

ESTACIÓN DE COMUNICACIÓN MÓVIL GSM BASADA EN SDR



**Diego Fernando Galvis Calambás
José Luis Sandoval Jácome**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de I+D GNTT
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
Popayán, Cauca
2022**



Estación de comunicación móvil GSM basado en SDR
Diego Fernando Galvis Calambás – José Luis Sandoval Jácome

ESTACIÓN DE COMUNICACIÓN MÓVIL GSM BASADA EN SDR



Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Magister en
Telecomunicaciones

Diego Fernando Galvis Calambás
José Luis Sandoval Jácome

Directora: Msc. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de I+D GNTT
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
Popayán, Cauca
2022



Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Estándar GSM</i>	4
1.1.1 Arquitectura de Red GSM.....	5
1.1.2 Interfaces Arquitectura GSM.....	8
1.1.3 Protocolos de Comunicación GSM.....	9
1.1.4 Acceso al Medio.....	10
1.2 <i>Radio Definida por Software</i>	11
1.3 <i>Plataformas Hardware para Implementación de SDR</i>	13
1.3.1 Plataformas Basadas en Procesadores de Propósito General.....	13
1.3.2 Plataformas Basadas en GPU.....	15
1.3.3 Plataformas Basadas en DSP.....	15
1.4 <i>Estaciones Base Basadas en Hardware y Software Libre</i>	16
1.4.1 OpenBTS.....	16
1.4.2 Yet Another Telephony Engine (YATE).....	20
2. DESARROLLO METODOLÓGICO	22
2.1 <i>Requerimientos del Sistema</i>	22
2.1.1 Requerimientos Funcionales.....	22
2.1.2 Requerimientos no Funcionales.....	23
2.2 <i>Diseño de la Estación de Comunicación Móvil GSM Basada en SDR</i>	23
2.2.1 Arquitectura Red GSM Basada en SDR.....	23
2.2.2 Arquitectura de Red GSM Definitiva.....	28
2.2.3 Diseño de Pruebas Validación de Servicios Estación de Comunicación.....	29
2.3 <i>Implementación Estación de Comunicación Móvil</i>	31
2.3.1 Instalación Infraestructura de Red.....	31
2.3.2 Instalación y Carga de Componentes.....	32
2.3.3 Inicialización Estación de Comunicación GSM Basada en SDR.....	32
2.3.4 Configuración Parámetros de Estación Base.....	38
3. RESULTADOS	44
3.1 <i>Verificación de Servicios</i>	44
3.2 <i>Búsqueda de Red en Terminales Móviles</i>	44
3.2.1 Alcatel Onetouch.....	44
3.2.2 Samsung Galaxy J6+.....	45
3.3 <i>Pruebas de Conectividad</i>	46
3.3.1 Frecuencia de Trabajo.....	46
3.3.2 Ancho de Banda.....	49
3.3.3 OpenBTS.....	51
3.3.4 Asterisk.....	53
3.3.5 SMS.....	53
3.3.6 Llamadas de Voz GSM.....	55
3.3.7 Llamadas de Voz Simultáneas en la Estación.....	60
3.4 <i>Análisis de Desempeño de la Estación de Comunicación</i>	64
3.4.1 Escenario Exteriores.....	64
3.4.2 Escenario Interiores.....	75



3.5	<i>Comparación Resultados Experimentales con Métodos Empíricos</i>	85
3.5.1	Modelo LOS Exterior	86
3.5.2	Modelo LOS – NLOS Interior	91
3.6	<i>Rendimiento Máquina Virtual</i>	98
4.	CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	100
4.1	<i>Conclusiones</i>	100
4.2	<i>Recomendaciones</i>	102
4.3	<i>Trabajos Futuros</i>	103
	BIBLIOGRAFÍA	104



LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Elementos de una red GSM	5
Ilustración 2. Detalle Subsistema GSM e Interfaces	8
Ilustración 3. Pila protocolos GSM	9
Ilustración 4. Banda de frecuencias GSM 900 MHz	10
Ilustración 5. Diagrama de bloques Arquitectura SDR ideal.....	12
Ilustración 6. Diagrama en bloques recepción SDR real	13
Ilustración 7. Universal Software Radio Peripheral (USRP)	14
Ilustración 8. Arquitectura OpenBTS	18
Ilustración 9. Fases desarrollo de la estación de comunicación móvil GSM	22
Ilustración 10. Arquitectura de red GSM basada en software libre.....	23
Ilustración 11. Vista frontal y posterior USRP B210	26
Ilustración 12. Logo sistema operativo máquina virtual.....	28
Ilustración 13. GSM tradicional vs. GSM basado en SDR	29
Ilustración 14. Diagrama flujo toma de medidas desempeño estación	31
Ilustración 15. Inicialización módulo transceptor estación GSM.....	33
Ilustración 16. Inicialización módulo OpenBTS estación GSM 1/2	33
Ilustración 17. Inicialización módulo OpenBTS estación GSM 2/2	34
Ilustración 18. Inicialización módulo smqueue estación GSM	34
Ilustración 19. Inicialización módulo sipauthserve estación GSM.....	34
Ilustración 20. Inicialización Asterisk estación GSM 1/2	35
Ilustración 21. Inicialización Asterisk estación GSM 2/2	36
Ilustración 22. Inicialización consola OpenBTSCCLI estación GSM.....	36
Ilustración 23. Comando "help" en OpenBTSCCLI	37
Ilustración 24. Comando "version" en OpenBTSCCLI	37
Ilustración 25. Comando "config" en OpenBTSCCLI 1/2	37
Ilustración 26. Comando "config" en OpenBTSCCLI 2/2	37
Ilustración 27. Configuración registro cualquier dispositivo móvil	38
Ilustración 28. Configuración banda 900 MHz estación GSM.....	38
Ilustración 29. Validación cambio de banda estación de comunicación GSM	39
Ilustración 30. Configuración bandas 850 y 1800 MHz estación GSM	39
Ilustración 31. Configuración canal para banda GSM 850 MHz	40
Ilustración 32. Configuración ganancia de antena USRP.....	40
Ilustración 33. Conexión red y mensaje de bienvenida Samsung J6+	41
Ilustración 34. Conexión red y mensaje de bienvenida Alcatel Onetouch	41
Ilustración 35. Salida configuración MCC MNC.....	42
Ilustración 36. Detalle paquete NodeManager	42
Ilustración 37. Usuarios registrados Sipauthserve	43
Ilustración 38. Validación servicios con procesos activos en Ubuntu 16.04	44
Ilustración 39. Lista de red en Alcatel Onetouch.....	45



Ilustración 40. Lista de red en Samsung Galaxy J6+	45
Ilustración 41. Conexión medidas de frecuencia con R&S ZVL.....	46
Ilustración 42. Frecuencias banda 850 GSM ARFCN 130.....	47
Ilustración 43. Frecuencias banda 900 GSM ARFCN 50	47
Ilustración 44. Frecuencias banda 900 GSM ARFCN 50 y 100.....	48
Ilustración 45. Frecuencias banda 1800 GSM ARFCN 512	48
Ilustración 46. Ancho de banda GSM 850	50
Ilustración 47. Ancho de banda GSM 900	50
Ilustración 48. Ancho de banda GSM 1800.....	51
Ilustración 49. MS conectados a OpenBTS, tiempo de actividad estación.....	52
Ilustración 50. Validación conexión MS a Asterisk.....	53
Ilustración 51. SMS desde Samsung J6 para Alcatel	53
Ilustración 52. SMS desde Alcatel para Alcatel	54
Ilustración 53. SMS desde Alcatel para Samsung J6	54
Ilustración 54. SMS desde OpenBTS para Samsung J6	54
Ilustración 55. SMS desde OpenBTS para Alcatel.....	54
Ilustración 56. Establecimiento de llamada desde J6+ a Alcatel Onetouch	56
Ilustración 57. Canales establecidos llamada desde J6+ a Alcatel	57
Ilustración 58. Llamadas establecidas llamada desde J6+ a alcatel.....	57
Ilustración 59. Canales con carga en GSM llamada desde J6+ a alcatel	57
Ilustración 60. Establecimiento llamada Asterisk desde J6+ a Alcatel.....	58
Ilustración 61. Establecimiento canales desde J6+ a Alcatel desde Asterisk.....	58
Ilustración 62. Detalle canales en llamada desde J6+ a Alcatel	58
Ilustración 63. Estado canales llamada desde J6+ a Alcatel	58
Ilustración 64. Establecimiento de llamada desde Alcatel Onetouch a J6+	59
Ilustración 65. Establecimiento llamada Asterisk desde Alcatel a J6+	59
Ilustración 66. Establecimiento canales Asterisk desde Alcatel a J6+	59
Ilustración 67. Detalle canales en llamada desde Alcatel a J6+	59
Ilustración 68. Estado canales llamada desde Alcatel a J6+	60
Ilustración 69. Registro 8 MS en la estación.....	60
Ilustración 70. Registro MS en sip.conf y extensión.conf de Asterisk.....	60
Ilustración 71. Registro MS en Asterisk.....	61
Ilustración 72. Establecimiento 2 y 3 llamadas simultáneas.....	61
Ilustración 73. Validación 2 y 3 llamadas en OpenBTS.....	62
Ilustración 74. Validación 2 y 3 llamadas en Asterisk	62
Ilustración 75. Red ocupada en intento cuarta llamada	63
Ilustración 76. Canales activos en Asterisk y OpenbTS.....	63
Ilustración 77. Canales disponibles en OpenBTS.....	64
Ilustración 78. Escenario de pruebas exterior	65
Ilustración 79. Potencia canal subida escenario exterior 1	67



Ilustración 80. RSSI RSSP canal subida escenario exterior 1	67
Ilustración 81. SNR canal subida escenario exterior 1	68
Ilustración 82. FER, BER , BER_DL escenario exterior 1	69
Ilustración 83. TXPWR, RXLEV_DL escenario exterior 1	69
Ilustración 84. Potencia canal subida escenario exterior 2	71
Ilustración 85. Potencia canal subida GSM1800 GSM850	71
Ilustración 86. RSSI RSSP canal subida escenario exterior 2	72
Ilustración 87. RSSI RSSP canal subida escenario exterior 1 y 2.....	72
Ilustración 88. SNR canal subida escenario exterior 2	73
Ilustración 89. SNR canal subida escenario exterior 1 y 2.....	73
Ilustración 90. FER, BER, BER_DL escenario exterior 2.....	74
Ilustración 91. TXPWR, RXLEV_DL escenario exterior 2	75
Ilustración 92. TXPWR, RXLEV_DL escenario exterior 1 y 2.....	75
Ilustración 93. Plano escenario interior	76
Ilustración 94. Potencia canal subida escenario interior 1	78
Ilustración 95. RSSI RSSP canal subida escenario interior 1	79
Ilustración 96. SNR canal subida escenario interior 1	79
Ilustración 97. FER, BER , BER_DL escenario interior 1	80
Ilustración 98. TXPWR, RXLEV_DL escenario interior 1	81
Ilustración 99. Potencia canal subida escenario interior 2	82
Ilustración 100. Potencia canal subida escenario interior 1 y 2.....	82
Ilustración 101. RSSI -RSSP canal subida escenario interior 2.....	83
Ilustración 102. SNR canal subida escenario interior 2.....	84
Ilustración 103. SNR canal subida escenario interior 1 y 2.....	84
Ilustración 104. TXPWR, RXLEV_DL escenario interior 2.....	85
Ilustración 105. Potencia señal empírico, experimental, escenario exterior 1	89
Ilustración 106. Potencia señal empírico, experimental, escenario exterior 2.....	91
Ilustración 107. Potencia señal empírico, experimental, escenario interior 1	95
Ilustración 108. Potencia señal empírico, experimental, escenario interior 2.....	97
Ilustración 109. Potencia. señal empírico, experimental escenario interior 1 y 2....	97
Ilustración 110. Consumo recursos máquina virtual	98
Ilustración 111. Consumo recursos máquina física	99



