



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

**FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y
DE LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
ESTACIÓN BASE TRANSMISORA – RECEPTORA (BTS)
GSM PARA SERVICIO DE VOZ Y SMS BASADA EN
YATEBTS”**

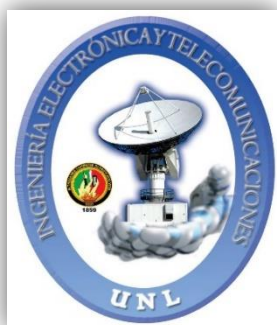
TESIS DE GRADO PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

Autor: Manuel Asdrual Montaña Blacio.

Director: Ing. Diego Fernando Carrera Moreno, Mg. Sc.

LOJA-ECUADOR

2017



CERTIFICACIÓN

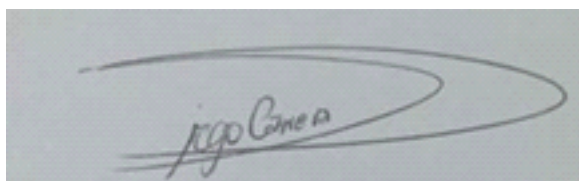
Ing. Diego Fernando Carrera Moreno, Mg. Sc.

Director de tesis

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en «Diseño e implementación de un prototipo de estación base transmisora – receptora (BTS) GSM para servicio de voz y SMS basada en YateBTS», previa a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, realizado por la señor egresado: Manuel Asdrual Montaña Blacio, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 27 de julio del 2017

A rectangular box containing a handwritten signature in dark ink. The signature appears to read 'Diego Carrera' and is enclosed within a large, loopy oval stroke.

Ing. Diego Fernando Carrera Moreno, Mg. Sc.

Director de tesis.

AUTORÍA

Yo **MANUEL ASDRUAL MONTAÑO BLACIO** declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.



Firma:

Cédula: 0706440674

Fecha: 07 de agosto del 2017

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo, **MANUEL ASDRUAL MONTAÑO BLACIO** declaro ser autor de la tesis titulada: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESTACIÓN BASE TRANSMISORA – RECEPTORA (BTS) GSM PARA SERVICIO DE VOZ Y SMS BASADA EN YATEBTS”**, como requisito para optar al grado de: **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los treinta días del mes de agosto del dos mil diecisiete.



Firma:

Autor: Manuel Asdrual Montaña Blacio.

Cédula: 0706440674

Dirección: Loja (San Cayetano Bajo).

Correo Electrónico: manuel.asdmon@gmail.com

Teléfono: 261-13-93 **Celular:** 0989669027

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Diego Fernando Carrera Moreno, Mg. Sc.

Tribunal de Grado: Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, Mg. Sc.

Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.

Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas, Mg. Sc.

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico a toda mi familia quienes hacen mi mundo más significativo.

AGRADECIMIENTO

A mi familia por el apoyo incondicional recibido, gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación en la vida.

A la Universidad Nacional de Loja, a la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, especialmente a los docentes y autoridades de la carrera de ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones por impartir sus conocimientos en mí.

Al Ing. Diego Fernando Carrera Moreno, director de tesis, quien con sus conocimientos y experiencia me brindo su asesoramiento para culminar el presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| CERTIFICACIÓN | II |
| AUTORÍA..... | III |
| CARTA DE AUTORIZACIÓN | IV |
| DEDICATORIA | V |
| AGRADECIMIENTO | VI |
| 1. TÍTULO | 1 |
| 2. RESUMEN..... | 2 |
| 3. INTRODUCCIÓN | 4 |
| 4. REVISIÓN DE LITERATURA | 6 |
| 4.1. Estaciones base basadas en hardware y software libre | 6 |
| 4.1.1. Sistemas de red GSM usando SDR | 7 |
| 4.2. Telecomunicaciones en caso de desastres | 9 |
| 4.2.1. Telefonía móvil como solución | 10 |
| 4.2.2. Marco regulatorio de las telecomunicaciones. | 10 |
| 4.3. BTS de código abierto, una gran ayuda socioeconómica a las comunidades rurales | 12 |
| 4.4. Conceptos generales..... | 14 |
| 4.4.1. Sistema Global de Comunicaciones Móviles GSM | 14 |
| 4.4.2. Arquitectura del sistema GSM | 16 |
| 4.4.3. Voz sobre IP (VoIP). | 20 |
| 4.4.4. SDR como plataforma GSM | 21 |
| 4.5. Componentes de la red GSM usando SDR | 24 |
| 4.5.1. Yet Another Telephony Engine (YATE) | 24 |
| 4.5.2. Arquitectura de Yate..... | 25 |
| 4.5.3. YateBTS | 27 |
| 4.5.4. Estructura interna de YateBTS | 28 |
| 4.5.5. Módulo JavaScript..... | 29 |

| | |
|--|----|
| 4.5.6. YBTS y MBTS | 30 |
| 4.5.7. SDR BladeRF | 30 |
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS | 33 |
| 5.1. Sistema de telefonía móvil estándar y su respectiva analogía con SRD..... | 33 |
| 5.2. Radio definido por software (SDR) | 35 |
| 5.3. Análisis y diseño de la solución..... | 36 |
| 5.4. Implementación de la solución | 38 |
| 5.4.1. Requerimientos de software | 38 |
| 5.4.2. Requerimientos de hardware | 38 |
| 5.5. Fases para la construcción del prototipo GSM | 39 |
| 5.5.1. Proceso de instalación del sistema | 40 |
| 5.5.2. Interfaz web de administración, control y monitoreo..... | 44 |
| 5.6. Configuración para la puesta en marcha del sistema | 46 |
| 5.7. Parámetros a evaluar de la red GSM..... | 48 |
| 6. RESULTADOS..... | 50 |
| 6.1. Pruebas de funcionamiento del prototipo de red GSM..... | 50 |
| 6.1.1. Conexión de las estaciones móviles a la red GSM implementada | 50 |
| 6.1.2. Prueba de los servicios de red | 54 |
| 6.2. Resultado y análisis de la potencia de la red GSM | 59 |
| 6.3. Resultado y análisis del retardo de los servicios en la red | 61 |
| 7. DISCUSIÓN | 67 |
| 8. CONCLUSIONES | 69 |
| 9. RECOMENDACIONES | 71 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA | 72 |
| 11. ANEXOS | 75 |
| ANEXO I: ABREVIATURAS | 75 |
| ANEXO II: HARDWARE DEL SISTEMA DE RED GSM | 77 |

| | |
|--|----|
| ANEXO III: PRUEBAS DEL BLADERF X40 | 78 |
| ANEXO IV: CONEXIÓN DEL HARDWARE AL SISTEMA | 81 |
| ANEXO V: CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE RED GSM..... | 83 |
| ANEXO VI: COSTO DEL PROTOTIPO | 86 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Central telefónica destruida. | 9 |
| Figura 2. Antena caída y daños en la torre. | 10 |
| Figura 3. Esquema de acceso al medio GSM. | 15 |
| Figura 4. Arquitectura de red GSM. | 17 |
| Figura 5. Estación Móvil. | 17 |
| Figura 6. Subsistema de estación base BSS. | 18 |
| Figura 7. Subsistema de conmutación de red [11]. | 20 |
| Figura 8. Diagrama de bloques de SDR. | 22 |
| Figura 9. Arquitectita SDR. | 23 |
| Figura 10. Arquitectura de Yate para la implementación de la red. | 26 |
| Figura 11. Estructura interna de YateBTS. | 28 |
| Figura 12. Módulo de JavaScript. | 29 |
| Figura 13. Radio BladeRF. | 31 |
| Figura 14. Sistema de telefonía móvil estándar y su respectiva analogía. | 34 |
| Figura 15. Fases de construcción de prototipo de red GSM. | 39 |
| Figura 16. Los suscriptores de la NIB Web | 45 |
| Figura 17. Configuraciones básicas para el funcionamiento de la red GSM | 45 |
| Figura 18. Selección de red en celulares. | 51 |
| Figura 19. Reconocimiento de la red implementada (Test PLMN 1-1). | 52 |
| Figura 20. Conectividad de la red y respectivo mensaje de confirmación. | 53 |
| Figura 21. Inicialización del sistema de red GSM. | 54 |
| Figura 22. Mensaje de bienvenida y registro de la estación base. | 54 |
| Figura 23. Asignación de números telefónicos. | 55 |
| Figura 24. Prueba de llamada entre 2 celulares | 56 |
| Figura 25. Prueba de llamada entre 4 estaciones móviles. | 56 |
| Figura 26. Prueba de envió de mensaje de texto. | 57 |
| Figura 27. Prueba de envió de mensaje múltiple. | 57 |
| Figura 28. Registro de los números telefónicos. | 58 |
| Figura 29. Diagrama estadístico de la calidad de la señal en base a la distancia. | 60 |
| Figura 30. Diagrama estadístico del retardo de SMS entre MS1-MS2. | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 31. Ubicación de los respectivos dispositivos móviles. | 63 |
| Figura 32. Retardo del servicio SMS en un entorno con interferencias. | 64 |
| Figura 33. Ubicación de las estaciones móviles con respecto a la BTS. | 65 |
| Figura 34. Equipos para implementar la red GSM | 77 |
| Figura 35. Comprobación de BladeRF X40. | 80 |
| Figura 36. Conexión de sistema de red. | 82 |
| Figura 37. Configuración de la estación base mediante la interfaz gráfica. | 84 |
| Figura 38. Configuración de la estación base mediante la línea de comandos del BladeRF. | 85 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Series de especificaciones GSM. | 14 |
| Tabla 2. Bandas de frecuencias GSM con sus respectivos canales ARFCN. | 16 |
| Tabla 3. Estructura del número IMSI en Ecuador. | 18 |
| Tabla 4. Comparación de Códecs. | 21 |
| Tabla 5. Comparación entre los diferentes modelos de los SDR. | 35 |
| Tabla 6. Especificación de SDR para emular redes GSM. | 36 |
| Tabla 7. Mediciones de la calidad de señal en base a la distancia. | 59 |
| Tabla 8. Parámetros de cobertura de la BTS | 61 |
| Tabla 9. Retardo del servicio SMS con respecto a la distancia | 62 |
| Tabla 10. Mediciones del retador de comunicación del servicio SMS | 64 |
| Tabla 11. Pruebas de calidad de audio bajo el método MOS. | 66 |
| Tabla 12. Costo del prototipo. | 86 |

1. TÍTULO

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
ESTACIÓN BASE TRANSMISORA – RECEPTORA (BTS)
GSM PARA SERVICIO DE VOZ Y SMS BASADA EN
YATEBTS”**

2. RESUMEN

El presente trabajo de tesis consiste en el diseño e implementación de un prototipo de estación base transmisora – receptora (BTS) GSM para servicio de voz y SMS basada en *YateBTS*, esto con el propósito de mejorar las condiciones en cuestión de telecomunicaciones de los sectores rurales que no cuentan con servicios de telefonía móvil y de alguna forma que sirva como red suplementaria en caso de colapso de la red central.

Para la implementación del prototipo se hace uso de herramientas tanto de hardware como de software libre, con el fin de tener un sistema de BTS de bajo costo y fácil implementación. Haciendo referencia de la documentación técnica de la telefonía móvil como también de la tecnología de voz sobre IP (VoIP), para luego, realizar la instalación del sistema *YateBTS* el cual utiliza el hardware *BladeRF*, una radio definida por software (SDR) que permite el despliegue de una red análoga al estándar GSM proporcionando el medio de comunicación con las estaciones móviles.

Para el desarrollo del presente trabajo se ha dividido la investigación en etapas, la primera consiste en el estudio de las características de la red, seguida por la parte de instalaciones y configuraciones, y, por último, la puesta en marcha del sistema para realizar las pruebas respectivas de los servicios y parámetros de la red.

ABSTRACT

This thesis work is about the desing and implementation of a *YateBTS* based GSM base transceiver station (BTS) for voice and SMS services. The aim of the proyect is to improve the telecommunications status in rural areas that doesn't have access to mobile telephony. Also it's expected that this work can be used as a supplementary network in case of a failure in the central network.

Open software and hardware tools were used for the implementation of the prototype, in order to desing a low-cost and easy to use BTS system. A review of the technical literature about mobile telephony and voice over IP (VoIP) was made, and after this, the YateBTS system was installed. This system uses BladeRF hardware, wich is a software defined radio (SDR) that allows the deploying of a standar GSM analog network, trough the provision of the communications channel between mobile stations.

This investigation work was divided in three stages: the first one it's about the study of the network's characteristics, the second about the installation and configuration of the system, and the in the last stage, the system is initialized for making tests of the services and network parameters.

3. INTRODUCCIÓN

Contar con un sistema emergente para las redes de telecomunicaciones es un factor importante a considerar, en dicho sistema se debe contar con varias alternativas para dar respuesta a los diferentes fenómenos que se presenten. Las redes de telefonía móvil GSM son una gran alternativa en casos de emergencia, por su rápida implementación y habilitación del sistema. No obstante, tomando en cuenta que los proveedores de telefonía móvil trabajan bajo el sistema de oferta y demanda, lo cual, les imposibilita la implementación de estaciones base en lugares donde el número de usuarios sea bajo para la rentabilidad de negocio, dando lugar a que la población quede aislada. Siendo así, que en caso de desastres naturales dicha población no contaría con servicios de telecomunicaciones, servicios que facilitan la ubicación de los lugares afectados y ayudan a los rescatistas en su trabajo. Es por esto que se plantea la construcción de un prototipo de estación base GSM portable de bajo costo que sirva para brindar servicio a las comunidades que se ven aisladas de las operadoras móviles, además, que sirva de red suplementaria para casos de emergencia. El objetivo de esta tesis es «Diseñar e implementar un prototipo de BTS GSM para conmutación de llamadas usando hardware y software libre» y para poder cumplir este objetivo, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Instalar y verificar la PBX montada sobre una plataforma Linux.
- Verificar las llamadas y envió de mensajes de texto a los diferentes móviles que se encuentran conectados en la red GSM.
- Verificar parámetros de la red GSM.

Para la implementación de la Estación Base Celular (BTS), se hace uso del proyecto *YateBTS* que genera una interfaz de aire (*Um*), utilizada para establecer la comunicación entre la estación móvil y la estación base. *YateBTS* hace uso del hardware *BladeRF* y del servidor *Yate* para realizar la conmutación de los servicios, de esta forma se puede emular una red celular funcional análoga al estándar de telefonía móvil GSM.

En la sección 4, se introducen los conceptos fundamentales de estaciones base basadas en hardware y software libre, como también la importancia que tienen los sistemas de BTS basados en SDR para las comunidades rurales aisladas de los servicios móviles y a su vez el estudio de una red móvil GSM emergente en situaciones de desastres naturales; no

obstante, se hace referencia al estándar GSM para cumplir con las condiciones y parámetros de red para poder habilitar los servicios de llamadas y mensajes de texto; este marco de referencia fue redactado tomando como base las mejores prácticas de implementación de este sistema de estación base. Entre estas referencias se puede destacar las siguientes «*An Empirical Approach to Autonomous GSM BTS based on OSS and OSH*» de la Universidad de Ingeniería y Tecnología, Bangladesh, «*OpenBTS Based Microtelecom Model: A Socio-Economic Boon To Rural Communities*» producido en el Centro Computacional y de Redes, India, entre otros. Posteriormente en la sección 5 se realizó un análisis del hardware y software, haciendo referencia a la potencia, consumo de energía, costo de implementación y requerimientos del sistema, además, del análisis que se tomó en cuenta para poner en marcha el sistema de BTS. Finalmente, en las secciones 6, 7, 8, 9, 10 y 11, se constata los resultados obtenidos a través de las pruebas realizadas en el campo, la discusión de las mediciones obtenidas, las conclusiones a las que se ha llegado, las recomendaciones para su despliegue, el indexado de comandos y la bibliografía, respectivamente.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Estaciones base basadas en hardware y software libre

A pesar de los avances tecnológicos, el despliegue instantáneo de infraestructura básica de telecomunicaciones como BTS no es factible debido a problemas de planificación y costos de implementación de infraestructura, es por ello, que el sector de investigación e industria se han enfocado en el estándar GSM, para la implementación de sistemas de estaciones base de bajo costo basados en software y hardware libre, fácil de usar y modificar, además de mejorar la seguridad de red.

Se cuenta con diferentes softwares de código abierto para la implementación de estaciones base como:

El software *Osmocom* mismo que ofrece más control y escalabilidad de red, pero necesita hardware comercial para la infraestructura de red, convirtiéndose en un sistema muy costoso por el tipo de dispositivos que utiliza, además, su código fuente es cerrado no permitiendo modificaciones a su función base [1].

En vista a los inconvenientes que presenta el software *Osmocom*, la empresa *Range Networks* desarrollo el proyecto *OpenBTS*, en el que el código fuente está completamente abierto, pero surge la complejidad cuando se configura. Se convirtió en el software más utilizado para emular redes GSM, uno de los inconvenientes del proyecto es el de no permitir la configuración de red multi-celular [1].

Años más tarde, el desarrollador David Burgess junto Legba, en su grupo de trabajo Inc y Null, han desarrollado un software de código abierto llamado *YateBTS*, logrando con este proyecto reducir los inconvenientes de *OpenBTS* en cuanto a código, convirtiéndolo en un código fuente más entendible para el usuario final [2].

En cuanto a hardware, también se dispone de diferentes dispositivos de código abierto como:

La empresa *Ettus*, una de las más conocidas por la fabricación de Radios Definidos por Software (SDR, por sus siglas en inglés) con su serie *USRP*, que es la más popular en cuanto a dispositivos SDR, pero su hardware no es completamente de código abierto porque no proporciona detalle más profundo que solo el bloque básico. Por otra parte, los dispositivos *USRP* dependiendo de la aplicación necesitan diferentes placas hijas para

funcionar, lo cual incrementa la complejidad y el costo de implementación de un proyecto [3]. La empresa *Range Networks* también ofrece un tipo de hardware, mismo que no se abarca en esta investigación, porque no puede ser utilizado en usos múltiples como son las BTS.

Umtrx es una tarjeta que se la puede utilizar en aplicaciones fijas, porque su rango de frecuencias es limitado, la tarjeta *MyridRF* es también un dispositivo de código abierto, pero no se encuentra disponible en el mercado y la tarjeta *HackRF* puede ser considerada como una gran opción para múltiples aplicaciones donde se ocupe de un gran rango de frecuencias [3].

La empresa Nuand, es una empresa nueva que se dedica a la construcción de SDRs, cuenta con dos tipos de tarjetas la *BladeRF X40* y la *BladeRF X115*, las mismas que tienen precios muy bajos en comparación con las demás. Cuentan con un amplio rango de frecuencias, se las puede utilizar para múltiples aplicaciones. No obstante, estas tarjetas no necesitan de periféricos alternos para poder funcionar en diferentes campos de investigación [3].

4.1.1. Sistemas de red GSM usando SDR

Numerosas investigaciones se han venido realizando en los últimos años con el objetivo de determinar el potencial de las BTS utilizando SDR. La mayoría de los artículos científicos publicados son en base a *OpenBTS* y *USRP*. Sin embargo H. Samra y David A. Burgess dan el primer paso con el fin de reducir el costo de los servicios GSM con su proyecto *YateBTS*.

La empresa *Range Networks* en el 2010, pone en funcionamiento su primer proyecto demo de estación base, convirtiéndose en la empresa que comercializa sistemas basados en *OpenBTS* [4]. Años más tarde, David Burgess junto al equipo Null desarrollaron el software de telefonía *Yate*, el mismo que sirvió como base para el desarrollo de *YateBTS*, que fue lanzado en el 2014 como un sistema de estación base basada en sistemas de código abierto [3].

No obstante, muchos sistemas de BTS se han implementado partiendo de los proyectos de BTS basadas en hardware y software libre.

En 2010, se instaló la primera BTS en una pequeña isla llamada *Niue*, con un aproximado de 1700 habitantes, el proyecto lo ejecutó una empresa de telecomunicaciones basando toda su infraestructura en el proyecto de *OpenBTS* [5].

En 2012, A. Anand propone un nuevo concepto de BTS para una estación de pueblo, utilizando *OpenBTS* y *Asterisk* brindando una conectividad celular de bajo costo para zonas rurales. En el mismo año el equipo de trabajo *Ninja Networks* estableció una red GSM denominada “*NinjaTel Van*”, misma que se la implementó en las Vegas, donde se empleó el sistema *OpenBTS* y sirvió para alojar a 650 teléfonos celulares con sus tarjetas SIM personalizadas [3].

En 2014, Zhilin Li también propuso su estación base GSM basada en *OpenBTS* y USRP [3].

4.2. Telecomunicaciones en caso de desastres

En casi todos los casos de desastres naturales que se presentan, los servicios de telecomunicaciones son los más afectados, por colapsos parciales o completos de las infraestructuras de red. Aun cuando tales afectaciones no se den en su totalidad, las comunicaciones se sobrecargan por la demanda en el alto tráfico que reciben, es importante recalcar que los servicios de telecomunicaciones ayudan a la tarea de rescate y ubicaciones de las personas afectadas por el incidente.

Tomando como referencia lo ocurrido en Ecuador, el terremoto que se registró el 16 de abril del 2016 en la provincia de Manabí. Según informes de las operadoras de telefonía fija, móvil y demás organismos de control concluyeron que en su gran mayoría los servicios básicos colapsaron.

La Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), emite su informe y da a conocer las principales causas de afectaciones en la red de telecomunicaciones como: fallas eléctricas, daños y derrumbes de las torres de telefonía y los múltiples cortes que se produjeron en la red troncal, no obstante, el movimiento que se produjo en las antenas ocasionando pérdidas de alineamiento de los enlaces de radio redundantes [6].



Figura 1. Central telefónica destruida [6].



Figura 2. Antena caída y daños en la torre [6].

Es de vital importancia ofrecer soluciones que permitan superar las dificultades que presenten las redes de telecomunicaciones en los lugares afectados. Existen muchas soluciones, en esta investigación se plantea una solución para cubrir de manera eficiente y rápida el acceso a los servicios de telecomunicaciones, para mantener informada a la población y así mismo apoyar a las actividades de búsqueda y rescate.

4.2.1. Telefonía móvil como solución

La telefonía móvil es uno de los sistemas que se pueden montar con más rapidez comparado con otros sistemas de comunicación. No obstante, los teléfonos móviles hacen su contribución en la tarea de recuperación y ayuda, por el mismo hecho de que cada ciudadano, por lo general, cuenta con uno de estos dispositivos, de esta manera se genera una información más eficiente en la localización inmediata.

