de portadora y una combinación de TDMA Y FDMA para proporcionar las estaciones base y a los abonados un acceso múltiple. Cada banda se encuentra dividida en 124 portadoras con una separación de 200 KHz llamados ARFCN (Números de canales de radio frecuencia absolutos). El ARFCN es un código que especifica un par de canales “uplink” y “downlink” separados por 45 MHz y compartido en el tiempo hasta por 8 abonados usando TDMA. En la Tabla 2.1, se muestra a la familia GSM con su rango de operación en frecuencia.[28]

Tabla 2.1 Bandas de frecuencia para la familia GSM.

BANDAS DE FRECUENCIA PARA LA FAMILIA GSM					
SISTEMA GSM	UPLINK (MHz)	DOWNLINK (MHz)	BANDA	SEPARACIÓN DEL DÚPLEX	PORTADORAS
GSM 900	890-915	935-960	2x25	45	124
E-GSM	880-915	925-960	2x35	45	174
R-GSM	876-915	921-960	2x39	45	194
GSM 1800	1710-1785	1805-1880	2x75	95	374
GSM 1900	1850-1990	1930-1990	2x60	80	299

Fuente: Tabla tomada de [28].

Elaboración: Propia de los autores.

GSM define una gran variedad de canales lógicos que se pueden usar para enlazarla capa física con la capa de datos. En los canales lógicos se transmite eficientemente los datos de usuario y proporciona el control de la red en cada ARFCN. Entonces se puede decir que GSM distingue entre canales físicos a las ranuras de tiempo y canales lógicos a la información portada por los canales físicos [28].

Los canales lógicos se pueden diferenciar por su funcionalidad en: los canales de tráfico (TCH - Traffic Channels) y los canales de control (CCH – Control Channels), que transportan señalización y sincronización entre la estación base y la estación móvil, sus funciones y varían según el enlace que se realice. En la Tabla 2.2 y Tabla 2.3 se presentan los distintos canales de tráfico y canales de control [28].

Tabla 2.2 Canales de tráfico GSM.

TIPO DE CANAL	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
<b>CANALES DE TRÁFICO CCH</b>	<b>TCH/FS</b>	<b>S: Voz (Speech)</b>
	<b>TCH/F9.6</b>	9.6: Datos a 9600 bps
	<b>TCH/2.4</b>	4.8: Datos a 4800 bps
	<b>TCH/HS</b>	2.4: Datos a 2400 bps
	<b>TCH/H4.8</b>	F: Full Rate. La información de un usuario es enviada en una ranura de tiempo a tasa completa y es capaz de transferir hasta 13Kbps de datos de usuario.
	<b>TCH/H2.4</b>	H: Half Rate. La información de un usuario es enviada en una ranura de tiempo. Por lo tanto, dos usuarios pueden compartir esta ranura en distintos instantes de tiempo pudiendo utilizar así el doble de canales de voz.

Fuente: Tabla tomada de [28].

Elaboración: Propia de los autores.

Tabla 2.3 Canales de control GSM.

TIPO DE CANAL	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN	
<b>CANALES DE CONTROL CCH</b>	<b>CANALES DE BROADCAST BCH</b>	<b>BCCH</b>	Canales de control utilizados para permitir el enganche de los móviles y el monitoreo de la potencia de estos en celdas vecinas.
		<b>FCCH</b>	
		<b>SCH</b>	
	<b>CANALES COMUNES DE COMUNICACIÓN CCCH</b>	<b>PCH</b>	Estos canales permiten el establecimiento de las llamadas y las asignaciones de canales de control.
		<b>RACH</b>	
		<b>AGCH</b>	
	<b>CANALES DE CONTROL DEDICADOS DCCH</b>	<b>SDCCH</b>	Canales de control bidireccionales utilizados para prestar los servicios de
		<b>SACCH</b>	

		<b>FACCH</b>	señalización y supervisión al usuario.
--	--	--------------	--

Fuente: Tabla tomada de [28].

Elaboración: Propia de los autores.

## 2.5 Radio definido por software (SDR).

SDR es una tecnología de comunicación que propone un modelo de sistema de radiocomunicación programable para la generación y recepción de señales RF, donde la mayor parte de los componentes necesarios se implementan en software en lugar de hardware. Al utilizar este tipo de tecnologías, se utiliza un receptor Zero-IF o low-IF configurable que se puede utilizar para diseñar distintos componentes como mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores/demoduladores, entre otros e incluso sistemas completos como transceptores, transmisores, receptores, osciloscopios, analizadores de espectros, capaces de modificar sus parámetros dinámicamente [31].

La radio definida por software surge por la necesidad de tener transmisores y receptores reconfigurables de gran eficiencia y aún más que puedan ser actualizados de forma remota. No es necesario adquirir un nuevo equipo para cualquier cambio o ajuste en la configuración de un sistema de radiocomunicación, las modificaciones se pueden hacer de manera remota reduciendo costos de idas al sitio. SDR también presenta la interoperabilidad entre usuarios ya que si se requiere un nuevo esquema de modulación o codificación se puede descargar y reconfigurar el sistema [32].

Existen algunas características que definen a un SDR, como se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Características de SDR.

<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
<b>Compatibilidad y eficiencia energética</b>	Se puede soportar varios estándares de comunicación en una sola plataforma SDR.
<b>Facilidad de fabricación</b>	Funciones de banda base son un problema de software, no un inconveniente en hardware.
<b>Facilidad de actualización</b>	Las actualizaciones de firmware en SDR permiten habilitar la funcionalidad con los últimos estándares de comunicación.
<b>Interoperabilidad</b>	Se pueden comunicar varios radios incompatibles o actuar como un puente entre ellos.
<b>Reutilización oportuna de frecuencia</b>	Puede tomar ventaja del espectro subutilizado pidiendo prestado cierta parte de este, siempre y cuando el dueño es esta parte no lo esté usando.

<b>Bajo costo</b>	Debido a su múltiple aplicación, el costo de mantenimiento se reduce notablemente.
<b>Desarrollo e investigación</b>	Implementación de muchas y distintas formas de onda para análisis del rendimiento en tiempo real.

Fuente: Tabla tomada de [33].  
Elaboración: Propia de los autores.

### 2.5.1 Estructura SDR.

En la Figura 2.3 se presenta el diagrama de bloques de la funcionalidad de SDR [34], compuesta de tres bloques funcionales:

- Sección de RF, implementada en hardware.
- Sección de IF, implementada en hardware.
- Sección banda base, implementada en Software.

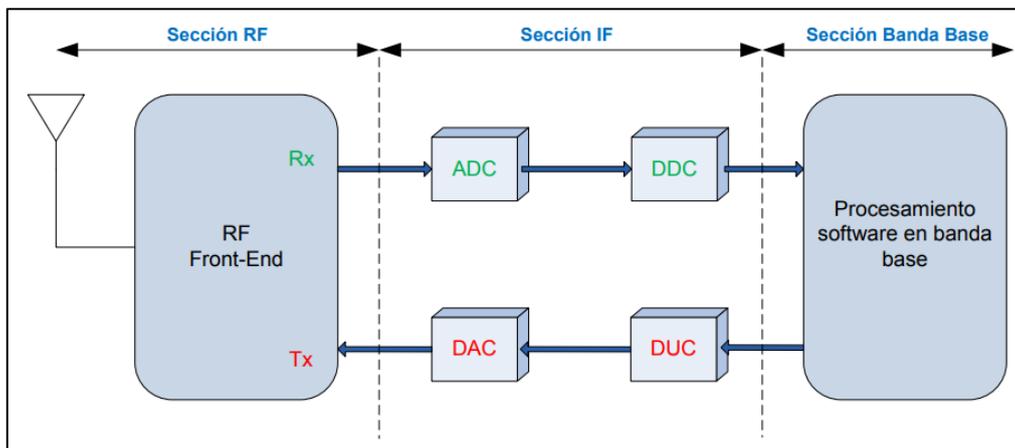


Figura 2.3 Arquitectura de hardware SDR.

Fuente: Imagen tomada de [34].  
Elaboración: Elaborado por [34].

La sección de RF es la encargada de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia para adecuarlas y convertirlas en frecuencia intermedia en recepción o amplificar y modular las señales de IF en el caso de transmisión [35].

La sección IF se encarga de pasar la señal de IF a banda base o viceversa y hacer la conversión analógica-digital o digital-analógica de la señal mediante los módulos ADC/DAC. También se utilizan los módulos DDC/DUC para bajar/subir, respectivamente la tasa de muestreo según se requiera receptor o transmitir [35].

La sección banda base es la encargada de todo el procesamiento en banda base de la señal como modulación/demodulación, análisis espectral de la señal, llevándose a cabo en software [36].

## 2.6 Vehículo aéreo no tripulado.

Conocido por sus siglas en inglés como UAV o comúnmente como dron, es una aeronave no tripulada pilotada por control remoto o inclusive a través de aplicaciones con smartphones o tablets, capaces de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido [37].

### 2.6.1 Tipos de UAV.

Existe una gran variedad de UAV, en su mayoría de uso militar, pero en la actualidad son desarrollados para un uso común. Debido al amplio campo de funcionamiento que ofrecen los UAV, se clasifican de acuerdo con el tipo de ala rotativa que poseen en su diseño como se muestra en la Figura 2.4. En el presente trabajo de titulación se hablará sobre los quad-rotors, ya que es el que se utilizará en el sistema a implementar [38].

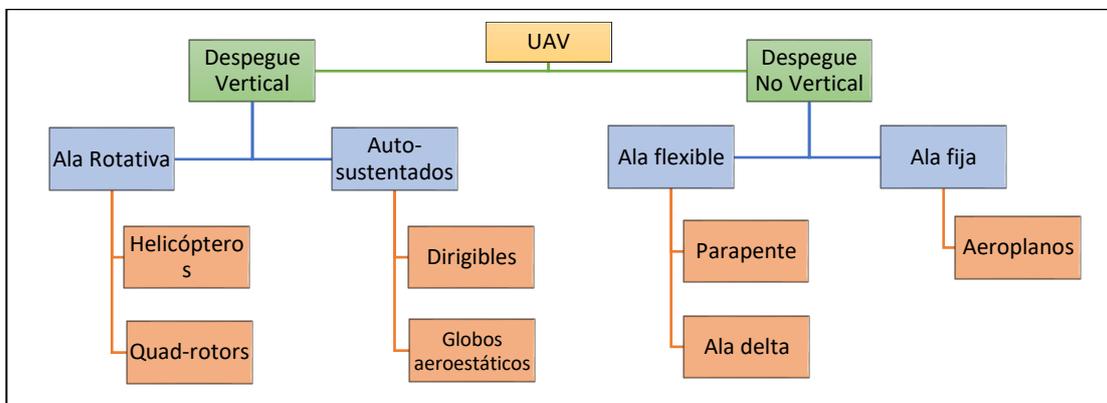


Figura 2.4 Tipos de UAV.

Fuente: Imagen tomada de [38].

Elaboración: Propia de los autores.

### 2.6.2 Quad-rotors.

Es un UAV de ala rotativa de cuatro rotores o hélices dispuestas en una configuración en cruz. Son capaces de descender y aterrizar de manera vertical, pudiendo suspenderse sobre un punto fijo.

Los motores que conforman un quad-rotor son equidistantes tanto uno del otro como del centro de la estructura, lo que lo convierte en un vehículo simétrico, en el que cada uno de los motores produce empuje y torque, por lo que para asegurar que el UAV se eleve y pueda desplazarse es necesario que el sentido de giro de los motores y el tipo de hélice de cada motor sea similar a las configuraciones ilustradas en la Figura 2.5 [39].

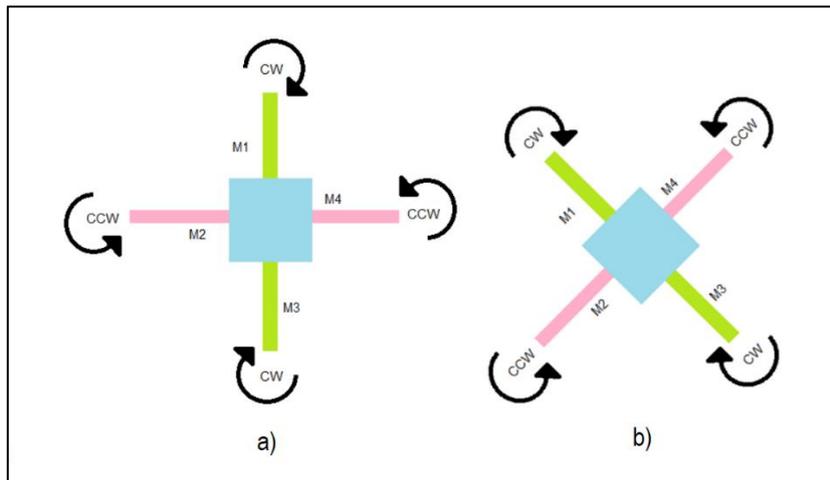


Figura 2.5 (a) Configuración Plus y (b) Configuración X.  
 Fuente: Imagen tomada de [39].  
 Elaboración: Elaborado por [39].

### 2.6.3 UAV en situaciones de emergencia.

Los UAV tienen un gran potencial en diversas áreas, ya que pueden desplazarse rápidamente sobre un terreno irregular o accidentado y superar cualquier tipo de obstáculo recogiendo información por diferentes sensores.

Hoy en día, esta tecnología se emplea como operativos de rescate y de vigilancia, para controlar incendios forestales, investigaciones arqueológicas, fotografías aéreas, para el campo. Actualmente se lo usa como sistema para rastrear a personas desaparecidas [40].

Se destacan por su efectividad en situaciones límites, especialmente en áreas que quedaron aisladas o de difícil acceso luego de un desastre natural, estos pueden sobrevolar los lugares de forma eficiente y reportar las imágenes tomadas en tiempo real a una estación terrena. Su velocidad de vuelo permite recorrer grandes áreas en poco tiempo, permitiendo llevar la ayuda necesaria. Pueden sobrevolar las zonas devastadas en cuestión de segundos. Estas aeronaves han entrado en acción en zonas de contaminación, tras un accidente nuclear, en terremotos, inundaciones, etc. [41]

Son pequeños, por lo que pueden buscar personas y objetos en grandes áreas, inclusive en la noche. Pueden acceder a edificios a punto de caer, buscando sobrevivientes y obteniendo datos e información vital. Tienen la capacidad de realizar vuelos entre el humo de los incendios e identifican térmicamente siluetas de personas para saber dónde están atrapados, desmayados e inconscientes. En ambientes explosivos, inspeccionan y toman muestras del aire, pasan entre escombros localizando a las personas, son rápidos y pueden recoger muestras de agua contaminada o sustancias químicas tras acceder a sitios inverosímiles [42].

### **CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE HARDWARE Y SOFTWARE**

### 3.1 Introducción.

El presente capítulo muestra los requerimientos del sistema, arquitectura, componentes hardware y software, la aplicación desarrollada en la plataforma Tkinter para el ingreso al transmisor FM y a la red GSM, control remoto mediante MobaXterm y la implementación del sistema de comunicación en un UAV.

### 3.2 Especificaciones del sistema.

En la Figura 3.1 se muestra el esquema del sistema a implementar. Para su diseño es necesario considerar los siguientes requerimientos:

- La placa donde se realice el procesamiento de datos deberá tener dimensiones reducidas debido a que será implementado en un UAV.
- Una placa con consumo de corriente bajo, capaz de soportar el dispositivo SDR y módulo Wi-Fi.
- El sistema podrá ser monitoreado, controlado y gestionado remotamente desde una estación base terrena mediante una interfaz gráfica para el usuario.

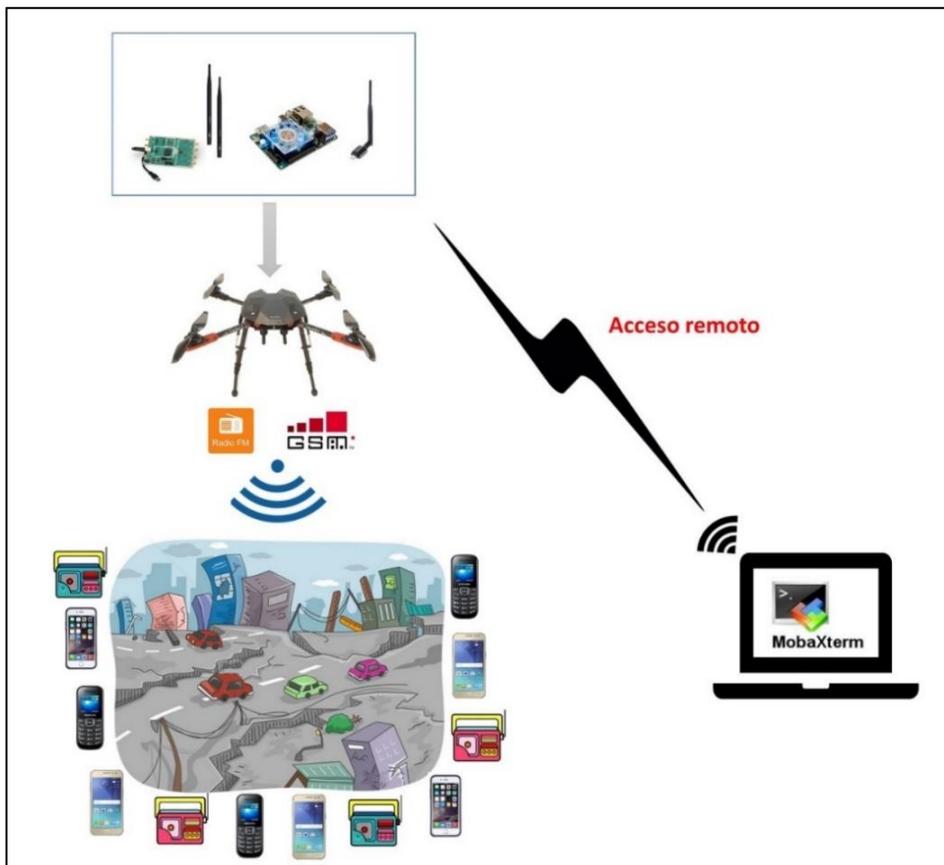


Figura 3.1 Esquema del sistema a implementar.

Fuente: Propia de autores.

Elaboración: Propia de autores.

### 3.3 Arquitectura hardware del sistema.

La arquitectura general del sistema de comunicación está compuesta por dos nodos, un nodo móvil constituido por el UAV y los dispositivos que conforman el sistema de comunicación; y el nodo estación terrena que es la encargada de monitorear, controlar y gestionar la red GSM y recibir la señal FM enviada por el nodo móvil.

La arquitectura hardware del nodo móvil se presenta en la Figura 3.2, se encuentra la adquisición de datos, procesamiento de las señales GSM y transmisión FM.

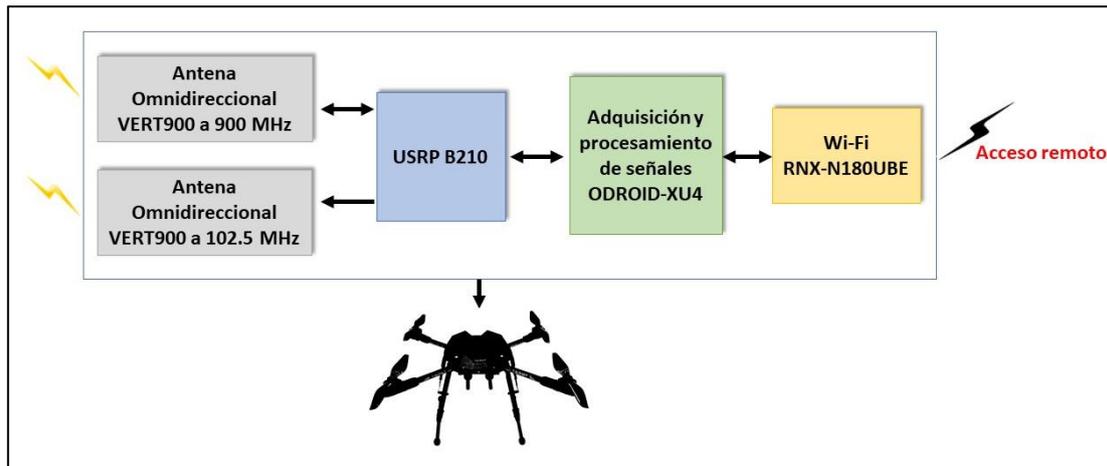


Figura 3.2 Arquitectura hardware del nodo móvil.

Fuente: Propia de autores.

Elaboración: Propia de autores.

La arquitectura hardware de la estación terrena, donde se visualiza, monitorea y controla el sistema de comunicación que se encuentra en el nodo móvil se observa en la Figura 3.3.

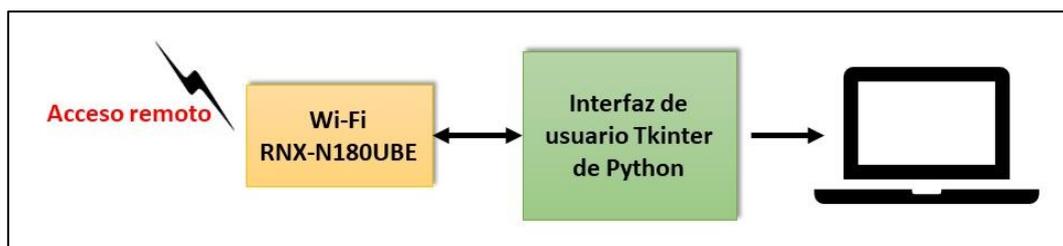


Figura 3.3 Arquitectura hardware de la estación terrena.

Fuente: Propia de autores.

Elaboración: Propia de autores.

### 3.4 Arquitectura software del sistema.

En la Figura 3.4 se muestra la arquitectura software del nodo móvil, donde se procesan las señales GSM y FM en el miniordenador ODROID-XU4.

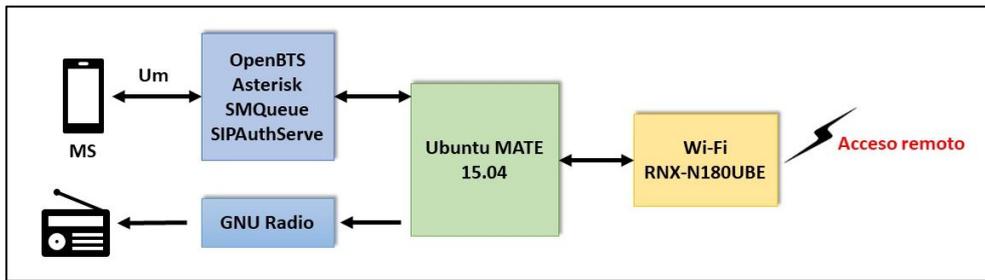


Figura 3.4 Arquitectura software del nodo móvil.

Fuente: Propia de autores.

Elaboración: Propia de autores.

La arquitectura software de la aplicación que se utiliza en la estación terrena compatibles para diversos sistemas operativos se presenta en la Figura 3.5.

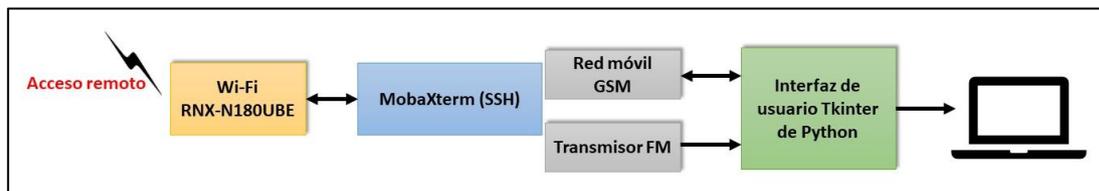


Figura 3.5 Arquitectura software de la estación terrena.

Fuente: Propia de autores.

Elaboración: Propia de autores.

### 3.5 Selección de componentes hardware del prototipo.

#### 3.5.1 Tarjeta de procesamiento.

Para el procesamiento del sistema de comunicación GSM y transmisor FM se usa un miniordenador ODROID-XU4 (Figura 3.6). La elección de este dispositivo frente a las diferentes tarjetas de procesamiento como Raspberry Pi, es el poseer un procesador de ocho núcleos y 2 GB de RAM, lo que permite contar con altas tasas de transferencia de datos.