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Series de especificaciones estándar GSM	4
Tabla 2. Distribución dígitos IMSI.....	6
Tabla 3. Algunos Códigos de países MCC.....	6
Tabla 4. Códigos MNC Colombia.....	6
Tabla 5. Interfaces arquitectura GSM.....	8
Tabla 6. Rango frecuencias bandas GSM.....	10
Tabla 7. Especificaciones mínimas servidor hardware.....	24
Tabla 8. Especificaciones hardware servidor	24
Tabla 9. Dispositivos móviles utilizados	26
Tabla 10. Distribuciones Ubuntu.....	27
Tabla 11. Especificaciones servidor virtual implementado.....	28
Tabla 12. Comparativa GSM tradicional vs. GSM basado en SDR.....	29
Tabla 13. Canalizaciones GSM [9]	39
Tabla 14. Descripción medidas de frecuencia tomadas con R&S ZVL.....	47
Tabla 15. Comparativo separación portadoras teórico vs obtenido	49
Tabla 16. Descripción medidas de ancho de banda tomadas con R&S ZVL	49
Tabla 17. Comparativo ancho de banda experimental, teórico	51
Tabla 18. Mensajes de texto en la estación de comunicación GSM.....	53
Tabla 19. Evidencias llamadas de voz en estación GSM.....	55
Tabla 20. Datos canal escenario exterior 1	65
Tabla 21. Datos canal escenario exterior 2.....	70
Tabla 22. Distancias localizaciones escenario interior	77
Tabla 23. Datos canal escenario interior 1	77
Tabla 24. Datos canal escenario interior 2	81
Tabla 25. Tipos de entornos LOS	86
Tabla 26. Comparación experimental, empírico LOS, escenario exterior 1	87
Tabla 27. Comparación experimental, empírico LOS, escenario exterior 2.....	90
Tabla 28. Índice variación n escenario interior.....	92
Tabla 29. Tipo de entorno de propagación interior según ubicación	92
Tabla 30. Comparación experimental, modelo empírico, escenario interior 1	93
Tabla 31. Comparación experimental, modelo empírico, escenario interior 2	95



LISTA DE ACRÓNIMOS

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i> , Proyecto de Asociación para la Tercera Generación.
2G	<i>Second Generation</i> , Segunda Generación.
3G	<i>Third Generation</i> , Tercera Generación.
4G	<i>Fourth Generation</i> , Cuarta Generación.
ADC	<i>Analogic Digital Converter</i> , Conversor Analógico Digital.
AGCH	<i>Access Grant Channel</i> , Canal Asignación de Acceso
AuC	<i>Authentication Center</i> , Centro de Autenticación.
BCCH	<i>Broadcast Control Channel</i> , Canal de Control de Difusión.
BCH	<i>Broadcast Channel</i> , Canal de Difusión.
BSC	<i>Base Station Controller</i> , Controlador de Estación Base.
BSS	<i>Base Station Subsystem</i> , Subsistema Estación Base.
BTS	<i>Base Transceiver Station</i> , Estación Base Transceptora.
BTSM	<i>Base Transceiver Station Manager</i> , Administrador Estación Base Transceptora.
CC	<i>Call Control</i> , Control de Llamadas.
CCH	<i>Control Channels</i> , Canales de Control.
CCCH	<i>Common Control Channel</i> , Canal de Control Común.
CM	<i>Communication Management</i> , Gestión de Comunicaciones.
DCCH	<i>Dedicated Control Channel</i> , Canal de Control Dedicado.
DDC	<i>Digital Down Converter</i> , Conversor Digital de Bajada.
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> , Procesador Digital de Señales
EIR	<i>Equipment Identity Register</i> , Registro de Identidad de Equipos.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> . Instituto Europeo de Estándares en Telecomunicaciones.
FACCH	<i>Fast Associated Control Channel</i> , Canal de Control Rápido Asociado.
FCCH	<i>Frequency Correction Channel</i> , Canal Corrección de Frecuencia.
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FEC	<i>Forward Error Correction</i> , Corrección de Errores hacia Adelante
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> , Matriz de Puertas Lógicas Programable en Campo
GMSC	<i>Gateway Mobile Switching Center</i> , Pasarela de Centro de Conmutación Móvil.
GPP	<i>General Purpose Processor</i> , Procesador de Propósito General.
GPU	<i>Graphic Processing Unit</i> , Unidad de Procesamiento Gráfico.
GUI	<i>Graphical User Interface</i> , Interfaz de Usuario Gráfica.
GSM	<i>Global System for Global Communications</i> , Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.
HLR	<i>Home Location Register</i> , Registro Local de Abonados.
HSS	<i>Home Subscriber Server</i> , Servidor de Suscripción Local.
IF	<i>Intermediate Frequency</i> , Frecuencia Intermedia.
IMEI	<i>International Mobile Equipment Identity</i> , Identificador Internacional de Equipo Móvil.



IMSI	<i>International Mobile Subscriber Identity</i> , Identidad de Suscriptor Móvil Internacional.
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
KUAR	<i>Kansas University Agile Radio</i> .
LAPDm	<i>Link Access Protocol on Dm Channel</i> , Protocolo de Control de Enlace de Datos para Canales Tipo D Móviles.
LMS-SDR	<i>Lime Micro-Systems - Software Defined Radio</i> , Micro-Sistemas Lime – Radio Definido por Software.
LOS	<i>Line Of Sight</i> , Línea de Vista.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución de Largo Término.
MAP	<i>Mobile Application Part</i> , Parte de Aplicación Móvil.
MCC	<i>Mobile Country Code</i> , Código de País del Móvil.
MCCH	<i>Multicast Control Channel</i> , Canal de Control de Multidifusión.
MM	<i>Mobility Management</i> , Gestión de la Movilidad.
MME	<i>Mobility Management Entity</i> , Entidad de Gestión de Movilidad.
MNC	<i>Mobile Network Code</i> , Código de Identificación de Red móvil.
MS	<i>Mobile Station</i> , Dispositivo Móvil.
MSC	<i>Mobile Switching Center</i> , Centro de Conmutación de Servicios Móviles.
MSIN	<i>Mobile Subscriber Identification Number</i> , Número de Identificación de Suscriptor Móvil.
MTP	<i>Message Transfer Pack</i> , Paquete de Transferencia de Mensajes.
NLOS	<i>No Line Of Sight</i> , Sin Línea de Vista.
NSS	<i>Network Switching Subsystem</i> , Subsistema de Conmutación de Red.
OpenBTS	<i>Open Base Transceiver Station</i> , Estación Base Transceptora Abierta.
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i> , Canal de Difusión Físico.
PC	<i>Personal Computer</i> , Computador Personal.
PCCH	<i>Paging Control Channel</i> , Canal de Control de Paging.
PCEF	<i>Policy Control Enforcement Function</i> , Función de Aplicación del Control de Políticas.
PCFICH	<i>Physical Control Format Indicator Channel</i> , Canal Indicador de Formato de Control Físico.
PCH	<i>Paging Channel</i> , Canal de Paging.
PCRF	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i> , Función de Control de Políticas y Reglas de Cobro.
PDCCH	<i>Physical Dedicated Control Channel</i> , Canal de Control Dedicado Físico.
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i> , Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos.
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> , Canal Compartido en Enlace Descendente Físico.
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> , Unidad de Datos del Protocolo.
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i> , Canal de Control en Enlace Ascendente Físico.



PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i> , Canal Compartido en Enlace Ascendente Físico.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RACH	<i>Random Access Channel</i> , Canal de Acceso Aleatorio.
RDSI	Red Digital de Servicios Integrados.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radiofrecuencia.
RLC	<i>Radio Link Control</i> , Control de Enlace Radio.
RNC	<i>Radio Network Controller</i> , Controlador de Red Radio.
RNL	<i>Radio Network Layer</i> , Capa de Red Radio.
RR	<i>Radio Resources</i> , Control de Recursos Radio.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Racional Unificado.
RTP	<i>Real Time Transport Protocol</i> , Protocolo de Transporte en Tiempo Real.
SACCH	<i>Slow Associated Control Channel</i> , Canal de Control Rápido Asociado.
SCCP	<i>Signaling Connection Control Part</i> , Parte de Control de Conexión de Señalización.
SC-FDMA	<i>Single-Carrier Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Portadora Única.
SCTP	<i>Stream Control Transmission Protocol</i> , Protocolo de Transmisión de Control de Flujo.
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , Radio Definida por Software.
SDCCH	<i>Stand Alone Dedicated Control Channel</i> , Canal Único de Control Dedicado.
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i> , Módulo de Identidad de Abonado.
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i> , Protocolo de Inicio de Sesión.
SMS	<i>Short Message Service</i> , Servicio de Mensajería Corto.
SMSG	<i>Short Message Service Gateway</i> . Puerta de Enlace de Servicio de Mensajería Corta
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SPDM	<i>Single Program Multiple Data</i> , Programa Simple de Múltiples Datos.
TCH	<i>Traffic Channels</i> , Canales de Tráfico.
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> , Protocolo de Control de Transmisión.
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TRAU	<i>Transcoding Rate and Adaptation Unit</i> , Unidad de Transcodificación.
TS	<i>Time Slot</i> , Ranura de Tiempo.
UDP	<i>User Datagram Protocol</i> , Protocolo de Datagramas de Usuario.
UL	<i>UpLink</i> , Enlace Ascendente.
Um	Interfaz Radio.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , Bus Universal Serial.
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> , Periférico Radio de Software Universal.
VLR	<i>Visitor Location Register</i> , Registro de Abonados Visitantes.
VoIP	<i>Voice Over Internet Protocol</i> , Voz Sobre Protocolo de Internet.





INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el despliegue y evolución de las redes de sistemas de comunicaciones móviles, se busca optimizar los dispositivos que los conforman, para que presenten una mejor relación costo beneficio, permitiendo así alcanzar un alto nivel de penetración de las redes de telecomunicaciones en comunidades cuya geografía es de difícil acceso, como se pretende en la política de conectividad planteada por el gobierno nacional en el congreso Andicom¹ 2019.

El despliegue de esta conectividad debería llevarse a cabo con estándares de comunicaciones que le permitan a la población obtener servicios de una manera adecuada, uno de esos estándares de comunicaciones es el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (*GSM Global System for Mobile Communications*), el estándar más usado a comienzos del siglo XXI. Se denomina estándar de segunda generación (2G) porque, a diferencia de la primera generación de teléfonos portátiles, las comunicaciones se producen de un modo completamente digital. Según la Asociación GSM² (GSMA) este estándar para el 2014 se encontraba extendido en más de un 90% alrededor de todo el mundo, contando con más de 3000 millones de usuarios en 219 países, convirtiéndose para la época en una tecnología móvil dominante, según la asociación GSMA para finales del 2019 brindaba conectividad al 30% de las conexiones a nivel global, porcentaje que es representativo, dado el auge de nuevas tecnologías como 3G con una participación del 40% y 4G con un 30 % de las conexiones.