Es importante mencionar que la telefonía móvil ha superado a la telefonía fija en los últimos años, por ende, se propone la telefonía móvil como solución en situaciones de desastres. Dada la velocidad con la que se puede montar una red de emergencia y la facilidad de adaptarse a la misma sin importar a que operadora móvil se esté registrando.

4.2.2. Marco regulatorio de las telecomunicaciones.

La ley orgánica de telecomunicaciones en el Ecuador en el capítulo II (competencias), el artículo 8, presenta lo que se debe efectuar en caso que se produzca un desastre natural u otros conflictos que conlleven la misma normativa.

Artículo 8.- Prestación de servicios en Estado de Excepción.

“En caso de agresión; conflicto armado internacional o interno; grave conmoción interna, calamidad pública; o desastre natural o emergencia nacional, regional o local, cuando

el Decreto Ejecutivo de Estado de Excepción que emita el Presidente o Presidenta de la República, involucre la necesidad de utilización de los servicios de telecomunicaciones, los prestadores que operen redes públicas de telecomunicaciones tienen la obligación de permitir el control directo e inmediato por parte del ente rector de la defensa nacional, de los servicios de telecomunicaciones en el área afectada. Dicho control cesará cuando se levante la declaratoria de Estado de Excepción conforme lo previsto en el artículo 166 de la Constitución de la República del Ecuador y el Decreto de Estado de Excepción” [7].

En cuanto a las sanciones que conlleva la prueba de la estación base en un campo libre se tiene. La ley Orgánica de Telecomunicaciones en el Título XIII Régimen Sancionatorio Capítulo I Infracciones, en los artículos 118 y 119 indica las contravenciones que se pueden cometer al momento de probar el sistema BTS en un ambiente no adecuado.

Artículo 118.- Infracciones de segunda clase

- Causar interferencias perjudiciales.

Para las sanciones de segunda clase, conlleva una multa desde ciento uno hasta trescientos Salarios Básicos Unificados del trabajador en general [7].

Artículo 119.- Infracciones de tercera clase

- Explotación o uso de frecuencias, sin obtención previa del título habilitante o concesión correspondiente, así como la prestación de servicios no autorizados, de los contemplados en la presente Ley.

Para las sanciones de tercera clase, conlleva una multa desde trescientos uno hasta mil quinientos Salarios Básicos Unificados del trabajador en general [7].

En conclusión, para verificar el funcionamiento de la Estación Base y los servicios que ofrece la red GSM se lo debe hacer en un lugar previamente comprobado donde no se interfiera con el espectro radioeléctrico, para no cometer las contravenciones antes mencionadas.

4.3. BTS de código abierto, una gran ayuda socioeconómica a las comunidades rurales

Haciendo un marco de referencias a varios artículos científicos, se puede determinar el impacto de las redes GSM programables en situaciones de ayuda a las sociedades que han sido vulneradas por las operadoras de telefonía móvil convencionales.

En este apartado se hará un análisis del artículo científico “*OpenBTS Based Microtelecom Model: A SocioEconomic Boon To Rural Communities*”, para poder determinar en que influye este proyecto de investigación, en cuanto a la ayuda a comunidades aisladas de los servicios que ofrece la red GSM.

El artículo antes mencionado hace referencia al proyecto *OpenBTS* y *USRP*, no obstante, este tema de investigación hace uso del proyecto *YateBTS* y *BladeRF*, lo importante en este análisis es la ayuda que pueden ofrecer estos sistemas de BTS más no los elementos que se utilicen para levantar la estación base, es decir, como se mencionó en el apartado 4.1, tanto *OpenBTS* y *YateBTS* son sistemas de código abierto y se los puede utilizar para realizar las mismas aplicaciones de red, resultando proyectos similares en cuanto a sus resultados finales.

Actualmente se están diseñando y desplegando redes de radio móviles digitales en todo el mundo. Su expansión influirá en gran medida en la industria e investigación y la forma en que las personas utilizan los servicios de comunicación e información. Sin embargo, la conectividad rural ha sido durante mucho tiempo un área de negocio no efectiva debido a la baja densidad de población y bajo retorno de inversión (ROI) para el despliegue de infraestructura. Las telecomunicaciones en zonas rurales siguen siendo muy pobres y se pueden mejorar mediante la introducción de tecnología moderna adecuada, junto con la participación del sector público en la inversión de infraestructuras [8].

Un sistema de red GSM basado en hardware y software libre es un modelo de negocio que optimiza la infraestructura de telecomunicaciones para una aplicación muy específica, atender a comunidades de bajos ingresos y de difícil acceso, principalmente en las zonas rurales, aumentando el nivel de penetración de las telecomunicaciones. Las características de este modelo de red GSM son: bajo costo, baja potencia, facilidad de despliegue, además, no requiere de un mantenimiento considerable. El despliegue de este sistema de red GSM tiene un beneficio mutuo tanto para el usuario como para el operador por su baja inversión y pronta recuperación del capital [8].

Este tema de investigación se puede aplicar como modelo de negocio para cubrir zonas rurales no abastecidas por los operadores de redes móviles, convirtiéndose en una necesidad para lograr un crecimiento inclusivo y sostenible de un país. El aumento de la conectividad ayuda a las comunidades rurales a obtener información actualizada, no obstante, esto a su vez conduce a una mayor productividad en las zonas rurales y aumentar sus ingresos.

Este modelo minimiza el riesgo de que los grandes operadores urbanos se desplieguen en las zonas rurales. Este sistema de red GSM se puede realizar utilizando *YateBTS* una alternativa de bajo costo para implementar redes celulares de gama alta que se basa en radio definida por software y las soluciones de código abierto para proporcionar comunicaciones de larga distancia locales y baratas para áreas remotas.

Un empresario rural con ayuda del gobierno puede implementar con éxito un modelo de red GSM basado en *YateBTS* y puede alcanzar el ROI en un corto plazo.

4.4. Conceptos generales

4.4.1. Sistema Global de Comunicaciones Móviles GSM

Es una tecnología inalámbrica de segunda generación que brinda servicios de voz y mensajería corta (SMS, por sus siglas en inglés). Es un estándar adecuado para telefonía móvil convirtiéndose en el más utilizado a nivel mundial [9].

El sistema GSM fue creado para ser una plataforma independiente, en sus especificaciones no se delimita el hardware a utilizar, sino que describe las funciones que debe cumplir la red [9]. Permitiendo a los proveedores diseñar distintos tipos de hardware que cumplan con las especificaciones técnicas del estándar.

Las especificaciones GSM consisten en doce series, como se muestra en la tabla 1, las cuales fueron elaboradas y editadas por diferentes grupos de trabajo (GSM, ETSI), actualmente el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, por sus siglas en inglés), es quien coordina a los diferentes grupos que elaboran las futuras especificaciones para el estándar [10].

Tabla 1. Series de especificaciones GSM [10].

| SERIE | TEMA |
|-------|--|
| 01 | Aspectos Generales |
| 02 | Normas de Servicio |
| 03 | Características de Red |
| 04 | Interfaz y protocolos entre (MS – BS) |
| 05 | Capa física de red (interfaz de radio) |
| 06 | Codificación de la voz |
| 07 | Adaptadores de terminales MS |
| 08 | Interfaces BS-MS |
| 09 | Interfuncionamiento de redes |
| 10 | Interfuncionamiento de servicios |
| 11 | Especificaciones y homologación |
| 12 | Operación y mantenimiento |

La interfaz de radio o capa física describe los métodos y especificaciones usados para establecer una comunicación bidireccional entre la estación móvil (MS, por sus siglas en inglés) y la estación base (BTS, por sus siglas en inglés), la interfaz de radio se encuentra

definida en las series del estándar GSM 04 y 05 que dan a conocer las frecuencias de operación como: 850 MHz, 900 MHz, 1800MHz, 1900MHz [10].

El método elegido por GSM es una combinación de tiempo y de acceso múltiple por división de frecuencia (TDMA y FDMA, por sus siglas en inglés) en un espectro total de 25 MHz. La parte FDMA implica la división por frecuencia del espectro de 25 MHz en 125 frecuencias portadoras o canales espaciados 200 kHz. A cada estación base se le asigna una o más frecuencias portadoras. Cada una de estas frecuencias portadoras se dividen en tiempo, utilizando un esquema TDMA. La unidad de tiempo fundamental en este esquema TDMA se denomina un periodo de ráfaga y dura 15/26 ms o aproximadamente 0.577 ms [10].

En la figura 1, se denota las divisiones de la banda en función del tiempo y la frecuencia.

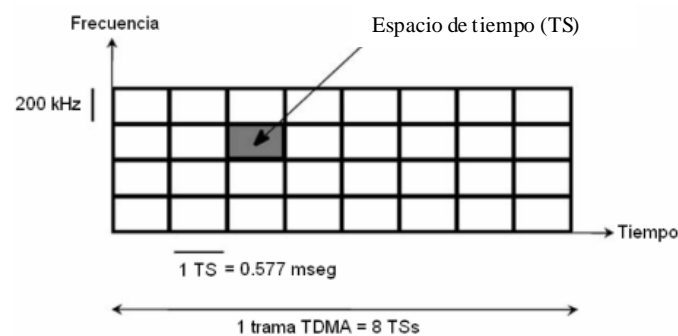


Figura 3. Esquema de acceso al medio GSM [11].

GSM usa la técnica de duplexación por división de frecuencia (FDD, por sus siglas en inglés), para dividir en dos la banda GSM, definiendo así una banda de frecuencias para el enlace ascendente “*uplink*” y otro descendente “*downlink*”, las mismas que son utilizadas por las estaciones móviles para poder establecer la comunicación [11].

Los canales tanto de *uplink* como de *downlink* son detallados por el Número Absoluto del Canal de Radiofrecuencia (ARFCN, por sus siglas en inglés), que es el número único asignado a cada canal de radio GSM del que hacen uso las estaciones móviles en la red, cada ARFCN está separado en canales de 200 KHz [11].

En la tabla 2, se especifican las bandas de frecuencias de *uplink* y *downlink* en GSM, según la recomendación de la ETSI.

Tabla 2. Bandas de frecuencias GSM con sus respectivos canales ARFCN [11].

| BANDAS GSM (MHz) | ARFCN | UPLINK (MHz) | DOWNLINK (MHz) |
|-----------------------------|-----------------------|---|---------------------------------|
| 850 | $128 \leq n \leq 251$ | $824.2 + 0.2 * (n - 128)$ 824 – 849 | $f_{up}(n) + 45$ 869 – 894 |
| 900 | $1 \leq n \leq 124$ | $890 + 0.2 * n$ 890 – 915 | $f_{up}(n) + 45$ 935 – 960 |
| 1800 | $512 \leq n \leq 885$ | $1710.2 + 0.2 * (n - 512)$ 1710 – 1785 | $f_{up}(n) + 95$ 1805 – 1880 |
| 1900 | $512 \leq n \leq 810$ | $1850.2 + 0.2 * (n - 512)$ 1850 – 1910 | $f_{up}(n) + 80$ 1930 – 1990 |

Las transmisiones de radio GSM se efectúan a una velocidad de 270.833 Kbps usando una modulación GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) con $BT=0.3$. El BT es el producto del ancho de banda del filtro por el periodo de bit de transmisión. La modulación MSK se deriva de la modulación FSK (Frequency Shift Keying) [24], cuando la tasa de bits de la señal moduladora es exactamente cuatro veces la traslación de la frecuencia de la portadora se consigue minimizar el espectro y la modulación es llamada MSK [11].

4.4.2. Arquitectura del sistema GSM

La arquitectura del estándar GSM se compone de tres subsistemas, la Estación Móvil, el Subsistema de Estación Base (BSS, por sus siglas en inglés) y el Subsistema de Red (NSS, por sus siglas en inglés) como se indica en la figura 4 [11].

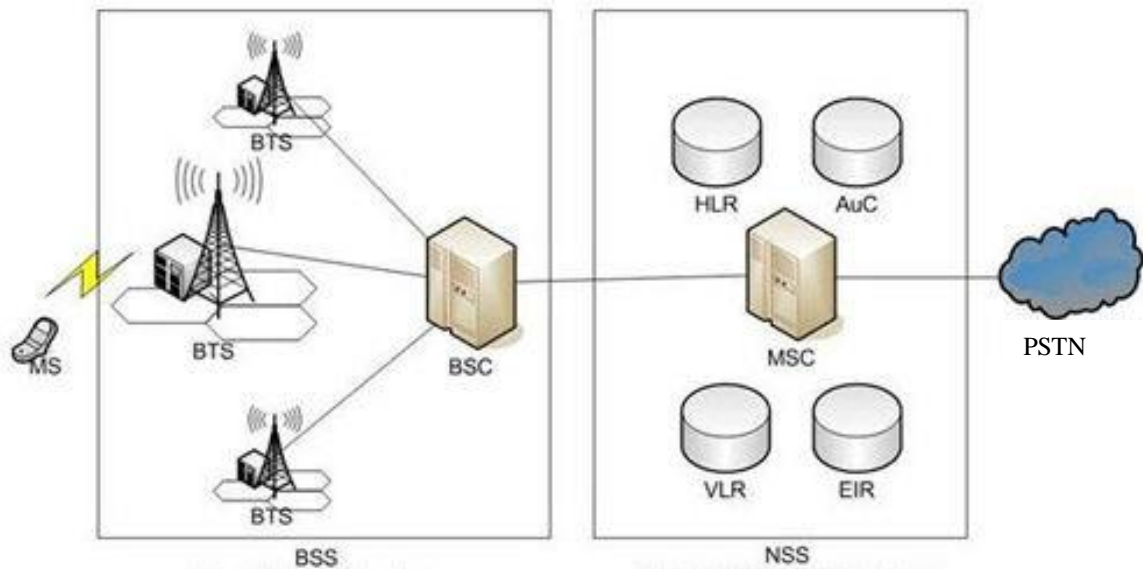


Figura 4. Arquitectura de red GSM [10].

Entre estos subsistemas funcionales se han definido dos interfaces, la interfaz de línea entre el NSS y BSS y la interfaz aérea o interfaz de radio entre el BSS y el conjunto de MS [10].

- **Estación móvil**

La estación móvil, es un celular conectado a través de un adaptador de banda ancha a la red móvil [12].

La estación móvil GSM cuenta con un módulo de identificación del usuario (SIM, por sus siglas en inglés), el mismo que se utiliza para conectar la estación móvil a la red, no obstante, posee una clave de autenticación para validar su acceso. Mientras que los terminales móviles se identifican por medio de el Identificador Internacional de Equipos Móviles (IMEI, por sus siglas en inglés) [11], [12], [13].



Figura 5. Estación Móvil [24].

El Identificador Internacional de Abonados Móviles (IMSI, por sus siglas en inglés), se encuentra almacenado en la tarjeta SIM y se utiliza para identificar al usuario de una red celular, además, es una identificación única asociada con todas las redes celulares, se representa generalmente con un número de 15 dígitos y está compuesto por el Código de País (MCC, por sus siglas en inglés), el Código de Red (MNC, por sus siglas en inglés) y por el Número de Identificación del Suscriptor (MSIN, por sus siglas en inglés), como se especifica en la tabla 3 [11], [13].

Tabla 3. Estructura del número IMSI en Ecuador [14].

| IMSI: 7400152952503786 | | | IMSI: 7400052952503138 | | | IMSI: 7400152952503248 | | |
|------------------------|-------------|---------|------------------------|-------------|----------|------------------------|-------------|---------|
| MCC | 740 | ECUADOR | MCC | 740 | ECUADOR | MCC | 740 | ECUADOR |
| MNC | 01 | CLARO | MNC | 00 | MOVISTAR | MNC | 02 | CNT |
| MSIN | 52952503786 | | MSIN | 52952503138 | | MSIN | 52952503248 | |

El código de país MCC se utiliza en las redes telefónica inalámbricas con el fin de identificar el país que corresponde a un abonado o estación móvil, el MNC indica el operador móvil al cual se encuentra registrado y el MSIN es el número que identifica al cliente dentro de la red GSM, la unión de todos estos códigos forma el IMSI [14].

- **Subsistemas de estación base.**

El subsistema de estación base es el responsable de la gestión de radiocomunicaciones con las estaciones móviles, está compuesta de dos unidades como se puede observar en la figura 6 [15].

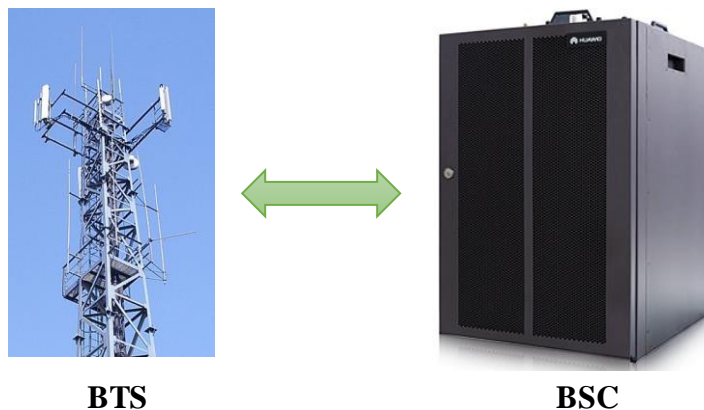


Figura 6. Subsistema de estación base BSS [24].

- ✓ **Controlador de estación base (BSC, por sus siglas en inglés):** Este elemento es el que controla el subsistema de radio, se ocupa de la configuración del canal de radio, salto de frecuencia y traspasos intercelular mientras el equipo se encuentra en movimiento lo que se conoce como *Handover* [11], [16].
- ✓ **Estación base de transmisión (BTS, por sus siglas en inglés):** Es el elemento responsable de mantener la interfaz de aire y reducir al mínimo los problemas de transmisión que se producen por las perturbaciones, aloja los transceptores y antenas utilizadas en cada célula de la red, con las que gestiona la radiocomunicación con los equipos móviles. Cada BTS tiene entre 1 a 16 transceptores dependiendo de la densidad de usuarios en cada célula. Su potencia de transmisión determina el tamaño de la célula y proporciona el número de canales de radio a la zona que brinda el servicio [16].

- **Subsistema de conmutación de red**

Incluye las funciones principales de conmutación, así también las bases de datos necesarias para las identificaciones de los abonados y para la gestión de movilidad, su objetivo principal es gestionar las comunicaciones entre los usuarios GSM y los usuarios de otras redes de telecomunicaciones, dentro de la NSS las funciones básicas de conmutación están realizadas por el centro de conmutación de servicios móviles (MSC, por sus siglas en inglés), cuya función principal es coordinar el establecimiento y terminación de cualquier llamada [16], [17], [24].

El NSS incluye dos bases de datos, el registro de localización local (HLR, por sus siglas en inglés) y el registro de localización de visitante (VLR, por sus siglas en inglés), el HLR analiza los niveles de suscripción, los servicios suplementarios contratados por el abonado además de la localización actual, conjuntamente a este elemento trabaja el centro de autenticación (AuC, por sus siglas en inglés) el cual contiene la información por la que se comprueba la autenticación de las llamadas para evitar posibles fraudes [9].

El VLR contiene la información del estado de todos los usuarios que provienen de otras operadoras que necesitan acceso a la red GSM [11] [12].

El registro de identidad del equipo (EIR, por sus siglas en inglés), almacena información sobre el tipo de estación móvil en uso, esta base de datos puede eludir que se realicen llamadas cuando se detecte teléfonos defectuosos o clonados [16], [24].

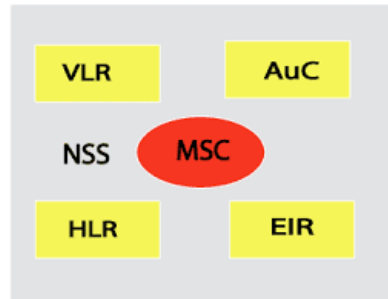


Figura 7. Subsistema de conmutación de red [11].

4.4.3. Voz sobre IP (VoIP).

Es la telefonía IP, utiliza las redes de datos IP para realizar llamadas de voz, la misma que permite digitalizar la voz y encapsularla en paquetes de datos para ser enviada a través de las redes empleando el protocolo de internet, la misma que posibilita la convergencia de varias redes que se manejen bajo el mismo protocolo y de esta forma integrar varios medios de comunicación [17].

Este sistema VoIP permite que las líneas de telefonía convencional de la red (PSTN), se adapten al nuevo sistema de digitalización de voz mediante un dispositivo denominado *Gateway*, el mismo que sirve de enlace con las otras redes, de esta forma se puede utilizar las redes de datos cableadas ya montadas y aprovechar al máximo el ancho de banda disponible [18], [19].

- **Protocolo SIP.**

Protocolo definido por el Grupo Especial sobre Ingeniería de Internet (IETF, por sus siglas en inglés), su función principal es la de establecer, modificar y terminar una sesión VoIP [20]. Además, ofrece la posibilidad de agregar nuevos servicios tales como, registrar y localizar los clientes, la gestión del conjunto de participantes y componentes del sistema. Esta ventaja hace que sea el protocolo más usado en el sistema de telefonía IP [11].

SIP es un protocolo de señalización a nivel de la capa de aplicación que utiliza el puerto 5060, los mensajes SIP pueden viajar sobre TCP y sobre UDP por lo general es más común utilizar el UDP, es importante saber que el protocolo SIP no es el que se encarga de

transportar los datos entre la sección establecida, para este trabajo se utiliza el protocolo de Transporte en Tiempo Real (RTP, por sus siglas en inglés) [20].

• Códecs de Audio

En los sistemas de VoIP, a pesar de ya disponer de una señal digital es necesario codificar los valores discretos, es decir, asignarles valores numéricos, para que sea posible su empaquetamiento y posterior transmisión, para llevar a cabo esta operación y su inversa se utiliza los códec. Por lo tanto, el códec influye mucho en la calidad de voz resultante, por lo que especifica componentes, tales como los algoritmos de compresión y los modos de codificación [21].

En la tabla 4, se clasifica los códecs más importantes de acuerdo a sus características, como; la calidad de audio, su tasa de bits, la complejidad y la tecnología que se esté utilizando.

Tabla 4. Comparación de Códecs [20].

| Códec | Ancho de banda (Kbps) | Retardo (ms) | Observación |
|--------------|--------------------------|-----------------|--|
| G.711 | 64 | 20-30 | ITUT, PCM, tiene dos versiones u-law (Japón) y a-law(Europa). |
| G.726 | 16/24/32/40 | 20-30 | ITUT, ADPCM. |
| G.729 | 8 | 15 | ITUT,CS-ACELP. |
| GSM | 13 | 20 | ETSI, Predicción de excitación con pulso regular a largo plazo |

En las redes de área local el códec más utilizado es el G.711 por su calidad de audio y consumo moderado [11].