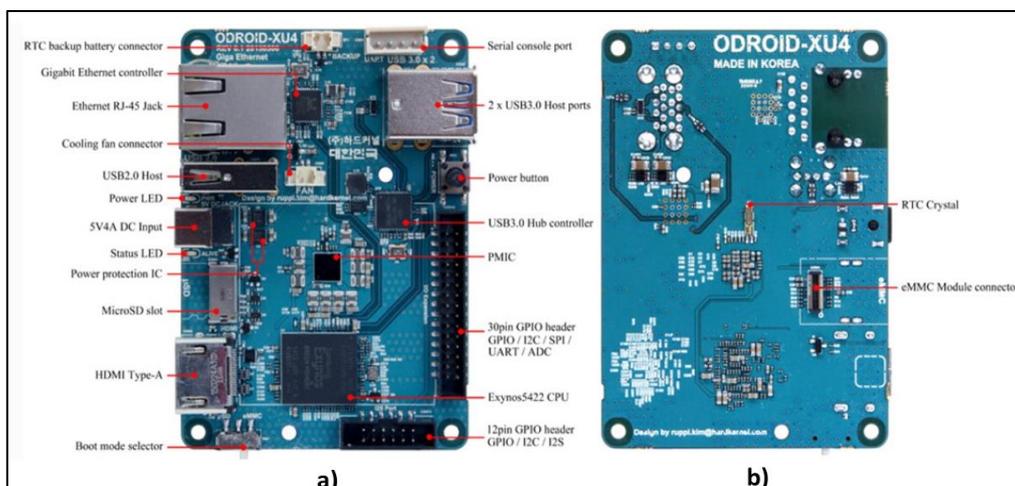


Figura 3.6 (a) Vista frontal tarjeta ODROID-XU4 y (b) Vista posterior tarjeta ODROID-XU4.

Fuente: Imagen tomada de [43].

Elaboración: Elaborado por [43].

El ODROID-XU4 es un dispositivo ARM, que es la arquitectura más utilizada para dispositivos móviles e informática integrada de 32 bits. Es uno de los computadores de bajo costo más potente y eficiente en cuanto a energía. Al ofrecer soporte de código abierto la placa puede ejecutar varias versiones de Linux, incluido Ubuntu 16.04 y Android 4.4 KitKat, Lollipop 5.0 y Nougat 7.1 [43].

En la Tabla 3.1 se muestra la tabla comparativa entre las tarjetas ODROID-XU4 y Raspberry Pi 3 Model B, en donde se describen las características más importantes de las mismas.

Tabla 3.1 Comparativa de procesadores.

Características	ODROID-XU4	Raspberry Pi 3 Model B
Procesador	Samsung Exynos 5422 de 8 núcleos (ARM Cortex A15 y ARM Cortex A7) a 2GHz.	Broadcom BCM2387 de 4 núcleos (ARM Cortex-A53) a 1.2 GHz
Memoria RAM	2 GB RAM LPDDR3	1 GB LPDDR2
Almacenamiento	eMMC 5.0 8 bits / Micro SD	Micro SD
Tarjeta de red	Gigabit Ethernet 10/100/1000 Mbps	Base Ethernet 10/100 Mbps
Alimentación	5V/4A	5V/2.5A
Dimensiones	82 x 58 x 22 mm	85 x 56 X 17 mm
Peso	60 g	45 g

Fuente: [43], [44].

Elaboración: Propia de los autores.

### 3.5.2 Dispositivo SDR.

Para el desarrollo del sistema es necesario un dispositivo en donde se despliegue la red de telefonía móvil GSM y el transmisor FM. En el Laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica Particular de Loja se cuenta con varios dispositivos SDR que nos permitirán desarrollar los sistemas propuestos, en la Tabla 3.2 muestra un resumen de las características más relevantes de estos dispositivos.

Tabla 3.2 Comparativa modelos SDR.

Característica	N210	B210	Nuand bladeRF x115
Banda de frecuencia	CC – 6GHz	70 MHz – 6 GHz	300 MHz- 3.8 GHz
Dúplex	MIMO 2x2 (2 antenas TX y 2 antenas RX) half o full dúplex	MIMO 2x2 (2 antenas TX y 2 antenas RX) half o full dúplex	Full Dúplex
Procesador	Xilinx Spartan 3A-DSP XC3SD3400A FPGA	Xilinx Spartan 6 XC6SLX150 FPGA	ARM9 de 200 MHz On-board 115KLE

			Altera Cyclone 4 FPGA
<b>Ancho de banda RF</b>	50 MHz con muestras de 8 bits. 25 MHz con muestras de 16 bits.	Hasta 56 MHz en tiempo real en 1x1 Hasta 30.72 MHz en tiempo real en 2x2	28 MHz con muestras de 12 bits
<b>Máxima frecuencia de muestreo</b>	ADC: 14 bits 100 MS/s DAC: 16 bits 400 MS/s	ADC: 12 bits 61.44 MS/s DAC: 12 bits 61.44MS/s	ADC: 12 bits 40 MS/s DAC: 12 bits 40 MS/s
<b>Precisión en frecuencia</b>	±2.5 ppm	±2 ppm	±1 ppm
<b>Conectividad</b>	Gigabit Ethernet	USB 3.0	USB 3.0 compatible con USB 2.0
<b>Alimentación DC</b>	6V	5V	5V
<b>Potencia máxima</b>	+15 dBm	RF A: TX/RX TX +20 dBm RF B: TX/RX TX +20 dBm	+6dBm
<b>Sensibilidad</b>		RF A: RX2 RX -15 dBm RF A: TX/RX RX -15 dBm RF B: RX2 RX -15 dBm RF B: TX/RX RX -15 dBm	
<b>Temperatura de operación:</b>	0 a 55°C	0 a 40°C	0 a 70 °C
<b>Dimensiones</b>	220 x 160 x 50 mm	97 x 155 x 15 mm	87 x 131 x 18 mm
<b>Peso</b>	1.2 kg	163g	80g
<b>Precio</b>	\$2.180,00	\$1.400,00	\$650,00

Fuente: [45], [46], [47].

Elaboración: Propia de los autores.

Se ha decidido usar el USRP B210, debido a las frecuencias en las que puede trabajar, haciéndolo capaz de adaptarse a diferentes estándares de transmisión y trabajar con señales de todo tipo de sistemas de radiocomunicaciones. Además, sus dimensiones y peso lo hacen flexible para un uso portátil.

El USRP B210 es un dispositivo SDR fabricado por Ettus Research que se conecta a un ordenador mediante un cable USB (ver Figura 3.7), a través del cual se configuran los parámetros necesarios y controla el dispositivo de manera general, en el que se debe instalar previamente el UHD.

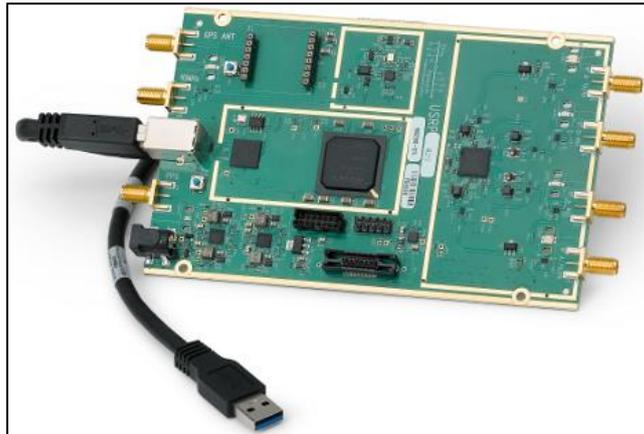


Figura 3.7 Vista frontal USRP B210.

Fuente: Imagen tomada de [45].

Elaboración: Elaborado por [45].

Tiene integrado un RFIC AD9361, que es un transceptor de conversión directa, ideal para transmitir y recibir señales de radio en un gran rango de frecuencias, con una figura de ruido de 2dB que permite señales con anchos de banda desde menos de 200 KHz hasta 56 MHz y frecuencias portadoras desde 70 MHz hasta 6 GHz [45].

La parte de control se lleva a cabo en la FPGA, en la que se implementan 4 bloques (uno por cada transmisor y receptor) de DUC y DDC. Cada bloque se comunica con el transceptor integrado (RFIC AD9361), que a su vez controla la interfaz de RF para la transmisión y recepción de señales. Adicionalmente, se tiene el sistema de alimentación y la generación de los relojes y señales de referencia necesarios para el sistema. También se lleva a cabo el control del UHD, que es el que se comunica con el controlador del USB. La Figura 3.8 muestra el diagrama de bloques que conforman al USRP B210 [45].

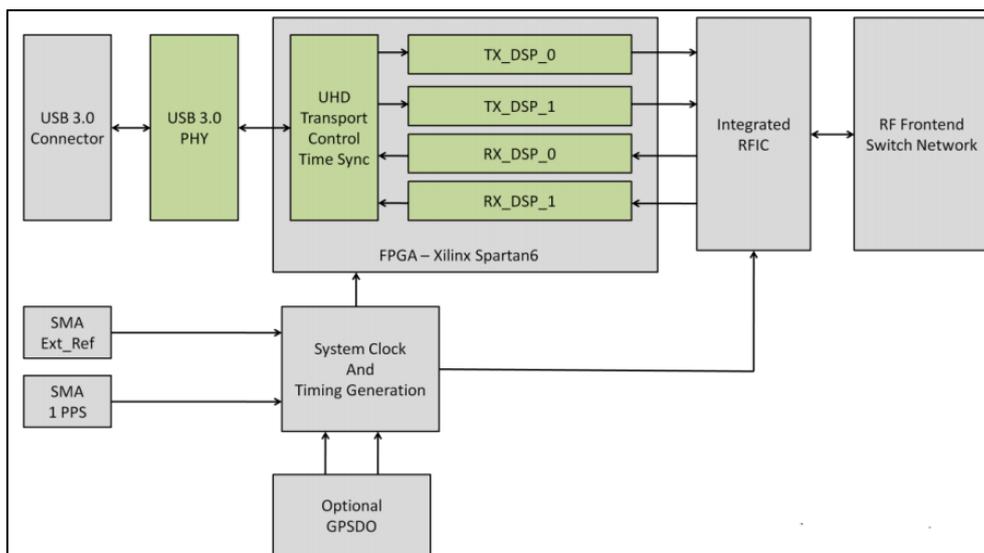


Figura 3.8 Diagrama de bloques USRP B210.

Fuente: Imagen tomada de [45].

Elaboración: Elaborado por [45].

Se debe adquirir dos antenas que constituyan el “Front-End” del módulo de transmisión y recepción del USRP necesarias para cubrir las bandas GSM y FM, Así mismo se realiza una comparativa de las antenas disponibles en el laboratorio, en la Tabla 3.3 se muestra sus características.

Tabla 3.3 Comparativa de antenas.

Parámetros	VERT900	TECHTOO 3G 4G	4G LTE HUAWEI
Frecuencia	824-960 MHz 1710-1990 MHz	700-2600 MHz	700-2600 MHz
Ganancia	3 dBi	5 dBi	5 dBi
Tipo	Dipolo Omnidireccional	Dipolo Omnidireccional	Dipolo Omnidireccional
Conector	SMA(M)	SMA(M)	SMA(M)
Polaridad	Vertical	Vertical	Vertical
Tipo de radiación	Toroidal		
Impedancia	50 ohm	50 ohm	50 ohm
Precio	\$35,00	\$24,00	\$8,50

Fuente:[48], [49], [50].

Elaboración: Propia de los autores.

Para las pruebas se han escogido las antenas VERT900 y TECHTOO (ver Figura 3.9), en el capítulo 4 se explica de mejor manera la elección de las mismas.

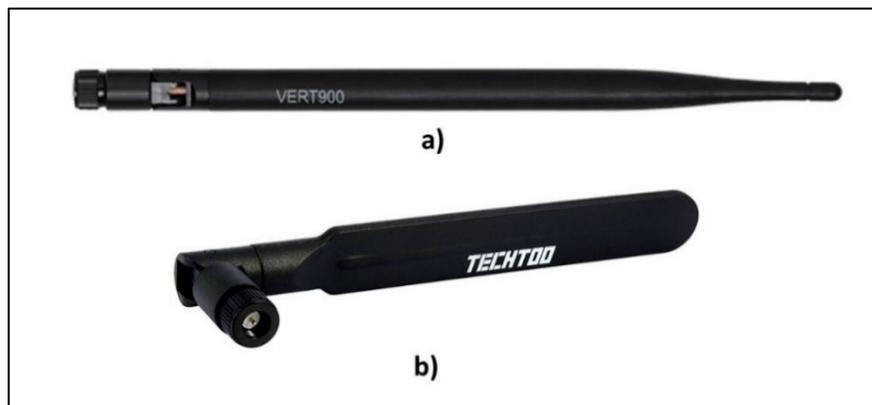


Figura 3.9 (a) Antena VERT900 y (b) Antena TECHTOO.

Fuente: Imagen tomada de [48], [49].

Elaboración: Propia de los autores.

Debido a que la ganancia de las antenas VERT900 no supera los 3 dBi, la red no alcanzará más de 47m de cobertura, si se aplica en el espacio libre. Para sustentar lo anteriormente dicho, usamos la siguiente ecuación para calcular la distancia [25]:

$$M = PIRE - Path_{loss} + Grx - S \quad (3.1)$$

Donde:

- M es el margen del enlace.
- PIRE es la potencia isotrópica radiada.
- $Path_{loss}$  son las pérdidas en espacio libre.
- Grx es la ganancia del receptor.
- S es la potencia mínima que el receptor puede recibir, para estaciones móviles GSM 900 según las especificaciones TS145.005 es de -104 dBm [51].

Para realizar los cálculos de alcance del enlace, se toma los datos presentados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Datos del enlace.

Parámetros	Características
$P_T$	15dBm
$G_a$	3dBi
$f$	900 GSM 102.5 FM
S	-104dBm

Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

$$PIRE = P_T + G_a \quad (3.2)$$

$$PIRE = 18dB \quad (3.3)$$

Entonces, reemplazando en la ecuación (3.1) tenemos:

$$Path_{loss} = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 32.4 \quad (3.4)$$

$$20 \log(d) = 18dB - 20 \log(900) - 32.45 + 3dBi + 104dBm \quad (3.5)$$

$$\log(d) = \frac{33,4651}{20} \quad (3.6)$$

$$d = 47.15m \quad (3.7)$$

De igual manera se realiza el cálculo para las antenas TECHTOO:

$$PIRE = 20dB \quad (3.8)$$

$$d = 74.67m \quad (3.9)$$

En este caso la red alcanzará hasta los 74.67m de cobertura.

Para la transmisión FM se realizan los mismos cálculos, cambiando la frecuencia y considerando como receptor uno implementado en un USRP B210 dando como resultado las siguientes distancias:

$$VERT900: d = 38.30m \quad (3.10)$$

**3.5.3 Módulo Wi-Fi.**

Para establecer la conexión remota entre el sistema implementado en la ODRROID-XU4 y la PC de escritorio, portátil o un dispositivo móvil que se usará en la estación terrena, usamos el adaptador Wi-Fi RXN-N180UBE que nos permitirá una conectividad rápida, confiable y de largo alcance.

Es un dispositivo cliente 802.11n, está diseñado para proporcionar velocidades inalámbricas de hasta 300 Mbps y tecnología MIMO avanzada, puede interoperar con otros dispositivos inalámbricos (802.11b, 802,11g) el adaptador es compatible con el cifrado WEP, WPA y WAP2 para evitar la intrusión externa y proteger eficazmente los entornos inalámbricos de los usuarios. Posee una antena desmontable de alta ganancia de 5dBi, logrando una recepción óptima y conexión Wi-Fi de alta calidad [52]. (Ver Figura 3.10).



Figura 3.10 (a) Adaptador Wi-Fi RXN-N180UBE y (b) Antena desmontable.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

A continuación, en la Tabla 3.5 se muestran las características principales del adaptador.

Tabla 3.5 Características de RXN-N180UBE.

Características	Descripción
Estándar	IEEE 802.11n Draft 2.0 e IEEE 802.11g/b
Banda de frecuencia	2.4 GHz ~ 2.848 GHz
Velocidad de datos	Hasta 150 Mbps en sentido ascendente y hasta 300 Mbps descendente.
Sensibilidad	-70dBm
Potencia de salida de RF	Hasta 20 ±1 dBm
Antena	Extraíble, externa de 5dBi
Dimensión	180 x 180 x 50 mm
Peso	29 g

Fuente: [53].

Elaboración: Propia de los autores

### 3.5.4 UAV “TAROT IRONMAN”.

El UAV utilizado en este trabajo de titulación es proporcionado por la empresa *ThunderDrone* (Figura 3.11), está constituido por un marco inferior de fibra de carbono para mantenerlo ligero y más robusto y un marco superior de PCB para facilitar la soldadura y cableado [54]. Es especialmente adecuado para hacer videovigilancia, detección remota, mapeo, reconocimiento aéreo, observación de incendios, monitoreo de granjas y otros equipos de requisitos de rendimientos móvil [55]. Tiene un tiempo de vuelo de 15 minutos (dependiendo de la configuración) [56].



Figura 3.11 Tarot IRONMAN 650.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

#### 3.5.4.1 Características del UAV “TAROT IRONMAN”.

A continuación, en la Tabla 3.6 se describen las características más relevantes del UAV “TAROT IRONMAN”.

Tabla 3.6 Características del UAV “TAROT IRONMAN”.

Característica	Descripción
<b>Estructura</b>	Tarot IRONMAN” de 650 mm <ul style="list-style-type: none"><li>• Ancho: 650 mm.</li><li>• Alto: 220 mm.</li><li>• Peso: 476 g.</li></ul>
<b>Motores brushless</b>	Multistar Elite 4114 330kV <ul style="list-style-type: none"><li>• Imanes N45SH.</li><li>• kV: 330kV.</li><li>• Alto:38 mm.</li><li>• Diámetro: 46 mm.</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empuje máximo: 1.75 kg.</li> <li>• Peso: 152 g.</li> </ul>
<b>Controladores electrónicos de velocidad (ESC).</b>	Hobbywing XRotor 40A <ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente constante: 40A.</li> <li>• Voltaje de alimentación: 3.7-22.2 V.</li> <li>• Corriente máxima: 60A.</li> <li>• Tamaño: 68x25x2.7 mm</li> <li>• Peso: 26 g.</li> </ul>
<b>Tarjeta controladora de vuelo</b>	Tarot ZYX-M <ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesador de 32 bits.</li> <li>• Sensores incorporados para la absorción de choque, resistencia superior a los golpes.</li> <li>• Receptor dual S-BUS compatible.</li> <li>• Módulos: GPS, de PMU.</li> </ul>
<b>Batería</b>	Multistar 6S 10000 mAh <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad máxima: 10000mAh.</li> <li>• Descarga constante: 10C.</li> <li>• Configuración: 6S2P/22.2V/6 Cell.</li> <li>• Tamaño: 156x65x53 mm.</li> <li>• Peso: 1.18 kg.</li> </ul>

Fuente: [54], [57], [58], [59], [60].  
Elaboración: Propia de los autores.

### 3.6 Software del prototipo.

#### 3.6.1 Sistema operativo.

Se utiliza el sistema operativo Ubuntu, ya que es el óptimo para la instalación de paquetes de GNURadio y del USRP necesarias debido a que los procedimientos de compilación e instalación se basan en scripts y herramientas de Linux. GNURadio funciona muy bien en todas las versiones de Ubuntu desde 10.04 en adelante. También es posible instalar en versiones anteriores; sin embargo, es posible que no se encuentre suficiente soporte para la versión a utilizarse [61].

Ubuntu tiene soporte para arquitecturas de hardware en computadoras personales y servidores de 32-bit y 64-bit existiendo también el soporte para procesadores ARM. Tiene la capacidad de actualizar al mismo tiempo todas las aplicaciones que se encuentran instaladas en el equipo mediante una serie de repositorios [62].

La versión de Ubuntu que se usa en este trabajo de titulación es Ubuntu MATE 15.04 debido a que, cuya versión permitió instalar los paquetes para el funcionamiento de GNURadio y OpenBTS.

Ubuntu MATE 15.04 también es conocido como *Vivid Vervet*, este disponible desde el 23 de abril de 2015, es la vigésima segunda versión de Ubuntu. Existen pocos cambios en esta versión, incluye kernel Linux 3.19.3, utiliza la interfaz Unity 7.3 que presenta menús integrados de forma predeterminada, reemplazando los menús globales anteriores [63]. En el ANEXO A, se encuentra la instalación del sistema operativo Ubuntu MATE 15.04 sobre el miniordenador ODROID-XU4.

### **3.6.2 GNURadio.**

Esta herramienta permite desarrollar aplicaciones de procesamiento de señales, el análisis, filtrado, codificación, modulación de las señales utilizadas en el sistema de comunicación a implementarse. Permitir transmitir y recibir señales de radio frecuencia de dispositivos SDR como USRP, BladeRF, HackRF o SDR-RTL.

Es una herramienta de software libre, que provee bloques de procesamiento de señales para el diseño y simulación de sistemas de radio definido por software [64].

Las aplicaciones en GNURadio se programan en Python, que es un lenguaje de programación interpretado, es decir, no se compila, sino que el sistema operativo lo ejecuta directamente. También utiliza la aplicación GNURadio Companion, que es una herramienta que, mediante una interfaz gráfica basada en bloques, facilita el diseño, creando los ficheros Python a partir del esquema que se cree. De esta manera el usuario no requiere conocimientos previos en Python [65].

La versión utilizada es GNURadio 3.7.10.1. Es importante tener en cuenta que las versiones más antiguas de GNURadio no ejecutan los archivos Python generados por las nuevas versiones. GNURadio tiene bloques dedicados exclusivamente al manejo de las tarjetas USRP de Ettus, por lo tanto, es importante destacar que el paquete UHD que viene dentro de la versión utilizada y que incluye funciones para la prueba de las tarjetas no nos servirá, ya que viene para arquitecturas x86 y x64, por lo que es necesario descargar el UHD compatible para ARMv7 que es la arquitectura usada por el miniordenador ODROID-XU4. La instalación se encuentra especificado en el ANEXO B.

El entorno gráfico como se muestra en la Figura 3.12 puede abrirse mediante el comando *gnuradio-companion* en una terminal del sistema operativo instalado.

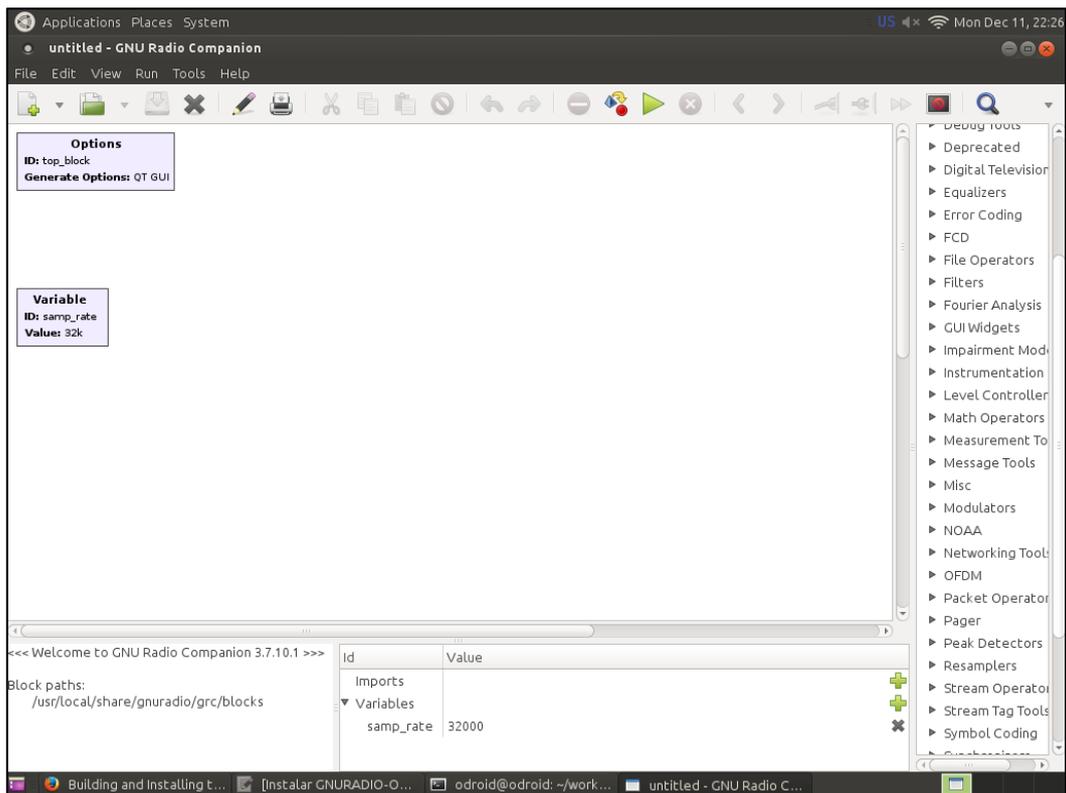


Figura 3.12 Entorno gráfico de GNURadio.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Se observa que en el lado derecho se encuentra una variedad de bloques agrupados de acuerdo con su función, en el lado superior se encuentra la barra de herramientas que permite cargar programas y ejecutarlos, eliminar y copiar bloques. En la parte inferior esta la consola de GNURadio que sirve para monitorear la ejecución de un programa y el centro es el espacio de trabajo para agregar y configurar los bloques.