La implementación del estándar GSM bajo dispositivos regulares se hace costoso y poco rentable en regiones geográficas en donde la densidad de población es baja; aprovechando el aumento de la capacidad de procesamiento de los dispositivos de cómputo que hoy en día existen, se hace posible sustituir algunos componentes hardware de una implementación tradicional por componentes software, los cuales cumplirían funciones equivalentes, aprovechando para introducir en estos nuevos componentes software, módulos de control y configuración que los componentes hardware tradicionales carecen; esta configuración se conoce como Radio Definida por Software (SDR, *Software Defined Radio*), la cual agrupa las técnicas empleadas para sustituir elementos hardware de un radio por equivalentes software[1], favoreciendo las implementaciones con gran flexibilidad, versatilidad y eficiencia, además de su significativo menor costo.

En la implementación de una celda de comunicación móvil con el estándar GSM basado en SDR, pueden existir diferentes arquitecturas, entre las que se encuentra una implementación directa en dispositivos FPGA (*Field Programmable Gate Array*), sin embargo este puede ser un camino más largo para obtener el propósito, pues

¹Andicom: Congreso internacional de Tecnologías de Información y Comunicaciones, que reúne a los principales actores de la industria.

² La Asociación GSM es una organización de operadores móviles y compañías relacionadas, dedicada al apoyo de la normalización, la implementación y promoción del sistema de telefonía móvil GSM.



existen iniciativas de plataformas de experimentación de acceso libre, entre las cuales se encuentra Estación Base Transceptora Abierta (OpenBTS³, *Open Base Transceiver Station* [2]) la cual genera una interfaz de aire GSM, que se usa para la comunicación entre el dispositivo móvil (*MS Mobile Station*) y la Estación Base Transceptora (*BTS Base Transceiver Station*) de una red GSM convencional. OpenBTS es un software que requiere un elemento físico que le permita tener interacción con las señales generadas desde y hacia el dispositivo móvil, para ello existen diferentes fabricantes, uno de ellos es Ettus Research, el cual provee un Periférico Radio de Software Universal (USRP, *Universal Software Radio Peripheral*, Periférico Radio de Software Universal), elemento que entre otras funciones tiene como propósito el intercambio de señales con el dispositivo móvil, el USRP puede ser gestionado por el software GNU Radio⁴, plataforma sobre la cual fue desarrollado OpenBTS, con estos dos elementos bajo la gestión del software GNU Radio, es posible tener una celda de comunicación móvil GSM, solo que estaría aislada, razón por la cual debe existir un elemento que permita una interacción con otras redes, para ello se hace uso del software Asterisk⁵ que tiene como función adicional el control y la conmutación de llamadas de la celda, permitiendo asociar la estación de comunicación móvil basada en SDR a una red de comunicación externa.

Las plataformas software de código abierto se consolidan como una alternativa para brindar un escenario de validación real en sistemas de comunicaciones móviles, enriqueciendo la aprehensión de conceptos teóricos, mejorando la preparación de futuros ingenieros para el ámbito laboral; adicionalmente, puede brindar una alternativa de comunicación digital a bajo costo, como un modelo que pueda ser implementado en zonas de baja densidad de población o como un plan de contingencia.

El presente documento aborda conceptos teóricos, de análisis, diseño y conclusiones, de una estación de comunicación móvil basada en SDR que estarán distribuidos de la siguiente forma:

Capítulo 1: marco teórico que fundamenta los principales conceptos relacionados con el estándar de comunicación GSM, introducción al concepto SDR, descripción de dispositivos USRP, OpenBTS y Asterisk como elementos fundamentales software.

Capítulo 2: metodología de trabajo, análisis de requisitos, arquitectura de red GSM basada en SDR, definición de componentes hardware y software requerido;

³ OpenBTS: Es una implementación de código abierto que permite un punto de acceso de GSM basado en software.

⁴ GNU Radio es una herramienta de desarrollo libre y abierta que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas SDR, puede ser usada con hardware de RF, o sin hardware en un ambiente de simulación.

⁵ Asterisk: Programa de software libre que proporciona funcionalidades de una central telefónica.



implementación de la estación de comunicación móvil, incluye la instalación de infraestructura de red, configuración del sistema de red BTS.

Capítulo 3: resultados donde se resaltan las pruebas de funcionamiento y la evaluación de desempeño de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR.

Capítulo 4: conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.



CAPÍTULO 1 – CONCEPTUALIZACIÓN

Las comunicaciones móviles han tenido un crecimiento vertiginoso, en unos cuantos años han pasado de analógicas a digitales, de 2G a 3G y hoy en día en pleno auge del despliegue de la cuarta generación, también vislumbrando la llegada de una quinta generación; razón por la cual el conocimiento teórico de los inicios de la generación digital es indispensable en la formación universitaria de estudiantes del programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, en este capítulo se presentan conceptos básicos del estándar de comunicación GSM, junto con una introducción a los conceptos SDR.

1.1 Estándar GSM

Iniciando la década de los ochenta, algunos países de Europa habían avanzado en sistemas de telefonía celular análoga los cuales operaban de forma independiente, limitante que motivó el desarrollo de un nuevo sistema inalámbrico móvil que permitiera itinerancia internacional (*roaming*⁶), soporte para introducción de nuevos servicios y compatibilidad con la RDSI (Red Digital de Servicios Integrados)[4]. De esta necesidad surge GSM como un estándar de comunicaciones de segunda generación que se basa en conmutación de circuitos, desarrollado por la ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*), su diseño inicial fue para servicios de voz, posteriormente se le adicionaron servicios de mensajes de texto cortos SMS (*Short Message Service*) y transferencia de datos a una tasa de 9.6 kbps. Este estándar permitió el paso de las comunicaciones de tipo analógico a comunicaciones de tipo digital, razón por la cual se le ha denominado de segunda generación 2G (*Second Generation*)[5].

El estándar de comunicación GSM en sus especificaciones describe la red, sin delimitar hardware o software, permitiendo a los proveedores ofrecer diferentes escenarios a utilizar para cumplir con las especificaciones técnicas del estándar.

Las especificaciones del estándar GSM están agrupadas en doce series, que se pueden identificar en la Tabla 1.

Tabla 1. Series de especificaciones estándar GSM [6]

SERIE	TEMA
01	Aspectos Generales
02	Normas de Servicio
03	Características de Red

⁶ El *roaming* internacional para móviles es un servicio que permite a los usuarios continuar usando sus teléfonos móviles u otros dispositivos móviles mientras visitan otro país, para realizar y recibir llamadas de voz, enviar mensajes de texto, navegar por internet y enviar y recibir correos electrónicos [3] GSMA, "Explicación de *roaming* móvil," .

04	Interfaz y Protocolos Estación Móvil - Base
05	Capa física de Red
06	Codificación voz
07	Adaptadores de terminales
08	Interfaces Estación Base – Estación Móvil
09	Funcionamiento de Redes
10	Funcionamiento de Servicios
11	Especificaciones y homologación
12	Operación y funcionamiento

1.1.1 Arquitectura de Red GSM

En la arquitectura GSM [4] se pueden diferenciar cuatro elementos, dos de los cuales son subsistemas propios de la arquitectura GSM, a saber:

- Estación móvil (*MS Mobile Station*).
- Subsistema Estación Base BSS (*Base Station Subsystem*), que corresponde al subsistema que permite la movilidad del usuario en el área de cobertura de la red.
- Subsistema Conmutación de Red NSS (*Network and Switching Subsystem*), responsable del establecimiento de la trayectoria de comunicación en la red.
- El bloque de otras redes muestra las diferentes alternativas externas con las cuales se puede establecer comunicación.

Dichos elementos se muestran en el diagrama de bloques de la Ilustración 1.

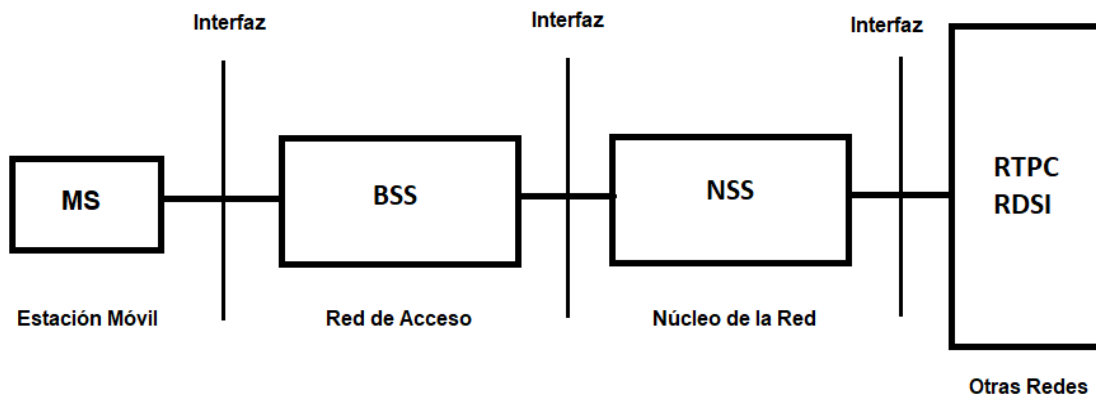


Ilustración 1. Elementos de una red GSM [3]

Es posible detallar cada uno de los bloques de la red GSM en donde se encuentran los siguientes componentes:

Estación móvil MS:

- Estación móvil MS. Corresponde al equipo físico usado por el usuario de la red GSM para acceder a los servicios suministrados por la red.



- Módulo de Identidad de Abonado SIM (*Subscriber Identity Module*). Es un chip que se encuentra inmerso en la estación móvil en donde se almacena información de identificación del abonado de la red GSM.
 - En la tarjeta SIM se almacena la Identidad de Suscriptor Móvil Internacional IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), un número internacional único que se utiliza para la mayoría de las señales relacionadas con el suscriptor en la red.
 - El IMSI como se aprecia en la Tabla 2 consta de máximo 15 dígitos, contiene el código del país del móvil MCC (*Mobile Country Code*) que identifica el país de origen del suscriptor (tres dígitos, como se aprecia en la Tabla 3); también contiene el código de red del móvil MNC (*Mobile Network Code*), que corresponde a la identificación nacional de la red del suscriptor (dos o tres dígitos, como se aprecia en la Tabla 4), ya que la generalidad muestra que en un mismo país existen varias redes independientes. Y finalmente el número de identificación del suscriptor móvil MSIN (*Mobile Subscriber Identification Number*) [7].

Tabla 2. Distribución dígitos IMSI [7]

IMSI											
MCC			MNC			MSIN					

Tabla 3. Algunos Códigos de países MCC [7]

País	MCC
Alemania	262
Australia	505
Argentina	722
Brasil	724
Chile	730
Colombia	732
Estados Unidos de América	310
España	214
Francia	208

Tabla 4. Códigos MNC Colombia [8]

País MCC	MNC	Operador
Colombia 732	001	Colombia Telecomunicaciones S.A. - Telecom
	002	EdateL S.A.
	101	Claro
	102	Bellsouth Colombia S.A. (movistar)



	103	Colombia Móvil S.A.
	111	Tigo
	123	Telefónica Móviles Colombia S.A. (movistar)
	360	Partners Telecom Colombia (WOM)

El subsistema de estación base BSS se compone por:

- Estación Base Transceptora BTS (*Base Transceiver Station*). Es el dispositivo que se encarga de establecer comunicación vía radio, entre la red y las estaciones móviles, provee la interfaz de aire del sistema, en donde se lleva a cabo señalización, cifrado, procesamiento de voz.
- Controlador de Estación Base BSC (*Base Station Controller*). Este componente de la red se encarga de las funciones centrales de la red de radio, realizando el control de uno de los subsistemas BSS, el cual está formado por el BSC y una o varias BTS administradas.
- Unidad de Transcodificación TRAU (*Transcoding Rate and Adaptation Unit*). Esta unidad pertenece al subsistema BSS y se encarga de comprimir la información en la interfaz aérea, permitiendo que tasas de datos GSM (8,16,32 Kbps) puedan ser compatibles con RDSI cuyas tasas son de 64 Kbps.