Por otra parte, el códec GSM es el que se utiliza generalmente en las redes móviles, presenta una calidad de voz codificada bastante pobre en comparación con los estándares modernos, pero presenta un método muy importante en lo que es ahorro de ancho de banda, el mismo que consume 5 veces menos que el estándar G.711 [21]. No obstante, es importante mencionar que el códec GSM es el que utiliza el proyecto *YateBTS*.

4.4.4.SDR como plataforma GSM

Las comunicaciones móviles hacen uso de distintos sistemas para lograr migrar sus tecnologías, con el propósito de optimizar recursos, ofrecer flexibilidad y eficiencia en sus servicios finales. El concepto de Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en

inglés), nace para corregir estos inconvenientes de compatibilidad e interoperabilidad de las nuevas tecnologías, haciendo uso de la modificación del software, logrando así un cambio dinámico, autónomo y eficiente sin tener que gastar en nuevos equipos. De esta forma las estaciones base y los terminales móviles pueden interactuar a nivel de software y hardware.

- **Aspectos fundamentales de SDR**

Los equipos de SDR han evolucionado con el pasar de los años, todos los adelantos obtenidos han partido esencialmente de la misma configuración base como se muestra en la figura 8, la cual se compone de tres bloques principales, el bloque RF el mismo que trabaja con hardware analógico, el bloque IF y Banda Base los mismo que se implementan con módulos de hardware digital [22].

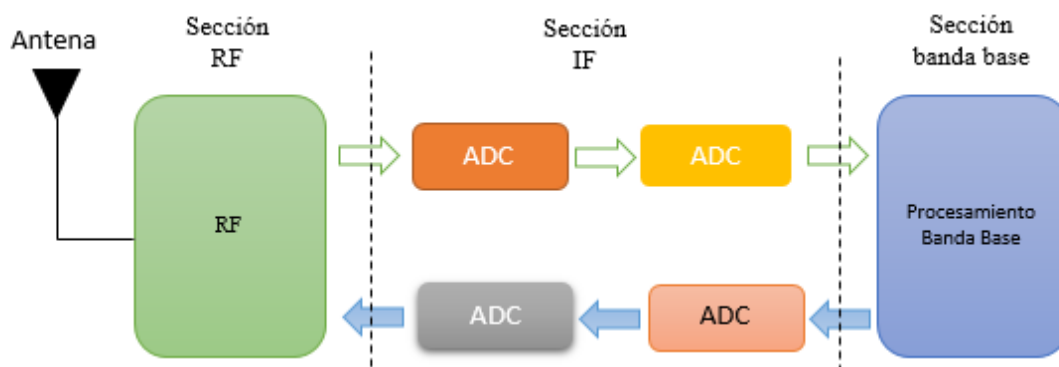


Figura 8. Diagrama de bloques de SDR [22].

- ✓ **Bloque RF:** También llamada *Front-End*, este bloque se lo analiza en dos aspectos, en caso recepción y transmisión, en el primero de los casos en recepción se encarga de recibir las señales de radio frecuencia y posteriormente convertirlas en frecuencias intermedias, en el segundo caso transmisión se encarga de amplificar y modular las señales de frecuencia intermedia para la transmisión al nuevo medio aire.
- ✓ **Bloque IF:** Al igual que el bloque anterior, se lo analiza de la misma forma, en caso de recepción se encarga de pasar la señal de IF a banda base y digitalizarla, y en caso de transmisión se encarga de pasar la señal de banda base a IF y hacer la conversión digital-analógica de la señal. Como se puede observar en la figura 8, los módulos ADC/DAC son los encargados de las conversiones tanto de analógico a digital como de digital analógico, además, los módulos DDC/DUC son los

encargados de bajar digitalmente la señal de IF a banda base o subir de banda base a IF respectivamente.

- ✓ **Bloque Banda Base:** Se encarga del procesamiento en banda base de la señal, como saltos de frecuencia, establecimiento de sesión, ecualización, manejos de tiempos de bit y en algunos casos de la implementación de protocolos de la capa de enlace de datos del modelo OSI [22].

Los SDR, son dispositivos que permiten una integración y convergencia de tecnologías inalámbricas, que hacen posible generar una interfaz de aire análoga al estándar GSM de esta forma se puede interactuar a nivel de hardware y software para establecer una comunicación continua entre la estación base y las estaciones móviles.

• Arquitectura SDR

En la figura 9, se puede apreciar una arquitectura base de un SDR, la misma que se la analiza en dos partes, tanto en la parte analógica como también en su parte digital.

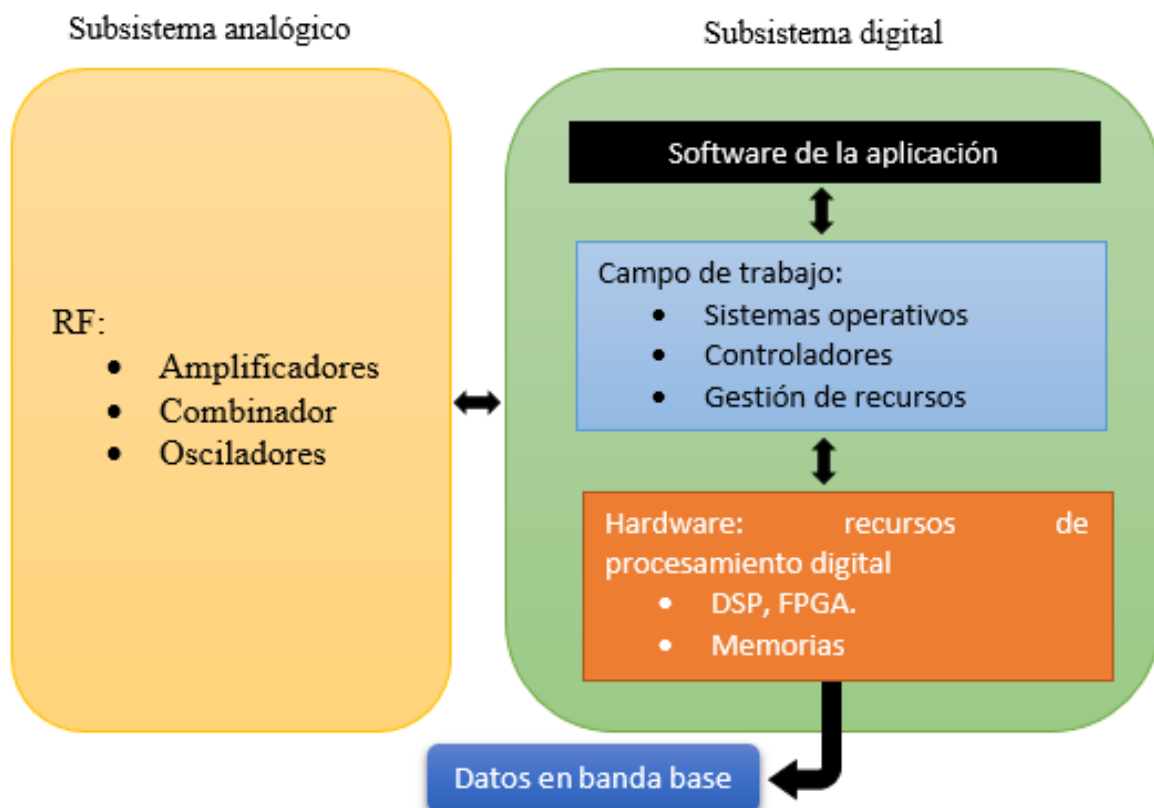


Figura 9. Arquitectita SDR [22].

- ✓ **Subsistema analógico:** En esta parte el SDR se encarga de efectuar todas las operaciones que no se efectúan en el dominio digital, tales como alimentación a las

antenas, filtrado, combinación en RF, preamplificación, amplificación y generación de la frecuencia de referencia.

- ✓ **Subsistema digital:** En esta parte se cuenta con el software del sistema el mismo que se encuentra estructurado por capas, con el fin de hacerlo modular y adaptable al hardware sobre el que trabaja. La arquitectura de software está basada en objetos que le permiten al hardware mapear a los mismo para proporcionar servicios de comunicación entre capas utilizando interfaces estándar. No obstante, en este subsistema se encuentra en hardware, el mismo que se encarga de proporcionar toda la flexibilidad y reconfiguración al radio, generalmente está constituido por dispositivos DSP, en algunos de los casos existe una combinación de DSP con FPGA para las diversas funciones que efectúa el subsistema [22].

4.5. Componentes de la red GSM usando SDR

4.5.1. *Yet Another Telephony Engine (YATE)*

Otro gestor de telefonía (*YATE*, por sus siglas en inglés), es un software de código abierto desarrollado con la finalidad de ser un sistema fiable, escalable y flexible para las próximas redes de telefonía. Es un sistema de telefonía de nueva generación, su dominio radica en la facilidad para ser extendido tanto en voz, vídeo, datos y mensajería instantánea puede ser unificado para maximizar la eficiencia en las comunicaciones y minimizar costos de infraestructura [23].

El software está escrito en lenguaje C++, es compatible con varios lenguajes de programación como los soportados por las librerías de PHP, Python y Javascript implementado actualmente, estas librerías están disponibles para facilitar el desarrollo de funciones externas para *YATE*. Posee licencia GPL con excepción para enlazarse con OpenH323 y PWlib con licencia MPL [23].

Este gestor de telefonía puede ser utilizado como:

- ✓ Servidor VoIP
- ✓ Cliente VoIP
- ✓ Gateway VoIP a PSTN
- ✓ Gateway PC2Phone y Phone2PC
- ✓ H.323 gatekeeper

- ✓ Servidor múltiple de fin de punto H.323
- ✓ H.323 SIP Proxy
- ✓ Controlador de frontera de sesión SIP
- ✓ Router SIP
- ✓ Servidor de registro SIP
- ✓ Servidor de timbre
- ✓ Gestor IVR
- ✓ Servidor y/o cliente IAX

Yate es un gestor de telefonía destinado a crear un servidor de VoIP que funciona lo suficientemente bien para hacer frente a los requisitos de PBX.

4.5.2.Arquitectura de Yate

La arquitectura de *Yate* se basa en un sistema de paso de mensajes, está construida sobre módulos mismos que son componentes cargables con funciones específicas, los módulos se están comunicando a través del envío de mensajes entre ellos, lo que hace que su principal característica sea su flexibilidad. Los mensajes de comunicación pueden tener un número arbitrario de parámetros, se pueden enviar a más de un módulo para cambiar su prioridad de funcionamiento. En la figura 10, podemos observar una arquitectura de *Yate* con sus respectivos módulos y comunicación entre mensajes.

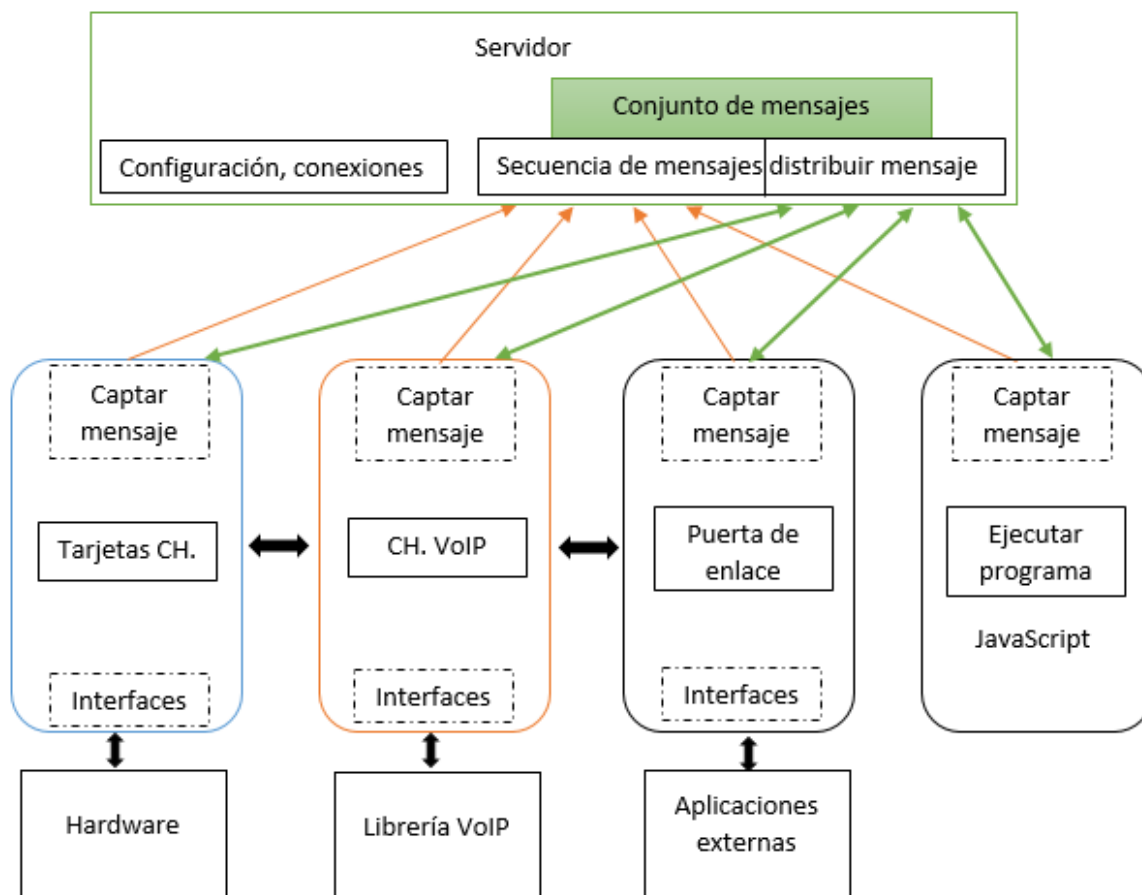


Figura 10. Arquitectura de Yate para la implementación de la red [25].

En la arquitectura de Yate, los mensajes pueden ser enviados o puestos en cola dependiendo el tipo de mensaje en ejecución. No obstante, el componente que distribuye los mensajes envía los mensajes de una forma sincrónica, es decir, que el módulo activo se detiene hasta recibir una respuesta. A su vez, el elemento de secuencia de mensajes realiza su función de una manera asíncrona, razón que, los mensajes se colocan en cola de espera y el sistema continúa sin esperar una respuesta. La secuencia de mensajes ofrece un mecanismo para organizar los mensajes en diferentes colas de espera pudiendo identificarlos por nombres y algunos filtros.

Los elementos que captan los mensajes, son enlaces de mensajes que permiten a un determinado módulo recibir o dejar pasar el mensaje al siguiente módulo.

El propósito de esta arquitectura es proporcionar un sistema de gestor de telefonía desplegable, sosteniendo el código fuente tan fácil como sea posible, ampliando funcionalidades que permitan al desarrollador encontrar el mejor equilibrio entre la función deseada, el rendimiento y la estabilidad del sistema [16].

4.5.3. *YateBTS*

YateBTS es un sistema de red de acceso de radio GSM/GPRS que se encuentra implementado bajo software libre, basa todo su sistema en el servidor de telefonía IP *Yate* y es compatible con redes GSM, GPRS, SS7, MAP y LTE [25].

YateBTS ofrece un enfoque distinto al de las redes tradicionales de acceso por radio, con mayor flexibilidad, escalabilidad y fácil actualización.

✓ **Software**

El sistema de radio *YateBTS* ofrece una amplia gama de soluciones de software:

Cuenta con una versión pública bajo la licencia AGPLv3 y la GPLv2, creada para ayudar a investigadores académicos a estudiar y realizar investigaciones científicas en el campo de la tecnología móvil.

La versión pública se compone del código fuente completo de *Yate* lanzado bajo la licencia GPLv2, el componente de radio MBTS y el transceptor de radio bajo la licencia AGPLv3, y además el servidor incorporado *JavaScript* de *Yate* mismo que permite acceder a un conjunto de experimentos y procedimientos de prueba [26].

Cuenta con una versión comercial destinada a los operadores móviles misma que está compuesta, por los elementos de radio MBTS y el transceptor de radio bajo la licencia AGPLv3 y la versión comercial de *Yate* basada bajo la licencia Binaria [26].

✓ **Hardware**

El sistema de *YateBTS*, ofrece principalmente dos productos de hardware:

El *YateBTS LabKit*, mismo que está conformado por la versión pública de *YateBTS*, proporciona la completa funcionalidad de una red 2.5G, red análoga al estándar GSM. Este Kit está dirigido para ambientes de laboratorios de redes móviles, desarrollo de aplicaciones para investigaciones académicas y de seguridad de red. Además, incluye el código completo de *Yate* bajo la licencia GPLv3 y el componente de radio MBTS bajo la licencia AGPLv3 y el servidor incorporado de *JavaScript* que ayuda para el desarrollo de experimentos de redes móviles [26].

El *YateBTS SatSite*, este es un sistema completo de estación base para exteriores al aire libre, se lo puede utilizar tanto en zonas rurales como en urbanas, con un sistema basado sobre protocolo IP.

Este sistema de red móvil GSM *YateBTS SatSite* es una solución simplificada que implementa la red de acceso por radio y la red central, ofreciendo la funcionalidad

completa de una red 2.5G, mismo sistema que es altamente eficiente en cuanto a energía y puede ser fácilmente cargado por paneles solares [26].

4.5.4. Estructura interna de *YateBTS*

En primer lugar, *YateBTS* consta de dos partes principales que son:

- ✓ La capa inferior: conformada por la MBTS y el transceptor de radio, que gestionan la parte GSM del sistema.
- ✓ La capa de red: manejada por el servidor de telefonía IP *Yate* y comprendida por YBTS y otros módulos de aplicación como: *NIB*, *JavaScript*, *accfile* para llamadas salientes o SIP/IAX [26].

En segundo lugar, el MBTS se conecta al transceptor de radio a través de una interfaz de la misma manera que el MBTS se conecta a la capa de red [26].

En la figura 11, podemos observar la estructura interna de *YateBTS*, con sus respectivos módulos e interfaces de conexión de las dos capas tanto la capa inferior y la capa de red.

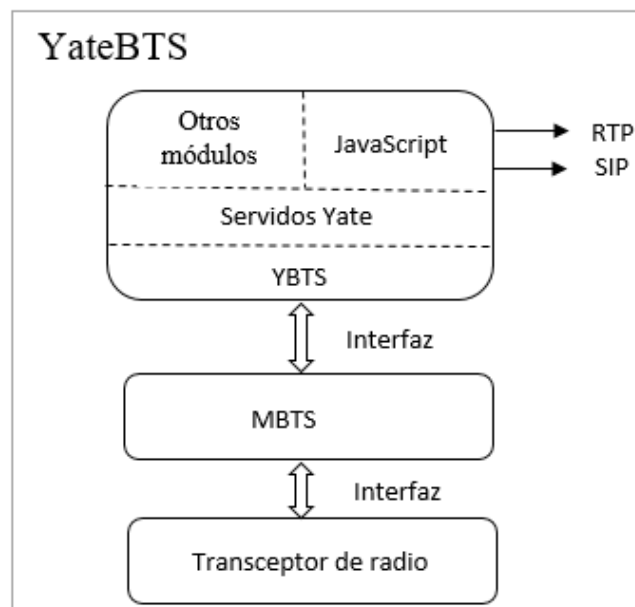


Figura 11. Estructura interna de *YateBTS* [26].

YateBTS combina una implementación GSM resistente y además de un potente gestor de telefonía *Yate*, esta estructura de red ofrece muchas ventajas como:

- Estabilidad mejorada.
- Soporte para todos los protocolos soportados por *Yate* como: SS7, MAP, IMS, MGCP, XMPP, H.323, IAX, ISDN entre otros.
- Ofrece su propio módulo de *JavaScript* para crear fácilmente aplicaciones.
- Varios módulos de gestión, supervisión y la posibilidad de desarrollar nuevos módulos [26].

4.5.5. Módulo JavaScript

El módulo de *JavaScript* cuenta con un sistema de red en caja, que no es más que una implementación de una red central GSM, misma que realiza registros, enrutamiento de llamadas, SMS y autenticación de usuarios en la versión pública de *YateBTS*. La red en caja NIB contiene, un HLR, un AuC y un VLR/MSC [26] como se muestra en la figura 12.

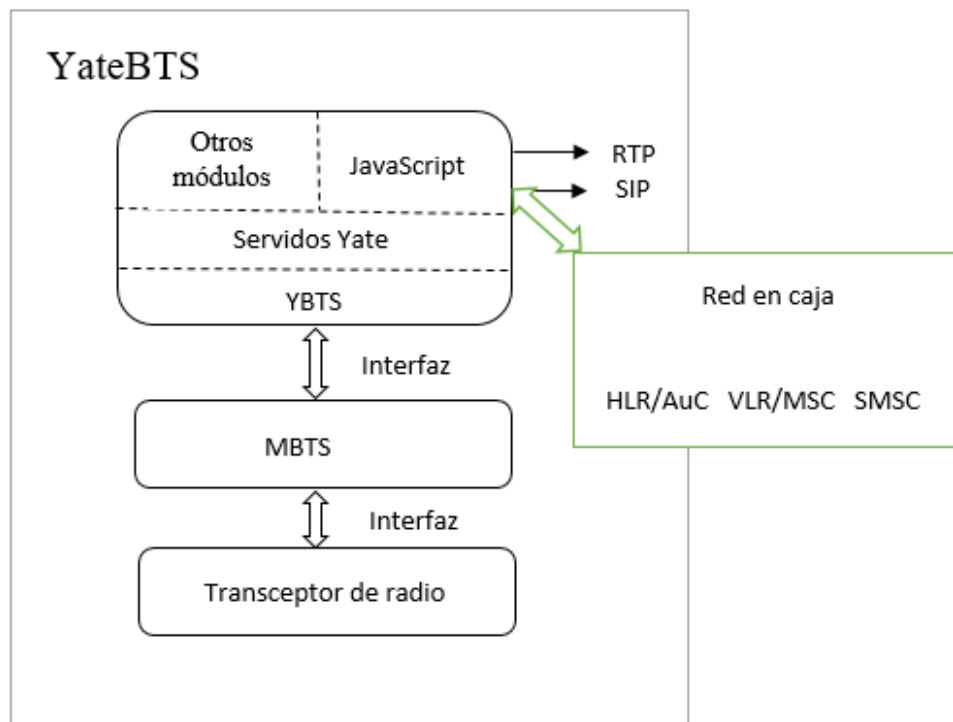


Figura 12. Módulo de JavaScript [26].