### 3.6.3 OpenBTS.

Este software de código abierto y comercial licenciada de Unix es utilizado por el hardware USRP para presentar una interfaz de aire Um emulando al estándar de comunicaciones móviles GSM, lo que permite que los teléfonos móviles adyacentes detecten la red GSM, donde ellos a su vez son vistos como terminales VoIP, es decir, como un cliente SIP dentro del software de central telefónica Asterisk PBX, permitiendo vincular llamadas telefónicas sin usar las redes de los operadores convencionales. Para cumplir con las funciones de un MSC, de una red GSM, Asterisk hace uso de la aplicación SIPAuthServer. Actualmente OpenBTS es mantenido por la compañía Range Networks, fundada por David Burgess y Harvind Samra [10].

OpenBTS no es una implementación completa de una red GSM, sino que reemplaza en software la BSC de una red convencional y hace uso de una central telefónica VoIP o PBX para enlazar las llamadas [10].

A continuación, en la Tabla 3.7 se muestra las equivalencias entre la red GSM convencional y OpenBTS.

Tabla 3.7 Tabla comparativa entre GSM convencional y OpenBTS.

GSM	OpenBTS	Comentarios
Um	Um	Misma interfaz para que sean compatibles
BTS	SDR/Transceiver	
BSC	OpenBTS	
Abis	UDP	Conexión entre Transceiver y OpenBTS
MSC	Asterisk PBX	Usa SIP/RTP
VLR	SIPAuthServer	
HLR	SIPAuthServer	
AuC	SIPAuthServer	
EiR	SIPAuthServer	
SMS	SMQueue	

Fuente: Tabla tomada de [9].

Elaboración: Propia de los autores.

Como se observa, el estándar GSM necesita de diferentes equipos e interfaces, en OpenBTS, al ser toda la señalización dentro de la red mediante SIP, no requiere de tantos elementos ya que todo está en un único modulo.

### 3.6.3.1 Arquitectura de OpenBTS.

OpenBTS consiste en varios programas que se ejecutan como servicios en Linux y que interactúan entre sí para emular la arquitectura GSM. En la Figura 3.13 se observa todos los componentes que se instalan junto con OpenBTS, para poner en marcha la red, operar, registrar los MS's e iniciar la comunicación.

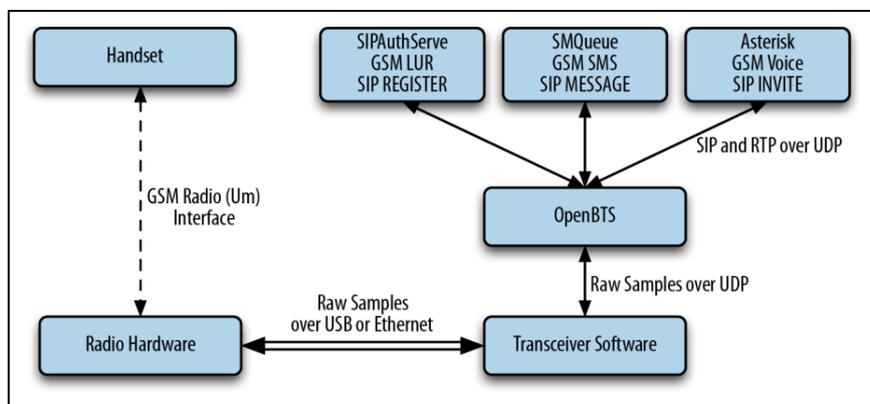


Figura 3.13 Arquitectura de OpenBTS.

Fuente: Imagen tomada de [66].

Elaboración: Elaborado por [66].

- **Transceiver:** realiza las funciones de radiomódem basado en software, es decir que puede trabajar en las 4 bandas principales de GSM [67]:
  - GSM850 y GSM1900: utilizadas en la región 2 definida por la ITU.
  - PGSM900, EGSM900 y DCS1800: utilizada en la mayor parte del mundo.

Maneja la interfaz USB con el USRP, y consiste en tres módulos [9]: transceiver, radiolInterface y USRPDevice.

El módulo USRPDevice es básicamente un controlador que lee y escribe paquetes al USRP, donde un lado del USRP es usado para la transmisión y el otro para la recepción.

El módulo radiolInterface es una interfaz entre el transceiver y el USRP. Este maneja el reloj de la BTS basado en el conteo de muestras recibidas del USRP. Los paquetes que van desde el USRP al módulo transceiver en la dirección de subida (uplink) son puestos en cola y segmentados dentro de ráfagas GSM. Las ráfagas del módulo transceiver son pasadas al USRP en la dirección de bajada (downlink).

El módulo transceiver realiza la modulación, demodulación, detección de ráfagas GSM. Se comunica con la pila de protocolos GSM a través de tres sockets UDP: uno para los datos, otro para mensajes de control, y uno para pasar información del clock. Contiene una cola de prioridad para ordenar las ráfagas que van a ser transmitidas y una tabla para llenar intervalos de tiempo que no tienen una ráfaga en la cola de prioridad.

- **SIPAuthServe:** se refiere al registro y autorización de usuarios, es decir, cumple la función del HLR, VLR, AuC y EiR en una red GSM convencional, procesa las solicitudes de actualización de ubicación que realiza OpenBTS y ejecuta las correspondientes actualizaciones en la base de datos de usuarios (sqlite3.db), la misma que accederá a Asterisk para gestionar los usuarios y llamadas. Cuando un teléfono se autentica con éxito, aparece en la red VoIP como un terminal SIP con el identificador "IMSIxxxxxxxxxxxxxx", donde las "x" corresponden al IMSI de 15 dígitos de la tarjeta SIM de la MS [10].

Existe la posibilidad de no necesitar el IMSI para el registro al abonado, para ello se debe dejar abierto el acceso a la red a todos los terminales que lo soliciten.

- **SMQueue:** el servidor de envío y almacenamiento de mensajes de texto cortos (SMS) entre terminales GSM, los programa para su entrega en la red y los

reprograma si el teléfono objetivo no está disponible. Los datos de su configuración se almacenan en la base de datos smqueue.db [9]. SMQueue dispone de dos aplicaciones por defecto:

- Autoprovisioning o registro (101): esta aplicación permite a los usuarios de OpenBTS crear nuevas entradas en el registro de suscriptores a través de SMS. El usuario envía su número de teléfono en un mensaje de texto a la dirección de código corto de registro. Para que esta aplicación funcione, también se debe habilitar el registro de código abierto.
  - Info (411): genera un informe breve del estado de SMQueue, que se devuelve al emisor en un mensaje de texto.
- **NodeManager:** es una API de administración que permite a aplicaciones de terceros administrar diferentes bases de datos OpenBTS Application Suite: OpenBTS, SIPAuthServe y SMQueue. Para lo cual utiliza una interfaz JSON. Uno de los usos, es registrar un nuevo usuario en la red GSM, creando una nueva entrada en la tabla de suscriptores de la base de datos de SIPAuthServe [68]. Conociendo el IMSI se añade al usuario en el registro de suscriptores por medio de la línea de comandos:

```
$ ./nmcli.py sipauthserve subscribers create "UsuarioA"  
IMSI74001016453XXXX 099375XXXX
```

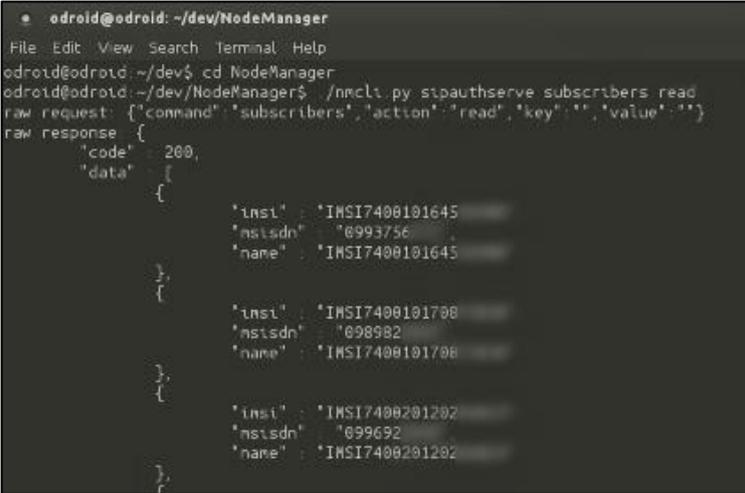
Para eliminar un usuario de la base de datos utilizamos la siguiente sentencia:

```
$ ./nmcli.py sipauthserve subscribers remove "imsi" IMSI74001016453XXXX  
099XXXXXXX
```

Si queremos mostrar todos los suscriptores registrados en el sistema ejecutamos:

```
$ ./nmcli.py sipauthserve subscribers read
```

Y se tiene como respuesta la imagen que se observa en la Figura 3.14.



```
odroid@odroid: ~/dev/NodeManager  
File Edit View Search Terminal Help  
odroid@odroid:~/dev$ cd NodeManager  
odroid@odroid:~/dev/NodeManager$ ./nmcli.py sipauthserve subscribers read  
raw request: {"command": "subscribers", "action": "read", "key": "", "value": ""}  
raw response: {  
  "code": 200,  
  "data": [  
    {  
      "imsi": "IMSI7400101645",  
      "msisdn": "099375",  
      "name": "IMSI7400101645"  
    },  
    {  
      "imsi": "IMSI7400101708",  
      "msisdn": "099882",  
      "name": "IMSI7400101708"  
    },  
    {  
      "imsi": "IMSI7400201202",  
      "msisdn": "099692",  
      "name": "IMSI7400201202"  
    }  
  ]  
}
```

Figura 3.14 Suscriptores de OpenBTS.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

- **OpenBTSCLI:** La aplicación de consola OpenBTS se denomina "interfaz de línea de comando" o CLI. La CLI le permite gestionar todas las configuraciones de la BTS, así como monitorear el estado del sistema y cambiar muchos parámetros operativos de OpenBTS y el Transceptor en tiempo real [9].

Para acceder se debe ejecutar desde la carpeta personal:

```
$ sudo ./CLI
```

Al ejecutarlo obtendremos un terminal de la siguiente forma:

```
OpenBTS>
```

Aquí se podrá configurar todos los parámetros de la estación base, como enviar SMS, ver los canales activos, modificar parámetros de la interfaz de radio (potencia de emisión, sensibilidad del receptor, etc.). Así como también monitorear las llamadas en curso y colgarlas en caso de ser necesario.

### 3.6.3.2 Asterisk.

Asterisk es una implementación de código abierto responsable de manejar solicitudes SIP INVITE, estableciendo las partes individuales de la llamada y conectarlas entre sí. Puede actuar como una central telefónica virtual. En este caso cumple el papel de MSC, ya que se encarga de enrutar las llamadas entre los distintos usuarios. Los Usuarios se conectan a ella mediante el protocolo SIP o IAX [66].

Existen dos paquetes responsables de configurar la instalación de Asterisk: range-asterisk y range-asterisk-configs. El paquete range-asterisk contiene una versión válida y confirmada del Asterisk, cambia el software y asegura que los módulos necesarios para OpenBTS estén incluidos [69].

El paquete range-asterisk-configs contiene un conjunto de archivos de configuración para que Asterisk conozca y pueda comunicarse con la base de datos del registro de suscriptores (sqlite3.db). En esta base de datos se almacena y actualizan los números de teléfono de los suscriptores, identificaciones, autenticaciones, identificador de llamadas y estados de registro [69].

En el ANEXO C, se encuentra la instalación de OpenBTS.

## 3.7 Desarrollo del transmisor FM.

El diagrama general del transmisor FM es el que se muestra en la Figura 3.15. La señal moduladora puede ser un archivo de audio o un tono de formato WAV. El amplificador de preénfasis contrarresta el voltaje de ruido que se genera al aumentar la frecuencia de la señal demodulada amplificando más la frecuencia alta de la señal moduladora. El filtro pasa bajas limita la señal de audio a una frecuencia de 15 KHz para concordar con

el rango de frecuencias establecido por la IFT [70]. El siguiente bloque se encarga de realizar la modulación en frecuencia por lo que a la salida de éste se tiene una señal de frecuencia modulada.



Figura 3.15 Diagrama del transmisor FM.

Fuente: Imagen tomada de [32].

Elaboración: Propia de los autores.

En la Figura 3.16 se muestra el mismo diagrama del transmisor FM, pero con los nombres de los bloques correspondientes que se usan en el software GNURadio.

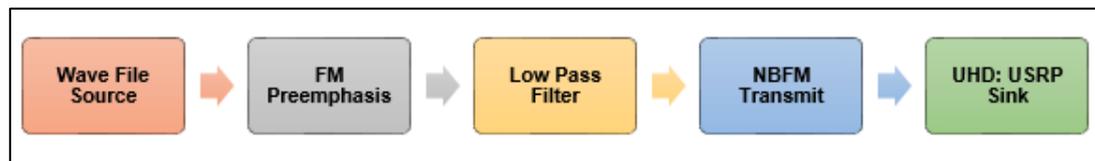


Figura 3.16 Nombres de los bloques del transmisor FM en GNURadio.

Fuente: Imagen tomada de [32].

Elaboración: Propia de los autores.

El diagrama de bloques del transmisor desarrollado en GNURadio es el que se muestra en la Figura 3.17.

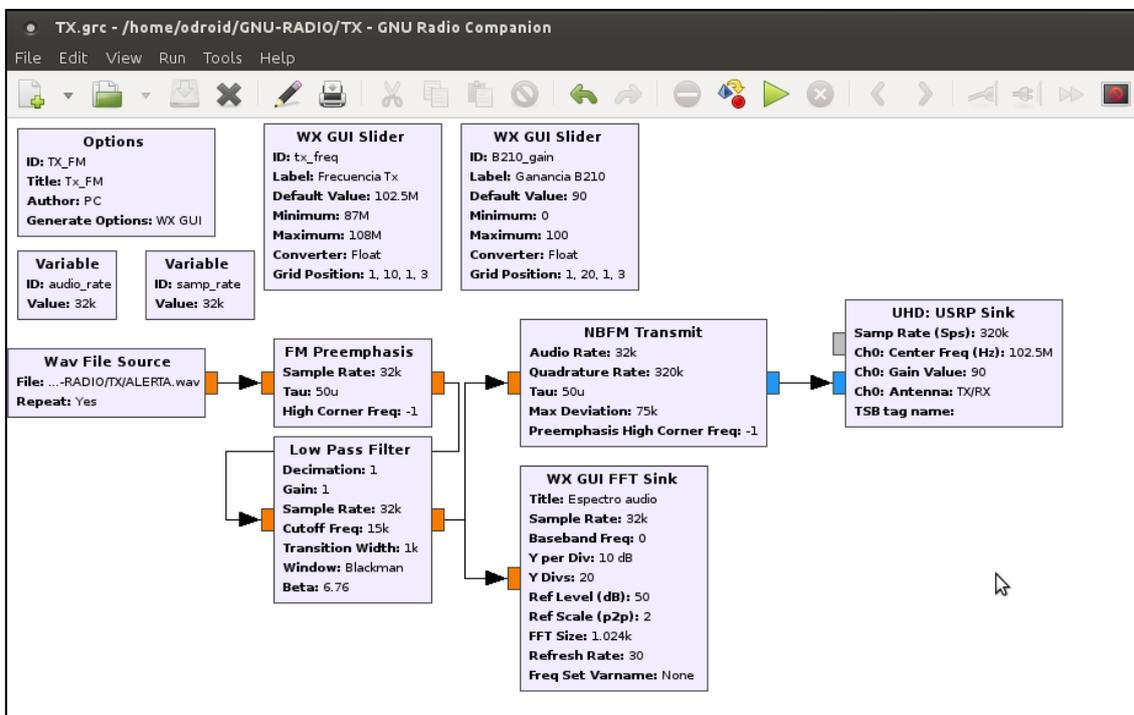


Figura 3.17 Diagrama del transmisor FM en GNURadio.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

En el ANEXO D se describe cada uno de los bloques de la Figura 3.17 y la configuración de sus propiedades.

Al obtener el fichero Python a partir del esquemático y ejecutarlo, la interfaz gráfica del espectro de la señal FM es la que se muestra en la Figura 3.18, se puede observar que la información se envía en la frecuencia de la señal modulada. La frecuencia seleccionada para el transmisor es de 102.5 MHz para no interferir con ninguna otra emisión. Se puede aumentar la potencia de la señal gracias a la ganancia del amplificador software que puede tomar valores entre 0 y 90 dB [71].

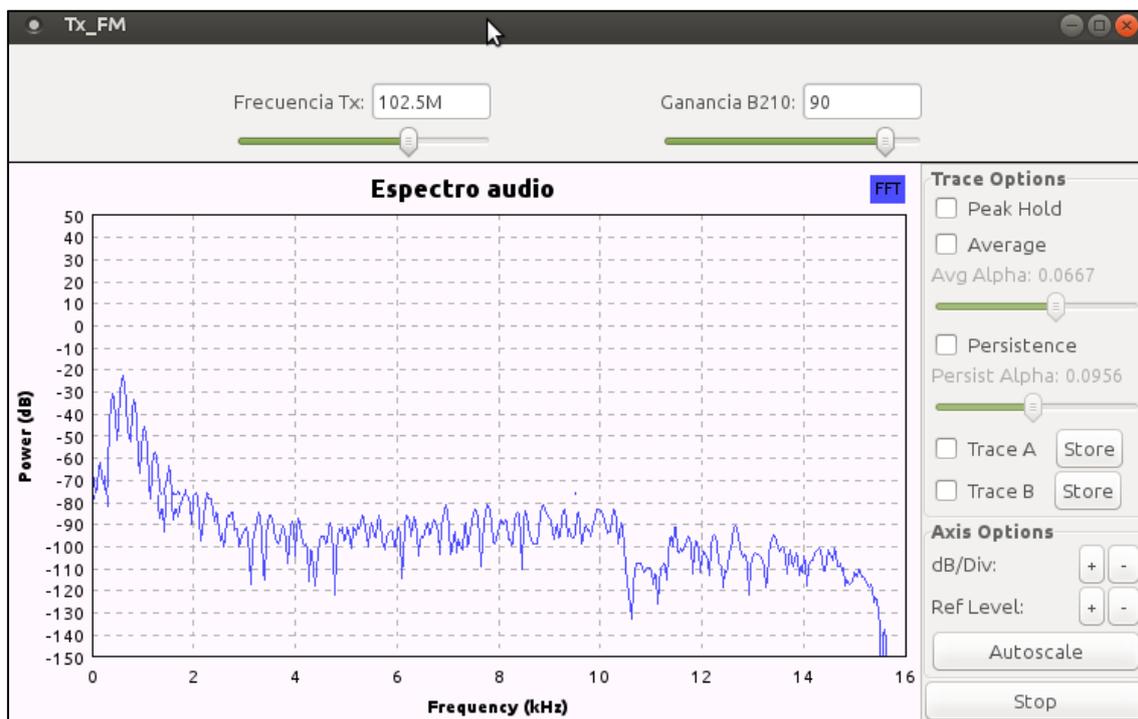


Figura 3.18 Visualización del espectro transmitido en banda base.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

### 3.8 Consumo de corriente del prototipo.

El consumo de corriente total del sistema está dado por: el consumo de corriente del procesamiento de la red de telefonía móvil o del transmisor FM y consumo de corriente del USRP. El suministro de corriente debe ser capaz de alimentar todo el sistema, por lo tanto, para conocer cuánto consume nuestro dispositivo se realizan las pruebas utilizando el multímetro digital KEYSIGHT 3446 que se muestra en la Figura 3.19, a través del software BenchVue Keysight Agilent.



Figura 3.19 Multímetro digital KEYSIGHT 3446.  
Fuente: Imagen tomada de [72].  
Elaboración: Elaborado por [72].

En la Figura 3.20 se muestra el consumo de corriente del miniordenador ODROID-XU4. En donde se puede observar que para inicializar la tarjeta de procesamiento se genera un pico de 1197mA, hasta estabilizarse en aproximadamente 483,73mA.

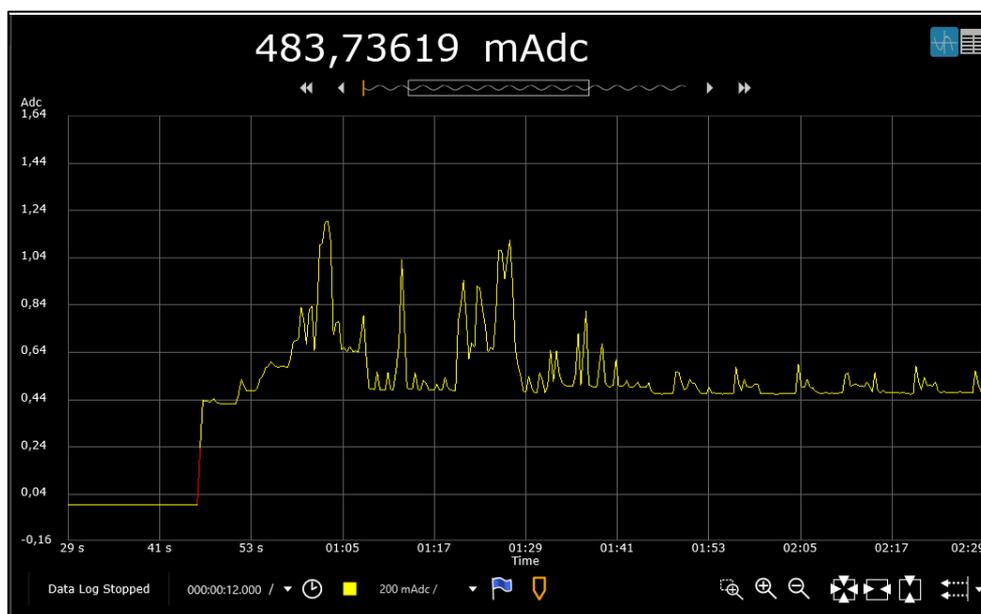


Figura 3.20 Consumo de corriente del ODROID-XU4.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

En la Figura 3.21 se observa el consumo de corriente del miniordenador juntamente con el USRP B210 funcionando con la red de telefonía móvil GSM. El consumo del ODROID-XU4 al momento de conectar el USRP B210, produce un pico de 1236 mA, hasta normalizarse en 1080 mA, es decir que únicamente el USRP B210 consume aproximadamente 596,27 mA.

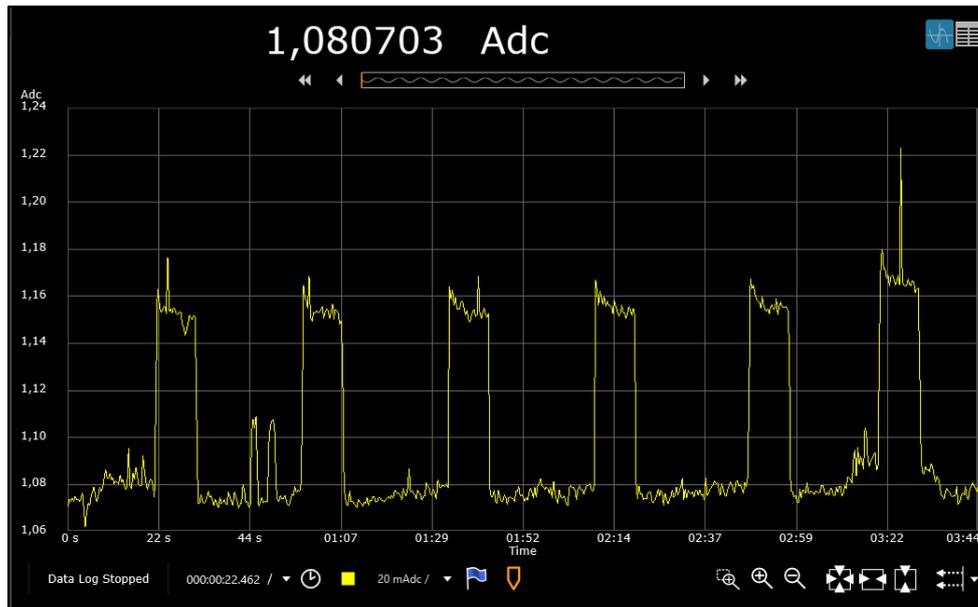


Figura 3.21 Consumo de corriente del ODR0ID-XU4 y USRP B210.  
 Fuente: Propia de los autores.  
 Elaboración: Propia de los autores.