En el subsistema de conmutación de red NSS se encuentra:

- Centro de Conmutación de Servicios Móviles MSC (*Mobile Services Switching Services*). Este elemento se encarga de enrutar tráfico de llamadas entrantes y salientes, junto con la asignación de canales de usuario en la interfaz entre el MSC y las BSC.
- Registro Local de Abonados HLR (*Home Location Register*). Corresponde a la base de datos que contiene información de los abonados registrados, manteniendo actualizada la información de la posición del MS, adicional al perfil de su servicio, esto mediante la identificación de su IMSI.
- Registro de Abonados Visitantes VLR (*Visitor Location Register*). Al igual que el HLR almacena el mismo tipo de información, pero correspondiente a abonados visitantes o itinerantes.
- Centro de autenticación AuC (*Authentication Center*). Es el elemento que genera, almacena las llaves usadas para autenticación y encriptación.
- Registro de Entidad de Equipos EIR (*Equipment Identity Register*). Este elemento almacena en su base de datos información sobre el estado de la estación móvil, discriminando entre equipos autorizados y no autorizados para realizar y recibir llamadas, proceso en el que se hace uso del identificador único de equipo IMEI (*International Mobile Equipment Identity*).

- **GMSC (Gateway Mobile Switching Center).** Elemento que se encarga del enrutamiento de la llamada hacia un MSC para encontrar el MS. También se encarga de manejar las conexiones dirigidas hacia otras redes.
- **SMSG (Short Message Service Gateway).** Este elemento soporta el servicio de mensajería corta con dos interfaces de envío y de recepción.

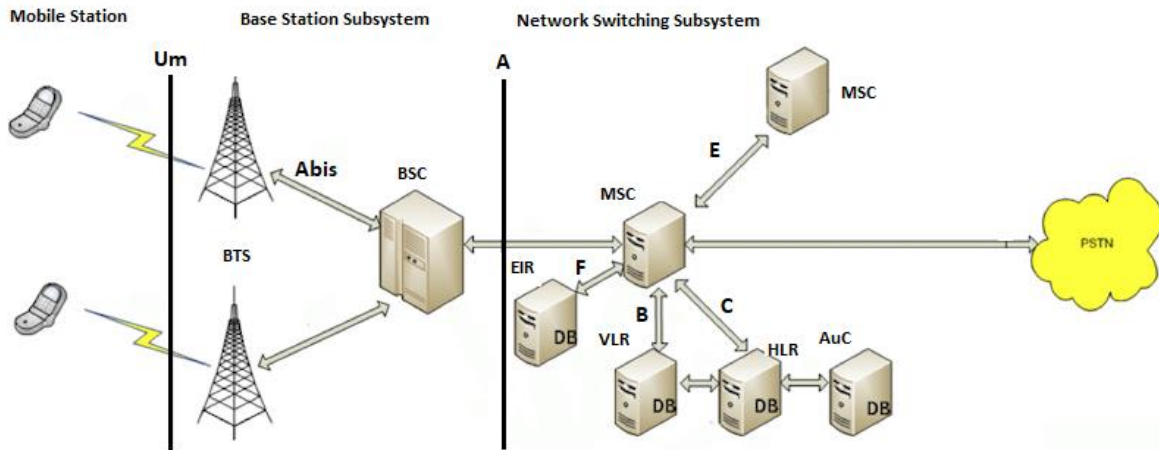


Ilustración 2. Detalle Subsistema GSM e Interfaces [3]

1.1.2 Interfaces Arquitectura GSM

Las interfaces permiten intercambiar información entre elementos de la arquitectura GSM, tal como se muestra en la Ilustración 2, bien sea subsistemas o elementos internos, en la Tabla 5 se muestran algunas de estas interfaces, las cuales pueden transportar tráfico de usuario o tráfico de señalización [6].

Tabla 5. Interfaces arquitectura GSM

Interfaz	Entre		Descripción	Tipo Tráfico
Um	MS	BSS	Interfaz de radio.	Voz -Datos - Control
Abis	BTS	BSC	Control del equipo de radio.	Usuario - Control
A	BSC	MSC	Negocia circuitos de comunicación.	Usuario - Control
F	MSC	EIR	Para comprobar IMEI del MS.	Control
B		VLR	Valida clientes visitantes	Control
C		HLR	Enruta llamadas a destino.	Control

D		MSC	Intercambio información entre MSC de diferentes áreas de cobertura.	Usuario - Control
I		MS	Intercambio transparente entre MSC – MS mediante BSS.	Usuario - Control
G	VLR	VLR	Intercambio información entre dos VLR de diferentes MSC.	Control

1.1.3 Protocolos de Comunicación GSM

GSM hace uso de varios protocolos de comunicación, para realizar una gestión del sistema, integrando las comunicaciones entre varias redes. En la pila de protocolos cada capa inferior satisface los servicios de los protocolos de las capas superiores, garantizando que la información esté en el formato correcto para ser transmitida. En la Ilustración 3 se muestran los protocolos establecidos entre las interfaces más significativas del sistema (Um, Abis, A).

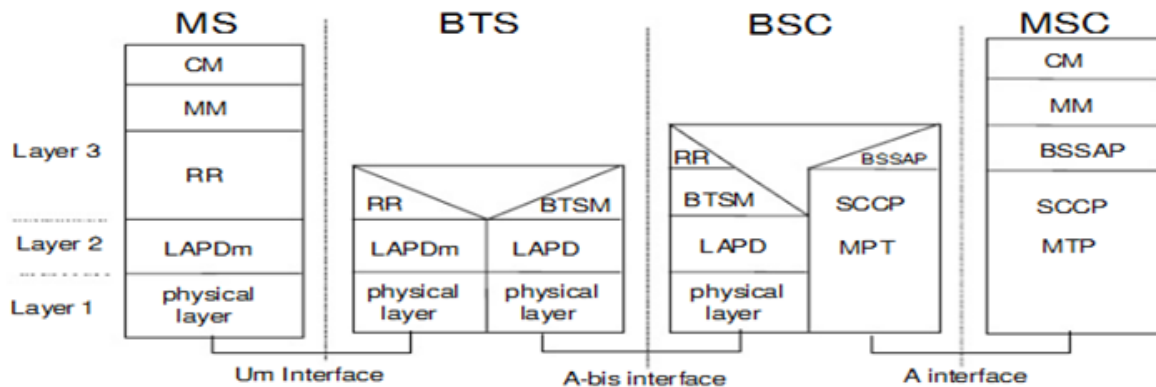


Ilustración 3. Pila protocolos GSM [9]

Estos protocolos están estructurados en tres capas:

- Capa 1 - Física, utiliza estructuras del canal sobre la interfaz aérea.
- Capa 2 – Enlace de datos, utiliza el protocolo de enlace de acceso en el canal LAPDm (*Link Access Protocol on Dm Channel*. Protocolo de Control de Enlace de Datos para Canales Tipo D móviles) y MTP (*Message Transfer Pack*) Protocolo de Transferencia de Paquetes que pertenece al sistema de señalización 7 (SS7).
- Capa 3 – Señalización, esta se divide en tres subcapas:
 - Gestión de recursos de radio RR (*Radio Resource*), responsable por el establecimiento del enlace entre el MS y el MSC. A este nivel también se encuentra el protocolo BTSM (*Base Transceiver Station Manager*), para

intercambiar información con el BSC. Otro protocolo de este nivel es SCCP (*Signalling Connection Control Part*, Parte de Control de Conexión de Señalización.) hace parte de SS7.

- Gestión de la Movilidad MM (*Mobility Management*), responsable por el mantenimiento de la información de la localización del usuario.
- Gestión de la conexión de comunicaciones CM (*Communication Management*), responsable de la gestión de llamadas a solicitudes de usuarios.

Se debe mencionar que existe en algunos casos intercambio de información exclusiva de señalización, para ello se utiliza el protocolo MAP (*Mobile Application Part*, Parte de Aplicación Móvil).

1.1.4 Acceso al Medio

El estándar GSM para acceder al medio hace uso de una combinación de TDMA (*Time Division Multiple Access*, Acceso Múltiple por División de Tiempo) y FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), es decir es un sistema TDMA multiportadora, con dos bandas de frecuencias de 45 MHz en GSM-900, una para el enlace de subida (entre el MS - BTS) en la banda de 890 MHz – 915 MHz, otra para el enlace de bajada (entre la BTS - MS) en la banda de 935 MHz – 960 MHz). Dichas bandas están subdivididas en 125 canales portadores de 200 KHz, cada canal se subdivide en ocho ranuras (*slots*) [4]. En la Ilustración 4 se muestra la banda de frecuencias GSM 900 MHz. Según la ETSI en su especificación técnica GSM 05.05 define las bandas de frecuencia y disposición de canales para GSM los cuales se muestran en la Tabla 6.

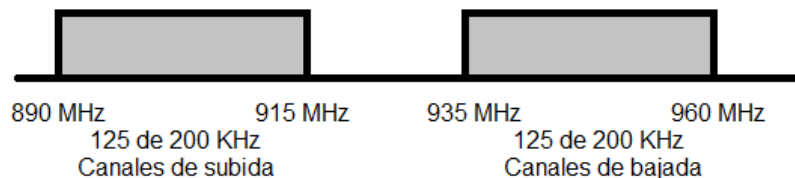


Ilustración 4. Banda de frecuencias GSM 900 MHz

Tabla 6. Rango frecuencias bandas GSM [10]

Banda (MHz)	Δ Port. (MHz)	Ancho Banda (KHz)	Canales	Banda Frec. Up (MHz)	Banda Frec. Down (MHz)
850	45	200	124	824 - 849	869 - 894
900	45	200	124	890 - 915	935 - 960
1800	95	200	375	1710 - 1785	1805 - 1880

En GSM existen canales físicos que se constituyen en las ranuras de tiempo y canales lógicos que corresponden a la información portada en los canales físicos; los canales lógicos pueden llevar información de voz o datos de usuario constituyéndose en canales de tráfico TCH (*Traffic Channels*) o también pueden



llevar información de señalización y sincronización, denominados CCH (*Control Channels*) [6]. Un canal lógico puede ser dedicado, cuyos datos pertenecen a un solo usuario o puede ser un canal común si los datos corresponden a varios usuarios. Son canales dedicados:

- TCH es un canal de tráfico que transporta datos de usuario, que se usa para transmitir señales de voz digitalizada o servicios de datos con conmutación de circuitos [11].
- FACCH (*Fast Associated Control Channel*, Canal de Control Rápido Asociado), este canal de control se transmite al mismo tiempo que el TCH, para enviar mensajes de señalización urgentes [11].
- SACCH (*Slow Associated Control Channel*, Canal de Control Rápido Asociado), este canal de control es usado en el enlace de subida, para informar a la red las mediciones de calidad de la señal de la celda de servicio y sus celdas vecinas; en el enlace de bajada para enviar comandos de control de potencia del móvil [11].
- SDCCCH (*Stand Alone Dedicated Control Channel*, Canal Único de Control Dedicado), es un canal de control usado durante el establecimiento de la llamada previo a la asignación de un TCH o también como procedimiento de actualización de ubicación, envío o recepción de SMS [11].