4.5.6. YBTS y MBTS

- YBTS

YBTS es un módulo de *Yate* que se encarga de la mayoría de las funcionalidades de capa 3 de GSM, YBTS utiliza a MBTS como un modem, mismo que se encarga de supervisar las capas tanto física como de enlace y también hace la gestión de recursos de radio. MBTS reenvía todas las tramas recibidas a YBTS para implementar funciones de control [3]. MBTS tiene la función de configurar el canal de radio y enviar toda la información recibida en ese canal hacia YBTS. YBTS entonces ve si es una llamada o un mensaje, para enviar una solicitud a *Yate* con una petición específica [26].

- MBTS

Por lo tanto, MBTS actúa como modem, supervisa la capa física L1 y la capa de enlace L2 y también efectúa parte de la gestión de recursos de radio L3. Después de establecer el enlace de radio, envía todas las tramas recibidas a YBTS.

- ✓ Gestión de recursos de radio Capa 3: La capa de red Um se define en GSM 04.07 y 04.08, posee múltiples subcapas, la capa más baja de las subcapas es la de gestión de recursos de radio que se encarga principalmente de asignar y liberar canales de radio entre el teléfono celular y la red.
- ✓ Capa 2: también conocida como capa de enlace de datos, se definen en GSM 04.05 y 04.06.
- ✓ Capa 1: también conocida como capa física se define en la serie GSM 05.xx de las especificaciones, entre sus principales funciones tenemos la multiplexación, sincronización, codificación, control de energía de lazo cerrado y control de temporización en bucle cerrado [26].

4.5.7. SDR *BladeRF*

El equipo *BladeRF*, es un dispositivo de radio definido por software, fabricado para explorar los diferentes campos multidisciplinarios de las comunicaciones RF, mismo que proporciona su código fuente y documentación exhaustiva fácil para entender el funcionamiento del radio. En la figura 13, se muestra la gráfica de un radio *BladeRF*.

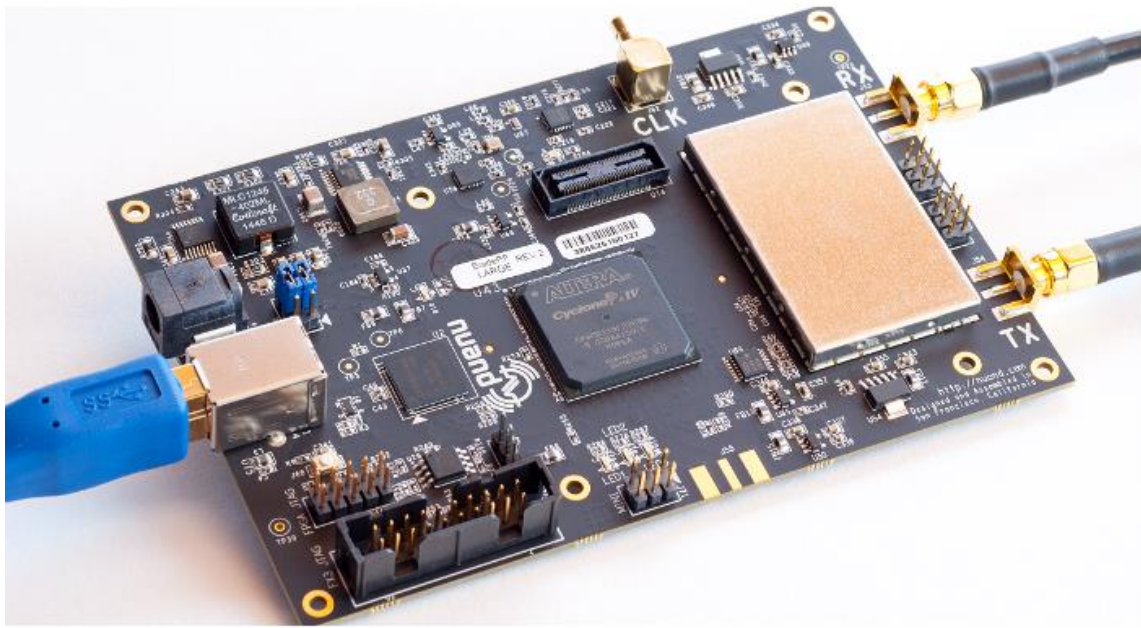


Figura 13. Radio *BladeRF* [27].

El *BladeRF* es un dispositivo que no necesita de tomas de corriente alterna para su normal funcionamiento, es un equipo totalmente alimentado por bus, cuenta con una conexión USB 3.0 super rápida, siendo un sistema ideal para alto rendimiento y baja latencia que aproxima la antena a la PC, es un dispositivo ideal para sistemas portables porque admite una entrada de alimentación de 5V DC y funciona de forma autónoma utilizando el FPGA para procesar la información [27].

El *BladeRF* se lo puede utilizar en múltiples aplicaciones, por su amplio espectro de frecuencia que maneja, puede sintonizar desde 300MHz hasta 3.8GHz sin la necesidad de utilizar tarjetas adicionales. Además, gracias a las recientes actualizaciones de controladores de código abierto, permiten al *BladeRF* la flexibilidad de actuar como un modem RF personal, un receptor GPS, un cliente wifi/bluetooth y lo más importante actuar como una picocelda GSM o LTE sin la necesidad de tarjetas de expansión [26].

El *BladeRF* fue diseñado para ser altamente integrado y totalmente reprogramado, lo que significa que el firmware del microcontrolador Cypress FX3 está disponible para modificar al igual que el VHDL de FPGA de Cyclone IV de Altera, de esta forma acercando a los desarrolladores lo más posible con el transceptor RF. Todas las piezas del dispositivo fueron publicadas para fomentar la modificación de cada etapa desde el software del *host* hasta la lógica FPGA. El *BladeRF* permite que el controlador y el FPGA se puedan

programar de dos formas diferentes que pueden ser desde el JTAG o directamente de la conexión USB [26].

Especificaciones técnicas del *BladeRF* [27]:

- ✓ USB 3.0
- ✓ Dimensiones 5 "por 3.5"
- ✓ Conectores SMA de RF
- ✓ Rango de frecuencia 300MHz - 3,8 GHz RF
- ✓ Independiente RX / TX 12-bit 40MSPS cuadratura de muestreo
- ✓ Capaz de lograr canales full dúplex de 28MHz
- ✓ 16-bit DAC calibrado de fábrica 38.4MHz +/- 1ppm VCTCXO
- ✓ A bordo 200MHz ARM9 con 512KB incorporado SRAM
- ✓ A bordo 40KLE o 115KLE Altera Cyclone 4 E FPGA (puerto JTAG disponible)
- ✓ 2x2 MIMO configurable con cable SMB, ampliable hasta 4x4
- ✓ Diseño de la tarjeta de expansión modular para agregar señal de sincronización GPIO, Ethernet y 1PPS y rango de frecuencia en expansión y límites de potencia
- ✓ Conector de corriente DC para funcionamiento
- ✓ Arquitectura de alta potencia y bajo nivel de ruido
- ✓ Soporte de software estable para Linux, Windows, Mac y GNU Radio
- ✓ Hardware capaz de funcionar como analizador de espectro, analizador de señales vectoriales y generador de señales vectoriales.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la ejecución de este trabajo de investigación se mantuvo un constante enfoque exploratorio de libros, artículos, documentos técnicos y publicaciones científicas con el fin de extraer las ideas principales del sistema de telefonía móvil de código abierto, de esta forma se pudo dar solución a los problemas que se presentaron y alcanzar los objetivos propuestos en la investigación.

Para definir el tema se hizo uso del método de investigación cuantitativo, es decir, que partiendo de conocimientos generales se determinó las posibles soluciones en cada una de las fases desarrolladas, según antecedentes previos se conoce que las redes móviles programables se pueden crear de distintas maneras dependiendo del software y hardware a utilizar. Se decidió seleccionar el proyecto *YateBTS* como software del sistema para la emulación de la red GSM, que presenta un desempeño aceptable para las propuestas de investigación. Los componentes de la red se los detalla a lo largo de esta sección.

5.1. Sistema de telefonía móvil estándar y su respectiva analogía con SRD

Para resolver los problemas de este trabajo, es necesario hacer una analogía en cuestión a la telefonía móvil GSM convencional y la forma de emular una red GSM en base a SDR. No obstante, en la figura 14, se muestra un sistema análogo al estándar GSM, con sus respectivos componentes tanto en software como hardware, que se comportan de similar forma a sus estándares originales.

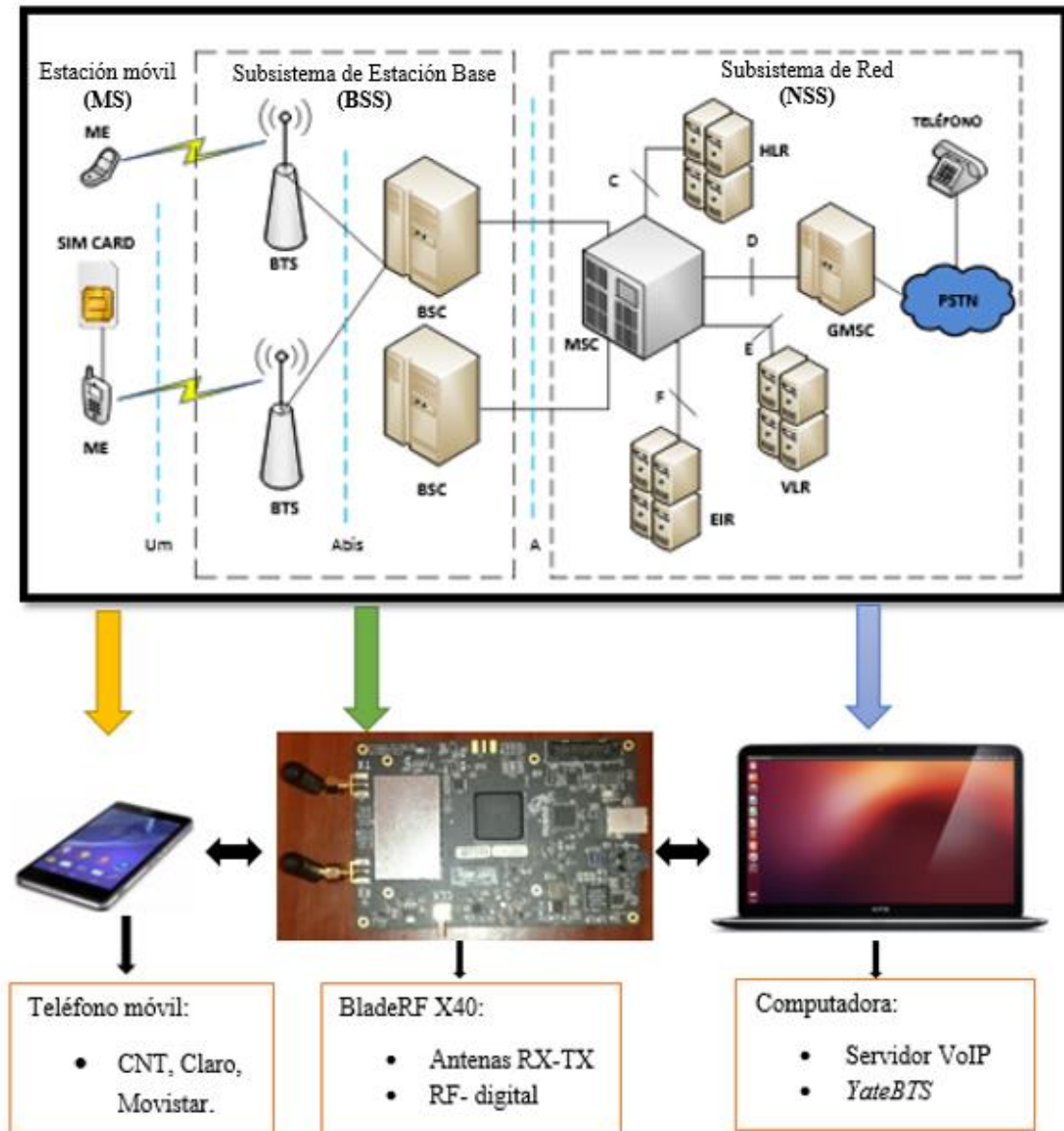


Figura 14. Sistema de telefonía móvil estándar y su respectiva analogía.

Fuente: Elaboración propia.

La telefonía móvil GSM funciona por medio de módulos físicos lo que implica mayor gasto en equipos y por ende en infraestructura, en el presente modelo análogo al estándar GSM se muestra una alternativa de red celular (BTS), mismo sistema basado en su totalidad en hardware y software libre. Es decir, los módulos físicos originales de la telefonía móvil se virtualizan utilizando las Redes Definidas por Software (SDN) en el proyecto de *YateBTS*, bajo un servidor de telefonía IP. Todo su sistema lo pasan a VoIP para la conmutación de los servicios, se logró en base a la tecnología que ofrecen los SDRs.

5.2. Radio definido por software (SDR)

Dentro de los métodos utilizados se encuentra el análisis de la mejor propuesta de SDR, el mismo que permitirá obtener una visión más clara de la red GSM, sin embargo, existen varios tipos SDR con similares características para trabajar en el rango de frecuencias del estándar GSM.

Se realizó una comparación de las características de los principales equipos para GSM basada en SDR, esta comparación se presenta en la tabla 5.

Tabla 5. Comparación entre los diferentes modelos de los SDR [28].

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS | HackRF | BladeRF | | USRP | | |
|---|-------------------------|--------------------|-------|-------------------------|--------------------|--------|
| | | X40 | X115 | B100 | B200 | B210 |
| Espectro de radio | 30Mhz - 6GHz | 300MHz – 3.8GHz | | 50MHz – 2.2GHz | 50MHz – 6GHz | |
| Ancho de banda | 20MHz | 28MHz | | 16MHz | 61.44MHz | |
| Duplex | Half | Full | | Full | Full | |
| Tamaño de muestra (ADC/DAC) | 8 bits | 12bits | | 12bits/14bits | 12 bits | |
| Frecuencia de muestreo (ADC/DAC) | 20 Msps | 40 Msps | | 64 Msps / 128 Msps | 61.44 Msps | |
| Interfaz | USB 2 HS (480 megabits) | USB 3 (5 gigabits) | | USB 2 HS (480 megabits) | USB 3 (5 gigabits) | |
| FPGA | No definido | 40K | 115k | 25K | 75K | 150k |
| Microcontrolador | LPC43XX | Cypress FX3 | | Cypress FX2 | Cypress FX3 | |
| Disponibilidad | Enero 2014 | Ahora | | Ahora | Ahora | |
| Costo | \$300 | \$420 | \$650 | \$675 | \$675 | \$1100 |

Como se muestra en la tabla 5, los dispositivos SDR tanto del modelo *BladeRF* como *USRP* son los que proveen mayor facilidad y adaptabilidad para trabajar con este sistema de red GSM. Para la construcción de redes GSM, se debe considerar ciertos parámetros como:

rango de frecuencias que maneja un dispositivo SDR, ancho de banda, velocidad de transmisión y la capacidad de transmisión, se consideró las especificaciones de *Md. Habibur Rahman*, especificaciones que se detalla en la tabla 6.

Tabla 6. Especificación de SDR para emular redes GSM.

Fuente: Elaboración propia

| Especificaciones técnicas SDR | GSM |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Rango de frecuencias | 850MHz, 900MHz, 1800MHz, 1900MHz, |
| Ancho de banda | 25MHz |
| Capacidad de transmisión | Full Dúplex |
| interfaz | USB 3.0 |

Tomando en cuenta estas especificaciones, se tiene tres dispositivos SDR que cumplen con estas condiciones como son: el *BladeRF X40*, *X115* y el *USRP B210*. Al realizar una comparación entre dispositivos, se encontró una diferencia acentuada, la misma que radica en el costo del dispositivo.

Tomando en cuenta esta diferencia y la aplicación del SDR en el prototipo, se seleccionó el dispositivo *BladeRF X40*, el mismo que permite un ahorro económico considerable para la implementación del prototipo de estación base GSM.

5.3. Análisis y diseño de la solución

Para el análisis y diseño del prototipo de estación base el punto de partida fue dar utilidad a la integración de software y hardware libre con el fin de facilitar las comunicaciones de las personas, además, de incluir a los organismos de emergencia en un escenario donde las redes de telecomunicaciones colapsen e incluso se presente una deficiencia en la red eléctrica. Como solución se trabajó en la implementación de un prototipo de estación base celular GSM (BTS), con la cual las comunicaciones en sectores rurales puedan ser brindadas a bajo costo, no obstante, en situaciones de desastres naturales se logre que las personas afectadas se puedan registrar a la picocelda para facilitar el trabajo de los organismos de socorro.

Para dar inicio a la implementación del prototipo se consideró prioritariamente la instalación del software y el estudio de su funcionamiento, por lo que se necesitó de un

computador portátil. Se tomó la decisión de montar todo el sistema de red GSM sobre una plataforma Linux, especialmente el sistema operativo Ubuntu porque se contaba con experiencia en el manejo y proceso de instalación.

Siguiendo las recomendaciones de *Nuand / BladeRF* [29], se utilizó el sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS, para la instalación y construcción de las bibliotecas principales de *BladeRF* que utiliza las imágenes de *firmware* y FPGA preconstruidas. Paso siguiente se hizo la instalación de las dependencias necesarias para la correcta instalación de los sistemas de red GSM. Posteriormente se procedió a instalar el software *YateBTS* que brinda la implementación de la pila de protocolos GSM.

Para la instalación de *YateBTS* y *Yate*, se siguió la recomendación de Simone Margaritelli [30], que especifica en su repositorio digital que versión de *Yate* y *YateBTS* son compatibles con el *BladeRF* X40.

El hardware fue adquirido de la marca *Nuand*. En la compra se adquirió el kit de radio *BladeRF* X40, que consta de la tarjeta, dos cables SMA y su respectivo cable USB 3.0, no obstante, se pidió las respectivas antenas *Quad-band Cellular Duck Antennas*, estos materiales se los detalla en el **anexo II**.

Para verificar el correcto funcionamiento entre el *BladeRF* y el computador, se trabajó sobre la interfaz de línea de comandos *BladeRF-cli*, misma que sirve para verificar que el dispositivo esté funcionando correctamente y que el software en el computador este correctamente instalado, se trabajó siguiendo la guía de verificación de las operaciones básicas del *BladeRF* [31], las pruebas de funcionamiento del *BladeRF* se detallan en el **anexo III**, no obstante, es importante la verificación visual del dispositivo, mismo, que cuenta con tres indicadores Led. Después de que se cargó el código fuente en el FPGA, se debe ver que el Led 1, Led 2 y Led 3 se enciendan y cuando este en uso el Led 2 parpadeará.

Las configuraciones de *YateBTS* se realizaron mediante los archivos *ybts.conf* y *subscribers.conf*, y las configuraciones de *Yate* se ejecutaron mediante el archivo *scripts/nib.js*, para verificar el control de numeración de los usuarios.

Para facilitar la administración, control y monitoreo de *YateBTS*, se instaló una interfaz gráfica de red (NIB), para no utilizar la interfaz de línea de comandos de Ubuntu. Interfaz que permitió realizar las configuraciones de la BTS mediante un entorno gráfico fácil de utilizar y modificar.

5.4. Implementación de la solución

Para poder realizar el despliegue de la red GSM y brindar los servicios de voz y mensajería es necesario contar con requerimientos tanto de hardware como de software. La base del hardware y el software son completamente de código abierto.

5.4.1. Requerimientos de software

- Para el presente trabajo se utilizó el sistema operativo Ubuntu 14.04. *Nuand / BladeRF* [29], recomienda usar el sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS o superiores debido a que estas distribuciones poseen soporte prolongado de dependencias para la compatibilidad con el radio definido por software (SDR) *BladeRF*, para poder posteriormente configurar, compilar e instalar *YateBTS* y *Yate*.
- Para construir e instalar *YateBTS* se necesita tener instaladas las siguientes dependencias: *apache2 php5 bladerf libbladerf-dev libbladerf0 automake*, mismas que sirven también para el controlador del *BladeRF X40*. Se las instaló por medio del sistema de gestión de paquetes (*apt-get*) de Ubuntu.
- Para el presente trabajo se utilizó la versión de *YateBTS* y *Yate* recomendada por Simone Margaritelli [30], ya que en su repositorio *github* da a conocer las versiones correctas de *YateBTS* y *Yate* que son compatibles con el *BladeRF*. Para el correcto funcionamiento se instaló la versión de *Yate* 5.1.0, no obstante, se puede utilizar versiones superiores.

5.4.2. Requerimientos de hardware

- Un computador portátil con puerto USB 3.0 por la velocidad de la transmisión de datos, por esta razón se trabajó con un computador HP Intel Core i7 de 2.2GHz, 8 GB de memoria RAM y dos puertos USB 3.0. Se necesitó hacer compartición de disco para tener una máquina física con sistema operativo Ubuntu, no obstante, en máquinas virtuales no funcionó el sistema de red.
- El paquete *BladeRF X40* es un kit que contiene, la tarjeta (SDR), dos cables RF con conectores SMA y el cable USB 3.0.
- Dos antenas *Quad-band Cellular Duck Antennas*, se utilizó este tipo de antena porque trabaja en todos los rangos de frecuencias del estándar GSM.
- Las estaciones móviles o equipos celulares GSM con sus respectivas tarjetas SIM. Estos deben funcionar en modo de búsqueda de red manual.

5.5. Fases para la construcción del prototipo GSM

Se efectuó un planteamiento por fases para el desarrollo del prototipo de BTS, como se describe en la siguiente figura 15.