Cuando se realiza una llamada el sistema genera un pico de 1332 mA, hasta establecerse en 1156 mA, es decir que al generar una llamada se consume aproximadamente 0,76mA. En la Figura 3.22 se registra su consumo.

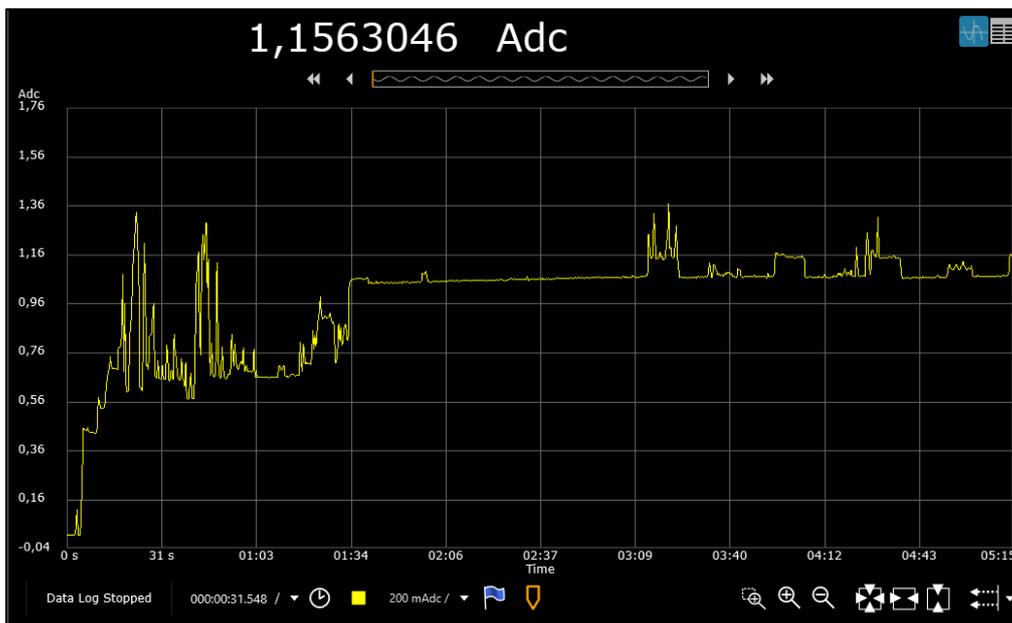


Figura 3.22 Consumo de corriente al establecer una llamada.  
 Fuente: Propia de los autores.  
 Elaboración: Propia de los autores.

Finalmente, se realizan las pruebas de consumo de corriente al ejecutar el transmisor FM, y como se observa en la Figura 3.23 se obtiene un pico de 1666 mA, hasta estabilizarse en 1620 mA, teniendo la ganancia del USRP B210 en 90 dB. Entonces se puede decir que el transmisor FM consume aproximadamente 540 mA.

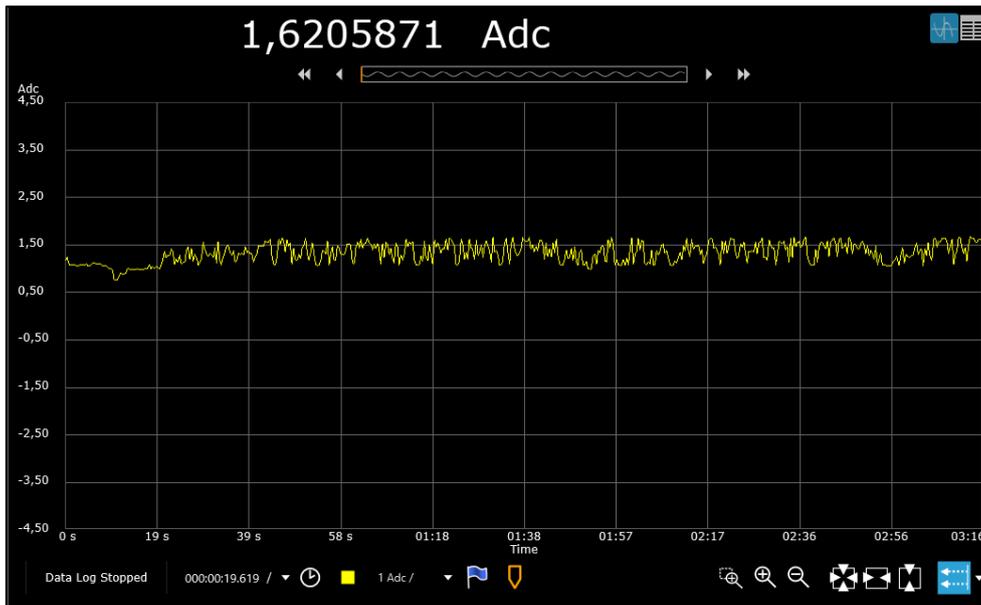


Figura 3.23 Consumo de corriente del transmisor FM.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Teniendo en consideración que el consumo máximo de corriente es de 1666 mA, se utiliza una batería de polímero de ion de Litio TURNIGY de 4000 mAh (Figura 3.24) con un voltaje de salida de 7.4V, ya que uno de los propósitos del prototipo es de mantener activo el sistema de comunicación durante un tiempo máximo de dos horas, para que los usuarios establezcan sus llamadas de socorro como también puedan recibir alertas mediante el transmisor FM.



Figura 3.24 Batería TURNIGY de 4000 mAh.  
Fuente: Imagen tomada de [73].  
Elaboración: Elaborada por [73].

Características:

- Capacidad máxima: 4000mAh.
- Descarga constante: 30C.
- Configuración: 2S1P/ 7.4V/ 2 Cell.
- Tamaño: 143 x 50 x 15 mm.

- Peso: 236 g.
- Precio: \$45,00

A continuación, se determina la capacidad del sistema para permanecer encendido [74].

$$B_L = \frac{B_C}{C_D} \quad (3.12)$$

Donde:

- $B_L$  = Autonomía del sistema.
- $B_C$  = Capacidad de la batería.
- $C_D$  = Consumo del dispositivo.

$$B_L = \frac{4000 \text{ mAh}}{1666 \text{ mA}} \quad (3.13)$$

$$B_L = 2,40 \text{ h} \quad (3.14)$$

$$B_L = 2,40 \text{ h} * \frac{60 \text{ min}}{\text{h}} \quad (3.15)$$

$$B_L = 144 \text{ minutos} \sim 2 \text{ horas } 20 \text{ minutos} \quad (3.16)$$

Debido a que la batería nos proporciona 7.4 V se debe usar un regulador de voltaje ya que los dispositivos que usamos trabajan a 5V, para ello se hace uso de un módulo regulador de voltaje y corriente (Figura 3.25) configurando con los valores correspondientes al utilizado en nuestro sistema.

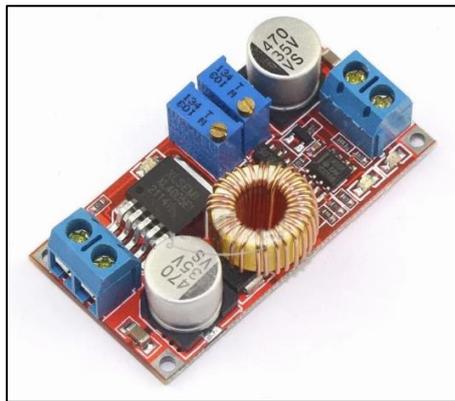


Figura 3.25 Módulo regulador de voltaje y corriente.  
Fuente: Imagen tomada de [75].  
Elaboración: Propia de los autores.

Características:

- Voltaje de entrada: 5V-32VCD.
- Voltaje de salida: 0.8V-30VCD.
- Corriente de salida: ajustable, máximo 5A.
- Tamaño: 143 x 50 x 15 mm.

- Temperatura de operación: -40 a +85°C.
- Tamaño: 51x 26 x 22 mm.
- Peso: 30 g.
- Precio: \$14,35.

### 3.9 Ensamblaje de componentes.

Para ubicar todo el sistema de comunicación en el UAV, se requiere tomar algunas consideraciones. La principal y más importante es el peso del sistema, ya que puede afectar el vuelo del UAV ejerciendo mayor potencia en sus rotores para elevarse.

#### 3.9.1 Verificación de pesos.

Los UAV son fabricados con una autonomía de vuelo determinado, al incluir el sistema de comunicación se interfiere en su autonomía, es por eso, que se procede a verificar los pesos de cada componente que se utiliza, lo que nos permitirá comprobar cómo le afecta el peso agregado en la duración de la batería del UAV.

Para realizar esta prueba se utilizó una báscula electrónica de precisión *KERN*, obteniendo los pesos expuestos en la Tabla 3.8 de cada dispositivo, sin incluir la caja de protección, debido a que su peso generará mayor carga al UAV disminuyendo el tiempo de vuelo. Las imágenes de los pesos obtenidos se pueden observar en el ANEXO E.

Tabla 3.8 Pesos de dispositivos.

DISPOSITIVO	PESO (g)
USRP B210	163
ODROID-XU4	60
Wi-Fi RNX-N180UBE	29
Antenas VERT900	77
Regulador de voltaje 30V 4ª	30
Batería TURNIGY 4000 mAh	236
Estructura plástica y de alucobond	223
<b>TOTAL</b>	<b>818</b>

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

#### 3.9.2 Implementación de hardware.

Este sistema de comunicación puede ser instalado no solamente en UAV, sino que también en ambulancias, y otros medios de transporte, por lo que se presentan dos opciones de estructura para el sistema.

### 3.9.2.1 Estructura para UAV.

Para implementar el sistema de comunicación en el UAV proporcionado por *ThunderDrone* se improvisa una base de varillas de aluminio colocadas en la estructura del UAV, así como se muestra en la Figura 3.26. Cabe mencionar que la base del sistema de comunicación varía conforme al UAV que se use.



Figura 3.26 Base para el sistema de comunicación.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Los dispositivos que hacen parte del sistema de comunicación son ensamblados como se muestran en la Figura 3.27 y Figura 3.28, quedando finalmente adheridos en el UAV como en la Figura 3.29.

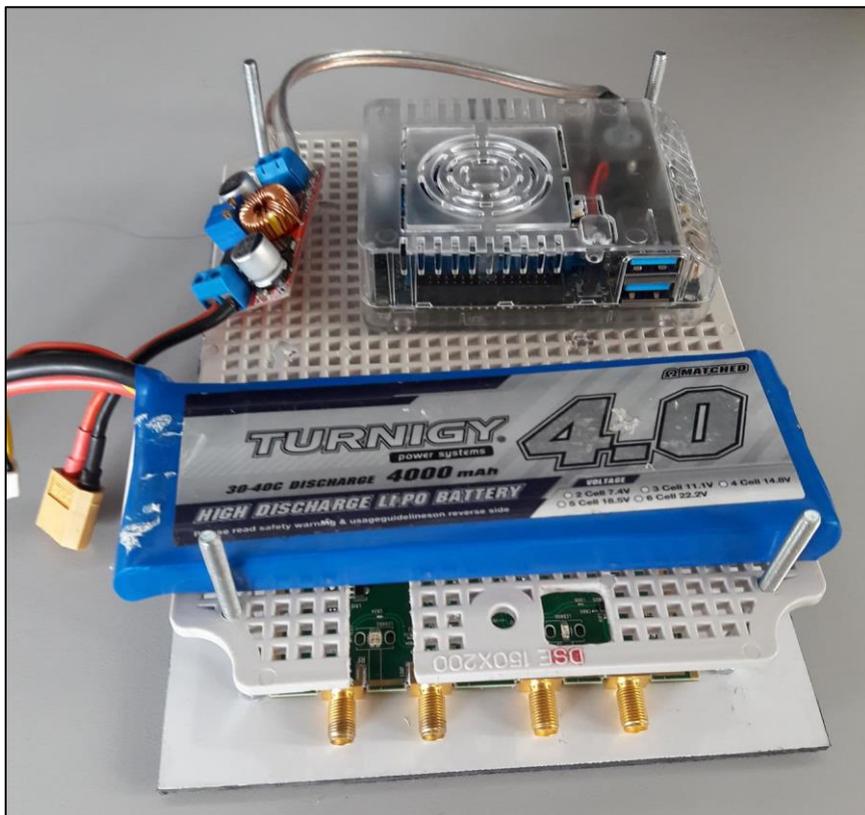


Figura 3.27 Vista superior de ensamble de dispositivos.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

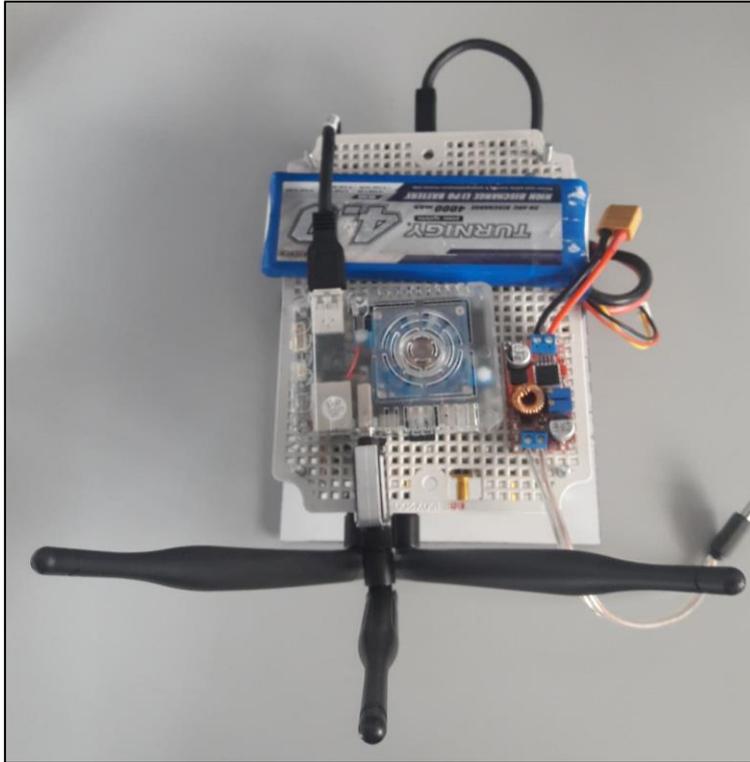


Figura 3.28 Ensamble final del sistema de comunicación.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.



Figura 3.29 Sistema de comunicación implementado en UAV.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

### 3.9.2.2 Estructura de protección del sistema.

Debido a que el sistema de comunicación es portable, no está diseñado únicamente para ser implementado en un UAV sino también para ser instalado en diferentes medios. En por eso que se implementa en una caja de plástico HI BOX IP67 (Figura 3.30).

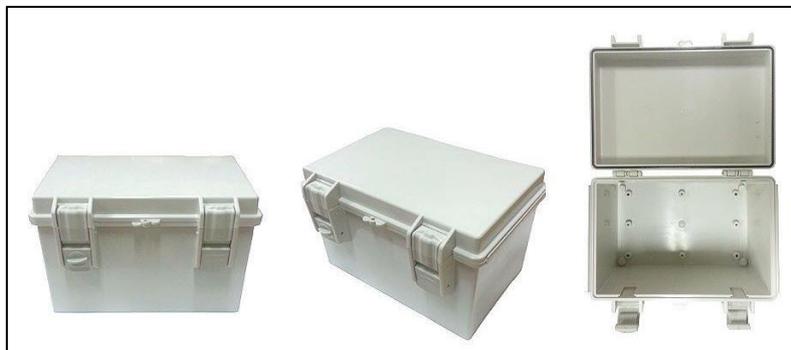


Figura 3.30 Caja HI BOX IP67.  
Fuente: Imagen tomada de [76].  
Elaboración: Elaborada por [76].

Características:

- Material: Poliéster PBT + PC.
- Dimensiones: 150 x 200 x 100 mm
- Estándares IEC529-IP67
- Peso: 505 g.

En la Tabla 3.9 se muestra el peso del sistema de comunicación sin tomar en cuenta 121g. correspondientes al peso de la estructura de alucobond, ya que su uso no es necesario al utilizar la caja de protección. El peso del sistema de comunicación se puede ver en el ANEXO E.

Tabla 3.9 Peso del sistema de comunicación.

DISPOSITIVO	PESO (g)
Sistema de comunicación	697
Caja HI BOX IP67	505
<b>TOTAL</b>	<b>1.202</b>

Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Los dispositivos del sistema de comunicación se incorporan de manera similar a la estructura para UAV, quedando como se muestra en la Figura 3.31 y Figura 3.32.



Figura 3.31 Ensamble de USRP B210 en la caja HI BOX IP67.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

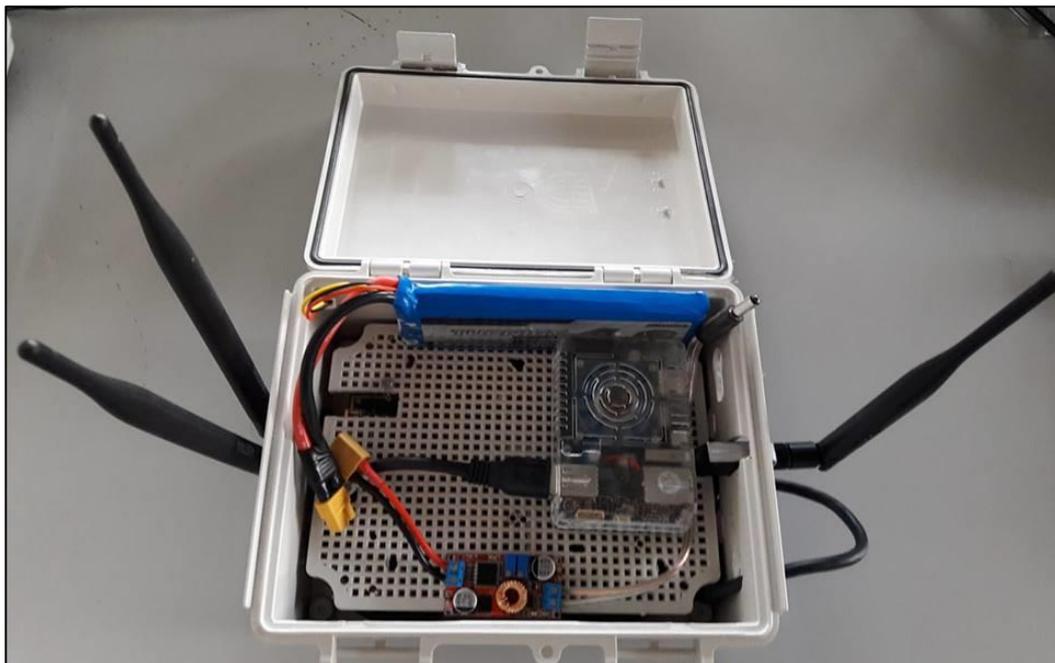


Figura 3.32 Ensamble de dispositivos en la caja HI BOZ IP67.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Finalmente, el sistema de comunicación queda ajustado a la caja como en la Figura 3.33.



Figura 3.33 Vista superior del sistema de comunicación implementado.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores

### 3.10 Interfaz gráfica de usuario.

Para facilitar la interacción del usuario con las aplicaciones del sistema de comunicación, se ha desarrollado una Interfaz Gráfica de Usuario mediante el programa Tkinter el cual es un módulo de Python basada en las librerías gráficas TCL/Tk disponible en la mayoría de las plataformas Unix. La interfaz de la aplicación se puede ver en la Figura 3.34.



Figura 3.34 Interfaz gráfica de la aplicación.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Tkinter brinda una variedad de widgets y la posibilidad de trabajar con estilos y temas que permiten personalizar totalmente la estética de cualquier programa. A esta interfaz se podrá acceder remotamente desde la estación terrena para el monitoreo del sistema mediante la conexión SSH.

Como se observa en la Figura 3.34, la interfaz está dividida en dos zonas, la primera concerniente a la red de telefonía móvil GSM y la segunda a la transmisión FM. En la red GSM se encuentran cuatro botones de inicio y detención para cada uno de los componentes de OpenBTS más un botón para ingresar a su terminal donde se pueden enviar mensajes y realizar configuraciones de la red si se desea. La aplicación está vinculada a la base de datos (sqlite3.db) que se genera cuando existen usuarios registrados a la red GSM, por lo que dispone de un recuadro con 3 botones para cargar, mostrar y eliminar usuarios lo que permite monitorear el registro de los MS's. Dentro de este recuadro se indicará la información con respecto al número de celular e IMSI correspondiente a cada usuario registrado. En lo que tiene que ver a la segunda zona solamente consta de dos iconos para el inicio y detención de la transmisión FM. Cuando se encuentre en funcionamiento cualquiera de estos dos módulos se encenderá una luz intermitente que se encuentra en la parte superior de cada uno de ellos para permitir diferenciar que módulo se está ejecutando.

En la parte superior izquierda existe un botón de ayuda donde se indica la información necesaria para el funcionamiento general de la aplicación, así como la contraseña por defecto del sistema que será obligatoria para el inicio de los componentes de la red GSM. Además, si se desea acceder remotamente mediante TeamViewer a la aplicación, se dispone de un botón en la parte superior que al pulsar nos da la contraseña necesaria para la conexión.

## **CAPÍTULO IV: PRUEBAS Y RESULTADOS**

#### 4.1 Introducción.

Para constatar la funcionalidad del sistema implementado, se desarrollaron diferentes tipos de pruebas que permiten establecer el nivel de eficiencia según los resultados obtenidos y que son detallados en el presente capítulo.

Dichas pruebas de conexión fueron realizadas en 2 zonas:

- Laboratorio de Telecomunicaciones del Edificio de Prototipos de la Universidad Técnica Particular de Loja y Campus con la integración del Vehículo Aéreo no Tripulado.
- Sendero Caxarumi a 11 Km desde la ciudad de Loja debido a que la cobertura de las distintas operadoras es débil o nula.

#### 4.2 Pruebas de laboratorio de la red GSM.

Para iniciar el sistema se ejecuta los servidores SMQueue, SIPAuthServe, Asterisk y el Transceiver (OpenBTS) mediante los comandos: *sudo start smqueue*, *sudo start sipauthserve*, *sudo start asterisk* y *sudo start openbts* respectivamente. Si la red GSM está operativa, se activará el led rojo y el led verde correspondientes al canal downlink y uplink respectivamente en la parte frontal de la tarjeta, así como observa en la Figura 4.1.

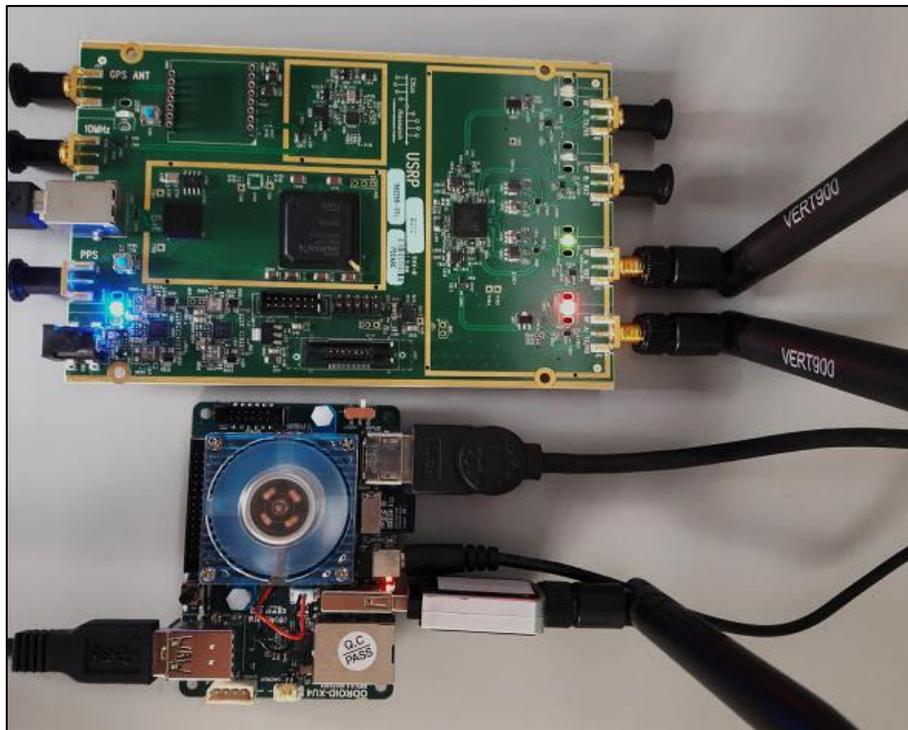


Figura 4.1 Red GSM operativa.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Cuando la red está en funcionamiento todos los teléfonos que se encuentran dentro del área de cobertura podrán registrarse accediendo a la configuración de redes móviles del dispositivo y buscar manualmente las redes existentes. Después de unos segundos aparecerá una lista de redes 2G, 3G y 4G de operadoras disponibles, más la nueva red que se ha creado. Para evitar señales de operadoras en 3G y 4G se debe configurar en el mismo dispositivo móvil el modo de red según el tipo de operador que se disponga y seleccionar solamente 2G.