Los canales comunes de intercambio de información en la celda son:

- SC (*Synchronization Channel* Canal de Sincronización) canal de control usado por los móviles para la búsqueda de redes y celdas [11].
- FCCH (*Frequency Correction Channel*, Canal Corrección de Frecuencia), canal de control de subida usado para calibrar las unidades transceptoras y detección de comienzo de una multitrama [11].
- BCCH (*Broadcast Common Control Channel*, Canal de Control de Difusión Común), es el canal principal de información de la celda, y frecuencias utilizadas por las celdas vecinas [11].
- PCH (*Paging Channel*, Canal de Paginación), canal usado para informar a los suscriptores inactivos las llamadas o mensajes entrantes, estos mensajes se transmiten a todas las celdas que pertenecen al área [11].
- RACH (*Random Access Channel*, Canal de Acceso Aleatorio) este canal es usado cuando el móvil recibe un mensaje a través del PCH solicitando un establecimiento de conexión, el cual responde con un RACH para el establecimiento de la comunicación inicial con la red [11].
- AGCH (*Access Grant Channel*, Canal Asignación de Acceso), canal de control como respuesta a un suscriptor, para notificar el SDSCCH o TCH que se le permitirá usar [11].

1.2 Radio Definida por Software

La radio definida por software, es una tecnología para comunicación por radio basada en protocolos inalámbricos definidos por software, permitiendo soportar

características y funcionalidades como la actualización, reprogramación, sin necesidad de reemplazar el hardware en que se implementan, dando la posibilidad de crear dispositivos inalámbricos multibanda, multifuncionales que se pueden adaptar a futuras actualizaciones, con protocolos existentes o nuevos y a unos costos de implementación significativamente menores [12].

Idealmente un receptor de SDR, debería estar constituido y ser configurable exclusivamente mediante software, los componentes hardware mínimos que debería tener se identifican en la Ilustración 5, una antena multibanda, conversores analógico digital (*ADC, Analogic Digital Converter*) de alta velocidad y resolución, junto con procesadores digitales de señal.

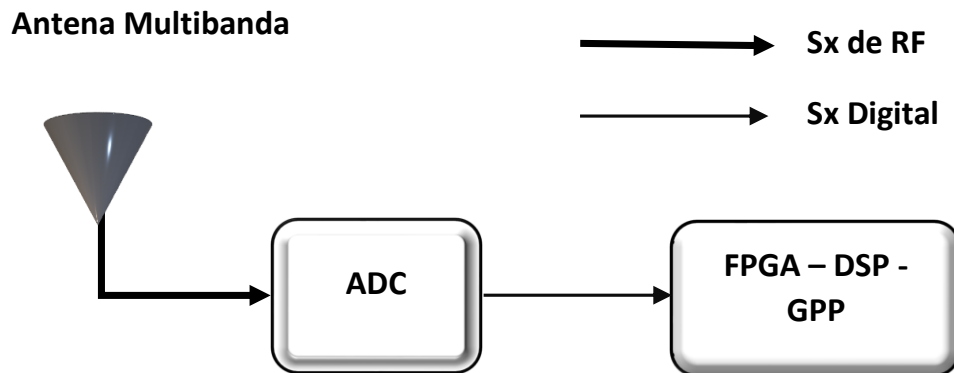


Ilustración 5. Diagrama de bloques Arquitectura SDR ideal

En la realidad se encuentran una serie de factores que favorecen muy poco el desempeño de una arquitectura ideal, entre los que se destacan:

- Señales RF (*Radio Frequency*) recibidas con bajos niveles de potencia.
- Interferencia en las señales recibidas.
- Limitaciones de las frecuencias de muestreo de los ADC.
- Limitaciones de la capacidad de transmisión de datos de las interfaces de comunicación de los GPP (*General Purpose Processor*).
- Limitaciones de la capacidad de procesamiento, de los GPP.

Condiciones que hacen necesario incorporar nuevos elementos hardware que permitan mitigar las limitaciones anteriormente enunciadas, razón por la cual se plantea una arquitectura en bloques real en la Ilustración 6.

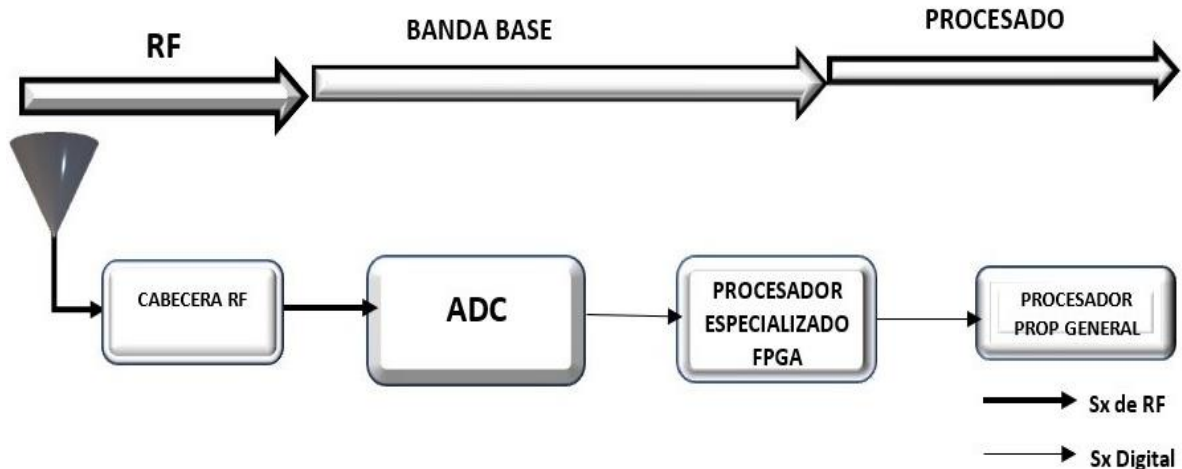


Ilustración 6. Diagrama en bloques recepción SDR real

En la Sección RF donde se realiza el procesado analógico, la señal de radio es captada a través de la antena, adaptándola a las características de entrada del conversor analógico digital de la siguiente sección, eliminando señales no deseadas mediante un filtro, posteriormente amplificándola y desplazándola en frecuencia, para llevarla de una frecuencia mayor a otra menor, cuya frecuencia central se denomina Frecuencia Intermedia (IF, *Intermediate Frequency*).

En la segunda sección se digitaliza la señal de IF mediante un ADC, a continuación de trasladarla a banda base mediante un módulo DDC (*Digital Down Converter*), disminuyendo o diezmando la tasa de muestreo para adaptarla a la capacidad de transmisión de datos del bus que comunica con la siguiente sección de procesado.

En la sección de procesado, la señal digital en banda base se procesa a baja velocidad, tarea que puede realizar un procesador de propósito general mediante alguna aplicación software, un ejemplo claro de lo que se puede realizar en esta sección es la demodulación.

1.3 Plataformas Hardware para Implementación de SDR

La arquitectura SDR requiere siempre un dispositivo con módulos de radiofrecuencia para enviar, recibir y procesar señales radioeléctricas, a continuación, se describirán plataformas de elementos especializados, existentes en el mercado.

1.3.1 Plataformas Basadas en Procesadores de Propósito General

Uno de los enfoques existentes para el desarrollo de plataformas SDR, consiste en hacer uso de procesadores de propósito general (GPP) con arquitecturas x86 /64, los cuales gracias a su flexibilidad y facilidad de programación son muy apetecidos, a continuación, se mencionan algunas plataformas que hacen uso de este tipo de procesadores.

1.3.1.1 Periférico Radio de Software Universal

La USRP es un periférico de *Ettus Research* [13] una de las plataformas más conocida, posee varias series de dispositivos, entre las que se encuentran:

- USRP N-Series conectada a un PC host a través de una conexión Ethernet.
- USRP B-Series, conectado a un PC host a través de una conexión USB. USRP X-Series de alto rendimiento la conexión puede ser ethernet o una conexión PCI Express X4.
- USRP E-Series incrustada diseñada con el fin de ejecutarse de manera independiente (sin un PC host).

Una USRP está diseñada para trabajar en conjunto con un procesador externo provisto por un computador a través de una FPGA [13].

En la Ilustración 7 se presenta la arquitectura general de una USRP, que es una placa con un ADC y DAC, provista de un *front-end* de RF, una interfaz de terminal hacia el PC y un FPGA.

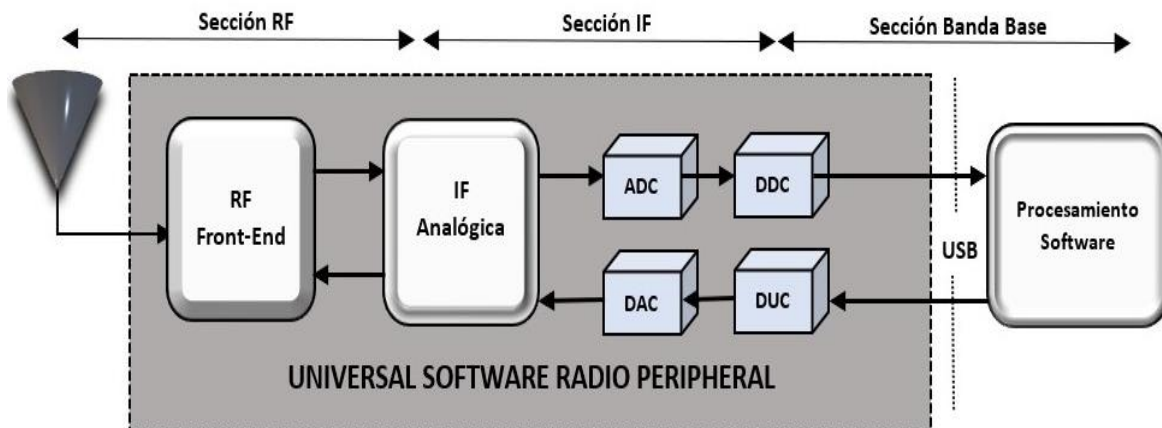


Ilustración 7. Universal Software Radio Peripheral (USRP)

Este periférico realiza las funciones de llevar la señal a banda base de RF a través de la sección de IF y viceversa. La interfaz USB 3.0 permite comunicar la USRP con el PC que realizará el procesamiento software.

1.3.1.2 Kansas University Agile Radio

KUAR (*Kansas University Agile Radio*) es una plataforma similar a USRP, cuya arquitectura básica está compuesta por un computador genérico y un FPGA, su principal ventaja es el grado de flexibilidad que ofrece a los desarrolladores, y que tienen la posibilidad de implementar estándares de comunicación en diferentes métodos, realizando una implementación híbrida hardware / software en donde se pueden distribuir las cargas de procesamiento de acuerdo a diferentes criterios [12].