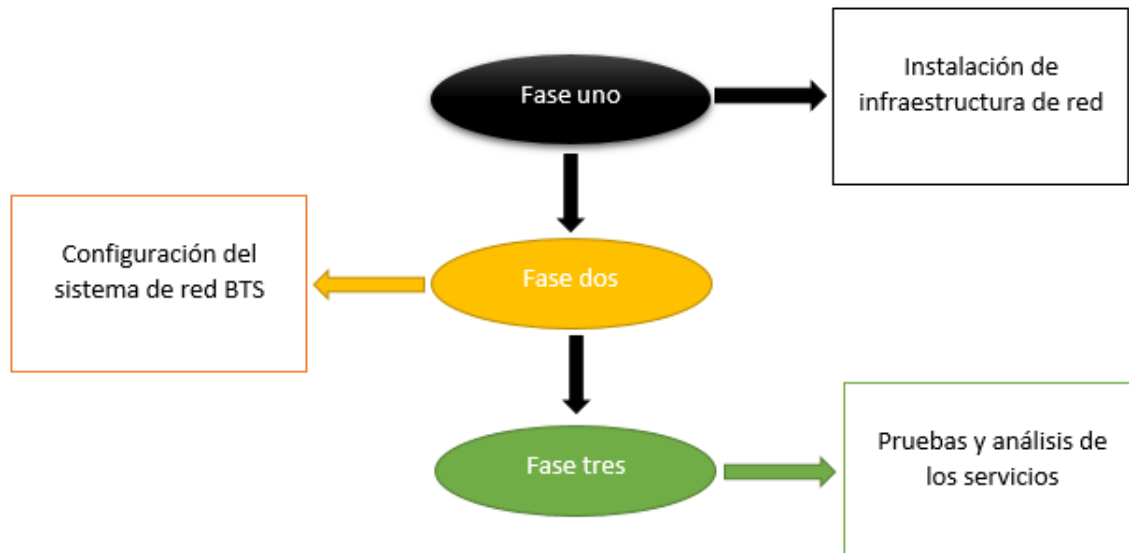


Figura 15. Fases de construcción de prototipo de red GSM.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la fase uno, se encuentra el sistema de red GSM basado en *YateBTS* y *Yate*, donde se analizó cada parte fundamental del sistema como; compatibilidad del software y hardware, requerimientos para la instalación de la interfaz de control gráfico de la red. Se tomó en cuenta todos estos aspectos para su correcta instalación y ejecución, todo como parte de la infraestructura necesaria para implementar la red celular de aspecto portable.

Dentro de la fase dos, tenemos la configuración del sistema de red. Que se convirtió en la central telefónica que permite realizar la gestión y conmutación de los servicios de la red GSM.

Y por último en la tercera fase, se analizó que los equipos se encuentren funcionando correctamente, no obstante, se verificó los servicios montados en la red celular y a su vez se corrigió los errores presentes en el lazo de puesta en marcha del sistema.

Se realizó las respectivas pruebas de calidad de señal de la red, que sirvió para verificar los servicios en dos ambientes diferentes *indoor* y *outdoor*.

5.5.1. Proceso de instalación del sistema

Para el proceso de instalación primero se hizo la correcta conexión de hardware, **ver anexo IV**. Se recomienda no manipular el dispositivo con las manos, usar guantes o algún otro elemento aislante para la conexión.

En esta sección se describe en detalle la instalación del software necesario para el funcionamiento de la radio base celular (BTS). Se inició partiendo de la instalación del sistema operativo Ubuntu 14.04 LTS en un computador portátil.

Todos los comandos que se presentan a continuación son corridos desde el terminal del sistema operativo Ubuntu. Para su ejecución, seleccione los comandos y arrástrelos al terminal, cópielos para luego en el terminal ejecutar la combinación de teclas Shift → Insert para pegar o digítelos en el terminal.

- ✓ **Instalación de dependencias:** Antes de instalar las dependencias, primero se instalan las actualizaciones disponibles, se abre un terminal por medio de la interfaz gráfica de Ubuntu o se presiona la combinación de teclas Ctrl → Alt → t.

Se escribió el siguiente comando en el terminal para las actualizaciones disponibles.

```
sudo apt-get update  
sudo apt-get upgrade
```

Para la instalación del software de la red GSM en Ubuntu se instaló varios paquetes o dependencias necesarias para continuar con la instalación.

- ✓ Herramientas de desarrollo, necesarias para la compilación.
 - git
 - apache2
 - php5
 - automake
 - cmake
 - telnet
- ✓ librerías necesarias para el tiempo de ejecución y compilación
 - libusb-1.0-0
 - libusb-1.0-0-dbgsymbols

- libusb-1.0-0-dev
- libgsm1
- libgsm1-dev
- libbladerf-dev

Para instalar las dependencias se seleccionó y se copió en el terminal las siguientes líneas comandos:

```
sudo apt-get -y install git telnet apache2 php5 libusb-1.0-0 libusb-1.0-0-dbg libusb-1.0-0-dev libgsm1 libgsm1-dev libbladerf-dev cmake automake
```

En este punto de la instalación, ya se pudo interactuar con el *BladeRF* y se verificó que el computador reconozca el dispositivo SDR.

Para verificar que esté conectado el *BladeRF* se seleccionó y se copió en el terminal la siguiente línea de comando:

```
sudo dmesg
```

Con este comando se verificó el nombre del dispositivo, el fabricante, el número de serie y el puerto USB que se encuentra conectado.

- ✓ **Instalación del código fuente y *firmware* del *BladeRF x40*:** En este punto de la instalación, se descargó e instaló el código fuente y el *Firmware* de Nuand *BladeRF*.

Para descargar el código fuente se seleccionó y se copió en el terminal la siguiente línea de comando:

```
wget -c https://github.com/Nuand/bladeRF/archive/master.zip
```

Se descomprimió el fichero y se accedió a la carpeta

```
unzip master.zip
cd bladeRF-master
cd host
```

En la carpeta *host* se crea una carpeta llamada *build*, para crear la carpeta se seleccionó y copió el siguiente comando:

```
mkdir build  
cd build
```

Para la instalación del código fuente, se ejecutó el comando *Cmake*, mismo que reconoce que compiladores utiliza para un determinado tipo de fuente, además, se ejecutó el comando *ldconfig* para crear los vínculos y caché necesarios para las bibliotecas. Se instaló en la carpeta creada *build*. Para instalar se seleccionó y copió los siguientes comandos:

```
cmake -DCMAKE_BUILD_TYPE=Release -  
DCMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local -DINSTALL_UDEV_RULES=ON ../  
make -j4  
make install > install.log  
ldconfig
```

Se descargó e instaló el *firmware Nuand BladeRf X40 v1.9.1*. Para instalar el *firmware* se seleccionó y copió las siguientes líneas de comandos:

```
wget -c http://www.nuand.com/fx3/bladeRF_fw_v1.9.1.img  
bladeRF-cli -f bladeRF_fw_v1.9.1.img -v verbose
```

Después de que se instaló el *firmware*, se procedió a desenchufar el *BladeRF X40* del puerto USB del computador, al desconectar el equipo de la energía sirve como *reset*, se volvió a conectar y se inició el dispositivo con el nuevo *firmware*.

Luego que se instaló todo lo requerido por el *BladeRF*, se comprobó las versiones instaladas del *firmware*, FPGA y la versión de la librería *libbladeRF*, no obstante, la versión de la interfaz de línea de comandos (cli). Para la comprobación de las versiones se seleccionó y copió los siguientes comandos en el terminal de Ubuntu:

```
sudo bladeRF-cli -i  
bladeRF> version
```

Para salir de la interfaz de línea de *BladeRF* se digitó '*quit*'

- ✓ **Instalación del servidor *Yate*:** Se instaló la versión de *Yate* 5.1.0, se recomienda instalar la versión *Yate* 5.1.0 o superiores, se descargó el software del repositorio digital *github* de *Simone Margaritelli* [32].

Se seleccionó y se copió la siguiente línea de comando en el terminal para descarga el software *Yate*.

```
git clone https://github.com/stcipyblog/SubversiveBTS.git
```

Después que se descargó la PBX (*Yate*), se procedió a construir el sistema, se localizó el directorio donde *Yate* fue descargado y se ejecuta el comando *autogen.sh*, este comando genera el *script* de configuración que verifica las dependencias, así mismo, se ejecutó el comando *configure* el mismo que se encarga de preparar para construir el software en un sistema específico, luego se ejecutó el comando *make install* que compilara e instalara *Yate*.

Para la instalación del sistema de conmutación VoIP *Yate* se seleccionó y se copió en el terminal las siguientes líneas de comandos:

```
cd yate
./autogen.sh
./configure --prefix=/usr/local
make -j4
make install > install.log
ldconfig
```

- ✓ **Instalación del sistema de red GSM *YateBTS*:** se descargó el software de sistema de red GSM del repositorio digital *github* de *Simone Margaritelli* [32].

Se seleccionó y se copió la siguiente línea de comando en el terminal para descarga el software *YateBTS*.

```
git clone https://github.com/stcipyblog/SubversiveBTS.git
```

Después que se descargó el software *YateBTS*, se procedió a construir el sistema de red GSM, se localizó al directorio donde *YateBTS* fue descargado y se ejecuta el comando *autogen.sh*, este comando genera el *script* de configuración que verifica las dependencias, así mismo, se ejecutó el comando *configure* el mismo que se

encarga de preparar para construir el software en un sistema específico, luego se ejecutó el comando *make install* que compilara e instalara *YateBTS*.

Para la instalación del sistema de emulación de red GSM *YateBTS* se seleccionó y se copió en el terminal las siguientes líneas de comandos:

```
cd yatebts
./autogen.sh
./configure --prefix=/usr/local
make -j4
make install > install.log
ldconfig
```

Echo todo este proceso de instalación, finalmente, se obtuvo todo el sistema de red GSM ya montado sobre una plataforma Linux (Ubuntu), no obstante, se configuró la estación base (microcelda), para la conmutación de los servicios red.

5.5.2. Interfaz web de administración, control y monitoreo

La interfaz web (NIB), es un entorno gráfico de administración y control del sistema de red GSM basado en *YateBTS* y *BladeRF*, realiza todas las funciones de una red convencional GSM. Implementa el módulo *JavaScript* para registrar, enrutar llamadas y mensajes de texto SMS y autenticación de usuarios para *YateBTS*.

El módulo NIB se configuró y administró a través de una GUI Web, las funciones de la GUI Web son las mismas que las descritas *JavaScript_NIB*, pero presentadas en una interfaz gráfica para facilitar el proceso de configuración de la red.

La GUI Web tiene las siguientes secciones de configuración:

- ✓ **Casilla suscriptores contiene:** Suscriptores en lista, suscriptores en línea entre otros. Los suscriptores en lista, cada IMSI se puede insertar individualmente, sin embargo, se colocó una expresión irregular que se utiliza para coincidir con todos los suscriptores IMSIs y los suscriptores en línea son todos los usuarios que están conectados en ese momento a la red o están haciendo uso de la misma.

Warning! You can't set mobile terminated authentication for calls, SMS, USSD when regular expression is used. Authentication requests will be ignored in this scenario.
Note! If a regular expression is used, 2G/3G authentication cannot be used. For 2G/3G authentication, please set subscribers individually.

Regular expression based on which subscriber IMSI are accepted for registration

Regexp* ?

Save Reset

Note! To disable nib mode and enable roaming mode see [Javascript Roaming](#)

Figura 16. Los suscriptores de la NIB Web

Fuente: Elaboración propia

- ✓ **Casilla configuración BTS:** Esta sección muestra los casilleros o formularios para la configuración de la BTS GSM, al presionar el botón enviar las configuraciones realizadas se escriben y se guardan en el archivo *ybts.conf*.

Set parameters values for section [gsm] to sent to API.

| | | |
|-------------------------------|--------------|---|
| Radio.Band | Not selected | ? |
| Radio.CO | Not selected | ? |
| Identity.MCC | 001 | ? |
| Identity.MNC | 01 | ? |
| Identity.LAC | 1000 | ? |
| Identity.CI | 10 | ? |
| Identity.BSIC.BCC | 2 | ? |
| Identity.BSIC.NCC | 0 | ? |
| Identity.ShortName | YateBTS | ? |
| Radio.PowerManager.MaxAttenDB | 10 | ? |
| Radio.PowerManager.MinAttenDB | 0 | ? |

Submit Reset Cancel

Figura 17. Configuraciones básicas para el funcionamiento de la red GSM

Fuente: Elaboración propia

Se instaló la interfaz gráfica, creando un enlace en la GUI Web de la NIB en la carpeta apache www, además, se concedió permisos de escritura a los archivos de configuración.

Para la instalación se seleccionó y copió en el terminal las siguientes líneas de comandos:

```
cd /var/www/html/  
  
ln -s /usr / local / share / yate / nib_web nib  
  
chmod -R a+w /usr/local/etc/yate
```

5.6. Configuración para la puesta en marcha del sistema

Antes de realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo, se configuró los parámetros de la BTS. La configuración requiere un grado de conocimiento de especificaciones técnicas de red GSM.

Para iniciar la configuración fue necesario ejecutar el archivo *ybts.conf*, se lo ejecuto con el comando *nano* o *vi*, que ofrecen las mismas funciones para editar *script*.

Para realizar las configuraciones se ejecutó el siguiente comando en el terminal y se modificó los respectivos parámetros para el correcto funcionamiento de la red.

```
cd /usr/local/etc/yate/nano ybts.con  
  
Radio.Band= ?  
  
Radio.C0= ?  
  
Identity.MCC=YOUR_COUNTRY_MCC  
  
Identity.MNC=YOUR_OPERATOR_MNC  
  
Identity.ShortName=YateBTS  
  
Radio.PowerManager.MaxAttenDB= ?  
  
Radio.PowerManager.MinAttenDB= ?
```

Los parámetros que se modificó son los siguiente:

```
Radio.Band=850  
Radio.CO=128  
Identity.MCC=001  
Identity.MNC=01  
Identity.ShortName=Red UNL  
Radio.PowerManager.MaxAttenDB=35  
Radio.PowerManager.MinAttenDB=35
```

Se encontró los valores válidos MCC y MNC para la ubicación de la BTS en la guía redes de país [33].

Realizada esta configuración se procedió a editar el archivo *subscribers.conf*

```
cd /usr/local/etc/yate/nano subscribers.conf  
country_code=YOUR_CONTRY_CODE  
regexp=.*
```

Se uso la expresión irregular (.*), para hacer que cada teléfono o estación móvil GSM que esté en el alcance del área de cobertura de la red se pueda conectar sin ningún inconveniente de autenticación de usuario.

Finalmente, para dar inicio a la red GSM basada en hardware y software libre, se ejecutó el comando *yate -s* en el terminal de Ubuntu, con el dispositivo SDR *BladeRF X40* conectado al sistema de red.

```
sudo yate -s
```

Si está correctamente instalado todo el sistema de red, la BST se iniciará sin ningún problema.

Starting MBTS...

Yate engine is initialized and starting up

RTNETLINK answers: File exists

MBTS ready

Se comprobó que la BTS se ha iniciado correctamente, porque en este punto de inicialización el Led 2 o Led central del *BladeRF* empezó a parpadear, que significa que el dispositivo entró en funcionamiento.

Para la puesta en marcha del sistema se necesitó hacer un análisis exhaustivo de los canales de transmisión y recepción, para efectuar este análisis se tomó en cuenta el canal ARFCN que las estaciones celulares en uso ocupan con menos frecuencia. Con el analizador de espectros se hace un barrido en todas las bandas de frecuencias GSM, para lograr determinar que banda se encuentra libre para poder hacer uso de la misma, sin embargo, todo este análisis se lo debe hacer en un entorno de laboratorio, por el mismo hecho que se puede interrumpir momentáneamente la comunicación de algún usuario que este accediendo a este canal de comunicación.

En el **anexo V**, se puede observar todas las configuraciones realizadas desde la interfaz de línea de comando (cli) y desde la interfaz gráfica NIB.

5.7. Parámetros a evaluar de la red GSM

Existen varios parámetros a evaluar durante el funcionamiento de una red de comunicaciones móviles GSM basada en SDR, tales como: potencia de la señal receptada, retardos en la comunicación de los servicios y calidad de señal.

Se evaluó los parámetros:

- ✓ **Potencia de la señal:** Para evaluar este parámetro se utilizó una aplicación (App) de Android denominada *Network Cell Info Lite* que recepta la señal GSM e indica con que potencia está llegando la señal al equipo de recepción, no obstante, para evaluar este parámetro las estaciones móviles fueron sometidas a dos campos diferentes *indoor* y *outdoor*.

- ✓ **Retardo de los servicios:** Este parámetro se lo evaluó bajo dos características, el tiempo de demora de los servicios desde la ejecución inicial hasta llegar al destino y el tiempo de demora en recibir una respuesta desde el destino hacia el punto de origen inicial del mensaje, en si, se trata del retardo de emisión de los servicios de una estación móvil A hacia otra estación móvil B y viceversa.

Para luego determinar un diagrama estadístico del comportamiento de los servicios dependiendo de las distancias de ubicación de las estaciones móvil.

- ✓ **Calidad de audio:** Debido a que las comunicaciones móviles son de dos vías (*Full dúplex*), cada enlace de comunicación es diferente, por lo tanto, la calidad de audio se analizó en los dos enlaces, por esta razón se utilizó el método de puntuación de opinión media (MOS, por sus siglas en inglés) [34].

6. RESULTADOS

Esta sección se compone de 3 partes: pruebas de funcionamiento del prototipo de red GSM, resultado y análisis de la potencia de la red GSM y resultado y análisis del retardo de los servicios en la red.

6.1. Pruebas de funcionamiento del prototipo de red GSM

Antes de iniciar el sistema de red móvil, se necesita realizar una prueba de conectividad entre el SDR *BladeRF* y el computador portátil. En su mayoría las pruebas que se realizaron durante este trabajo han sido ejecutadas en un entorno de laboratorio, considerando que el nivel de señal GSM de otras operadoras móviles es bajo. Esto beneficia la detección y acceso de las estaciones móviles hacia la red GSM implementada.

A continuación, se hizo uso del analizador de espectros para escanear las bandas de frecuencia GSM activas. Se logró determinar que la banda de frecuencia GSM 850MHz y el identificador de canal ARFCN número 128 es el menos utilizado por la operadora móvil. Se realizó esta prueba en el laboratorio de telecomunicaciones de la facultad de energía, las Industrias y de los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja. Con este análisis se puede implementar la red sin problemas y evitar causar interferencia a esa operadora.

Realizada la correcta conexión de equipos se procede al inicio del sistema de red GSM *YateBTS*, el sistema de red arranca con la ejecución del servidor VoIP *Yate*, mismo que se lo ejecuta con el siguiente comando `sudo yate -s` en el terminal de Ubuntu.

Iniciado el sistema, la red entra en funcionamiento, su transmisión se encuentra activa, las estaciones móviles (celular) que se encuentren dentro de la cobertura de la celda celular podrán notar la existencia de la nueva red, junto a la lista de redes disponibles de las demás operadoras.

6.1.1. Conexión de las estaciones móviles a la red GSM implementada

El módulo de identidad de usuario (SIM) contiene información sobre todas las redes disponibles. La conectividad de red en las estaciones móviles se las puede cambiar a la nueva red implementada (*Test PLMN 1-1*) siguiendo los pasos mostrados en la figura 18.

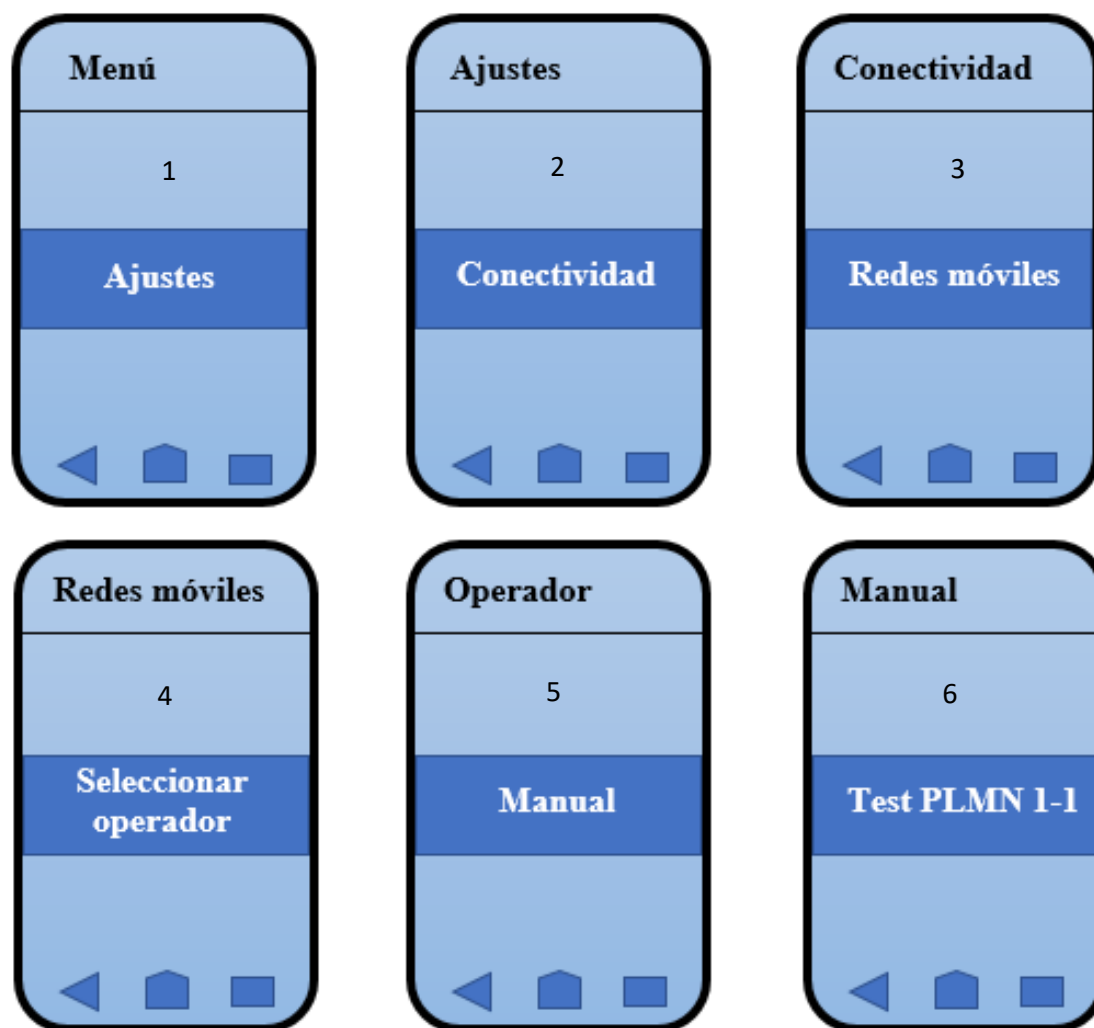


Figura 18. Selección de red en celulares.

Fuente: Elaboración propia.

Para *YateBTS*, la tarjeta SIM no es obligatoria. Incluso con la SIM existente de la red del operador móvil en uso, también es posible conectar, ventaja que tiene sobre los otros sistemas como *OpenBTS*. Cuando el teléfono está conectado, BTS responde con un mensaje de bienvenida y luego permite asociar el teléfono asignándole un número único de 7 dígitos, la BTS responde a través de un SMS.