En la Figura 4.2 se muestra que el nombre de la red varía así se haya configurado previamente con el comando `GSM.Identify.ShortName` en OpenBTS; y se puede mostrar como “00101”, “001-011”, “Test PLMN 1-1”, o “Range” esto depende principalmente del tipo de teléfono móvil y la SIM utilizada.

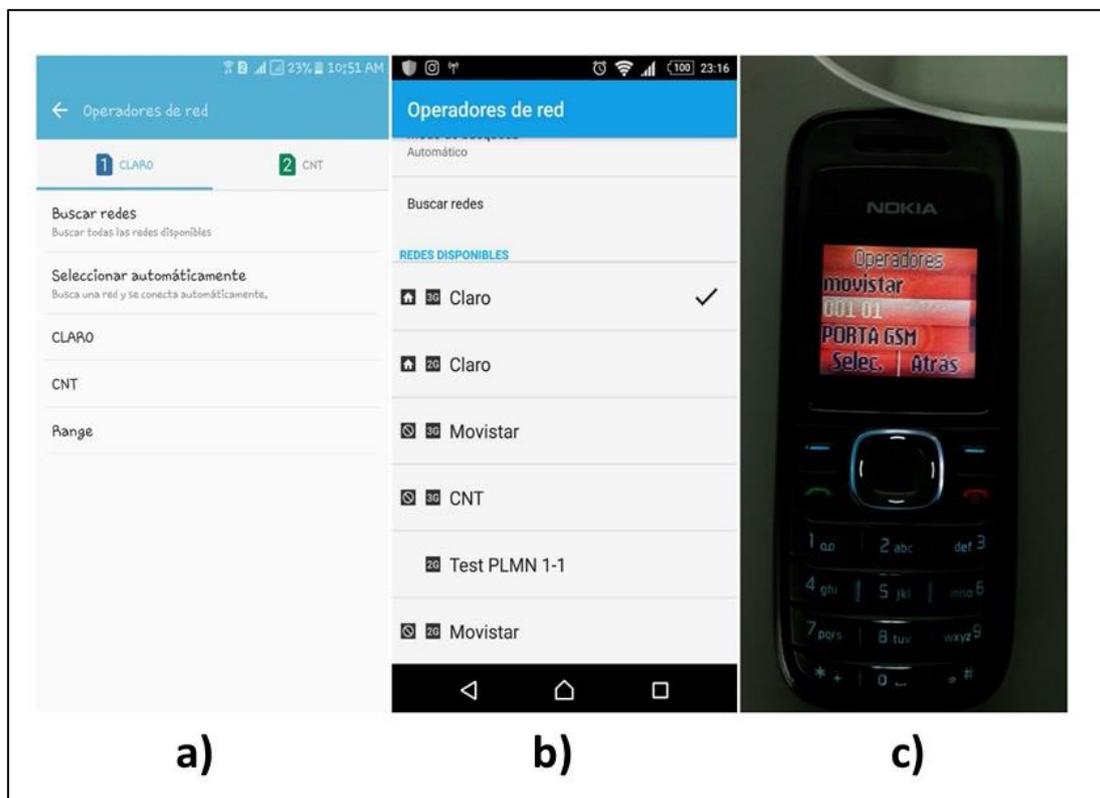


Figura 4.2 Redes disponibles: a) Samsung J7 b) Sony Xperia Z3 c) Nokia 1200.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Una vez registrado en la red, se recibirá automáticamente el mensaje de bienvenida que se haya configurado desde la extensión 101 como se muestra en la Figura 4.3, en el cual se indica el número de IMSI de la tarjeta SIM, y se solicitará que envíe su número para la autorización de llamadas y mensajes.

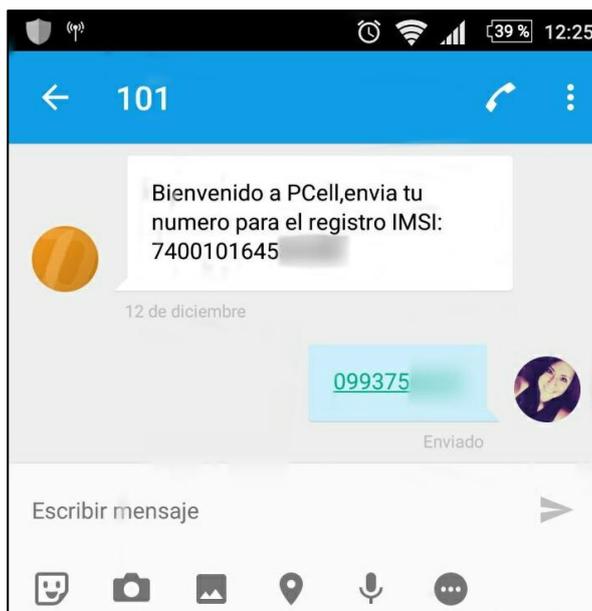


Figura 4.3 Mensaje de bienvenida.  
 Fuente: Propia de los autores.  
 Elaboración: Propia de los autores.

Para comprobar el registro de los MS's, en la terminal de OpenBTS se digita el comando *tmsis* el cual presenta la información con respecto al IMSI, en el TMSI se visualiza la autorización y el tiempo de acceso como se muestra en la Figura 4.4.

```

OpenBTS> tmsis
IMSI          TMSI  IMEI          AUTH  CREATED  ACCESSED  TMSI_ASSIGNED
7400101645    -     35457507013   1     114s     36s       0
7400101561    -     35476908014   1     144s     144s      0
7400101708    -     86345103359   1     13m     255s     0
7400001117    -     86878902215   2     11m     11m       0
7400201702    -     35945907100   2     12m     12m       0
7400101580    -     35637906647   1     12m     12m       0
7400101595    -     35461408016   2     13m     13m       0

OpenBTS> █
  
```

Figura 4.4 Tabla TMSI.  
 Fuente: Propia de los autores.  
 Elaboración: Propia de los autores.

Cada uno de los usuarios se ordena por tiempo con su respectiva autorización. Si la columna AUTH para un determinado IMSI está establecido en 1 es porque se encuentra autenticado y sí es 2 solo está registrado, pero no puede realizar llamadas a otros usuarios registrados en la red, es decir no existe en la HLR.

#### 4.2.1 Prueba de servicios.

##### 4.2.1.1 Mensajes de prueba.

Desde el CLI de OpenBTS se puede enviar mensajes directos a cada uno de los móviles registrados y autorizados digitando el comando *sendsms*. Los mensajes se envían

especificando el IMSI, el número de origen del mensaje que en este caso será 101 y el cuerpo del mensaje (ver Figura 4.5).

```
OpenBTS> tmsis
IMSI          TMSI  IMEI          AUTH  CREATED  ACCESSED  TMSI_ASSIGNED
74001015610   -     35476908014  1     119s    119s     0

OpenBTS> sendsms 7400101561 101 Mensaje de prueba
message submitted for delivery

OpenBTS> █
```

Figura 4.5 Mensajes a través del CLI de OpenBTS.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

En la Figura 4.6 se observa el mensaje recibido en el dispositivo móvil que fue enviado desde la consola de OpenBTS.

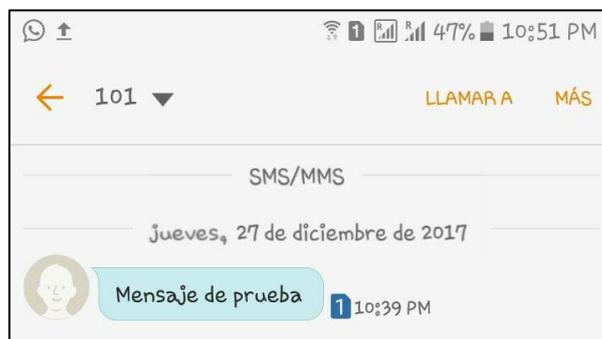


Figura 4.6 Mensaje recibido en el dispositivo.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Para el caso de envío de mensajes entre los MS's, se lo hace de manera convencional especificando el número celular (ver Figura 4.7).

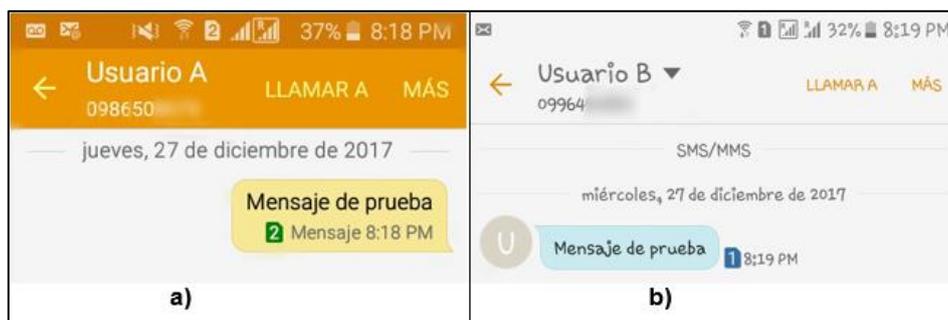


Figura 4.7 Mensajes entre MS's: (a) Móvil emisor y (b) Móvil receptor.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

#### 4.2.1.2 Llamadas de prueba.

Para las llamadas de prueba se hace uso de 2 extensiones propias de OpenBTS las cuales son: 2600 y 2602.

La primera extensión de prueba 2600, crea una llamada de eco, es decir, todo el audio que reciba Asterisk se repetirá inmediatamente en el mismo dispositivo móvil desde donde se marcó esta extensión. La llamada de eco evidencia cualquier problema de calidad de retraso o enlace ascendente presente en la red.

La segunda extensión 2602 hará reproducir un tono constante lo que determina que Asterisk es accesible y está funcionando el enrutamiento de llamadas. Si se producen cambios de tono o si hay pequeños cortes, se deben a la falta de información en la ruta del flujo de voz del enlace descendente, similar a la pérdida de paquetes.

Para el caso de ejecución de llamadas entre los MS's, se lo hace de manera convencional como se indica en la Figura 4.8. Las imágenes (a) y (b) muestran el proceso de marcado entre el usuario A y B y las imágenes (c) y (d) presentan la ejecución de la llamada. Si se desea monitorear este procedimiento se debe acceder a la consola de Asterisk mediante el comando *sudo asterisk -r*.

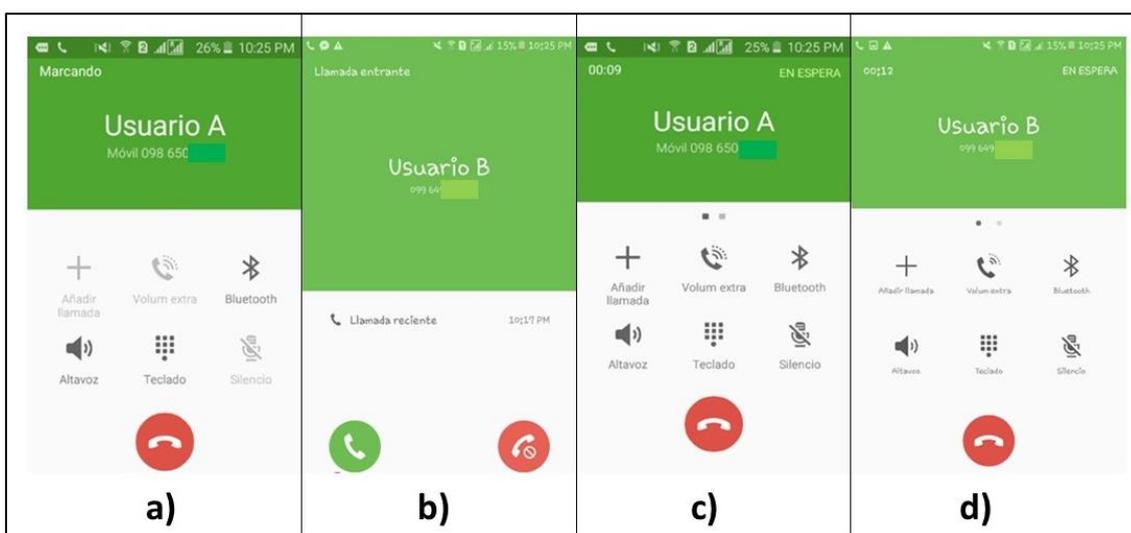


Figura 4.8 (a) Marcado a usuario B, (b) Llamada entrante, (c) Llamada establecida con usuario B y (d) Llamada establecida con usuario A.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

En la Figura 4.9 se puede observar el proceso de llamada entre dos MS. En primera instancia se realizó una llamada desde A-Number hacia B-Number, cada uno con su respectivo código IMSI. La variable "dialstatus" para el primer caso es igual a ANSWER lo que significa que la llamada fue respondida por el destinatario (B-Number) y éste a su vez realizó el colgado de la llamada, lo cual se refleja en la variable hangupcause con valor 16. Para el segundo caso la llamada fue realizada desde B-Number hacia A-Number con la diferencia que la llamada fue cancelada es decir el comando de marcación alcanzó al número del destinatario, pero la persona que llamó colgó antes de

que el destinatario respondiera la llamada por lo que la variable dialstatus es igual a CANCEL y hangupcause es igual a cero.

```
=====  
Running as user 'asterisk'  
Running under group 'www-data'  
Connected to Asterisk 11.7.0.5 currently running on odroid (pid =  
881)  
[2017-12-28 04:27:08.382] NOTICE[2197][C-00000000]: Ext. h:1 @ to-  
openBTS: A-Number=099649 A-Name= A-TMST=TMST74002016070 B-  
Number=098650 B-Name= B-IMSI=IMSI74001015610 hangupcause=1  
6 <dialstatus=ANSWER> hangupdirection=A duration=0 billsec=0  
[2017-12-28 04:27:56.908] NOTICE[2203][C-00000002]: Ext. h:1 @ to-  
openBTS: A-Number=098650 A-Name= A-TMST=TMST74001015610 B-  
Number=099649 B-Name= B-IMSI=IMSI74002016070 hangupcause=0  
<dialstatus=CANCEL> hangupdirection=A duration=10 billsec=0  
[2017-12-28 04:28:56.095] NOTICE[2206][C-00000004]: Ext. h:1 @ to-  
openBTS: A-Number=098650 A-Name= A-TMST=TMST74001015610 B-  
Number=099649 B-Name= B-IMSI=IMSI74002016070 hangupcause=1  
6 <dialstatus=ANSWER> hangupdirection=A duration=0 billsec=0  
odroid*CLI>
```

Figura 4.9 Terminal de Asterisk.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

#### 4.2.2 Cobertura de la celda.

Para comprobar el funcionamiento de la red GSM en la parte de la interfaz de radio se hizo uso del analizador de espectros CXA Signal Analyzer N9000A que se encuentra en el laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica Particular de Loja.

Como se puede observar en la Figura 4.10 la potencia del canal es de -22,4 dBm por lo que según el estándar TS 145,005 en su última actualización de octubre de 2017, clasifica a este tipo de red como una micro-BTS M1. De igual manera en la Figura 4.11 se indica el ancho de banda ocupado que en el momento de la medición nos da un valor de 274,56 KHz con una potencia de -20 dBm cercano a la primera medición realizada.

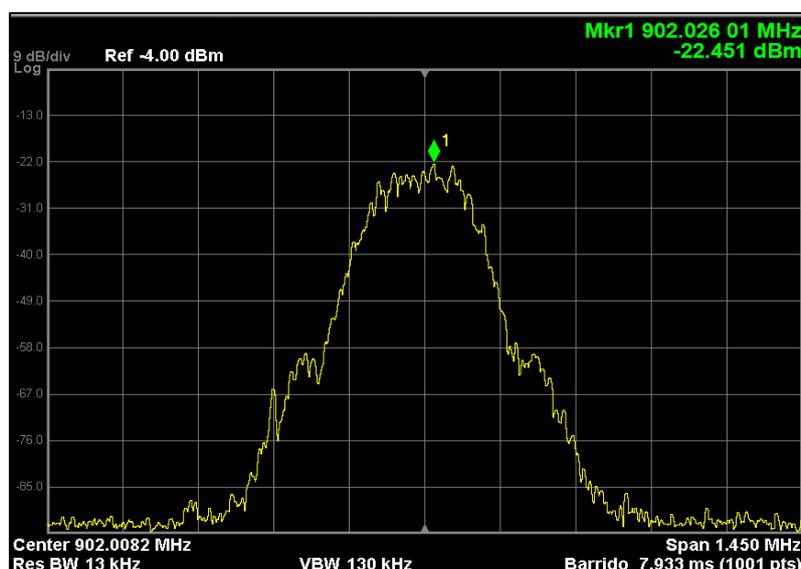


Figura 4.10 Potencia del canal utilizado.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

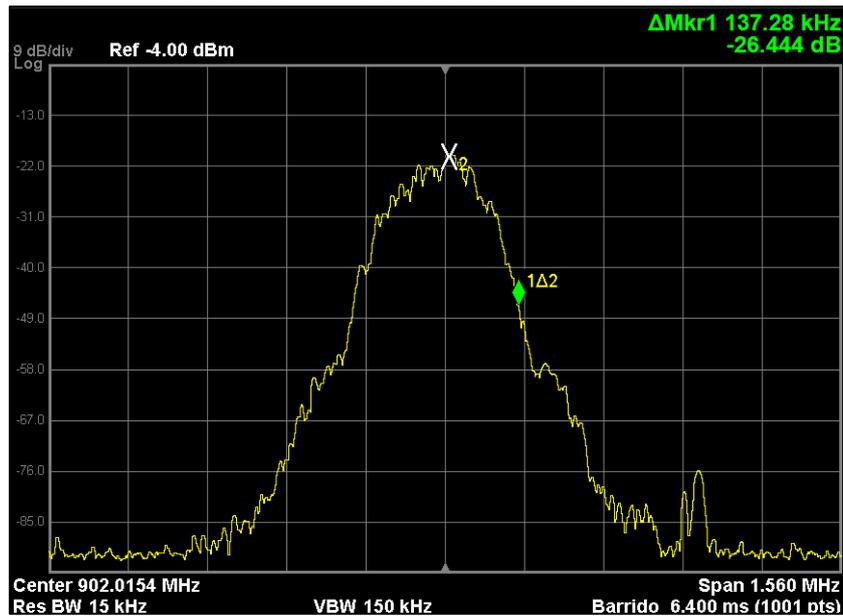


Figura 4.11 Ancho de banda de la señal GSM.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Para hacer una comparación con relación al espectro del estándar GSM tomamos la gráfica del documento TS145.005 en su Anexo A donde señalan las características que debe cumplir.

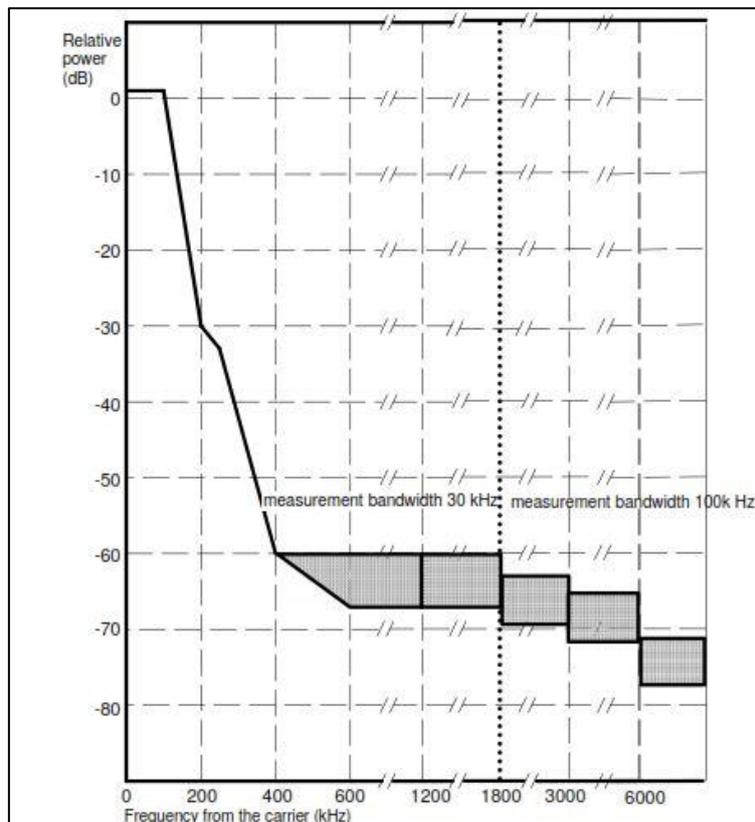


Figura 4.12 Espectro GSM según estándar.

Fuente: Imagen tomada de [51].

Elaboración: Elaborado por [51].

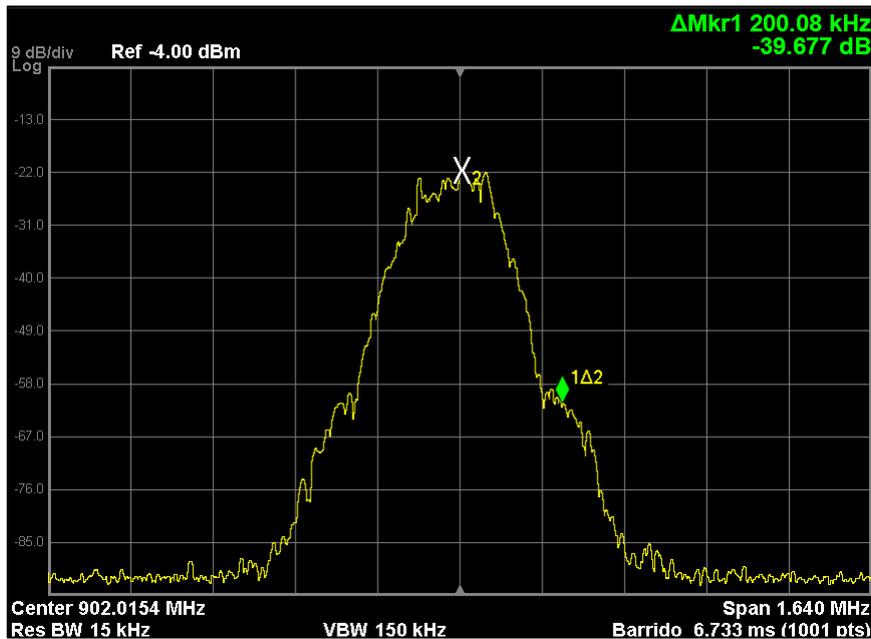


Figura 4.13 Espectro GSM medido.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Como se puede observar en las Figuras 4.12 y 4.13 ambos espectros son cercanos, ya que a 200 KHz del origen, según el estándar, la señal deberá estar a -30 dBm y según lo medido da un valor de -39,6 dBm por lo que se encuentra dentro del estándar. Esta diferencia de valores se debe a valores de configuración propia de la BTS como potencia de transmisión y del analizador de espectros como span y número de muestras.

Para medir la distancia del enlace se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Llamada de prueba al número 2602 hasta que se interrumpa la comunicación.
- Medición mediante sujeción a la red hasta pérdida de la señal.
- Utilización de 3 diferentes tipos de antenas con diferentes ganancias.

Tabla 4.1 Medición del alcance máximo de la cobertura.

ALCANCE MÁXIMO DE COBERTURA (m)	TIPO DE ANTENAS	GANANCIA DE LAS ANTENAS (dBi)	CASO
48	Vert900	3	Pérdida de llamada
50	TECHTOO 3G 4G	5	
33	4G LTE Huawei	5	
55	Vert900	3	Sujeción a la red
55	TECHTOO 3G 4G	5	
40	4G LTE Huawei Antena Externa	5	

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

La cobertura se determinó con el nivel de señal recibida con la aplicación móvil “Información de la señal de red” versión 4.35.11 a diferentes distancias al origen, mediante sujeción a la red. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.2 y Figura 4.14 tomando en cuenta la utilización de 3 diferentes tipos de antenas para la BTS. Es importante mencionar que debido al área de la planta del edificio de prototipos donde se encuentra el laboratorio, se limitó el alcance máximo de la cobertura para el caso de pruebas de sujeción a la red.

Tabla 4.2 Medición de la cobertura.