1.3.1.3 Lime Micro-Systems - Software Defined Radio

LMS-SDR (Lime Micro-Systems - Software Defined Radio, Micro-Sistemas Lime – Radio Definido por Software), esta plataforma tiene la responsabilidad de brindar datos inalámbricos, mientras que GPP tiene la tarea de procesar las señales entrantes y generar los datos que serán transmitidos por la SDR. Admite anchos de banda entre 30-60 MHz, posee también una aplicación denominada Ziria para su programación con diseño a dos capas, en una de ellas se realiza una compilación eficiente y otra capa para organizar el flujo de la información en los procesadores. Las principales características de esta plataforma son las reconfiguraciones fáciles y dinámicas [14].

1.3.1.4 Sora

Es una plataforma de Software Radio, programable en C para procesadores de propósito general multinúcleo, se caracteriza por tener un alto rendimiento que incluye alta velocidad de procesamiento baja latencia, ha sido probada para aplicaciones de operación en tiempo real que alcanza mediante la programación y división del procesamiento a nivel físico de los núcleos de su GPP, aprovechando técnicas de hacen uso de la velocidad de la memoria caché [15].

1.3.1.5 BladeRF

Es un dispositivo de radio definido por software que se caracteriza por un alto rendimiento y baja latencia, opera entre 300 MHz y 3.8 GHz, puede ser usado como picocelda GSM o LTE, compatible y estable para sistemas operativos como Linux, Windows, Mac y GNU Radio, posee una conexión USB 3.0 para interactuar con un FPGA que procesa su información [16].

1.3.2 Plataformas Basadas en GPU

Las plataformas basadas en GPP, poseen limitaciones, razón por la cual nacieron las plataformas basadas en Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU, *Graphic Processing Unit*), que usan procesadores específicamente diseñados para realizar tareas relacionadas con gráficos, procesamiento de señales y grandes volúmenes de datos en tiempo real, que pueden realizar gracias a su arquitectura de múltiples núcleos y procesadores paralelos, para ello emplean un concepto denominado, Programa Simple Múltiples Datos, (SPDM, *Single Program Multiple Data*) que permite múltiples secuencias de instrucciones para ejecutar al mismo tiempo un programa [12].

1.3.3 Plataformas Basadas en DSP

Las plataformas basadas en Procesadores Digitales de Señales (*DSP, Digital Signal Processor*), usan como elemento central los DSP que son un tipo particular de procesadores que están optimizados para trabajar con señales digitales, algunos de



ellos equipados con aceleradores de hardware para funciones complejas como los decodificadores Viterbi y Turbo, son capaces de ejecutar tareas como la modulación, demodulación, filtrado entre otras, pero con un alto rendimiento y menor potencia, convirtiéndolos en mejores candidatos para la implementación de plataformas de SDR.

1.4 Estaciones Base Basadas en Hardware y Software Libre

El despliegue rápido de una BS en el sistema tradicional de la infraestructura de telecomunicaciones es poco probable debido a situaciones como la planificación y costos de implementación de la infraestructura, por ello, sectores interesados en la investigación han dedicado esfuerzos para la implementación de sistemas de estaciones de bajo costo, los cuales estén basados en software libre, que sean fácil de usar, configurar y con posibilidades de programación.

Existe en la actualidad software de código abierto para la implementación de estaciones base, que permite optimizar la infraestructura de telecomunicaciones, para fines específicos, como es el caso de la atención de comunidades de bajos ingresos, difícil acceso, en donde existe un bajo retorno a la inversión, aumentando el nivel de penetración de las telecomunicaciones, ofreciendo un modelo de red GSM con bajo costo, baja potencia, facilidad de despliegue, además de unos costos de mantenimiento de la red poco considerables. A continuación, se exponen algunas alternativas del mercado.

1.4.1 OpenBTS

Es una aplicación de Linux que utiliza SDR, la cual permite presentar una interfaz aérea 3GPP⁷ estándar a los dispositivos de usuario, donde simultáneamente presenta dichos dispositivos como puntos finales SIP (*Session Initiation Protocol*, Protocolo de Inicio de Sesión) [2]. Implementa la pila de protocolos GSM, reemplazando algunos componentes hardware por aplicaciones software, en complemento con un dispositivo hardware que actúe como una BS; el cual se encarga de transmitir y recibir señales GSM, mientras que el procesamiento de señales lo realiza OpenBTS, el cual se ejecuta en un PC, quien se encarga del envío de mensajes y la conmutación de llamadas. La gestión y enrutamiento de llamadas se realiza mediante un servidor Asterisk asociado, mediante el cual es posible enrutar llamadas a otra red GSM, usando voz sobre IP (VoIP) [17].

⁷ 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*, Proyecto Asociación de Tercera Generación), que corresponde a una colaboración de grupos de asociaciones de telecomunicaciones cuyo objetivo era estandarizar un sistema global de comunicaciones de tercera generación 3G para teléfonos móviles, basándose en las especificaciones de GSM.



1.4.1.1 Componentes Hardware Requeridos

OpenBTS para su funcionamiento requiere componentes hardware en donde está implementado el software o como complemento al mismo, elementos que se describen a continuación:

a. Servidor Linux

OpenBTS es un desarrollo software que requiere un sistema operativo para ser implementado, este es un servidor Linux, el cual puede estar sobre una máquina virtual o en su defecto sobre cualquier PC con un procesador i5 o superior, que debe contar con puerto USB 3.0 para interconectar el dispositivo hardware SDR [18].

b. Dispositivo Hardware SDR

OpenBTS para tener una interacción con las señales enviadas y recibidas desde el móvil requiere un dispositivo hardware SDR, el cual recibe desde el móvil las señales de radiofrecuencia y al mismo tiempo es capaz de enviar estas señales procesadas por OpenBTS al móvil, estos dispositivos pueden ser de varios fabricantes entre los cuales se incluye *Ettus Research, National Instrument* [18].

c. Antena

Para entornos de prueba algunos dispositivos hardware SDR logran funcionar sin antenas, pero en la mayor parte de casos se requiere una antena, en el caso de Colombia para transmisiones GSM en la banda de 900 MHz o 1800 MHz [18].

d. Dispositivo Móvil de Prueba

Corresponde a los teléfonos móviles empleados para enviar y/o recibir mensajes de texto o realizar o recibir llamadas mediante la estación GSM; deben ser compatibles con las bandas en las cuales se pretende realizar la implementación del sistema, estos deben estar provistos de una tarjeta SIM que les permita ser identificados en el sistema [18].

1.4.1.2 Componentes Software

Para realizar el despliegue de una red móvil GSM se deben instalar componentes software, necesarios para realizar la transmisión de voz y SMS, los cuales se pueden ejecutar en una misma plataforma hardware.

a. Paquete OpenBTS

Está compuesto por módulos de código abierto que se ejecutan como servicios en la máquina Linux. La arquitectura de estos módulos, los componentes del paquete

de aplicaciones OpenBTS y sus canales de comunicación para un punto de acceso, se muestran en la Ilustración 8,

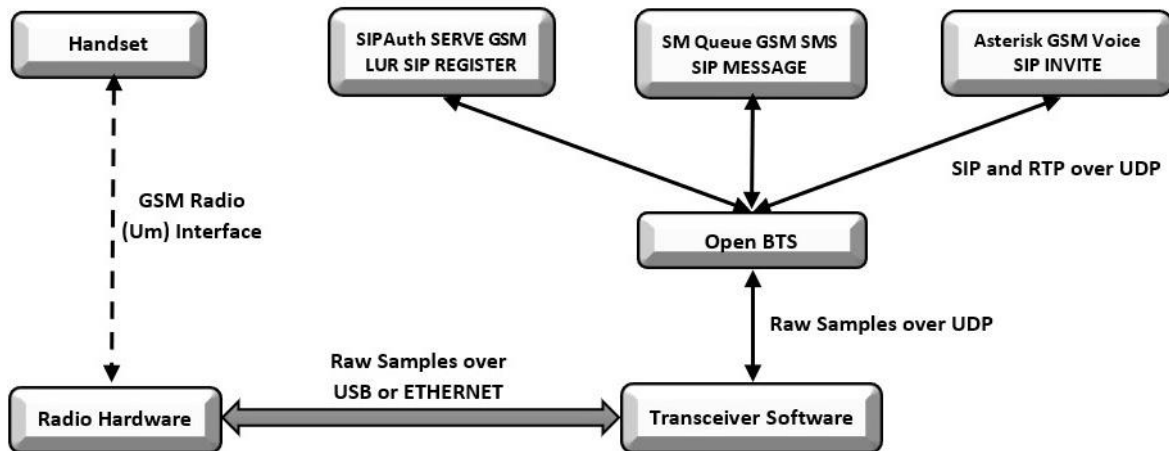


Ilustración 8. Arquitectura OpenBTS tomado de [15]

b. Transceiver

Este módulo se encarga de comunicar el módulo OpenBTS y el dispositivo hardware SDR haciendo uso del protocolo UDP (*User Datagram Protocol*, Protocolo de Datagramas de Usuario) mediante la interfaz USB [18]. Realiza funciones de radio modem GSM 05.05, administrando la interfaz de radio hardware [19].

c. OpenBTS

Es el módulo central del aplicativo, es responsable de implementar la interfaz aérea GSM software, se comunica directamente con los teléfonos GSM mediante protocolos de comunicación SIP y RTP (*Real time Transport Protocol*, Protocolo de transporte en Tiempo Real) [19].

El módulo OpenBTS contiene:

- L₁ TDM implementa las funciones de la especificación GSM 05.02 [19], donde se definen los canales físicos del subsistema de radio requeridos para soportar los canales lógicos, define la frecuencia de salto para el sistema de transmisión TDMA, junto con intervalos de tiempo y ráfagas [20].
- L₁ FEC implementa las funciones de codificación de canal, especificación GSM 05.03 [19], en donde se definen los esquemas de codificación para cada canal [10].
- L₁ Controles de potencia y temporización de bucle cerrado implementando funciones de la especificación GSM 05.08 [19], la cual especifica el control de enlace del subsistema de radio en la MS, BS y MSC del estándar GSM [21]. GSM 05.10 que define los requisitos para la sincronización en el subsistema de radio GSM [21].



- L₂ LAPDm implementando funciones de la especificación GSM 04.06 [19], en donde se define el protocolo de la capa de enlace de datos que se usará para la señalización y también para otras aplicaciones en la interfaz MS-BS [22].
- L₃ funciones de gestión de recursos de radio [19], implementando funciones de la especificación GSM 04.08 que especifica los procedimientos utilizados en la interfaz radio para el Control de Llamadas CC (*Call Control*), conectando las llamadas telefónicas con transacciones SIP para la central local Asterisk, la Gestión de Movilidad (*MM Mobility Management*), encargada de autenticar a los usuarios y realizar el seguimiento de sus movimientos entre las diferentes celdas y la gestión de Recursos de Radio (*RR Radio Resource*) [23].
- L₃ GSM-SIP Puerta de enlace para gestión de movilidad [19].
- L₃ GSM-SIP Puerta de enlace para gestión de llamadas [19].
- L₄ GSM-SIP Puerta de enlace para mensajería de texto [19].

d. SIPAuthServe

El servidor de autorización SIPAuthServe es una aplicación que procesa las solicitudes de registro SIP que genera el módulo OpenBTS cuando un móvil intenta unirse a la red móvil, una vez el teléfono se autentica este módulo es el responsable de actualizar la base de datos de registro de suscriptores con la dirección IP de la instancia de OpenBTS que la inició, permitiendo la comunicación con este móvil [18]. Este módulo cumple las funciones de HLR, VLR AuC y EiR de una red GSM convencional.

e. SMQueue

Corresponde a la aplicación de mensajería SIP, procesa las solicitudes de mensajes SIP que genera OpenBTS cuando un móvil envía un SMS, es capaz de almacenar los mensajes o programarlos para su entrega para cuando el móvil de destino esté disponible, o en su defecto descartarlos cuando el destino es inalcanzable [18].

f. Asterisk

Asterisk es un sistema de telefonía de código abierto, que puede ser instalado en un computador, para servir como un conmutador telefónico VoIP, esta central telefónica puede ser capaz de cumplir las funciones de control de llamadas y en algunos casos tareas de gestión de movilidad, para ello hace uso del IMSI del suscriptor como nombre de usuario SIP, presentando a cada usuario móvil conectado en la red GSM como un cliente SIP.