En la figura 19, se puede observar el reconociendo de la red implementada por parte de la estación móvil (*Sony Xperia Z2*).

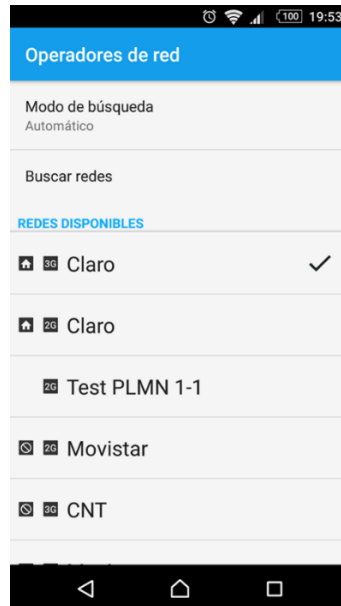
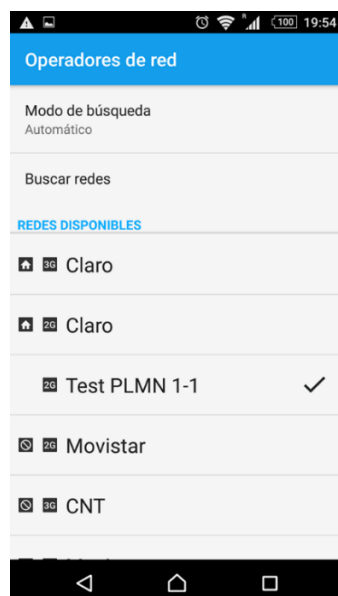


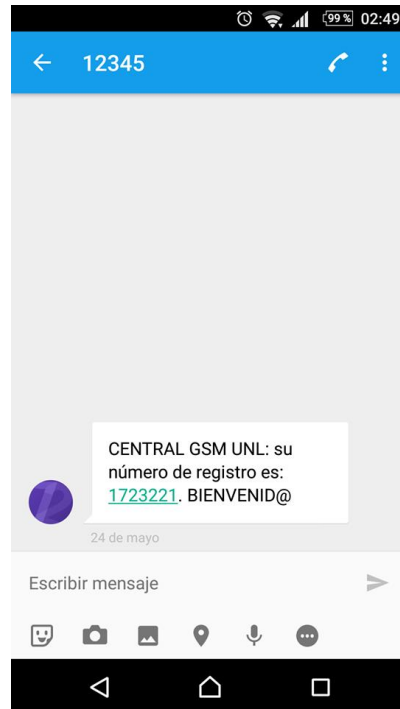
Figura 19. Reconocimiento de la red implementada (*Test PLMN 1-1*).

Como se muestra en la figura 19, se puede constatar que se está trabajando con un SIM de la operadora móvil Claro, no obstante, se puede trabajar con cualquier SIM de las operadoras móviles funcionales en el Ecuador.

En la figura 20, se muestra la conectividad de la red con la estación móvil y el respectivo SMS con el mensaje de bienvenida y nuevo número asignado.



a) Conectividad de la red.



b) Mensaje de bienvenida y número asignado.

Figura 20. Conectividad de la red y respectivo mensaje de confirmación.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2. Prueba de los servicios de red

- Inicialización del sistema

```
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC: /  
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC: /# yate -s
```

a) Comando de inicialización.

```
Release 5.0.1 formal build date Oct 12 2016 rev  
Starting MBTS...  
MBTS ready
```

b) Sistema inicializado

Figura 21. Inicialización del sistema de red GSM.

Fuente: Elaboración propia.

- Mensaje de confirmación y asignación del nuevo número.

```
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC:/usr/local/share/yate/scripts# nano nib.js  
  
function sendGreetingMessage(imsi, msisdn)  
{  
    if (msisdn.substr(0,1)=="")  
        msisdn = msisdn.substr(1);  
    var msg_text = "Central GSM UNL; su numero de registro es: "+msisdn+" Bienvenid@";  
    message(msg_text,imsi,msisdn,9);  
}
```

Figura 22. Mensaje de bienvenida y registro de la estación base.

Fuente: Elaboración propia.

- Prueba del servicio de llamada.

En la figura 23, se puede observar el mensaje de bienvenida y el respectivo número telefónico, para posterior realizar la prueba del servicio de llamada.

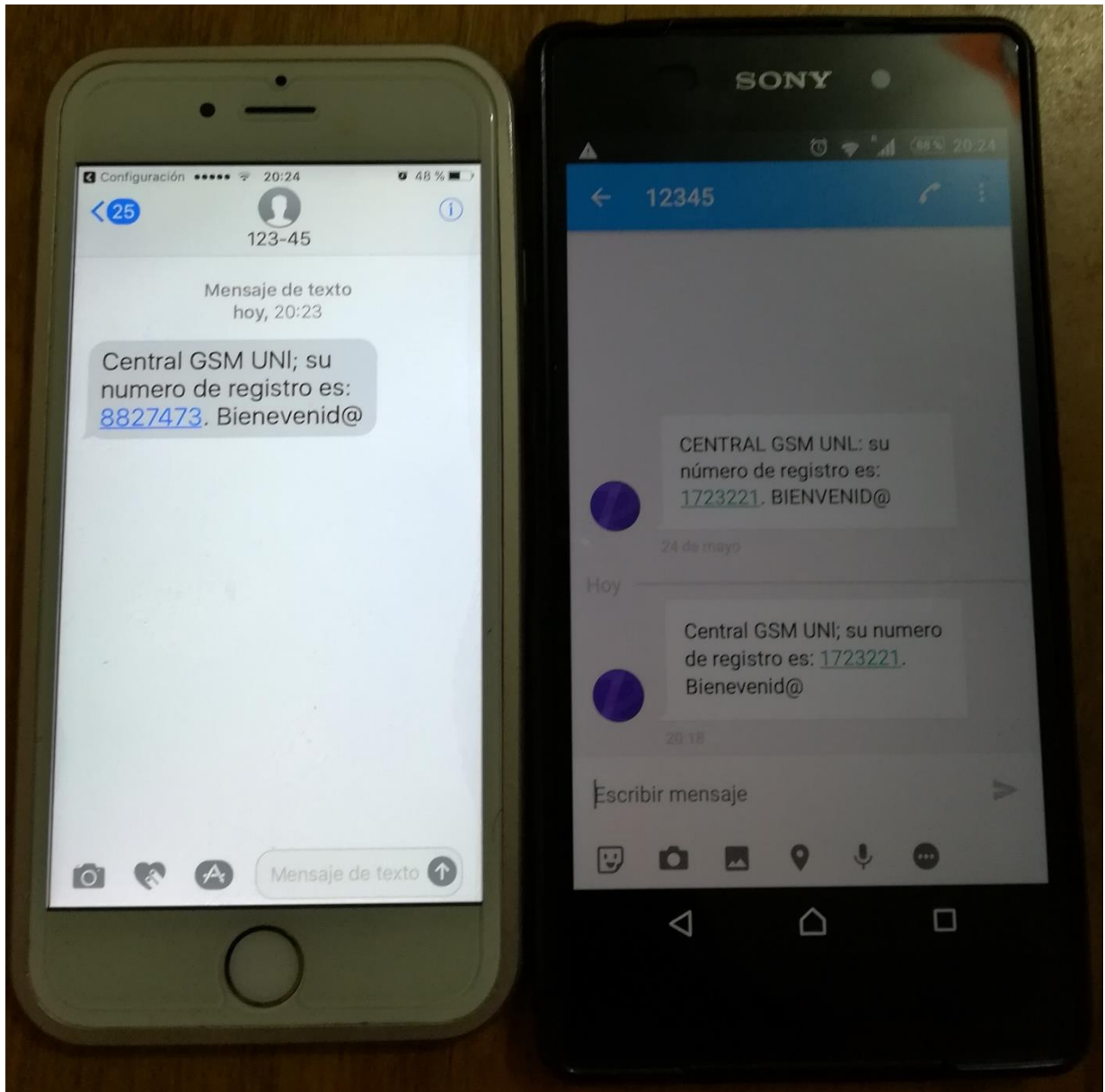


Figura 23. Asignación de números telefónicos.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Prueba de llamada entre 2 celulares

Fuente: Elaboración propia.

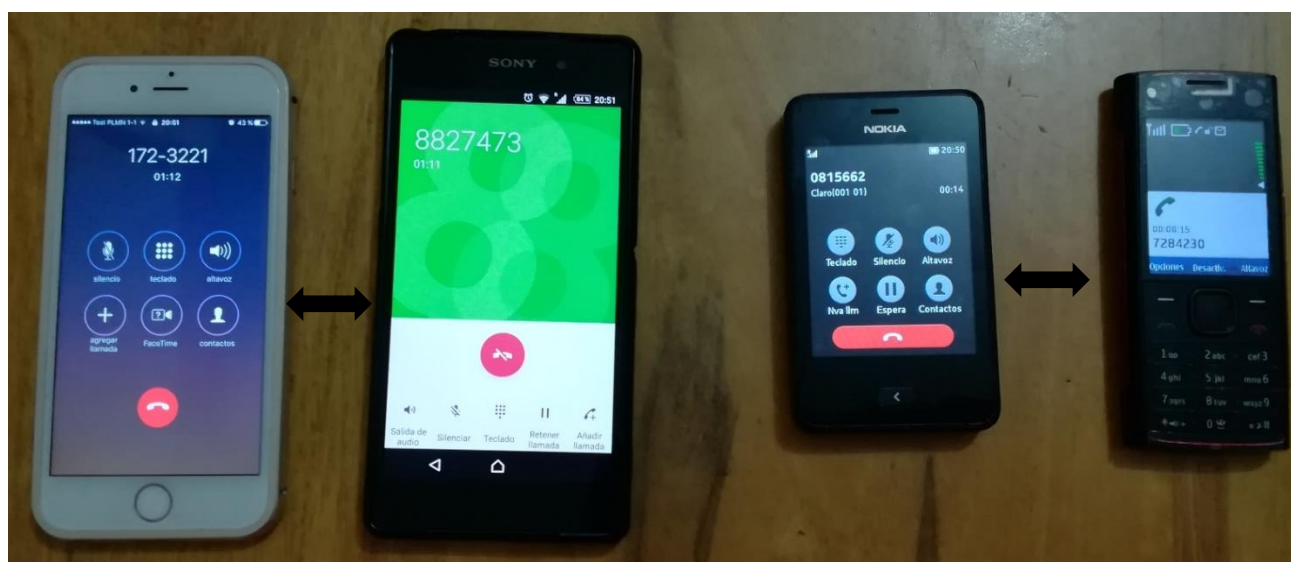


Figura 25. Prueba de llamada entre 4 estaciones móviles.

Fuente: Elaboración propia.

- Prueba del servicio SMS

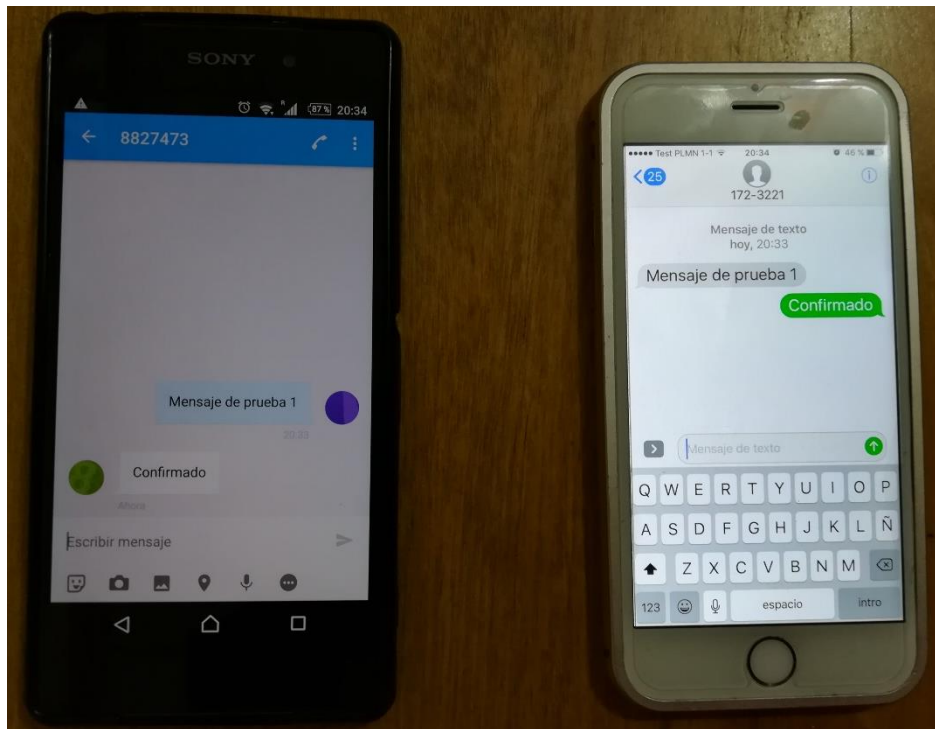


Figura 26. Prueba de envío de mensaje de texto.

Fuente: Elaboración propia.

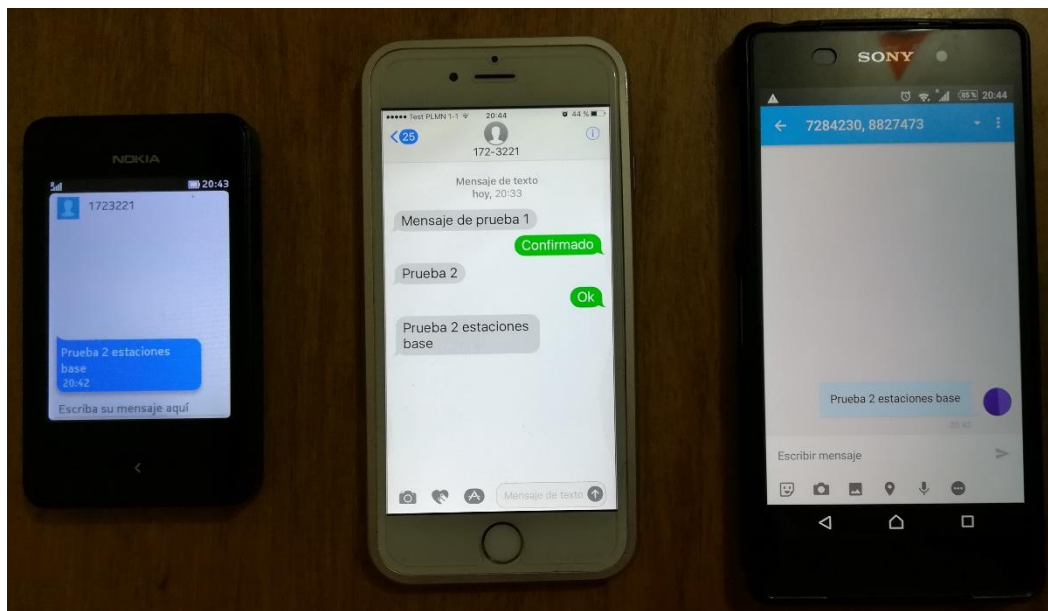



Figura 27. Prueba de envío de mensaje múltiple.

Fuente: Elaboración propia.

- Registro de los terminales en la interfaz web



| | | | |
|------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|
| Subscribers | BTS Configuration | Call Logs | Outgoing |
| List Subscribers | Country Code and SMSC | <u>Online Subscribers</u> | Rejected IMSIs |
| | | Manage SIMs | |

| IMSI | MSISDN |
|-----------------|---------|
| 740010157284230 | 7284230 |
| 740010131723221 | 1723221 |
| 740010138827473 | 8827473 |
| 740020150815662 | 0815662 |

Figura 28. Registro de los números telefónicos.

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Resultado y análisis de la potencia de la red GSM

Esta prueba se la realizó para determinar hasta que punto la calidad de la señal y el rango de distancia son factibles para brindar los servicios entre estaciones móviles. Se realizó las pruebas en dos entornos diferentes, en primer lugar, se realizó las pruebas en un espacio libre de interferencias (*outdoor*) y en segundo lugar en un ambiente con interferencias (*indoor*) como paredes, arboles entre otros obstáculos.

En la tabla 7, se presenta el promedio de los datos obtenidos de las mediciones realizadas del funcionamiento del prototipo, se realizó un total de 10 mediciones para constatar la calidad de la señal en base a la distancia de cobertura.

Tabla 7. Mediciones de la calidad de señal en base a la distancia.

Fuente: Elaboración propia.

| CALIDAD DE LA SEÑAL DE ACUERDO A LA DISTANCIA EN DOS ESPACIOS DIFERENTE | | | |
|---|---|-------------------------|----------------------|
| | | Potencia (dBm) | |
| Distancia (m) | ▼ | Libre de interferencias | ▼ Con interferencias |
| 0 | | -50 | -50 |
| 2,5 | | -51 | -53 |
| 5 | | -59 | -59 |
| 7,5 | | -60 | -65 |
| 10 | | -63 | -70 |
| 12,5 | | -64 | -71 |
| 15 | | -67 | -73 |
| 17,5 | | -68 | -73 |
| 20 | | -74 | -70 |
| 22,5 | | -75 | -75 |
| 25 | | -77 | -85 |
| 27,5 | | -78 | -85 |
| 30 | | -80 | -87 |
| 32,5 | | -79 | -87 |
| 35 | | -79 | -89 |
| 37,5 | | -80 | -95 |
| 40 | | -81 | -98 |
| 42,5 | | -83 | -100 |
| 45 | | -83 | -100 |
| 47,5 | | -84 | |
| 50 | | -85 | |

Como se muestra en la tabla 7, la calidad de señal varía en un 50% en el alcance de cobertura de un entorno a otro. Tomando como referencia la recomendación de Md. Habibur Rahman [3], se determinó que la potencia de la señal debe estar en el rango de (-85 ± 3) dBm para brindar un servicio aceptable.

En la figura 29, se muestra un diagrama estadístico de las medidas promedio de la tabla 7.

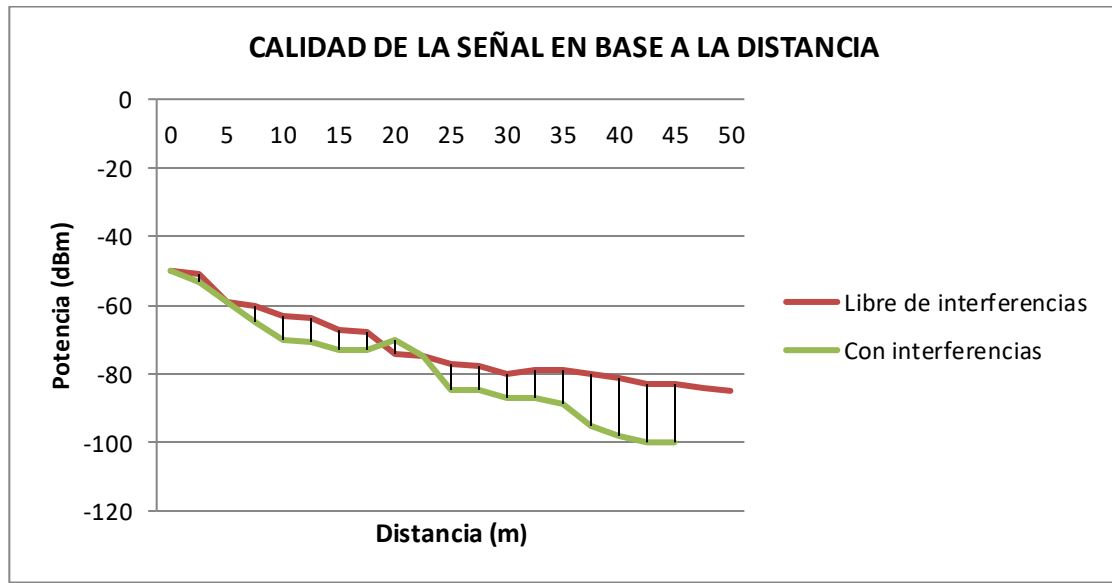


Figura 29. Diagrama estadístico de la calidad de la señal en base a la distancia.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura 29, las gráficas de las señales no son lineales. Lo que demuestra que la potencia del radio *BladeRF* disminuye proporcionalmente a la distancia de cobertura, dando lugar, a que la señal en un espacio con interferencia se vea más afectada con la pérdida de potencia, esto se debe a que el área exterior tiene una condición de obstáculo pequeño a diferencia de la interior que se ve afectada por la reflexión de la señal y la atenuación.

En base en la figura 29, la red GSM que utiliza SDR *BladeRF X40* es capaz de envolver un área de cobertura 30 metros en un entorno con interferencias (*indoor*) y 50 metros en un entorno sin interferencias (*outdoor*) respectivamente.

En la tabla 8, se especifica los parámetros de cobertura de la estación base GSM implementada.

Tabla 8. Parámetros de cobertura de la BTS

Fuente: Elaboración propia.

| Especificaciones | Indoor | Outdoor |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Distancia de cobertura | 30 m | 50 m |
| Área de cobertura | $225 \pi m^2$ | $625 \pi m^2$ |

6.3. Resultado y análisis del retardo de los servicios en la red

Esta prueba tiene como objetivo determinar cuánto tiempo se requiere para enviar un mensaje SMS y la calidad de audio del servicio de llamada. Se realizó las pruebas entre dos estaciones móviles conectadas a la red.

- **Pruebas de retardo del servicio SMS entre dos estaciones móviles en un entorno libre de interferencias.**

La medición comienza cuando la estación móvil 1 (MS 1) envía un mensaje a la estación móvil 2 (MS 2) y la medición se detiene cuando la estación móvil 2 recibe un mensaje de la estación móvil 1. La distancia entre la BTS y las estaciones móviles afecta directamente al tiempo de entrega del mensaje como se muestra en la Figura 30. Si La posición de la estación móvil está lejos de la BTS para él envió de mensaje, la red GSM necesita un poco más de tiempo para enviar un mensaje desde una estación móvil a otra estación móvil. La comunicación entre MS 1 y MS 2 se realiza cuando la MS 1 envía el mensaje a la MS 2. Mientras tanto, la comunicación entre MS 2 y MS 1 se hace cuando la MS 2 envía un mensaje a la MS 1 es decir, la respuesta de mensaje.