DISTANCIA AL ORIGEN (m)	INTENSIDAD DE LA SEÑAL (dBm)	TIPO DE ANTENAS
3	-51	Vert900
20	-67	
40	-77	
3	-51	TECHTOO 3G 4G Dipole Antenna Wide Band
20	-73	
40	-80	
3	-51	4G LTE HUAWEI Antena Externa
20	-89	
40	-108	

Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

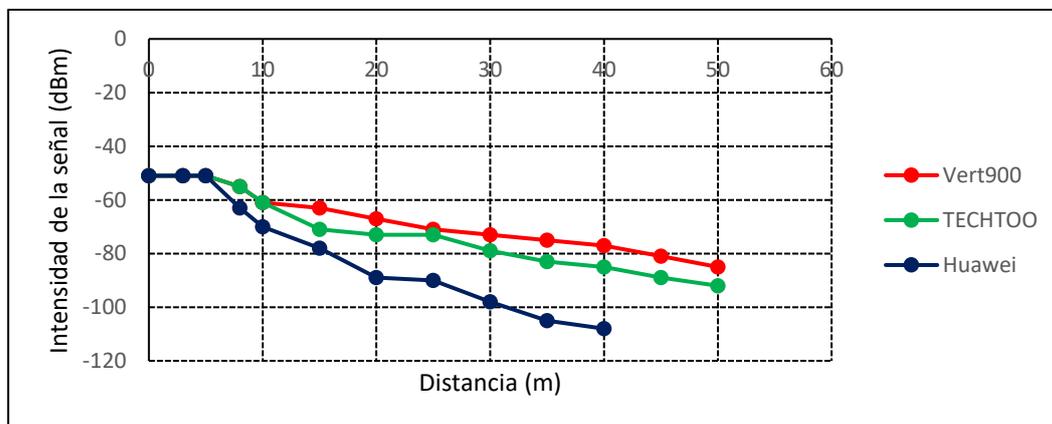


Figura 4.14 Intensidad de la señal recibida.

Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Según los datos obtenidos en la Figura 4.14, los rangos de alcance máximo de la celda permiten tener una cobertura estable de la red, considerando que las pruebas fueron realizadas ante la presencia de obstáculos que pueden ocasionar desvanecimiento o degradación en la calidad del enlace.

### 4.2.3 Calidad del enlace.

Mediante la herramienta Asterisk, como se indicó en la Figura 4.9, se obtiene un reporte de las llamadas exitosas y rechazadas para 2 pruebas realizadas. La primera prueba consistió en 17 llamadas entre 6 MS y la segunda prueba en 15 llamadas entre 4 MS con la utilización de las antenas Vert900. Al utilizar mayor número de MS ocasionará una variación de la probabilidad de bloqueo, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Marcadores de llamadas de voz.

Llamadas de voz	Resultados	
	Total	%
Primera Prueba		
Número de intentos de llamada	17	100
Número de llamadas exitosas	15	88
Número de llamadas rechazadas	2	12
Tiempo de establecimiento de la llamada < 10 s	13	87
Segunda Prueba		
Número de intentos de llamada	15	100
Número de llamadas exitosas	14	93
Número de llamadas rechazadas	1	7
Tiempo de establecimiento de la llamada < 10 s	9	64

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

En la primera prueba, para una probabilidad de bloqueo del 12% se obtiene un tráfico soportado de 4,0 Erlang. Estas pruebas se realizaron con 6 MS lo que implica que por cada línea se usan 0,66 Erlang, es decir se puede generar 8 llamadas por cada línea con una duración de 5 minutos. Permitiendo 5 llamadas simultáneas entre los MS.

En la segunda prueba para una probabilidad de bloqueo de 7% con 4 MS da como resultado 1,7 Erlang y por cada línea se usan 0,42 Erlang generando 5 llamadas por hora por cada línea con una duración de 5 minutos, realizando 7 llamadas simultáneas entre los MS.

De los 32 intentos de llamadas, 29 de ellas obtuvieron una comunicación óptima hasta una intensidad de la señal de -85 dBm, siendo de menor calidad cerca del límite del alcance de la red a los 50m con una intensidad de señal de -100 dBm.

OpenBTS a través de su terminal, también permite cuantificar objetivamente la calidad del enlace en lugar de basarlo en la percepción del usuario. Esto se logra gracias al

comando *chans* que proporciona los detalles acerca de, Signal, SNR, FER, TXPWR, RXLEV\_DL (ver figura 4.15).

```

OpenBTS> chans
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
   type id          dB      pct sym dBm dBm      pct
0  1 TCH/F T103     15     54.5 0.00 -0.4 17 -48     0.00  0:21 7400201702
    
```

Figura 4.15 Ejecución comando *chans*.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Como se observa en la Figura 4.15, existe un solo canal activo donde el valor de la SNR corresponde al enlace ascendente medida por la estación base cuyo valor entre más alto es mejor ya que la calidad aumenta. La columna SIGNAL es la intensidad de la señal en el enlace ascendente según el valor de RSSITarget configurado, FER es la tasa de pérdidas de tramas de voz en el enlace ascendente, TXPWR representa la potencia de transmisión del MS, RXLEV\_DL es la potencia recibida por el MS, y la columna Time representa el tiempo desde que se establece la llamada hasta que se ejecuta el comando *chans*. A continuación, en la Tabla 4.4 se presenta las pruebas realizadas con el comando *chans* a diferentes distancias de la BTS medidas con un flexómetro.

Tabla 4.4 Medidas de la calidad de la señal.

Distancia (m)	Signal (dB)	SNR(UL)	FER (%)	TXPWR(dBm)	RXLEVEL_DL (dBm)
2	36	36,8	0,73	5	-48
3	36	38,2	1,02	5	-59
5	29	40	4,69	5	-59
8	28	12,2	4,85	6	-64
10	25	13,7	7,94	7	-69
15	23	9,19	13,16	8	-70
20	21	16,6	15,91	10	-73
25	18	19	18,15	10	-73
30	12	11,6	21,27	15	-75
35	8	12,2	19,60	21	-77
40	7	16,5	19,31	23	-77
40	9	18,8	12,46	25	-79
45	10	11,2	9,98	16	-78
45	8	23,5	9,28	23	-82
30	10	23,3	4,86	23	-77
20	13	24,4	1,72	21	-76
15	19	22,7	1,07	19	-76
10	25	20	0,90	10	-67

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

De la Tabla 4.4, se determina que a medida que el MS se aleja de la estación base y según los niveles de potencia que ésta recibe en su señal de enlace ascendente, la potencia del MS varía como muestra la columna TXPWR. Otra variable que se toma en cuenta es la SNR, ya que al estar en movimiento el MS hace que el enlace de radio varíe con el tiempo, por lo que se debe asegurar un mínimo de calidad en la comunicación de 9 a 11 dB de SNR, para asegurar una comunicación estable. El valor que ha sido configurado es de 10 dB mediante el comando `config gsm.Radio.SNRTarget` y como se observa existe una mayor pérdida de paquetes a una distancia de 30m donde el valor de SNR es de 11.6 dB y la potencia que emite el MS es de 15 dBm. Para la distancia máxima medida de 45m, vemos que la SNR aumenta a 23.5 dB, esto se explica debido a que la potencia por parte del MS también aumenta de los 15 dBm a 23 dBm, utilizando más energía al encontrarse alejado de la estación base. Esto se refleja en la mejora de la comunicación ya que la pérdida de paquetes es menor con un valor del 9.28%.

Se ha verificado que cuanto mayor sea el porcentaje del FER, existirá una degradación en la calidad del enlace de comunicación, por lo que no existe relación alguna con la SNR, ya que el FER sólo considera los paquetes perdidos del total que se han receptado en la BTS.

### 4.3 Pruebas de laboratorio de transmisión FM.

Previo al inicio del transmisor FM es necesario detener la red GSM mediante el comando `sudo stop openbts` para seguidamente ejecutar el script Python TX\_FM.py localizado en la dirección GNURADIO/TX (ver Figura 4.16) el cual transmitirá un archivo de audio. Este audio consiste en un sonido de alerta que para pruebas del sistema en la ciudad de Loja se eligió la frecuencia libre de 102.5 MHz.

```
odroid@odroid:~$ cd GNU-RADIO/TX
odroid@odroid:~/GNU-RADIO/TX$ ./TX_FM.py
linux; GNU C++ version 4.9.1; Boost_105500; UHD_003.007.003-0-unknown

-- Operating over USB 3.
-- Initialize CODEC control...
-- Initialize Radio control...
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Asking for clock rate 32.000000 MHz
-- Actually got clock rate 32.000000 MHz
-- Performing timer loopback test... pass
-- Performing timer loopback test... pass
```

Figura 4.16 Ejecución del script TX\_FM.py.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

De igual manera para verificar que la transmisión se está realizando se hizo uso del analizador de espectros realizado en GNURadio y del analizador CXA Signal Analyzer N9000A dando valores de potencia similares de -50.63 y -52.09 dBm. Estos resultados se indican en las Figuras 4.17 y 4.18.

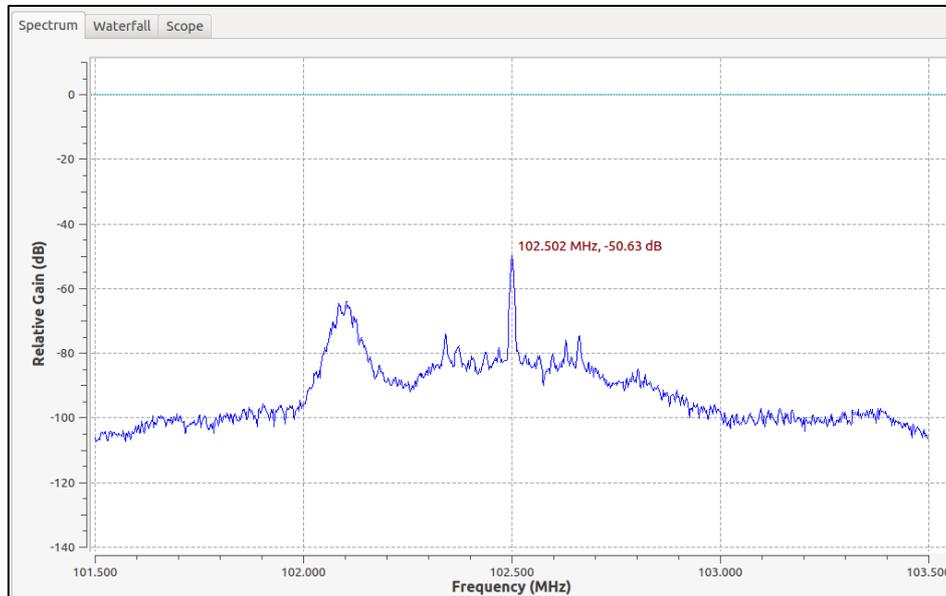


Figura 4.17 Analizador de espectros diseñado en GNURadio.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

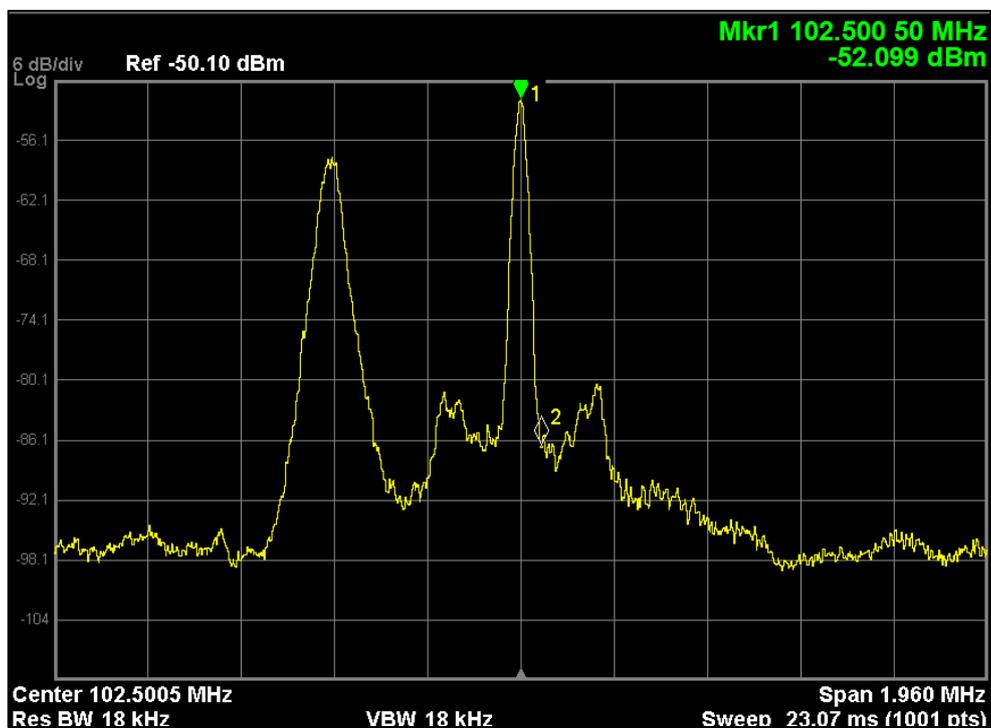


Figura 4.18 Espectro de la señal FM.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

#### 4.4 Pruebas de campo.

##### 4.4.1 Cobertura y calidad del enlace.

Para las pruebas de campo, como se mencionó al inicio del capítulo, se las realizó en la localidad de Caxarumi, ubicado a 11 Km de la ciudad de Loja, donde se procedió a la instalación de manera provisional de la estación. Aquí se pudo evidenciar la conectividad automática de los usuarios de prueba a la red implementada.

Las configuraciones realizadas para las pruebas de campo fueron implementadas de la misma manera que las efectuadas en el Laboratorio de Telecomunicaciones de la Universidad Técnica Particular de Loja descritas anteriormente, con la diferencia de que para monitorear, gestionar y controlar los diferentes procesos se realiza remotamente mediante la aplicación MobaXterm. Al no existir cobertura de ninguna operadora, el registro es automático, pero no la autenticación, razón por la cual se debe enviar de igual manera su número de celular como respuesta al mensaje recibido desde la red.

Una vez que se han registrado los MS's se procede a realizar las llamadas de prueba del sistema al 2600 y 2602. Para monitorear estas llamadas se accede a la terminal de Asterisk mediante el comando *Asterisk -rvvv* y para ver los canales activos se ejecuta el comando *core show channels* (ver Figura 4.19)

```
odroid*CLI> core show channels
Channel          Location          State  Application(Data)
SIP/00101100010-0000 2602@default:3   Up     Milliwatt()
SIP/00101100010-0000 2602@default:3   Up     Milliwatt()
2 active channels
2 active calls
```

Figura 4.19 Canales activos en Asterisk.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Una vez realizadas las llamadas de prueba se determina el alcance máximo del enlace de comunicación en la zona mediante un flexómetro, considerando en primera instancia la pérdida de llamada y sujeción a la red (ver Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Medición del alcance máximo de la cobertura en espacio libre.

ALCANCE MÁXIMO DE LA COBERTURA (m)	CASO	TIPO DE ANTENAS
65	Pérdida de llamada	Vert900
80	Sujeción a la red	

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

De igual manera para la cobertura se hizo uso de la aplicación móvil “Información de la señal de red” a diferentes distancias al origen, mediante sujeción a la red. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Medición de la intensidad de señal de la red en espacio libre.

DISTANCIA AL ORIGEN (m)	INTENSIDAD DE LA SEÑAL (dBm)	TIPO DE ANTENAS
5	-51	Vert900
10	-67	
20	-70	
30	-73	
40	-77	
50	-80	
60	-84	
70	-87	
75	-89	

Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

En cuanto a la calidad del enlace, se procedió de las 2 formas vistas anteriormente que son mediante el establecimiento de 15 llamadas entre 5 MS y el monitoreo con el comando *chans* de OpenBTS. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.7 y Tabla 4.8.

Tabla 4.7 Marcadores de llamadas de voz en espacio libre.

Llamadas de voz	Resultados	
	Total	%
Número de intentos de llamada	15	100
Número de llamadas exitosas	14	93
Número de llamadas rechazadas	1	7
Tiempo de establecimiento de la llamada < 10 s	10	71

Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Para una probabilidad de bloqueo del 7%, se obtiene un tráfico soportado de 2,5 Erlang lo que implica que para 5 MS por cada línea se usan 0,5 Erlang.

Tabla 4.8 Medidas de la calidad de la señal en espacio libre.

Distancia (m)	SNR(UL)	FER (%)	TXPWR(dBm)	RXLEVEL_DL (dBm)
5	56,8	0,00	7	-48
10	57,7	0,17	21	-61
20	51,1	0,02	19	-83
30	16,8	0,95	33	-81
40	19	1,06	33	-94

<b>50</b>	53,9	0,98	33	-89
<b>60</b>	40,6	1.02	33	-87
<b>70</b>	47,5	2,25	31	-94

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Según la Tabla 4.8, la pérdida de paquetes es menor al comparar con los valores obtenidos en la Tabla 4.4, ya que existe línea de vista entre la estación base y el MS lo que demuestra una estabilidad en el área de cobertura. Así mismo, no existe variación considerada en los valores correspondientes a la columna RXLEVEL\_DL y TXPWR.

#### 4.4.2 Mediciones usando el UAV.

Para las pruebas con el UAV, se fijó a una altura de 15m como se puede observar en la Figura 4.20, con un tiempo de vuelo de 6 minutos.



Figura 4.20 Sistema de comunicación en el UAV.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Como se indica en la Figura 4.21, la estación de monitoreo terrena tiene una conexión Wi-Fi con la BTS y a través del software MobaXterm permite llevar un registro, información de los canales utilizados, envío de mensajes y el proceso de llamada entre los usuarios mediante la terminal de Asterisk.



Figura 4.21 Estación de monitoreo y control.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Para esta prueba, se implementó un receptor FM en GNURadio, para constatar que se está llevando a cabo la transmisión FM; para ello se utilizó un USRP B210 como se indica en la Figura 4.22.

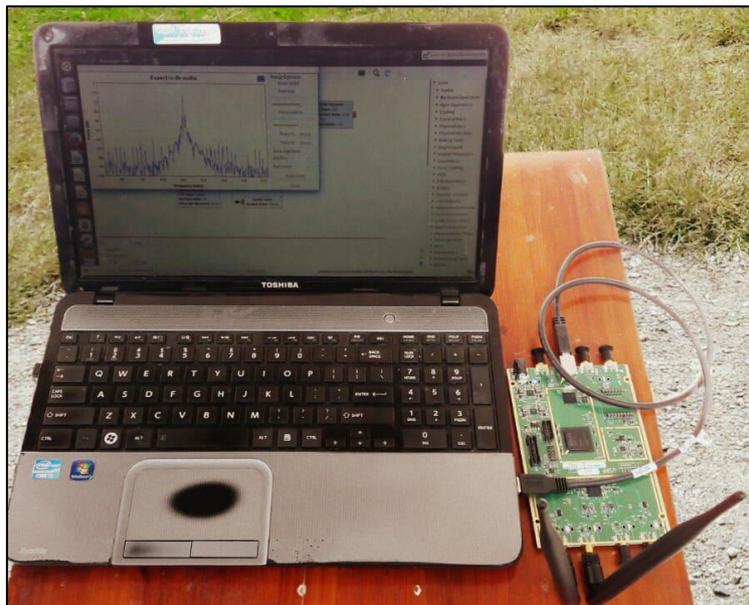


Figura 4.22 Conexión del USRP B210 para la recepción FM.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Para tener una mayor constancia de que los usuarios se encuentran registrados en la red, mediante cualquier aplicación disponible en el Play Store podemos obtener la información acerca del dispositivo móvil como es el código IMSI e IMEI como se observa en la Figura 4.23. Posteriormente los códigos IMSI aparecerán en la terminal de OpenBTS.

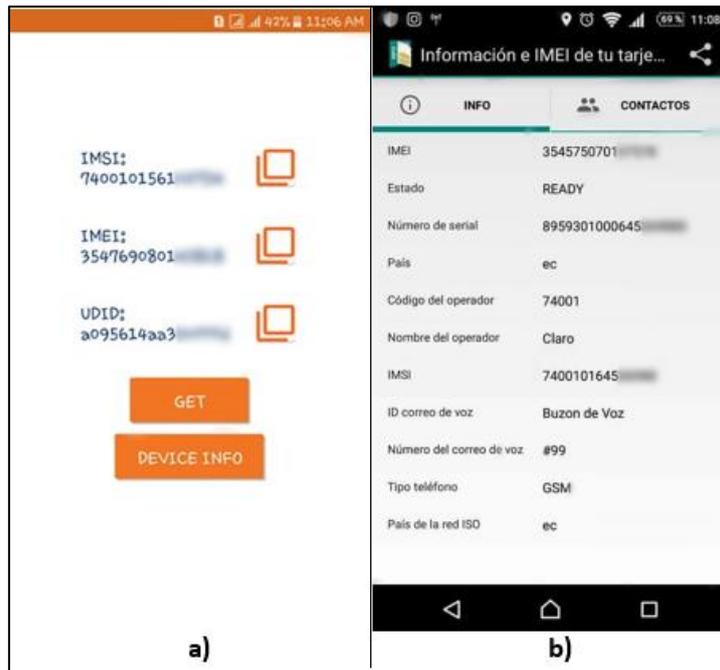


Figura 4.23 (a) IMSI móvil A y (b) IMSI móvil B.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

Debido al tiempo de vuelo del UAV con el que se dispone, se distribuyen 4 minutos para la red GSM y 2 minutos para la transmisión FM. Para la red GSM se inicia registrando 2 usuarios a una distancia de 50 y 35m desde el punto de partida del UAV (Figura 4.24).

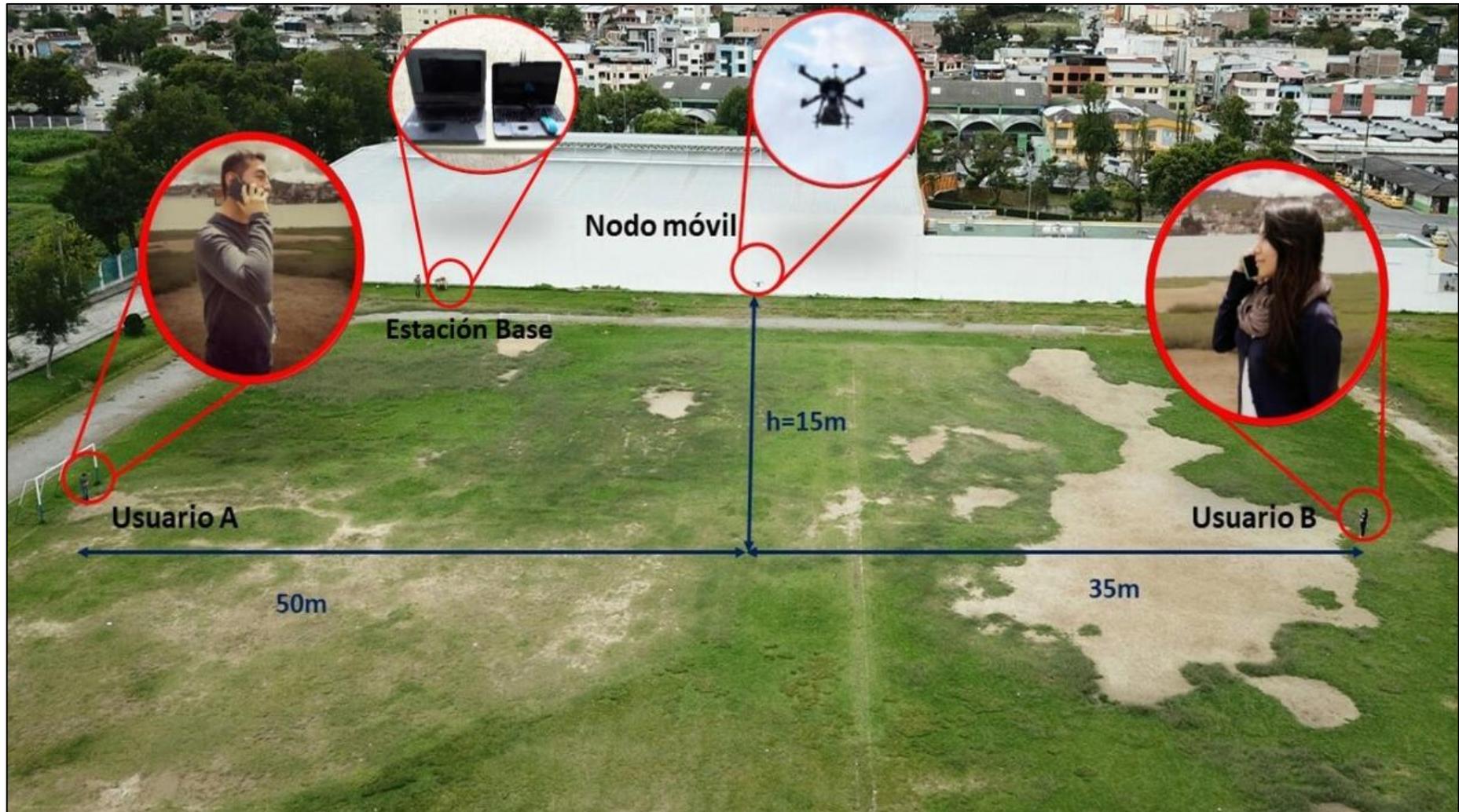


Figura 4.24 Ubicación de los usuarios al origen dentro del área de cobertura de la BTS.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Una vez registrados los dispositivos a la red, mediante la interfaz de usuario realizada en Tkinter se accede a la terminal de OpenBTS y se ejecuta el comando *chans* como se observa en la Figura 4.25.

```
OpenBTS> chans
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
   type id          dB      pct sym dBm dBm  pct
0  1 TCH/F T176     11     56.2 2.01 0.4 21  -61  0.00  4:19 7400101561
0  2 TCH/F T177     37     27.9 1.04 -0.2 5  -52  0.00  4:15 7400101645

OpenBTS> █
```

Figura 4.25 Características del enlace.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Como se muestra en la Figura 4.25, para el caso del móvil que se encuentra a 50m de la BTS, registra una pérdida de paquetes del 2% siendo mayor con relación al segundo móvil, pero los valores de ambos terminales no superan el 5% de pérdidas de paquetes por lo que se registra una estabilidad de la cobertura. Además, no utilizan una potencia de transmisión elevada hacia la BTS.