En síntesis esta central telefónica VoIP cumple funciones de administración de usuarios y conmutación de llamadas, equivalente a la funcionalidad del MSC de una red GSM convencional [18].



1.4.1.3 Administración Hardware SDR

Para gestionar el hardware SDR es necesario contar con software, dos de las más importantes alternativas se mencionan a continuación.

a. GNURadio

Es una herramienta software de código abierto que en conjunto con SDR, brinda una gran cantidad de aplicaciones a las telecomunicaciones, dada la posibilidad de realizar variaciones hardware-software, es decir, ofrecer diferentes funciones acorde a las necesidades.

Con GNURadio es posible implementar en, C++ o Python, depende de la necesidad en el procesamiento que se requiera para el funcionamiento de la aplicación, Python es más utilizado para aplicaciones de bajo procesamiento que necesiten igualmente de bajos recursos, mientras que C++ se utiliza cuando el procesamiento de señales es mayor, como en tecnologías en tiempo real.

GNURadio se utiliza en ambientes académicos en proyectos que hacen uso del espectro electromagnético, permite generar, recibir, transmitir estas señales, analizarlas mediante bloques de procesamiento. Entre los más representativos bloques de hardware disponibles en GNURadio se encuentran los filtros, moduladores, demoduladores, codificadores, decodificadores, capas de sincronización, transmisores y receptores.

GNURadio posee librerías para administrar hardware SDR, como es el caso de las USRP, mediante los paquetes Osmocom y UHD.

b. Matlab

Es una aplicación software ampliamente conocida que maneja un lenguaje matemático interpretado que permite simular de forma sencilla sistemas de varios tipos, entre ellos sistemas de telecomunicaciones, ya sea mediante su programación o en un ambiente similar a GNURadio mediante Simulink.

Hace algún tiempo Matlab tenía tiempos de ejecución muy elevados, comparados con lenguajes de programación como C++, lo que generaba cierto nivel de incomodidad para sistemas de telecomunicaciones, pero esta situación se ha subsanado poco a poco con las últimas versiones de este software, en donde adicionalmente se han añadido toolbox para gestionar los dispositivos hardware SDR. Una de sus principales desventajas es el valor de las licencias de Matlab y Simulink.

1.4.2 Yet Another Telephony Engine (YATE)

YateBTS es un sistema de red de acceso de radio GSM / GPRS. Es un software que cuenta con una versión pública, escalable y flexible, desarrollado en lenguaje C++, posee un componente de radio, un transceptor de radio y un servidor incorporado que permite acceder a un conjunto de experimentos y procedimientos; también cuenta con una versión comercial destinada a operadores móviles, la cual



está compuesta por los mismos componentes de la versión pública, pero con más funcionalidades [16]. YateBTS, trabaja en conjunto con BladeRF.

2. DESARROLLO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el desarrollo metodológico realizado para implementar una estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, empleando el modelo en cascada [24], el cual permite la realización de cada una de las etapas del trabajo de grado de manera precisa, mediante el desarrollo de diferentes fases, las cuáles inician con la definición de los requerimientos, para posteriormente definir la arquitectura, asociando a ella elementos hardware y software, los cuales deben ser instalados, configurados, y en su conjunto probados y evaluados.

Fases

En la Ilustración 9 se presenta un esquema básico de las fases empleadas para el desarrollo de un prototipo de estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, fases necesarias para garantizar el cumplimiento de los objetivos propuestos.

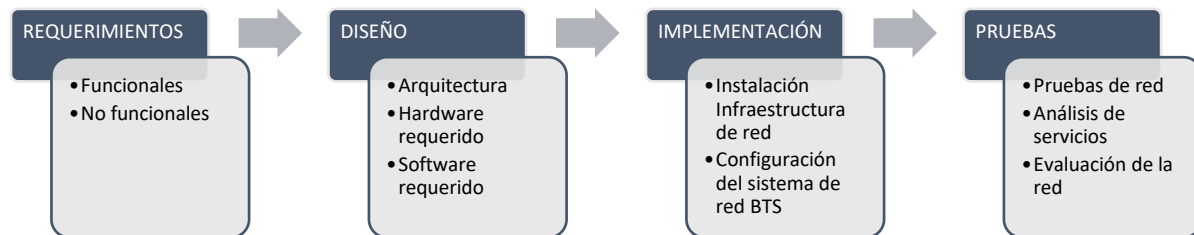


Ilustración 9. Fases desarrollo de la estación de comunicación móvil GSM

2.1 Requerimientos del Sistema

Para identificar las necesidades del sistema se definen requerimientos funcionales, es decir aquellos que establecen qué debe hacer la estación de comunicación y los no funcionales, enfocados a los elementos y requisitos necesarios para cumplir con los requerimientos funcionales.

Los requerimientos están acordes a los objetivos planteados en el trabajo y se mencionan a continuación:

2.1.1 Requerimientos Funcionales

La estación de comunicación móvil funcionalmente debe:

- Ofrecer un prototipo funcional de red GSM basada en SDR.
- Ser un sistema abierto, programable y configurable.
- Permitir realizar llamadas entre terminales móviles.
- Permitir el intercambio de SMS entre terminales.

2.1.2 Requerimientos no Funcionales

La estación de comunicación móvil tiene como requerimientos no funcionales:

- Hacer uso de software libre para su implementación.
- Limitar el uso de hardware en el diseño e implementación de la estación de comunicación móvil.
- Permitir la configuración de la estación de comunicación de acuerdo a las bandas indicadas para el estándar de comunicación GSM.
- Permitir una implementación más rápida y sencilla que una estación GSM tradicional.

2.2 Diseño de la Estación de Comunicación Móvil GSM Basada en SDR

Para plantear la arquitectura de la celda de comunicación móvil basada en SDR es necesario tener claro cuál es la arquitectura de una red GSM tradicional, encontrando la equivalencia en los componentes frente a una red basada en SDR.

2.2.1 Arquitectura Red GSM Basada en SDR

La Ilustración 10 muestra la arquitectura planteada, la cual consta de una estación móvil que interactúa con un dispositivo hardware SDR, que a su vez está conectado con un módulo software.

- Estación móvil MS. Corresponde al equipo físico usado por el usuario de la red GSM para acceder a los servicios suministrados por la red.
- Hardware SDR realiza las funciones equivalentes a la BTS. Es el dispositivo que se encarga de establecer comunicación vía radio, entre la red y las estaciones móviles, provee la interfaz de aire del sistema, en donde se lleva a cabo señalización, cifrado, procesamiento de voz.
- BS software libre que soporta la conmutación de llamadas, autenticación de usuario, mensajería corta e interfaz con redes externas.

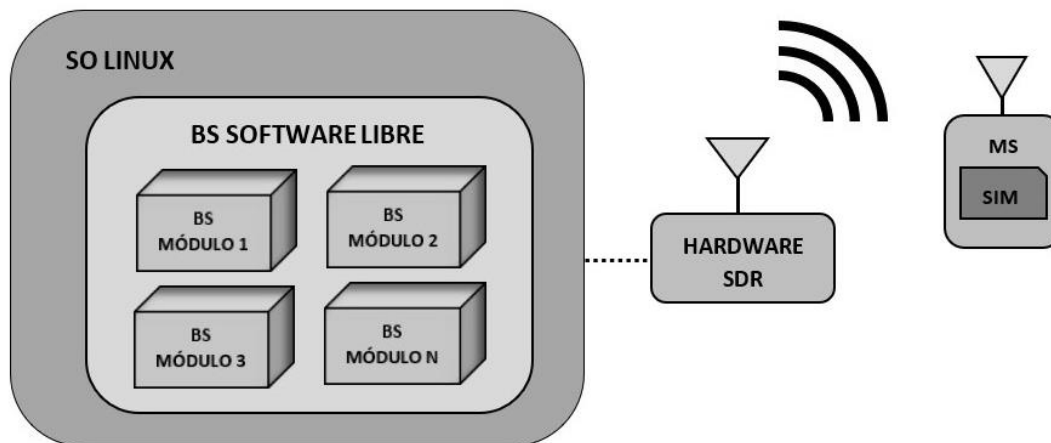


Ilustración 10. Arquitectura de red GSM basada en software libre



La arquitectura de red GSM planteada requiere de dispositivos hardware y paquetes software para su implementación, a continuación se analizarán algunas de las posibilidades que ofrece el mercado y que estén al alcance de la presente tesis.

2.2.1.1 Hardware

a. Servidor

Es necesario contar con una máquina con sistema operativo Linux que aloje la plataforma software central de la arquitectura GSM, este sistema operativo puede estar instalado directamente en una máquina hardware, esquema recomendado, para aprovechar totalmente el rendimiento del hardware y evitar compartir recursos con otras aplicaciones o en su defecto en un servidor virtualizado con alguna herramienta para tal propósito (entre las más conocidas se encuentra Oracle VM Virtualbox, VMware Workstation, Microsoft Hyper V), se puede virtualizar incluso en un servidor que posea sistema operativo Windows o Linux. Las especificaciones mínimas del servidor se indican en la Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones mínimas servidor hardware

Característica	Descripción
Procesador	Intel(R) Core (TM) i5 o superior AMD Ryzen 5 o superior
Disco duro	100 GB SSD o HDD
USB	3.0 Indispensable, se recomienda no hacer uso de hub USB.
Memoria RAM	8 MB o superior

Para este trabajo de grado no se posee un equipo exclusivo, se dispone de un computador portátil, cuyas características se muestran en la Tabla 8, se virtualiza un servidor con sistema operativo Linux que aloja la plataforma software que se convierte en el corazón de la arquitectura GSM.

Tabla 8. Especificaciones hardware servidor

Característica	Descripción
Procesador	Intel(R) Core (TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz
Disco duro	512 GB SSD
USB	3.0
Memoria RAM	20 MB
Sistema Operativo	Windows 10 64 bits
Software Virtualizador	Oracle VM Virtual Box 6.1.2 r135662

b. Dispositivo SDR

Se ha realizado una comparación de las principales características de los dispositivos SDR que permiten la implementación del estándar GSM y que son más comunes comercialmente, esta comparación se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Comparativa dispositivos hardware SDR [25]

Especificaciones Técnicas	BladeRF		USRP		
	X40	X115	B100	B200	B210
Espectro de radio	300 MHz – 3.8 GHz		50 MHz – 2.2 GHz	50 MHz – 6 GHz	
Ancho de banda	28 MHz		16 MHz	61.44 MHz	
Dúplex	Full		Full	Full	
Tamaño muestra (ADC/DAC)	12 bits		12 bits / 14 bits	12 bits	
Frecuencia de muestreo (ADC/DAC)	40 Msps		64 Msps / 128 Msps	61.44 Msps	
Interfaz	USB 3 (5 Gbits)		USB 2 (480 Mbits)	USB 3 (5 Gbits)	
Microcontrolador	Cypress FX3		Cypress FX2	Cypress FX3	
Disponibilidad Unicauca	No		No	No	Si

Para la implementación de una red GSM, se deben tener en cuenta parámetros inherentes a la red y que el dispositivo hardware SDR debe ser capaz de soportar, en la Tabla 10 se presentan las especificaciones técnicas mínimas que debería cumplir el dispositivo.