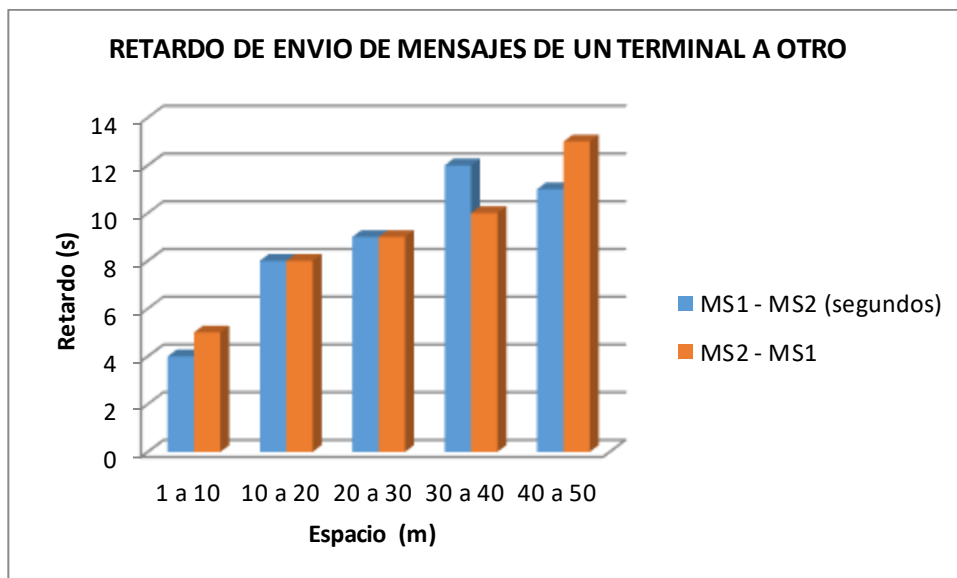


Figura 30. Diagrama estadístico del retardo de SMS entre MS1-MS2

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la tabla 9, se presenta los valores de los tiempos de demora de cada estación móvil en ejecutar el servicio de SMS, dependiendo del rango de la distancia que se encuentran los celulares.

Tabla 9. Retardo del servicio SMS con respecto a la distancia

Fuente: Elaboración propia

| PRUEBA DE ENVIO DE MENSAJES (ESPACIO LIBRE DE INTERFERENCIA) | | | |
|--|----------------------|----------------------|--|
| Distancia (m) | MS1 - MS2 (segundos) | MS2 - MS1 (segundos) | |
| 1 a 10 | 4 | 5 | |
| 10 a 20 | 8 | 8 | |
| 20 a 30 | 9 | 9 | |
| 30 a 40 | 12 | 10 | |
| 40 a 50 | 11 | 13 | |

Para la ejecución de esta prueba se tomó en cuenta la ubicación de cada estación móvil y la distancia que se encuentra con respecto a la estación base, estas distancias se las detalla en la figura 31, misma que da a conocer que ubicación tomaría cada celular en el diagrama de medición de la red GSM.

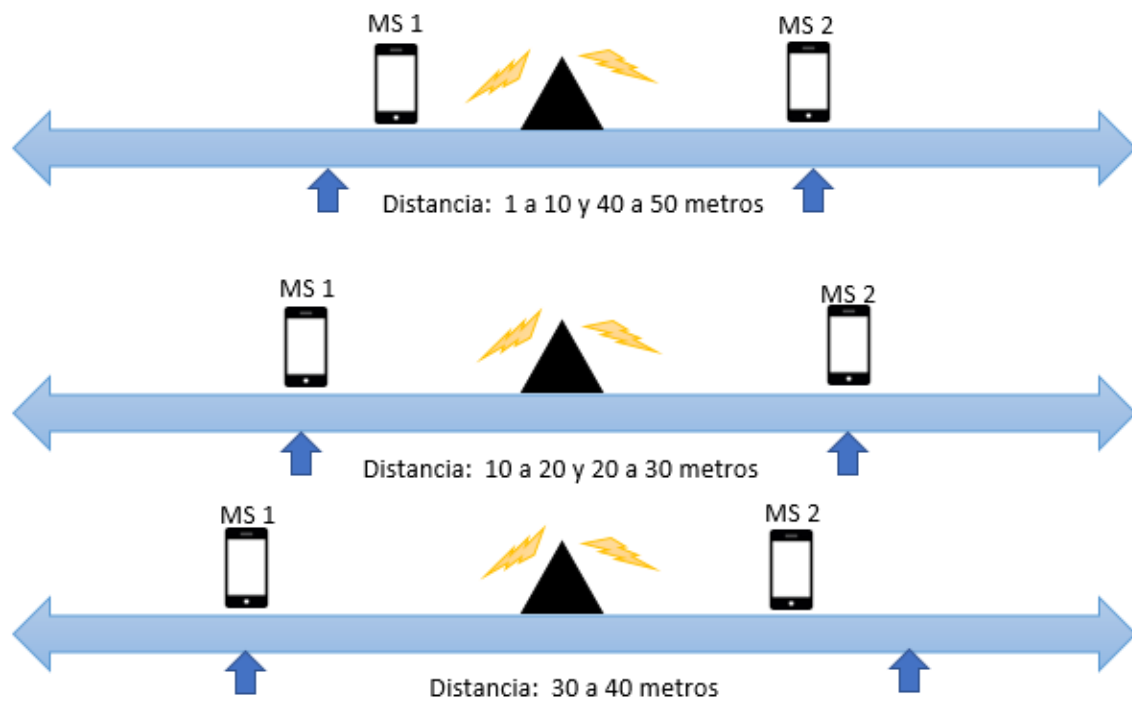


Figura 31. Ubicación de los respectivos dispositivos móviles.

Fuente. Elaboración propia.

Tomando en cuenta la tabla 9, se pudo determinar un tiempo promedio de envío de mensajes SMS de 8.8 segundos y un tiempo promedio de respuesta de 9 segundos en un entorno libre de interferencia. Estas pruebas se las realizó hasta el nivel de potencia de -85 dBm en los dos casos de envío y respuesta de mensajes.

- **Pruebas de retardo del servicio SMS entre dos estaciones móviles en un entorno con interferencias.**

Tomando como referencia el mismo análisis del apartado anterior, en este entorno de comunicación móvil con interferencia se obtuvo los siguientes resultados.

En la figura 32, se muestra las gráficas del retardo en la ejecución del servicio de SMS dependiendo directamente de la distancia de ubicación entre estaciones móviles.

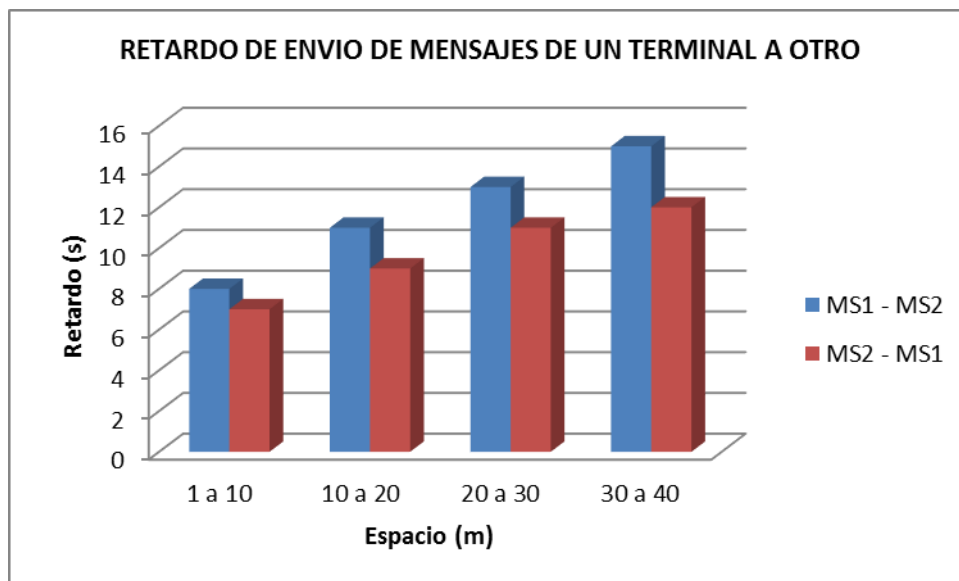


Figura 32. Retardo del servicio SMS en un entorno con interferencias.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la tabla 10, presenta las mediciones del retardo de los mensajes desde la ejecución hasta la llegada al usuario final.

Tabla 10. Mediciones del retador de comunicación del servicio SMS

Fuente: Elaboración propia

| PRUEBA DE ENVIO DE MENSAJES (ESPACIO CON INTERFERENCIA) | | | |
|---|-----------|-----------|----|
| Distancia (m) | MS1 - MS2 | MS2 - MS1 | |
| 1 a 10 | | 8 | 7 |
| 10 a 20 | | 11 | 9 |
| 20 a 30 | | 13 | 11 |
| 30 a 40 | | 15 | 12 |

Para la ejecución de esta prueba se tomó en cuenta la ubicación de cada estación móvil y la distancia que se encuentra con respecto a la estación base, estas distancias se las detalla en la figura 33.

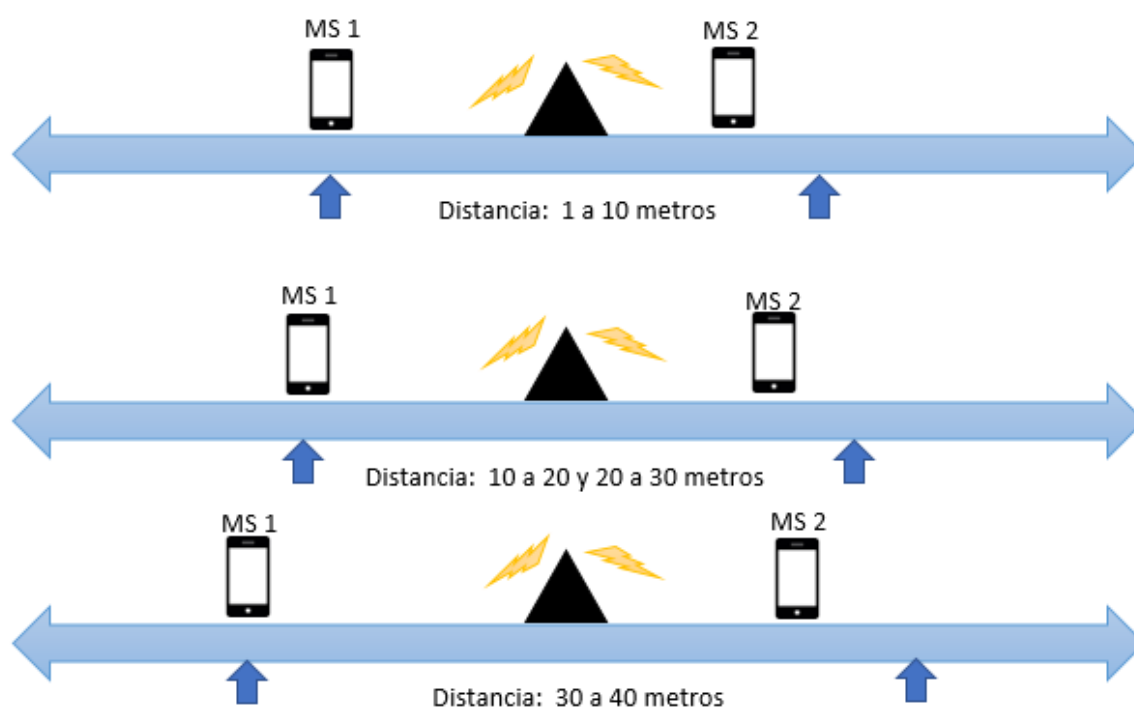


Figura 33. Ubicación de las estaciones móviles con respecto a la BTS.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 32, la estación móvil 2 (MS 2), en todos los casos de medición es la que se encuentra más cerca de la estación base, dando lugar a que la comunicación entre MS 2 y MS 1 sea la que se efectúe con menor tiempo con respecto a la comunicación MS 1 y MS 2, como se puede constatar en la tabla 10. Por lo tanto, mientras la estación móvil se encuentre más cerca de la BTS, el retardo de comunicación resulto menor, que en el caso contrario estación móvil lejos de la BTS.

- **Pruebas de la calidad de audio del servicio de llamada.**

Esta prueba se la realizo en base a la puntuación de medición media (MOS), que sirve como referencia para evaluar la calidad de audio en un canal de telefonía móvil GSM. Estas mediciones se basan en la percepción de calidad del oído humano y usa un sistema de calificación que va desde 0 a 5.

Existen varias metodologías para realizar la medición MOS. Se utilizó en esta medición uno de los métodos más populares para evaluar la calidad de audio, que es la Evaluación Perceptiva de la Calidad del Habla (PESQ).

Para poder evaluar esta prueba de calidad de audio, se necesitó realizar una encuesta a 10 personas, mismas que colaboraron para poder determinar la calidad del habla en la recepción del servicio de llamada, sin embargo, en la tabla 11, se presenta un promedio de las opiniones dadas por las personas según la calidad de audio percibida por el oído de cada una.

El método PESQ produce un valor que va desde 4.5 a 1. Un valor de 4.5 significa que la voz medida no tiene distorsión, es decir que es exactamente igual a la original. Un valor de 1 indica la degradación más severa.

De igual forma que en el servicio SMS, las pruebas se las realizó en dos entornos diferentes *indoor* y *outdoor*.

Tabla 11. Pruebas de calidad de audio bajo el método MOS.

Fuente: Elaboración propia.

| PRUEBA DE CALIDAD DE VOZ | | |
|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Distancia (m) | Espacio libre de interferencia | Espacio con interferencia |
| 1 a 10 | 4,5 | 4,5 |
| 10 a 20 | 4 | 3,5 |
| 20 a 30 | 3,5 | 3 |
| 30 a 40 | 2,5 | 2 |
| 40 a 50 | 2 | 1 |
| 50 a 60 | 1 | 1 |

Como resultado de las pruebas realizadas, se puede observar que las mediciones del método MOS son directamente proporcionales a al nivel de potencia de recepción de los equipos móviles que es de -85dBm, misma potencia que ofrece un área de cobertura de 40 a 50 metros en un entorno *outdoor*, y un área de cobertura de 20 a 30 metros en un entorno *indoor*. Por lo tanto, a nivel de estas áreas de cobertura se puede ofrecer un servicio confiable sin distorsión de la calidad de audio.

7. DISCUSIÓN

Existen aún lugares en el sector rural que no cuentan con los servicios de telecomunicaciones como son los servicios de telefonía móvil GSM, además, tomando como referencia lo ocurrido en el Ecuador el año pasado, el terremoto que causó que vidas humanas fallecieran y estructuras físicas se derrumbaran, lo que ocasionó que toda la infraestructura de red de telecomunicaciones se vea afectada impidiendo que la población sobreviviente se pueda comunicar con sus familiares y que conlleve esto a un estado de desesperación y angustia por no saber si sus familiares se encontraban vivos o muertos, considerando esta problemática fue que se planteó realizar un sistema de red celular portable, para brindar el servicio inmediato en situación como las ocurridas en el Ecuador y además, poder incluir a los sector vulnerados por las operadoras móviles convencionales, permitiendo que estos sectores se involucren con la tecnología móvil celular.

El desarrollo de un prototipo de estación base celular de código abierto, permitió la eficiente ejecución de una red análoga al estándar GSM, mismo sistema que se lo puede utilizar como red suplementaria, en vista que las redes móviles se pueden implementar de una forma más fácil y rápida en comparación con otro tipo de redes de datos.

El estudio previo de las diferentes tecnologías para implementar una red GSM basada en hardware y software libre, permitió contrastar perfectamente que tipo de sistema de red (software) y la tecnología de los SDR para implementar redes de este tipo, obteniendo de esta manera los conocimientos y bases sólidas para la realización del prototipo de red GSM. El uso del proyecto *YateBTS* en procesos de emulación de redes GSM tiene una gran acogida ya que como se vio en la revisión literaria posee mayores ventajas en comparación con otros sistema que realizan el mismo trabajo, ventajas entre las cuales se destacan, código fuente más entendible al usuario final para posibles modificaciones, asignación de numeración a las estaciones móviles, ocupa un hardware de bajo costo, cuenta con su propia interfaz gráfica para la configuración de todo el sistema de red, estabilidad y bajo consumo, entre otros.

Al mismo tiempo, se realizó el estudio de hardware, se hizo una comparación de las diferentes tecnologías de SDR, estudio que llevó a la conclusión de utilizar el SDR *BladeRF X40*, por el costo del equipo y la aplicación que se le iba a dar en la implementación del prototipo de red GSM.

Se realizó el estudio del estándar GSM, para poder implementar una red similar bajo los mismos estándares, mismo que especifican el cumplimiento de los parámetros de la red, no incluyen especificaciones técnicas de hardware. En base a estos conocimientos previos se pudo realizar la correcta configuración de la BTS.

A continuación, ya con los conocimientos bien claros se procedió a la instalación del sistema de red y la respectiva configuración del prototipo considerando su desempeño en el campo.

Por lo tanto, con la red GSM ya implementada y funcional, se procedió a realizar diferentes pruebas de campo (laboratorio), como detección de la red por los dispositivos móviles, potencia de la señal receptada y retardos en los servicios, con la realización de la prueba de alcance y potencia de recepción se comprobó que área de cobertura tiene la red, el valor oscila en un intervalo de (-85 ± 3) dBm, este valor sirvió de referencia para la realización de las diferentes pruebas de campo.

En base a todo lo antes mencionado sobre el trabajo se pudo verificar la importancia de contar con una red GSM suplementaria de bajo costo y sobre todo la aplicación del proyecto *YateBTS* y *BladeRF*, puesto que estos permitieron la obtención, interpretación e implementación confiable de la red, con funcionamiento estable. Se implementó la red en una banda GSM libre de interferencias, permitiendo de esta manera la toma de decisiones acertadas para el funcionamiento de la red, de igual forma no causar interferencia con las demás redes móviles.

Para finalizar, cabe recalcar los problemas técnicos que se presentaron a lo largo de la implementación del prototipo fueron: sistema operativo Ubuntu no compatible con las dependencias del sistema de red, versiones de *YateBTS* y *Yate* que sean compatibles con *BladeRF*, configuración del sistema entre otros. No obstante, se pueden hacer mejoras al prototipo implementado como, ampliación de la cobertura de red, sistema de red que ofrezca el servicio GPRS (internet), sistema de red propiamente de emergencia que se encuentre enlazado a la línea de socorro 911 entre otras mejoras y nuevas aplicaciones partiendo del sistema implementado. En el **anexo VI** se puede observar el costo de implementación del prototipo de red GSM.

8. CONCLUSIONES

Cumplidos finalmente los objetivos planteados y finalizado el trabajo de investigación se concluye con lo siguiente:

- Se ha logrado construir una red celular móvil para contribuir en la atención de los desastres naturales, donde las redes de telecomunicaciones son las más afectadas, además, se ha comprobado que por medio de las comunicaciones se puede brindar ayuda más eficiente, por la localización de los afectados. No obstante, esta red GSM puede ser implementada en lugares vulnerados por las operadoras móviles comerciales.
- El sistema *YateBTS* reduce considerablemente el costo de infraestructura, minimizando el costo de implementación en un 70 % en equipos, en comparación a la infraestructura de las operadoras móviles comerciales.
- Queda demostrado, que la telefonía móvil celular GSM basada en SDR tiene un sistema de restauración más rápida comparada con otros sistemas como la televisión o la radio.
- Dado el impacto de hardware y software de código abierto, mismo que es efectivo en el desarrollo de la tecnología celular GSM, enormes oportunidades están aquí para investigar y mejorar la red GSM en gran medida. Estos tipos de hardware y software abiertos crean oportunidad para que los investigadores jóvenes aprendan detalles sobre estándares, protocolos, cifrado y la descripción de datos de GSM.
- La red GSM implementada tiene una potencia de recepción en el rango de -85 ± 3 dBm, este nivel de potencia permite a las estaciones móviles transmitir sus datos sin mayor interferencia, en base a esta potencia se logró hacer las pruebas de funcionamiento en dos entornos diferentes *indoor*, *outdoor*, obteniendo un déficit del 50 % menos de cobertura de red en el entorno *indoor*, esto se debió a los obstáculos presentes en este entorno, no obstante, se logró determinar el área de cobertura de la BTS en interiores y exteriores con un alcance de 225 y 625 πm^2 respectivamente.

- En cuanto al retardo del servicio de SMS, se obtuvo un retardo promedio de envío de 8.8 segundos y un retardo de respuesta de 9 segundos esto en un entorno sin interferencia, así mismo, se obtuvo los valores para un entorno con interferencia dando como resultado un promedio de retraso para el envío de 11.75 segundos y un retardo de respuesta promedio de 9.75 segundos.
- La calidad de audio de la red implementada depende directamente de la potencia de transmisión, logrando un alcance de señal para una calidad de audio aceptable de 30 a 40 metros en exteriores y de 20 a 30 metros en interiores.