En la Figura 4.26 se indica el proceso de llamada realizada con éxito entre los terminales móviles reflejado en la variable “dialstatus” con valor ANSWER.

```
Running as user 'asterisk'
Running under group 'www-data'
Connected to Asterisk 11.7.0.5 currently running on odroid (pid = 881)
[2018-01-09 11:13:03.182] NOTICE[1197][c-00000000]: Ext. h:1 @ to-openBTS: A-Number=099649 A-Name= A-IMSI=IMSI74002016070 B-Number=098650 B-Name= B-IMSI=IMSI74001015610 hangupcause=16 dialstatus=ANSWER hangupdirection=A duration=0 billsec=0

odroid*CLI> █
```

Figura 4.26 Monitoreo de dos usuarios registrados desde la terminal de Asterisk.

Fuente: Propia de los autores.

Elaboración: Propia de los autores.

Una vez finalizadas las pruebas con la red GSM, se detiene el servicio de OpenBTS y se ejecuta mediante la interfaz de usuario el transmisor FM.

Se sintoniza la frecuencia de 102.5 MHz a través del receptor FM realizado en GNURadio para comprobar la transmisión realizada como se observa en la Figura 4.27.

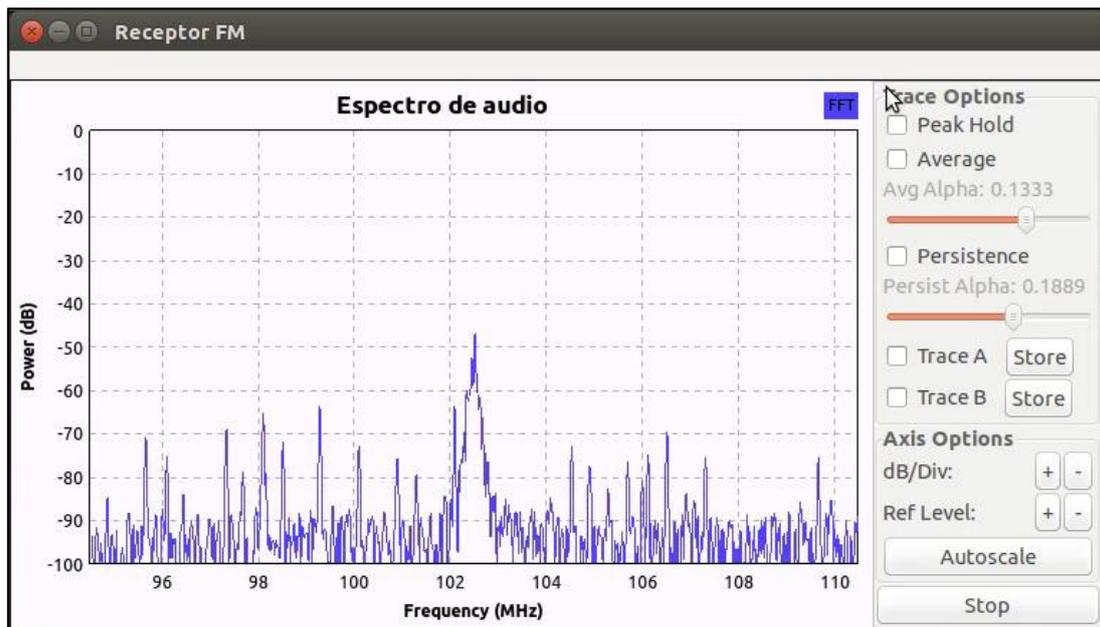


Figura 4.27 Espectro FM.  
Fuente: Propia de los autores.  
Elaboración: Propia de los autores.

## CONCLUSIONES

- El diseño de la arquitectura es válida y factible, ya que se implementa el sistema de comunicación, mediante la integración de la tecnología SDR, lo que posibilita que sea flexible a diferentes ambientes y su instalación como despliegue sea rápido.
- El desarrollo e implementación del sistema de comunicación, contribuye a la atención de desastres o emergencias donde principalmente las redes de comunicación tienen una alta probabilidad de colapsar o en su defecto carecen de cobertura necesaria para la zona necesitada.
- La utilización de hardware libre permite desarrollar un prototipo de dimensiones 20x15x10 cm y peso de 818g sin la caja de protección, lo que faculta la integración en un UAV para el transporte del sistema de comunicación de un lugar a otro para casos de emergencia.
- Para la implementación del sistema de comunicación en ambientes externos u hostiles, se utiliza una caja de grado de protección IP67, adecuada a las características físicas del USRP B210 y del miniordenador ODROID-XU4, lo que permite tener un prototipo portable y compacto.
- La plataforma GNURadio permite desarrollar el transmisor FM mediante el uso de bloques de procesamiento digital, los cuales conforman un esquema de procesamiento basado en software.
- En las pruebas de laboratorio, se obtiene una mayor pérdida de paquetes a distancias mayores a los 30m a partir del origen, registrando valores entre el 19 y 21%, debido a la variedad de obstáculos presentes que ocasionan la atenuación de la señal haciendo que el MS utilice más potencia de transmisión hacia la BTS. Mientras que la región donde la cobertura es estable corresponde a distancias menores a 8m, donde la pérdida de paquetes no supera el 5% y la SNR tiene valores de 36, 38 y 40 dB.
- La pérdida de paquetes en espacio libre no supera el 5%, por lo que existe una estabilidad del área de cobertura y calidad del enlace hasta los 70m; mientras que la potencia de transmisión del MS no sufre grandes variaciones, ya que a distancias entre 30 y 70m se mantiene estable en 31 dBm, a diferencia de las pruebas realizadas en laboratorio, donde a distancias máximas correspondientes entre 30 y 45m se obtiene valores de 15, 21,23,25,16 y 23 dBm.

- Para obtener un mejor rendimiento de la celda, se configura el valor de *GSM.Radio.PowerManager.MaxAttenDB* en 0, porque se requiere que la BTS transmita a la máxima potencia, *Gsm.Radio.SNRTarget* se fija en 10 para regular la potencia transmitida por el MS y en *GSM.Radio.RSSITarget* se asigna un valor de -46dB, para obtener el nivel de RSSI que necesita la BTS para recibir la señal del MS sin errores.
- Se obtiene un promedio de 8,216s en espacio libre al establecer llamadas menores a 10s y 9,231s para las pruebas en laboratorio, esta diferencia se debe a que el número de intentos de llamadas es mayor, así como el número de MS's utilizados.
- Se desarrolla una interfaz de usuario a través de la herramienta Tkinter de Python, para facilitar el control, gestión y monitoreo de la red GSM, así como de el transmisor FM por parte de cualquier usuario sin necesidad de recurrir a la terminal de comandos del sistema operativo Ubuntu.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda descargar la versión de UHD 3.7.3 para el dispositivo USRP B210 y se procede a editar el archivo `build.sh`, ya que la dependencia `libzmq3` no se cumple en Ubuntu 15.04 y no permite instalar `libzmq5`, además no se debe instalar la versión por defecto en Ubuntu de UHD ya que previamente se ha instalado la versión 3.7.3 y puede abortar el proceso de compilación. Las líneas por comentar o eliminar son las líneas 135 a 139.
- Se debe eliminar manualmente por completo todas las referencias a `libcoredumper` de OpenBTS y sus dependencias, ya que no funciona en absoluto en arquitecturas ARM.
- En el caso de que Asterisk no detecte los abonados, se recomienda cambiar la ruta del archivo `libsqlite3odbc.so` por la ruta que se tenga almacenado en el sistema, con el fin de lograr encontrar las rutas de lectura.
- Si se desea acceder a la base de datos `sqlite3.db` para trabajar con sus registros, se debe descargar aplicaciones gráficas como SQLiteMan o SQLiteBrowser y acceder en modo superusuario.
- Si existe dificultades en el registro de los terminales móviles a la red, se recomienda reiniciar el teléfono móvil para que tome de manera automática la información de la red OpenBTS.
- Para la estructura de soporte del sistema de comunicación, se recomienda usar un material robusto pero de menor peso, como por ejemplo alucobond o fibra de vidrio, para que sea ligero al momento de transportarlo.
- Para obtener mayor alcance de cobertura celular, se puede usar un amplificador de potencia para el USRP, teniendo en cuenta la frecuencia de trabajo. También se puede implementar repetidoras para que la señal que genera OpenBTS tenga mayor alcance a comparación de los 70m que puede llegar a tener el prototipo propuesto. La antena es otro factor importante, ya que tiene diferentes configuraciones como la potencia, el patrón de radiación, la ganancia, entre otros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ITU, *Manual sobre telecomunicaciones de emergencia*. Ginebra, Suiza: Cosmas Zavazava, 2004.
- [2] W. E. Castellanos Hernández y H. J. Herrera Lizcano, "Comunicaciones inalámbricas a través de plataformas estratosféricas", vol. 4, p. 9, ene. 2005.
- [3] iRescate, "ONU destaca la importancia de la tecnología móvil en desastres", *iRescate, revista digital de crisis y emergencias*, 2013.
- [4] Ecuadorinmediato, "ABRIL: Terremoto de 16 de abril de 2016: Una huella en más de 16 millones de ecuatorianos", *Exclusivo*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/gwwqSY>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [5] EL COMERCIO, "Pablo Córdova, el hombre que renació de los escombros: "es un milagro"", *Actualidad*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/bGvPue>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [6] K. Guevara, M. Rodriguez, N. Gallo, G. Velasco, K. Vasudeva, y I. Guvenc, "UAV-based GSM network for public safety communications", en *SoutheastCon 2015*, 2015, pp. 1-2.
- [7] J. D. Gutiérrez, I. F. Santa Ramírez, y J. V. Laverde, "Prototipo de una estación celular portátil para atención de emergencias", 2012.
- [8] S. Thamilselvi y P. Gopinath, "Communication based on UAV for network capturing & search and rescue operation in disaster area", vol. 23, p. 6, jun. 2016.
- [9] A. González Garrido, "Prototipo de estación base GSM usando OpenBTS", Universidad de Granada, 2015.
- [10] C. Canet Felip, "Evaluación y oportunidades de una estación base GSM definida por software", 2016.
- [11] P. E. Prato, "Gestión de riesgos: Telecomunicaciones en emergencias y desastres", *GESTIÓN DE RIESGOS*, 26-mar-2013.
- [12] ITU, "Telecomunicaciones de emergencia", *Emergency-Telecommunications*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/7UWaZG>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [13] L. J. Yepes Rojas y H. J. Rhenals Pérez, "Arquitectura de comunicación para situaciones de atención de desastres soportada en tecnologías móviles", Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, 2013.
- [14] M. Ferreira, "24 TES: Las comunicaciones en emergencias y catástrofes.", *24 TES*, 15-abr-2016.
- [15] Condor Comunicaciones S.A., "Prepárese ante desastres naturales", *Condor Comunicaciones, blog de informar sobre tecnología y soluciones de telecomunicación.*, 10-sep-2012.

- [16]M. Pereira, L. Gaggero, y A. Drabenche, “Comunicaciones Inalámbricas en Zonas de Desastre Inundaciones.”, p. 24.
- [17]J. Niño, E. Useche, y Á. Vivas, “Modulación en frecuencia”, *Sistemas de Comunicaciones*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/eQWMcB>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [18]E. F. Ocaña Arcos, “Estudio de factibilidad para la implementación del servicio de radiodifusión digital iboc en el Ecuador”, B.S. thesis, SANGOLQUÍ/ESPE/2005, 2005.
- [19]ARCOTEL, “Norma técnica para el servicio de radiodifusión sonora en frecuencia modulada analógica”. 2015.
- [20]M. E. Alulema Quitaquis, “Estudio de la comunicación con comando AT y microcontroladores caso practico implementación de un prototipo sistema de gestión de alarma para viviendas con monitoreo mediante telefonía celular.”, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2010.
- [21]J. G. Acosta Calderón, “Sistema de control y monitoreo vehicular utilizando tecnología RFID y envío de alertas mediante mensajes de texto.”, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2015.
- [22]S. Agrawal, “GSM Network Architecture”, *QueryHome*, 16-jul-2014. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/zQxanL>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [23]A. López Lizama, “Sistema de priorización de tráfico para la red celular de un operador móvil”, Santiago de Chile, 2011.
- [24]E. Porras, “Ingeniería de sistemas: Tecnología GSM”, *Ingeniería de sistemas*, 16-abr-2012.
- [25]J. P. Tene Castillo, “Diseño e implementación de un sistema de conmutación de red para un sistema GSM basado en OpenBTS y Asterisk”, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, 2013.
- [26]Marcombo S.A, *Telecomunicaciones móviles*. España: Marcombo, 1998.
- [27]TELETOPIX.ORG, “Definición y función de HLR y VLR para GSM y LTE en telecomunicaciones”, *GSM*, 01-feb-2013. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/Acgf8E>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [28]M. R. Mérida Méndez, “Aplicaciones y servicios de un sistema de telefonía móvil GSM, sobre una plataforma de transferencia de datos GPRS, en la república de Guatemala”, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2007.
- [29]Comisión de Regulación de Comunicaciones, “Identificación y depuración de equipos terminales móviles que hacen uso de un IMEI inválido”. dic-2015.

- [30]Tutorials Point Pvt Ltd, "GSM - El subsistema de soporte de la operación (OSS)", *Tutorial GSM*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/NfDyhU>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [31]O. Ridolfi, "Radio definida por software (SDR) – receptor experimental", 2012.
- [32]V. Mares Rodríguez, "Diseño e implementación de un transmisor AM, FM y ATSC en Radio Definida por Software para docencia", Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2016.
- [33]S. J. Romero Pamiño, "Implementación de sistemas receptores de AM, FM y ADS-B usando SDR (Software Defined Radio), Hardware y Software libre.", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2015.
- [34]I. Pinar Domínguez y J. J. Murillo Fuentes, *Laboratorio de comunicaciones digitales radio definida por software*, Primera. 2011.
- [35]C. Aldaz, "Estudio de la tecnología SDR (Software Defined Radio) y posibles aplicaciones en comunicaciones inalámbricas.", Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2009.
- [36]J. G. Vega Rodríguez, "Análisis de la sincronización de la trama de datos en la modulación OFDM utilizando radio definido por software", B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Carrera de Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, 2015.
- [37]M. E. Villena, "El uso de vehículos aéreos no tripulados (drones) en las labores de seguridad y vigilancia de la administración". oct-2014.
- [38]J. del C. Barrientos, S. M. Gutiérrez, y R. Martínez, "Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones."
- [39]L. A. Hernández Barrón, J. C. Pedraza Ortega, G. Velázquez García, y M. Delgado Rosas, "Diseño y desarrollo de un vehículo volador de cuatro hélices no tripulado de bajo costo". ene-2014.
- [40]Expansión, "Drones: usos que se les puede dar y cómo conseguirlos más baratos", *Ahorros*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/2xbVeU>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [41]A. Iturri, "Drones: el futuro de la respuesta a desastres", *Drones Argentina*, 03-jun-2013.
- [42]C. López Jimeno, *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*. Madrid: Gráficas Arias Montano S.A, 2015.
- [43]R. R. Venkat Bommakanti, "ODROID-XU4 Beginner's Guide". 2015.
- [44]Raspberry Pi Ltd, "Raspberry Pi Compute Module (CM1) Raspberry Pi Compute Module 3 (CM3) Raspberry Pi Compute Module 3 Lite (CM3L)". 2016.
- [45]Ettus Research, "Hoja de datos de USRP B200/B210".

- [46] Ettus Research, "Hoja de datos USRP N200/N210".
- [47] Nuand LLC, "bladeRF x115", *Nuand*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/VEiQ4N>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [48] Ettus Research, "Antena VERT900". WANSIH ELECTRONIC CO., LTD., 2011.
- [49] TECHTOO, "Antena dipolo TECHTOO 3G 4G", *Network Antennas*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/UDufgJ>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [50] ESUMIC, "Antena LTE 4G para Huawei". [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/GropYR>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [51] ETSI, "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); GSM/EDGE Radio transmission and reception (3GPP TS 45.005 V13.3.0)". 2017.
- [52] Rosewill, "ROSEWILL RNX-N180UBEV2 - Adaptador Inalámbrico WI-FI", *Adaptadores inalámbricos*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/VMv3NF>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [53] Rosewill, "Adaptador inalámbrico Rosewill RNX-N180UBE", *Manualslib*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/sgkjEQ>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [54] Helipal, "Tarot-Frame-TL65S01", *Tarot 650 Sport Quadcopter Build Kit*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/q48v9S>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [55] Tarot, "Marco Quadcopter plegable fibra de carbono Tarot Iron 650", *UAV y Drone Kits*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/CkpsBz>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [56] Hobbyking, "Marco Tarot FY650 IRON MAN 650", *Tarot FY650 IRON MAN 650 Quad-Helicóptero de carbono Kit TL65B01*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/Q8a3ni>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [57] D. Martínez, M. R. Gómez, y C. Baraza, "Motores Brushless", *Quadruino*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/AYhji8>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [58] M. R. Gómez, D. Marínez, y C. Baraza, "ESC's", *Quadruino*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/LXr3mC>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [59] HobbyReal, "Controlador de vuelo para multi-cóptero ZYX25", *Controlador de vuelo & GPS Tarot ZYX-M*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/H5hMrU>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [60] Hobby King, "Batería Lipo MultiStar LiHV 10000mAh 6S", *Battery Bargains*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/jJ8o3T>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [61] Mbr0wn, "UbuntuInstall", *Installing GNU Radio*, 08-mar-2017. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/z8gvxU>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [62] Colaboradores de Wikipedia, "Ubuntu", *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Wikipedia, La enciclopedia libre., 29-ene-2018.
- [63] MuyLinux, "Ubuntu 15.04 'Vivid Vervet'", *Distribuciones: Ubuntu*, 23-abr-2015. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/JYQAeC>. [Accedido: 19-ene-2018].

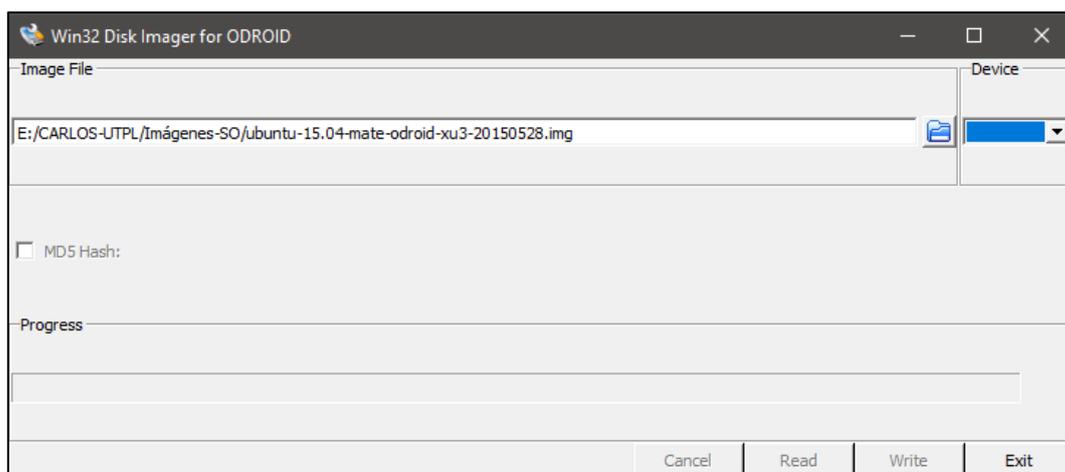
- [64]GNURadio, "About GNU Radio", *Acerca de la radio GNU*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gnuradio.org/about/>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [65]C. D. Monar Herrera, "Diseño experimental de sistema de monitoreo meteorológico satelital a través de sistema SDR –USRP.", Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2017.
- [66]Michael Ledema, *Getting Started with OpenBTS*, Primera. United States of America, 2015.
- [67]WorldTimeZone, "GSM World Coverage Map and GSM Country List.", *GSM World Coverage Map - GSM Country List by frequency bands*. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldtimezone.com/gsm.html>. [Accedido: 19-feb-2018].
- [68]Michael Ledema, "API de NodeManager", en *Getting Started with OpenBTS*, Primera., O'Reilly Media, Inc., 2015, p. 122.
- [69]J. V. Meggelen, L. Madsen, y J. Smith, *ASTERISK*, Segunda. Safari Bookshelf, 2007.
- [70]Instituto Federal de Telecomunicaciones, "Disposición técnica IFT-002-2016 especificaciones y requerimientos para la instalación y operación de las estaciones de radiodifusión sonora en frecuencia modulada en la banda de 88 a 108 MHz."
- [71]Ettus Research, "Lista de características comparativas - B200 / B210 / B200mini", *Controlador de hardware USRP y Manual de USRP: Serie USRP B2x0*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/MsFjNd>. [Accedido: 01-feb-2018].
- [72]KEYSIGHT TECHNOLOGIES, "Multímetro digital 34465A", *Multímetros Digitales (DMM)*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/CK6mi1>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [73]TURNIGY, "Batería TURNIGY 4000mAh 2S 7.4V", *TURNIGY 4000mAh 2S 7.4V 30C 40C Batería de polímero de lithium-ion HXT 4MM*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/xi14Yc>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [74]L. A. Masdeu González, "Cálculo de autonomía de una batería", *Cálculo de autonomía de una batería - Asociación de Robótica y Domótica de España*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/5nBLyM>. [Accedido: 19-feb-2018].
- [75]Tecnikro, "Módulo para fuente regulable", *Electrónica, audio y video*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/Ht4KW9>. [Accedido: 19-ene-2018].
- [76]HI BOX, "Caja de almacenaje de plástico / rectangular", *Productos*. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/bu5CMM>. [Accedido: 19-ene-2018].

## **ANEXOS**

## ANEXO A: INSTALACIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO

Es necesario instalar el sistema operativo Ubuntu 15.04 versión 2015-05-21 desde la página oficial de ODROID donde podremos encontrar algunas imágenes etiquetadas para el ODROID-XU3. Sin embargo, debido a la compatibilidad de software entre los dos mini ordenadores cualquier imagen funcionará también en el ODROID-XU4.

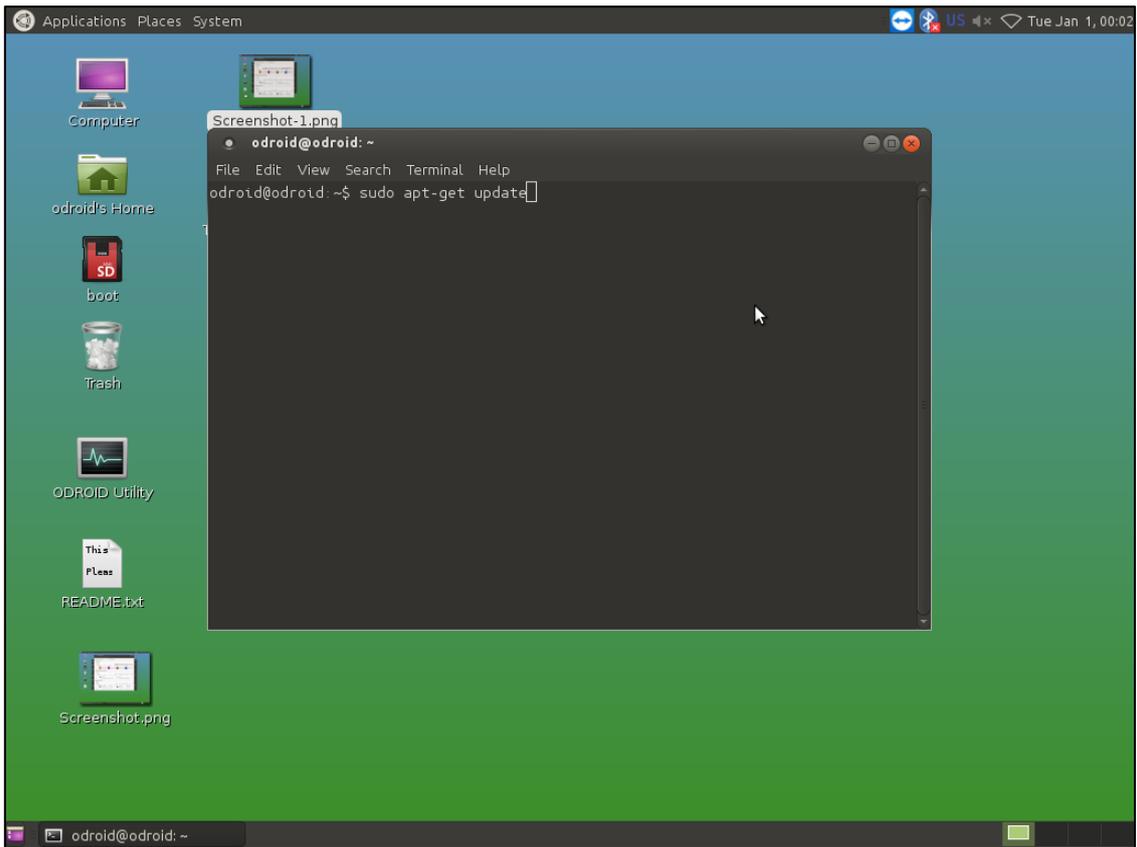
Se introduce el microSD de clase 10 o superior para luego mediante el programa Win32DiskImager grabar la imagen descomprimida mediante el botón Write.



Interfaz de Win32DiskImager.

Una vez que se ha cargado la imagen en la microSD e insertado en su respectiva ranura, se procede a encender la placa tomando en cuenta que el selector de modo de arranque con el que cuenta el ODROID-XU4 esté en SD.

Luego se conecta el cable de alimentación que hará que el LED rojo se encienda y el LED azul empiece a parpadear. Esto indica que el sistema fue instalado correctamente. Posteriormente, en la terminal con el que cuenta el ODROID se ejecuta el comando `sudo apt-get update` para actualizar paquetes y repositorios.



Interfaz de Ubuntu 15.04 para ODROID.

## ANEXO B: INSTALACIÓN DE GNURADIO

Se instala los paquetes necesarios para Ubuntu 15.04:

```
sudo apt-get -y install git swig cmake doxygen build-essential libboost-all-dev
libtool libusb-1.0-0 libusb-1.0-0-dev libudev-dev libncurses5-dev libfftw3-bin
libfftw3-dev libfftw3-doc libcppunit-dev libcppunit-doc ncurses-bin
cpufrequtils python-numpy python-numpy-doc python-numpy-dbg python-scipy
python-docutils qt4-bin-dbg qt4-default qt4-doc libqt4-dev libqt4-dev-bin
python-qt4 python-qt4-dbg python-qt4-dev python-qt4-doc python-qt4-doc libqwt6
libfftw3-bin libfftw3-dev libfftw3-doc ncurses-bin libncurses5 libncurses5-dev
libncurses5-dbg libfontconfig1-dev libxrender-dev libpulse-dev swig g++ automake
autoconf libtool python-dev libfftw3-dev libboost-all-dev libusb-dev libusb-1.0-
0-dev fort77 libsdl1.2-dev python-wxgtk2.8 git-core libqt4-dev python-numpy
ccache python-opengl libgsl0-dev python-cheetah python-mako python-lxml doxygen
qt4-default qt4-dev-tools libusb-1.0-0-dev libqwt5-qt4-dev pyqt4-dev-tools
python-qwt5-qt4 cmake git-core wget libxi-dev gtk2-engines-pixbuf r-base-dev
python-tk liborc-0.4-0 liborc-0.4-dev libasound2-dev python-gtk2 libzmq-dev
libzmq1 python-requests python-sphinx libcomedi-dev python-zmq
```

Se crea una carpeta para contener todo el repositorio:

```
cd $ HOME

mkdir workarea-uhd

cd workarea-uhd
```

Clonamos el repositorio:

```
git clone https://github.com/EttusResearch/uhd

cd uhd
```

Verificamos la versión de UHD deseada

```
git checkout v3.7.10.1
```

Creamos una carpeta de compilación, construimos el código e instalamos:

```
cd host

mkdir build

cd build

cmake ../

make

make test
```

```
sudo make install
```

```
sudo ldconfig
```

**Por último, instalamos los iconos de GNURadio mediante los comandos siguientes:**

```
sudo /usr/local/libexec/gnuradio/grc_setup_freedesktop install
```

```
sudo make install
```

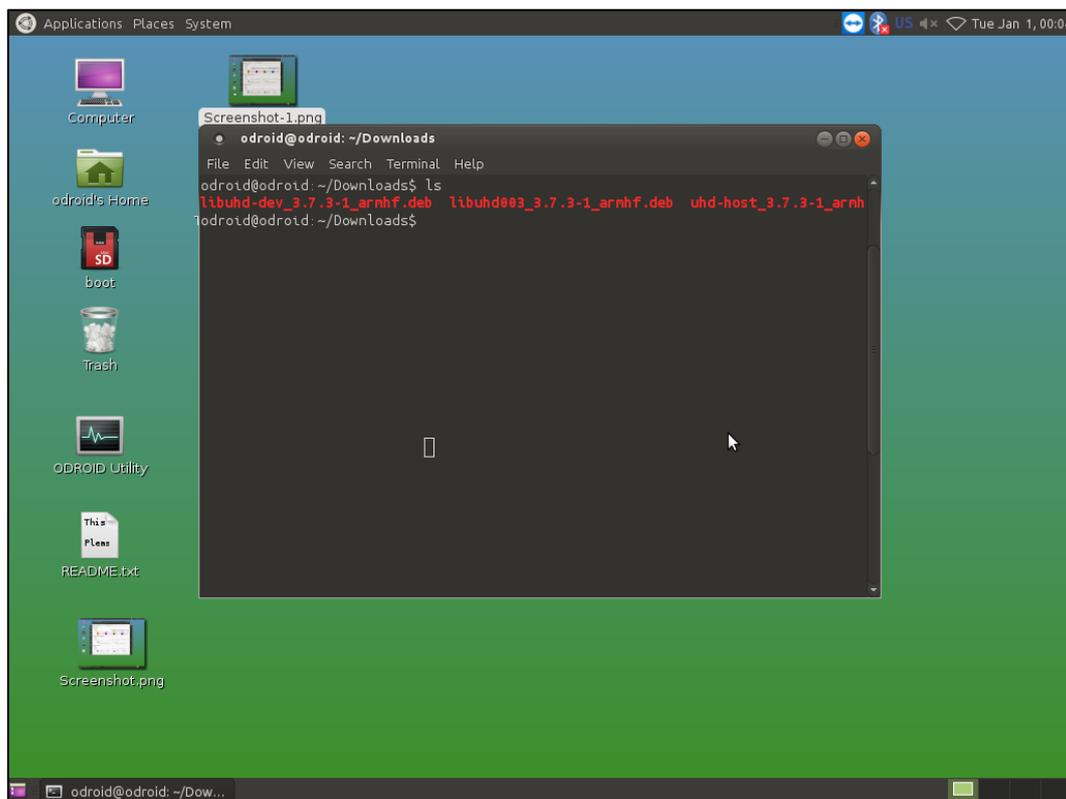
```
sudo ldconfig
```

## ANEXO C: INSTALACIÓN DE OPENBTS

Es necesario instalar los siguientes paquetes adicionales requeridos previos a la instalación del driver UHD para el equipo USRP de marca ETTUS modelo B210.

```
sudo apt-get install g++ erlang libreadline6-dev bind9 ntp autoconf libboost-all-dev
```

El siguiente paso es descargar e instalar una versión de UHD desde la página oficial de Ubuntu compatible con el ODROID-XU4 ya que es un dispositivo de arquitectura ARMv7. Se recomienda descargar la versión 3.7.3 que fue con la que tuvo compatibilidad el USRP B210 para el presente trabajo de titulación. Se descargarán 3 archivos .deb y para su instalación se lo realiza mediante la terminal ejecutando el comando *sudo dpkg* opción *-i* o *-install*.



Instalación del UHD para el USRP B210.

El siguiente paso es conectar la tarjeta B210 al puerto USB 3.0 del ODROID-XU4 y verificar mediante los comandos *uhd\_find\_devices* y *uhd\_usrp\_probe* su funcionamiento.

```

Applications Places System
odroid@odroid:~$ uhd_usrp_probe
Linux, GNU C++ version 4.9.1, Boost_105500, UHD_003.007.003-0-unknown
-- Operating over USB 3
-- Initialize CODEC control...
-- Initialize Radio control...
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Asking for clock rate 32.000000 MHz
-- Actually got clock rate 32.000000 MHz
-- Performing tuner loopback test... pass
-- Performing tuner loopback test... pass

Device: B-Series Device
-----
Mboard: B210
revision: 4
product: 2
serial: F5EAAE
FW Version: 4.0
FPGA Version: 3.0

Tune sources: none, internal, external, gpsdo
Clock sources: internal, external, gpsdo
Sensors: ref_locked

RX DSP: 0
Freq range: -16.000 to 16.000 Mhz

TX DSP: 0
Freq range: -16.000 to 16.000 Mhz

TX DSP: 1
Freq range: -16.000 to 16.000 Mhz

TX Dboard: A
-----
TX Frontend: A
Name: FE-TX2
Antennas: TX/RX
Sensors:
Freq range: 50.000 to 6000.000 Mhz
Gain range PGA: 0.0 to 89.8 step 0.2 dB
Connection Type: IQ
Uses LO offset: No

TX Frontend: B
Name: FE-TX1
Antennas: TX/RX
Sensors:
Freq range: 50.000 to 6000.000 Mhz
Gain range PGA: 0.0 to 89.8 step 0.2 dB
Connection Type: IQ
Uses LO offset: No

TX Codec: A
Name: B210 TX dual DAC
Gain Elements: None
odroid@odroid:~$

```

Comprobación de conexión USRP B210.

Para obtener el código fuente se ejecutan los siguientes comandos:

```

sudo apt-get install git
git clone https://github.com/RangeNetworks/dev.git
cd dev
./clone.sh

```

Se compila la versión máster:

```

./switchto.sh master

```

Para garantizar los enlaces simbólicos entre los diferentes elementos que se van a instalar se ejecuta los siguientes comandos:

```

cd liba53
sudo make install
sudo ldconfig
cd ..

```

Añadimos un repositorio para todos los componentes

```

sudo apt-get install software-properties-common python-software-properties
sudo add-apt-repository ppa:chris-lea/zeromq
sudo apt-get update

```

Mediante un editor de texto se modifica el archivo build.sh que se encuentra dentro de la carpeta dev que se creó y se cambia `installIfMissing libzmq5` por `installIfMissing`

libzmq3. Además, se debe eliminar las siguientes líneas ya que si se compila se instalará la versión por defecto en Ubuntu del UHD y se borrará la versión anterior que se instaló. Las líneas por eliminar son las siguientes:

```
if [ "$MANUFACTURER" == "Ettus" ]; then

installIfMissing libuhd-dev

installIfMissing libuhd003

installIfMissing uhd-host

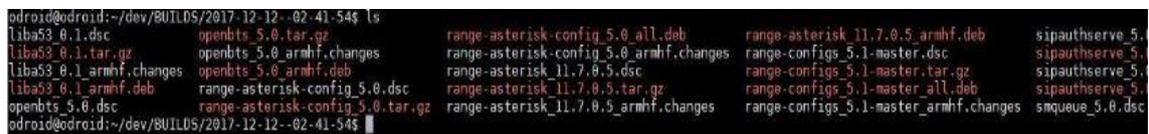
fi
```

Una vez que se ha realizado los cambios se procede a guardar con el mismo nombre y conectado el USRP B210.

Algo importante previo a la compilación del código es eliminar por completo manualmente todas las referencias a libcoredumper de OpenBTS y sus dependencias, ya que no funciona en absoluto en los conjuntos de chips ARM. Esta dependencia solo es necesaria para la depuración por lo que se puede deshabilitar y aún si OpenBTS funcionará. Esto se logra eliminando de todos los archivos Makefile.am y UnixSignal.cpp la palabra *'WriteCoreDump'* y *'coredump'*.

Después de haber realizado estos cambios se puede compilar digitando el comando `./build.sh B210`.

La ejecución del comando anterior crea los paquetes \*.deb en el directorio: `cd dev/BUILDS/*fecha-de-compilación*` para luego proceder a su instalación con el comando `sudo dpkg -i *.deb` n, Cuando se haya instalado los paquetes se debe reiniciar el sistema operativo para que todos los cambios realizados queden correctamente configurados.



```
odroid@odroid:~/dev/BUILDS/2017-12-12-02-41-54$ ls
liba53_0.1.dsc          openbts_5.0.tar.gz          range-asterisk-config_5.0_all.deb      range-asterisk_11.7.0.5_armhf.deb      sipauthserve_5.
liba53_0.1.tar.gz      openbts_5.0_armhf.changes   range-asterisk-config_5.0_armhf.changes range-configs_5.1-master.dsc          sipauthserve_5.
liba53_0.1_armhf.changes openbts_5.0_armhf.deb      range-asterisk_11.7.0.5.dsc          range-configs_5.1-master.tar.gz      sipauthserve_5.
liba53_0.1_armhf.deb   range-asterisk-config_5.0.dsc range-asterisk_11.7.0.5.tar.gz       range-configs_5.1-master_all.deb      sipauthserve_5.
openbts_5.0.dsc        range-asterisk-config_5.0.tar.gz range-asterisk_11.7.0.5_armhf.changes range-configs_5.1-master_armhf.changes smqueue_5.0.dsc
odroid@odroid:~/dev/BUILDS/2017-12-12-02-41-54$
```

Instalación de OpenBTS y sus servicios asociados.

Luego que se ha reiniciado el sistema se inician los cuatro servicios que previamente fueron instalados mediante los siguientes comandos:

```
sudo start sipauthserve

sudo start smqueue

sudo start asterisk

sudo start openbts
```

## ANEXO C1: CONFIGURACIÓN DE OPENBTS

Para configurar los parámetros del sistema, OpenBTS dispone de un terminal para modificar algunas características. Se ingresa al directorio `cd/dev/openbts/apps` y se ejecuta el comando `./CLI`.

Como primer paso se cambia el nombre a la red:

```
OpenBTS> config GSM.Identity.ShortName PCell
GSM.Identity.ShortName changed from "OpenBTS" to "PCell"
```

Para la banda GSM de operación se deja por defecto la banda de 900 MHz, pero si desea cambiar se ejecuta el siguiente comando:

```
OpenBTS> config GSM.Radio.Band 850
GSM.Radio.Band changed from "900" to "850"
WARNING: GSM.Radio.C0 (51) falls outside the valid range of ARFCNs 128-251 for
```

De igual manera se cambia el ARFCN por un canal que se encuentre libre en la banda de operación configurada:

```
OpenBTS> config GSM.Radio.C0 166
GSM.Radio.C0 changed from "51" to "166"
```

Se configura para que la BTS transmita a la máxima potencia:

```
OpenBTS> config GSM.Radio.PowerManager.MaxAttendB 0
```

Para regular la potencia transmitida por el MS e intentar fijar la SNR se ejecuta:

```
OpenBTS> config GSM.Radio.SNRTarget 10
```

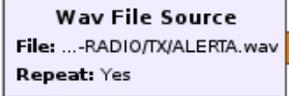
Para recibir la señal del MS en la BTS sin errores se configura el valor de RSSI:

```
OpenBTS> config GSM.Radio.RSSITarget
```

Si se desea tener un mensaje de bienvenida para el momento que los MS's se registran se configura con el comando:

```
OpenBTS> config Control.LUR.NormalRegistration.Message Bienvenido a la red
PCell, envía tu numero para el registro
Control.LUR.NormalRegistration.Message changed from "" to " Bienvenido a la red
PCell, envía tu numero para el registro"
```

## ANEXO D: BLOQUES UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DEL TRANSMISOR FM

ICONO	BLOQUE	DESCRIPCIÓN
 <p><b>Options</b>  <b>ID:</b> TX_FM  <b>Title:</b> Tx_FM  <b>Author:</b> PC  <b>Generate Options:</b> WX GUI</p>	Options	Establece parámetros especiales para el diagrama de flujo como título, autor y descripción para propósitos de identificación.
 <p><b>Variable</b>  <b>ID:</b> audio_rate  <b>Value:</b> 32k</p>	Variable	Asigna un valor a una variable única y no tiene representación gráfica.
 <p><b>Wav File Source</b>  <b>File:</b> ...-RADIO/TX/ALERTA.wav  <b>Repeat:</b> Yes</p>	Wav File Source	Crea una fuente de datos a partir de un archivo de onda de audio en formato .wav. Reproduce el archivo en un bucle si se desea.
 <p><b>FM Preemphasis</b>  <b>Sample Rate:</b> 32k  <b>Tau:</b> 50u  <b>High Corner Freq:</b> -1</p>	FM Preemphasis	Se utiliza para aumentar la amplitud de la frecuencia lo que mejora la SNR. La constante de tiempo puede ser 50 $\mu$ s o 75 $\mu$ s.
 <p><b>Low Pass Filter</b>  <b>Decimation:</b> 1  <b>Gain:</b> 1  <b>Sample Rate:</b> 32k  <b>Cutoff Freq:</b> 15k  <b>Transition Width:</b> 1k  <b>Window:</b> Blackman  <b>Beta:</b> 6.76</p>	Low Pass Filter	Se utiliza para filtrar las frecuencias por encima de 108 MHz. Se especifica la frecuencia de corte y el ancho de transición.
 <p><b>NBFM Transmit</b>  <b>Audio Rate:</b> 32k  <b>Quadrature Rate:</b> 320k  <b>Tau:</b> 50u  <b>Max Deviation:</b> 75k  <b>Preemphasis High Corner Freq:</b> -1</p>	NBFM Transmit	Modula la señal en banda angosta.
 <p><b>WX GUI FFT Sink</b>  <b>Title:</b> Espectro audio  <b>Sample Rate:</b> 32k  <b>Baseband Freq:</b> 0  <b>Y per Div:</b> 10 dB  <b>Y Divs:</b> 20  <b>Ref Level (dB):</b> 50  <b>Ref Scale (p2p):</b> 2  <b>FFT Size:</b> 1.024k  <b>Refresh Rate:</b> 30  <b>Freq Set Varname:</b> None</p>	WX GUI FFT Sink	Actúa como un analizador de espectro haciendo una transformada de Fourier discreta de corta duración. Permite visualizar el espectro de las señales.

<p><b>UHD: USRP Sink</b>  <b>Samp Rate (Sps):</b> 320k  <b>Ch0: Center Freq (Hz):</b> 102.5M  <b>Ch0: Gain Value:</b> 40  <b>Ch0: Antenna:</b> TX/RX  <b>TSB tag name:</b></p>	<p>UHD: USRP Sink</p>	<p>Realiza el traslado en frecuencia y transmite las muestras.</p>
<p><b>WX GUI Slider</b>  <b>ID:</b> tx_freq  <b>Label:</b> Frecuencia Tx  <b>Default Value:</b> 102.5M  <b>Minimum:</b> 87M  <b>Maximum:</b> 108M  <b>Converter:</b> Float  <b>Grid Position:</b> 1, 10, 1, 3</p>	<p>WX GUI Slider</p>	<p>Permite utilizar controles deslizantes.</p>

## ANEXO E: VERIFICACIÓN DE PESOS



ODROID-XU4.



Wi-Fi RNX-N180UBE.



Antenas VERT900.



Regulador de voltaje 30V 5A.



Batería TURNIGY 4000 mAh.



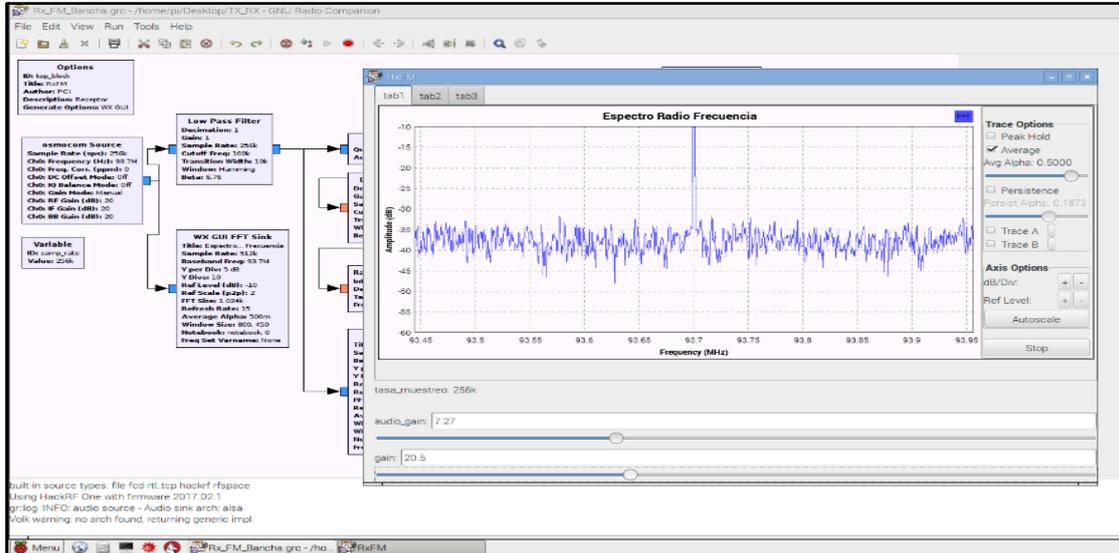
Estructura plástica y alucobond.



Sistema de comunicación en la caja HI BOX IP67.

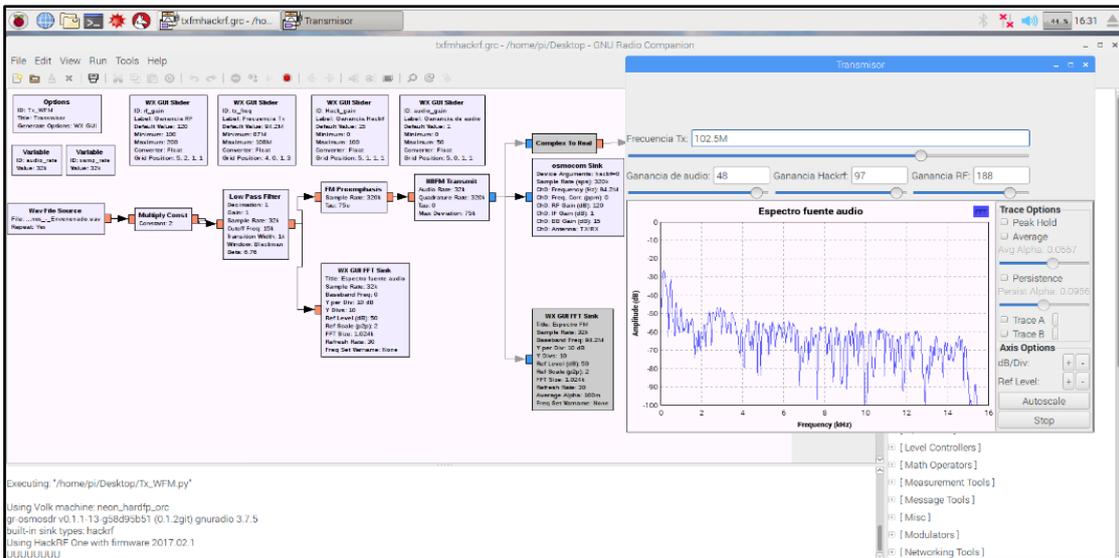
## ANEXO F: RECEPCIÓN Y TRANSMISIÓN FM USANDO RASPBERRY PI Y EL DISPOSITIVO SDR HACKRF ONE

Para el caso del dispositivo SDR HackRF One se utiliza el bloque Osmocom Sink que hace un traslado en frecuencia para la transmisión.



Espectro de la señal del receptor FM.

En el caso del receptor FM primeramente las señales se reciben mediante el bloque Osmocom Source para después su demodulación por el bloque WBFM Receive y si se desea controlar el volumen por el bloque Multiply Const.



Espectro de la señal del transmisor FM.