9. RECOMENDACIONES

- Es recomendable utilizar la versión de Ubuntu 14.04 LTS o superiores, por la disponibilidad de actualización de las dependencias del SDR *BladeRF*.
- Es recomendable estudiar previamente cada parte del sistema *YateBTS* para reconocer cualquier error que se presente en la instalación o configuración de la puesta en marcha de la red.
- Si en la terminal de Ubuntu, al iniciar la BTS aparece un mensaje de transceptor no encontrado se debe detener el sistema desconectar el SDR y conectarlo en otro puerto USB 3.0, para que se reinicie el firmware del *BladeRF*.
- Se recomienda manipular con precaución la tarjeta de radio SDR, con el fin de evitar inconvenientes o posterior una avería que pueda arruinar el funcionamiento del sistema de red.
- Es de vital importancia utilizar una máquina física de Linux con sistema operativo Ubuntu para el correcto funcionamiento de la red, no obstante, en máquinas virtuales el sistema no funcionara.
- Evitar utilizar el sistema *YateBTS* para realizar cualquier acto delictivo, debido a que este sistema presenta las especificaciones de red suficientes para confundir a cualquier persona que esté utilizando las redes móviles GSM para comunicarse, evite ser sancionado por interferir con el espectro radioeléctrico sin tener la debida licencia de operación.
- Modificar el sistema, mejorar la potencia de transmisión, agregar nuevos servicios como internet, hacer uso de varios SDR para dar mayor cobertura de red.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. A. Cooper, *Integration of Open-Source GSM Networks*, Virginia, 2012.
- [2] K. Finley, «Out in the Open: This Super-Cheap Cellphone Network Brings Coverage Almost Any where,» 2014 septiembre 6. [En línea]. Available: www.wired.com/2014/06/openbts. [Último acceso: 22 mayo 2017].
- [3] M. M. I. Md. Habibur Rahman, «An Empirical Approach to Autonomous GSM BTS based on OSS and OAH,» *IEEE*, pp. 1-5, 2017.
- [4] D. Takahashi, «DEMO: Range Networks rings in cell-phone service for \$2 a month,» 14 septiembre 2010. [En línea]. Available: www.venturebeat.com/2010/09/14/demo-range-networks-cheap-cell-phone-service/. [Último acceso: 23 mayo 2017].
- [5] B. David, «FAKALOFALAHI ATU, The OpenBTS Chronicles,» 7 marzo 2010. [En línea]. [Último acceso: 23 mayo 2017].
- [6] M. J. C. V. Fulvio Andrés Carrasco Cabrera, *Diseño de un plan de telecomunicaciones para emergencias en desastres naturales en Ecuador*, Guayaquil, 2016.
- [7] A. N. d. e. Ecuador, *Ley Orgánica de Telecomunicaciones*, Quito, 2015.
- [8] G. X. A. M. Neethu Prasannan, «OpenBTS based microtelecom model: A socio-economic boon to rural communities,» *IEEE*, pp. 856-861, 2013.
- [9] Hernandez, «GSM,» de *Operación de una radio base celular cuando coexisten GSM & TDMA.*, México, pp. 63-100.
- [10] L. M. T. M. R. S. José María Hernando Rábanos, *Comunicaciones móviles*, Madrid: Universitaria Ramón Areces, 1998.
- [11] J. P. Tene Castillo, «<http://dspace.utpl.edu.ec>,» septiembre 2013. [En línea]. Available: http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/7993/1/Tesis_TeneCastilloJuanPablo.pdf. [Último acceso: 30 enero 2017].
- [12] «Operacion de una radio celular cuando coexiste GSM y TDMA,» de *GSM*, pp. 63-115.
- [13] «yatebts.com,» [En línea]. Available: www.yatebts.com. [Último acceso: 1 febrero 2017].
- [14] N. NETWORKS, «www.roggework.net,» NOKIA, junio 2002. [En línea]. Available: http://www.roggework.net/uploads/media/Student_-_GSM_Architecture.pdf. [Último acceso: 1 febrero 2017].
- [15] I. d. m. GmbH, «[mcc-mnc.com](http://www.mcc-mnc.com),» 2011. [En línea]. Available: <http://www.mcc-mnc.com/>. [Último acceso: 1 febrero 2017].
- [16] J. T. J. Penttinen, *The Telecommunications handbook*, United kingdom, 2015.

- [17] A. R. Mishra, Cellular Network Planning and Optimisation, USA: John Wiley & Sons, 2004.
- [18] C. M. D. fernando, «Monitoreo del servicio de telefonía IP de la red de telemedicina Tutupali: fase I,» Loja, 2012.
- [19] E. Rescorla, «An Introduction to Standards-Based VoIP: SIP, RTP,» *IEEE Journals & Magazines*, vol. 14, pp. 69-73, 2010.
- [20] R. G. Juan Vicente Capella, Practicas de Redes de Área Local E interconexión de Redes, Valencia, 2010.
- [21] D. M. Yi Han, «Determination of bit-rate adaptation threshold for the Opus codec for VoIP services,» *IEEE*, pp. 1-7, 2014.
- [22] I. A. G. Quintero, «SDR: la alternativa para la evolucion inalámbrica a nivel fisico».
- [23] M. J. T. M. Jaqueline Moncerrath Romero Figueroa, *Estudio de factibilidad para la implementacion de un sistema de telefonía IP, utilizando software de código abierto*, Cuenca, 2008.
- [24] N. Team, «YATE (Yet Anoyher Telephony Engine),» 25 abril 2014. [En línea]. Available: Yate.ro. [Último acceso: 22 abril 2017].
- [25] K. v. Rijsbergen, «The effectiveness of a homemade IMSI catcher build with YateBTS and a BladeRF,» 2016.
- [26] «YateBTS,» [En línea]. Available: http://wiki.yatebts.com/index.php/Main_Page. [Último acceso: 17 07 2017].
- [27] «Nuand,» [En línea]. Available: www.nuand.com. [Último acceso: 17 julio 2017].
- [28] T. Killian, «Taylor Killian,» 7 agosto 2013. [En línea]. Available: <http://www.taylorkillian.com/2013/08/sdr-showdown-hackrf-vs-bladerf-vs-usrp.html>. [Último acceso: 21 julio 2017].
- [29] Nuand, «Github,» 29 diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://github.com/Nuand/bladeRF/wiki>. [Último acceso: 22 julio 2017].
- [30] S. Margaritelli, «Evilsocket,» 31 marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.evilssocket.net/2016/03/31/how-to-build-your-own-rogue-gsm-bts-for-fun-and-profit/>. [Último acceso: 22 julio 2017].
- [31] Nuand, «GitHub,» 23 mayo 2016. [En línea]. Available: <https://github.com/Nuand/bladeRF/wiki/Getting-Started%3A-Verifying-Basic-Device-Operation>. [Último acceso: 22 julio 2017].
- [32] S. Margaritelli, «Github,» 31 marzo 2016. [En línea]. Available: <https://github.com/evilsocket/evilbts>. [Último acceso: 24 julio 2017].

- [33] GmbH, «country networks,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.mcc-mnc.com/>.
[Último acceso: 24 julio 2017].
- [34] «Konectado,» [En línea]. Available: http://www.konectado.com/file/Medicion_MOS.pdf.
[Último acceso: 24 julio 2017].
- [35] C. H. Christian Bettstetter, GSM Digital Cellular Communication System, New York: John G. Proakis, 2003.

11. ANEXOS

ANEXO I: ABREVIATURAS

| | |
|------|--|
| BTS | Base Transceiver Station (Estación base transmisora – receptora) |
| GSM | Global System for Mobile Communications (sistema global para las comunicaciones móviles) |
| SDR | Software Defined Radio (Radio definida por software) |
| VoIP | Voice over IP (Voz sobre el protocolo de internet) |
| PBX | Private Branch Exchange (Central de conmutación telefónica) |
| TDMA | Time Division Multiple Access (Acceso múltiple por división de tiempo) |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access (Acceso múltiple por división de frecuencia) |
| GMSK | Gaussian Minimum Shift Keying (Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano) |
| FSK | Frequency Shift Keying (Modulación por desplazamiento de frecuencia) |
| PSTN | Public Switched Telephone Network (Red telefónica pública conmutada) |
| TCP | Transmission Control Protocol (Protocolo de control de transmisión) |
| UDP | User Datagram Protocol (Protocolo de datagrama de usuario) |
| SIP | Session Initiation Protocol (Protocolo de inicio de sección) |
| RTP | Real-time Transport Protocol (Protocolo de transporte en tiempo real) |
| DSP | Digital Signal Processor (Procesador digital de señales) |

| | |
|-------|---|
| FPGA | Field Programmable Gate Array (Arreglo de compuertas programables por el usuario) |
| GPL | GNU General Public License (Licencia publica general GNU) |
| AGPL | GNU Affero General Public License (Licencia publica general de Affero GNU) |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones) |
| ARFCN | Absolute Radio – Frequency Channel Number (Número de canal de radiofrecuencia absoluto) |
| MS | Mobile Station (Estación móvil) |
| NSS | Network Switching Subsystem (Subsistema de conmutación de red) |
| BSS | Base Station Subsystem (Subsistema de estación base) |
| BSC | Controlled Base Station (controlador de estación base) |
| HLR | Home Location Register (Registro de ubicación base) |
| AuC | Authentication Center (Centro de autenticación) |
| VLR | Visitor Location Register (Registro de ubicación de visitante) |
| EIR | Equipment Identity Register (Registro de identidad de equipo) |
| MSC | Mobile Switching Station (Central de conmutación móvil) |
| SIM | Subscriber Identity Module (Módulo de identificación de abonado) |
| IMEI | International Mobile Station Equipment Identity (Identidad internacional de equipo móvil) |
| IMSI | International Mobile Subscriber Identity (Identificador Internacional de Abonados Móviles) |
| MCC | Mobile Country Code (Código de país móvil) |
| MNC | Mobile Network Code (Código de red móvil) |

ANEXO II: HARDWARE DEL SISTEMA DE RED GSM

En la figura 34, se indica todos los dispositivos para implementar la red GSM:

- Computador portátil.
- Kit *BladeRF* X40 (<https://www.nuand.com/>)
- Antenas RX y TX para GSM (<https://www.sparkfun.com/products/675>)
- Equipos celulares

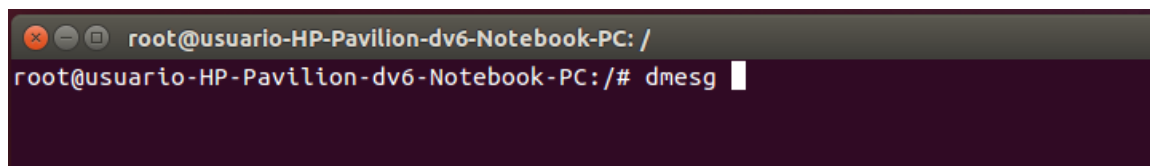


Figura 34. Equipos para implementar la red GSM

Fuente: Elaboración propia.

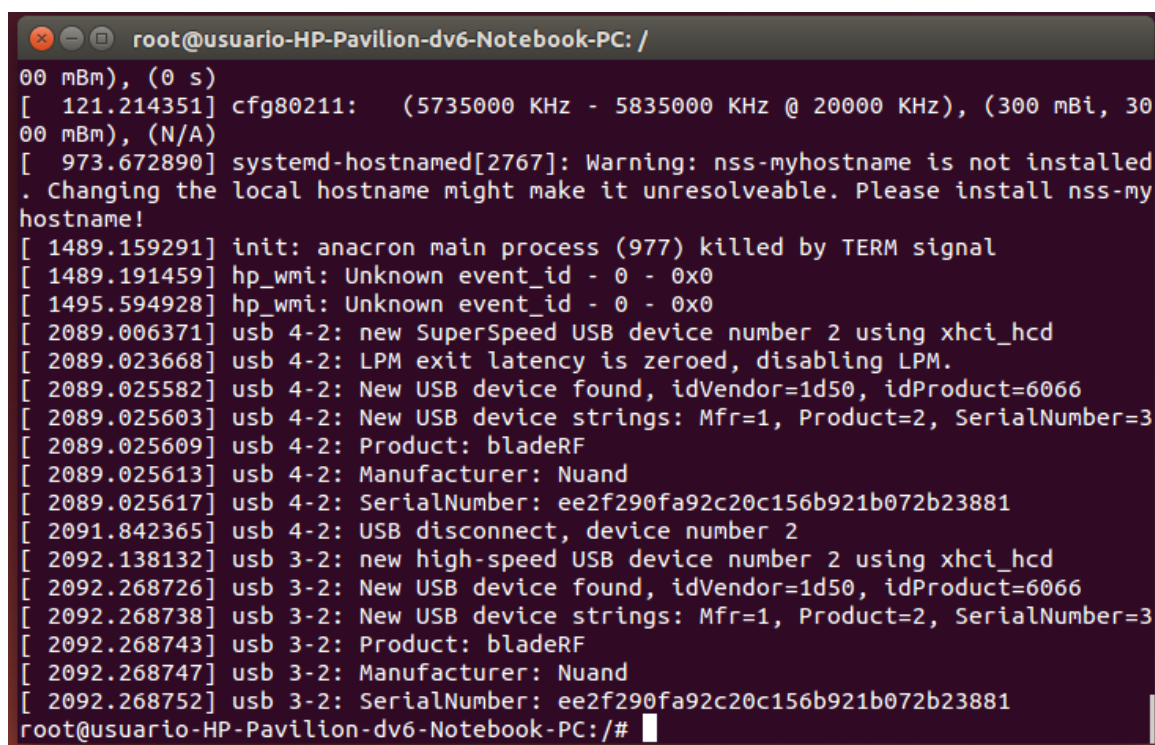
ANEXO III: PRUEBAS DEL *BLADERF X40*

Este anexo muestra como ejercer algunas operaciones de funcionamiento del dispositivo *BladeRf*, mediante el programa *BladeRF-cli* o la interfaz de línea de comandos como se indica en la figura 35.



```
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC: /
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC: /# dmesg
```

- a) Comando para comprobar que el equipo se encuentre conectado.



```
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC: /
00 mBm), (0 s)
[ 121.214351] cfg80211: (5735000 KHz - 5835000 KHz @ 20000 KHz), (300 mBi, 30
00 mBm), (N/A)
[ 973.672890] systemd-hostnamed[2767]: Warning: nss-myhostname is not installed
. Changing the local hostname might make it unresolveable. Please install nss-my
hostname!
[ 1489.159291] init: anacron main process (977) killed by TERM signal
[ 1489.191459] hp_wmi: Unknown event_id - 0 - 0x0
[ 1495.594928] hp_wmi: Unknown event_id - 0 - 0x0
[ 2089.006371] usb 4-2: new SuperSpeed USB device number 2 using xhci_hcd
[ 2089.023668] usb 4-2: LPM exit latency is zeroed, disabling LPM.
[ 2089.025582] usb 4-2: New USB device found, idVendor=1d50, idProduct=6066
[ 2089.025603] usb 4-2: New USB device strings: Mfr=1, Product=2, SerialNumber=3
[ 2089.025609] usb 4-2: Product: bladeRF
[ 2089.025613] usb 4-2: Manufacturer: Nuand
[ 2089.025617] usb 4-2: SerialNumber: ee2f290fa92c20c156b921b072b23881
[ 2091.842365] usb 4-2: USB disconnect, device number 2
[ 2092.138132] usb 3-2: new high-speed USB device number 2 using xhci_hcd
[ 2092.268726] usb 3-2: New USB device found, idVendor=1d50, idProduct=6066
[ 2092.268738] usb 3-2: New USB device strings: Mfr=1, Product=2, SerialNumber=3
[ 2092.268743] usb 3-2: Product: bladeRF
[ 2092.268747] usb 3-2: Manufacturer: Nuand
[ 2092.268752] usb 3-2: SerialNumber: ee2f290fa92c20c156b921b072b23881
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC: /#
```

- b) Comprobación del comando *dmesg*

```
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC:/tmp# bladeRF-cli -i
bladeRF> version

bladeRF-cli version:      1.4.0-git-fcd775f
libbladeRF version:      1.7.2-git-fcd775f

Firmware version:        1.9.1
FPGA version:            0.1.2

bladeRF> █
```

- c) Ejecución de la interfaz de línea de comando y verificación de las versiones instaladas

```
bladeRF> p

RX Bandwidth:    1500000 Hz
TX Bandwidth:    1500000 Hz

RX Frequency:    824800000 Hz
TX Frequency:    869800000 Hz

GPIO: 0x000100d7
LMS Enable:      Enabled
LMS RX Enable:   Enabled
LMS TX Enable:   Enabled
TX Band:         Low Band (300M - 1.5GHz)
RX Band:         Low Band (300M - 1.5GHz)
RX Source:       LMS6002D
```

- d) Verificación de los parámetros de funcionamiento del radio

```
bladeRF> info

Serial #:          ee2f290fa92c20c156b921b072b23881
VCTCX0 DAC calibration: 0x8e09
FPGA size:         40 KLE
FPGA loaded:       yes
USB bus:           3
USB address:       2
USB speed:         Hi-Speed
Backend:           libusb
Instance:          0
```

e) Información general del dispositivo

Figura 35. Comprobación de BladeRF X40.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO IV: CONEXIÓN DEL HARDWARE AL SISTEMA

Para la correcta instalación de todo el sistema de red se debe hacer la correcta instalación del dispositivo SDR *BladeRF*:

- Conectar el BladeRF a un puerto USB 3.0
- Verificar la dirección IP del servidor para continuar con la respectiva instalación y configuración.



a) Conexión del equipo

```
wlan0    Link encap:Ethernet  direcciónHW 20:10:7a:2a:54:6d  
         Direc. inet:192.168.1.16  Difus.:192.168.1.63  Másc:255.255.255.192  
         Dirección inet6: fd4c:8bef:589c:6700:2210:7aff:fe2a:546d/64  Alcance:G
```

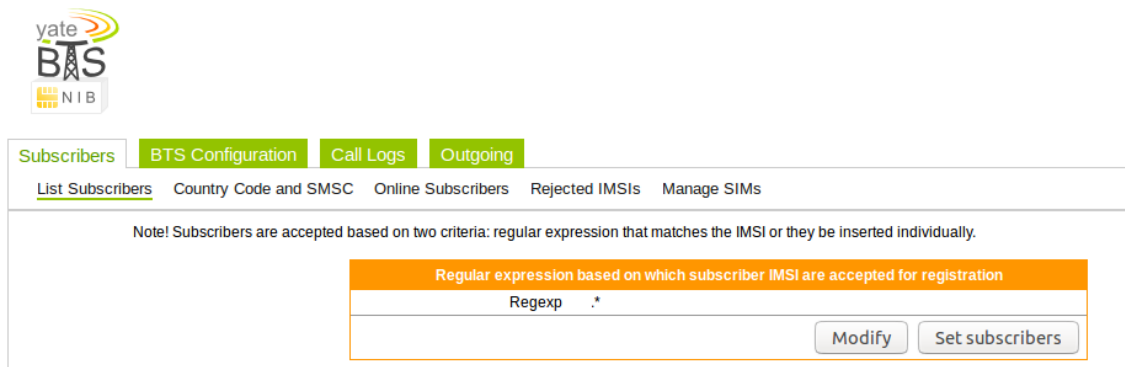
b) Verificación de la dirección IP del servidor con el comando *ifconfig*

Figura 36. Conexión de sistema de red.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO V: CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE RED GSM

- Configuración por interfaz gráfica



The screenshot displays the YateBTS N1B web interface. At the top left is the logo with the text "yate", "BTS", and "N1B". Below the logo is a navigation bar with tabs: "Subscribers", "BTS Configuration", "Call Logs", and "Outgoing". Under the "Subscribers" tab, there are sub-links: "List Subscribers", "Country Code and SMSC", "Online Subscribers", "Rejected IMSIs", and "Manage SIMs". A note states: "Note! Subscribers are accepted based on two criteria: regular expression that matches the IMSI or they be inserted individually." Below this note is a form titled "Regular expression based on which subscriber IMSI are accepted for registration". The form contains a label "Regexp" and a text input field with the value ".*". To the right of the input field are two buttons: "Modify" and "Set subscribers".

- a) Configuración de la lista de subscriptores para que se puedan conectar todos los dispositivos que estén dentro de la cobertura de la red implementada.

Subscribers

BTS Configuration

Call Logs

Outgoing

GSM

GPRS

Control

Transceiver

Tapping

Test

YBTS

GSM

GSM Advanced

Set parameters values for section [gsm] to be written in ybts.conf file.

| | | |
|-------------------------------|----------------------|---|
| Radio.Band | GSM850 | ? |
| Radio.CO | #128 : 869.2 MHz dov | ? |
| Identity.MCC | 001 | ? |
| Identity.MNC | 01 | ? |
| Identity.LAC | 1000 | ? |
| Identity.CI | 10 | ? |
| Identity.BSIC.BCC | 2 | ? |
| Identity.BSIC.NCC | 0 | ? |
| Identity.ShortName | UNL | ? |
| Radio.PowerManager.MaxAttenDB | 35 | ? |
| Radio.PowerManager.MinAttenDB | 35 | ? |

Submit

Reset

b) Configuración de los parámetros de la estación base

Figura 37. Configuración de la estación base mediante la interfaz gráfica.

Fuente: Elaboración propia.

- Configuración por la interfaz de línea de comandos

```
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC:/usr/local/etc/yate# nano ybts.conf
```

```
GNU nano 2.2.6 Archivo: ybts.conf

[gsms]
;The GSM operating band.
;Valid values are 850 (GSM850), 900 (PGSM900), 1800 (DCS1800) and 1900 (PCS1900).
;For non-multiband units, this value is dictated by the hardware and should not be changed.
Radio.Band=850

;The C0 ARFCN. Also the base ARFCN for a multi-ARFCN configuration. Valid values depend on the selected Radio.Band.
; GSM850: 128..251.
; EGSM900: 0..124 or 975..1023.
; DCS1800: 512..885.
; PCS1900: 512..810.
;THERE IS NO DEFAULT, YOU MUST SET A VALUE HERE!
Radio.C0=128

;Mobile country code, must be three digits.
;The value 001 is reserved for test networks.
;Defaults to 001 (Test Network)
Identity.MCC=001

;Mobile network code, two or three digits.
;The value 01 is usual for test networks with MCC 001.
;Defaults to 01 (Test Network, only in association with Identity.MCC=001)
Identity.MNC=01

;Location area code, 16 bits, values 0xFFxx are reserved.
;For multi-BTS networks, assign a unique LAC to each BTS unit.
;Interval allowed: 0..65280.
;Defaults to 1000 (arbitrary)
Identity.LAC=1000

;Cell ID, 16 bits, should be unique.
;Interval allowed: 0..65535.
;Defaults to 10 (arbitrary)
Identity.CI=10
```

a) Configuración de los parámetros de la estación base

```
root@usuario-HP-Pavilion-dv6-Notebook-PC:/usr/local/etc/yate# nano subscribers.conf
```

```
!!! NOTE !!!
;This file is used when YateBTS is in NIB (Network in a box) mode
;File generated by the YateBTS NIB interface

[general]
; Your Country code (where YateBTS is installed)
;Ex: 1 for US, 44 for UK
;country_code=

;Subscribers are accepted by either matching the IMSI against this configured
;regular expression or by setting subscribers individually
;Note! If a regular expression is used, 2G/3G authentication cannot be used.
;Ex: regexp=^001
;regexp=
regexp=.*
```

b) Configuración de la expresión irregular

Figura 38. Configuración de la estación base mediante la línea de comandos del *BladeRF*.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO VI: COSTO DEL PROTOTIPO

Tabla 12. Costo del prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

| Unidad | Descripción | Valor unitario | Valor total |
|--------------|---------------------|----------------|-------------------|
| 1 u | Kit BladeRF x40 | \$ 420.00 | \$ 420.00 |
| 1u | Computador portátil | \$ 700.00 | \$ 700.00 |
| 2 u | Antenas | \$ 8.00 | \$ 16.00 |
| 1 u | Carcasa | \$ 20.00 | \$ 20.00 |
| TOTAL | | | \$ 1156.00 |