Tabla 10. Especificaciones GSM para hardware SDR

Especificaciones Técnicas	GSM
Rango de frecuencias	850, 900, 1800, 1900 MHz
Ancho de banda	45, 95 MHz
Capacidad de transmisión	Full Dúplex
Interfaz	USB 3.0

En la comparación establecida en la Tabla 9 se determina que el dispositivo SDR USRP B210 cumple con las especificaciones técnicas de la Tabla 10, adicionalmente el departamento de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca posee estos dispositivos en su laboratorio, favoreciendo la implementación de la estación GSM. En la Ilustración 11 se identifican las imágenes frontal y posterior del dispositivo USRP B210 usado.



Ilustración 11. Vista frontal y posterior USRP B210

c. Estación Móvil

La estación móvil o teléfono móvil, es el dispositivo del que disponen los abonados de la red. En la Tabla 9 se detallan los dispositivos utilizados.

Tabla 9. Dispositivos móviles utilizados

Características / Tel Móvil	Smart Phone	IMEI	O.S.	Bandas Soportadas
Alcatel One Touch	No	014304007458500	Propietario	GSM 850/900/ 1800/1900 HSDPA 850/900/ 1900/2100
Samsung Galaxy J6 +	Si	351756100380790	Android 10 One	GSM 850/900/ 1800/1900 UMTS 850/900/ 1700/1900/2100 LTE Cat4 700/800/ 850/900/ 1700/1800 /1900/2100 /2600 Bands (1,2,3,4,5,7,8,12,17,20,66)
Samsung Galaxy Note 9 Plus	Si	359426091026750	Android 10 One	GSM 850/900/1800/1900 CDMA 800/1900 CDMA 2000 TD-SCDMA 1900/2000 UMTS 850/900/1700/1900/2100 LTE Cat18 (1,2,3,4,5,7,8,12,18,19,20,28,29,30) TD-LTE (38,39,40,41)
Sony Ericsson Xperia Neo V	Si	358518040786130	Android 4 Ice Cream	GSM 850/900/1800/1900 UMTS 850/1900/2100
Huawei Mate 8	Si	868662021491770	Android 6 Marshmallow	GSM 850/900/1800/1900 UMTS 850/900/1700/1900/2100 LTE Cat6 (1,2,3,4,5,6,7,8,12,17,18,19,20,26,28) TD-LTE (38,39,40)
Huawei P8 Lite	Si	860715036177400	Android 5 Lollipop	GSM 850/900/1800/1900 UMTS 850/1700/1900/2100 LTE Cat4 (2,4,5,12,17)
Xiaomi Poco X3 NFC	Si	869819058525940	Android 11	GSM 850/900/1800/1900 UMTS 850/900/1700/1900/2100 LTE Cat15 (1,2,3,4,5,7,8,20,28) TD-LTE (38,40,41)



Samsung Krono K32	No	358812081876090	OSX	GSM 850/900/1800/1900
--------------------------	----	-----------------	-----	-----------------------

2.2.1.2 Software

En la definición de los componentes software se escoge el paquete de la BTS, y posterior a ello el sistema operativo que tenga compatibilidad con la BTS.

a. Estación Base Transceptora Basada en Software Libre

OpenBTS y YateBTS, son alternativas para el paquete software de BS, sin embargo se debe tener como punto de partida la integración con hardware SDR escogido, con el fin de emplear interfaces nativas, evitando la adaptación de las mismas.

Se debe considerar que YateBTS posee una interfaz con dispositivos BladeRF, y adicionalmente en su versión libre es limitado respecto a su versión comercial, mientras que OpenBTS posee unas librerías específicas para el manejo de las USRP, argumento que se presenta como fundamental para escoger OpenBTS como software libre para la implementación de la estación GSM basada en SDR.

Los componentes software asociados a esta estación base transceptora son:

- Transceiver, software que se encarga del funcionamiento del transceptor en la USRP.
- OpenBTS, software encargado de hacer que la USRP se comporte como una BTS y genere la interfaz aérea Um.
- SIPAuthServe, software que se encarga de la funcionalidad de centro de autenticación de los MS e interacción con el HLR y el VLR.
- SMQueue, es el software que se presenta como el servidor SMS.
- Asterisk, es el software externo al paquete OpenBTS que funciona como conmutador de llamadas entre abonados, centrales y RTPC, mediante el uso de SIP.

b. Servidor virtualizado

El software de la estación base transceptora debe ser instalado en un servidor virtualizado con sistema operativo basado en Linux, que permita la implementación de las herramientas a utilizar.

La documentación de los paquetes OpenBTS y YateBTS recomiendan que sean instalados sobre un sistema operativo Linux[18], se validaron diferentes posibilidades de esta distribución de sistema operativo Linux Ubuntu, en la Tabla 12 se identifican algunas de las distribuciones más estables.

Tabla 10. Distribuciones Ubuntu [26]

Nombre	Última Modificación	Descripción
14.04.6	2020-08-18	Ubuntu 14.04.9 LTS (Trusty Tahr)
16.04.6	2020-08-18	Ubuntu 16.04.6 LTS (Xenial Xerus)

18.04.6	2021-09-16	Ubuntu 18.04.6 LTS (Bionic Beaver)
20.04.4	2022-02-24	Ubuntu 20.04.3 LTS (Focal Fossa)
21.04	2021-04-22	Ubuntu 21.04 (Hirsute Hippo)
21.04	2021-10-14	Ubuntu 21.10 (Impish Indri)

De las distribuciones Linux indicadas en la Tabla 10, se ha seleccionado Ubuntu 16.04.6 LTS (Xenial Xerus) en la versión escritorio pues ofrece un proceso de instalación más rápido y sencillo en comparación con la versión servidor, el logo de la versión de Ubuntu seleccionada se identifica en la Ilustración 12, y la cual ofrece un mayor grado de estabilidad y compatibilidad que versiones posteriores, con los componentes software a instalar, como es el caso del paquete OpenBTS. Adicional a ofrecer un entorno gráfico de fácil utilización.

El archivo instalador se puede descargar en el enlace <https://releases.ubuntu.com/16.04.7/>. Se recomienda realizar la instalación en una máquina nueva para evitar errores causados por modificaciones hechas al sistema operativo de la máquina virtual. Las especificaciones del servidor virtual utilizado se describen en la Tabla 11.



Ilustración 12. Logo sistema operativo máquina virtual

Tabla 11. Especificaciones servidor virtual implementado

Característica	Descripción
Software Virtualizador	Oracle VM Virtual Box 6.1.2 r135662
Sistema Operativo	Linux Ubuntu 16.04 LTS 64 bits
Memoria RAM	8 MB
Procesador	4 core
USB	3.0
Disco duro	100 GB
Adaptador de red	Intel PRO / 1000 MT Desktop (NAT)

2.2.2 Arquitectura de Red GSM Definitiva

La arquitectura definitiva de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR se observa en la Ilustración 13, en donde se incluyen los componentes definidos, al igual que un comparativo con los elementos de una estación GSM tradicional.

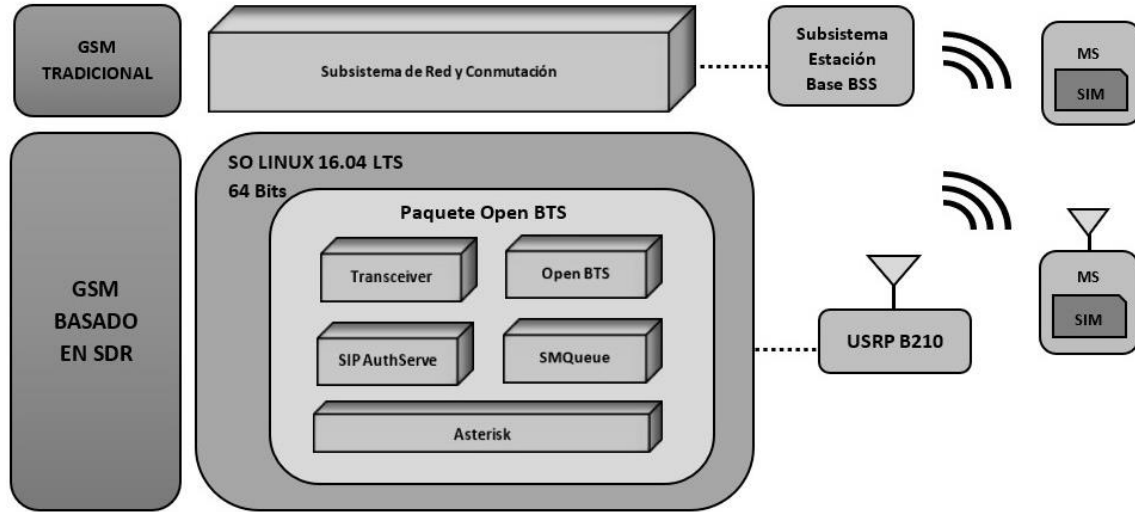


Ilustración 13. GSM tradicional vs. GSM basado en SDR

En la Tabla 12 se muestra de forma resumida el paralelo entre los elementos de una red GSM tradicional versus los elementos de la red GSM propuesta, basada en SDR. En esta tabla se muestran los módulos de gestión de usuarios de la arquitectura GSM tradicional (VLR, HLR, AuC, EIR), son reemplazados por un único módulo (SIPauthserver), dado que toda la autenticación y señalización se realiza mediante SIP.

Tabla 12. Comparativa GSM tradicional vs. GSM basado en SDR

Interfaz/ Equipo GSM tradicional	Módulo en OpenBTS	Observaciones
Um	Um	Misma Interfaz para compatibilidad
BTS	SDR/Transceiver	
BSC	OpenBTS	
Abis	UDP	Conexión transceiver y OpenBTS
MSC	Asterisk	PBX software que usa SIP/RTP
VLR	SIPauthServer	
HLR	SIPauthServer	
AuC	SIPauthServer	
EiR	SIPauthServer	
SMS	SMqueue	
SGSN	IPtables	

2.2.3 Diseño de Pruebas Validación de Servicios Estación de Comunicación

Los servicios por validar en la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, de acuerdo con los requerimientos funcionales y no funcionales, son el establecimiento de llamadas y el envío de SMS entre terminales móviles conectadas a la estación.



Las pruebas por realizar se subdividen en dos tipos, una de tipo funcional y otra de tipo área de cobertura.

2.2.3.1 Pruebas Funcionales

Este tipo de pruebas buscan validar el establecimiento de las llamadas de voz bajo el estándar de comunicación GSM, identificando los requerimientos de la estación BTS y del MS para acceder a los servicios; las variables a tener en cuenta son:

- Conectividad del MS con la BTS.
- Validación de frecuencias y anchos de banda de acuerdo con la banda GSM.
- Establecimiento de llamadas entre dos MS.
- Envío de SMS entre MS registrados en la estación de comunicación
- Estabilidad de la estación de comunicación móvil.
- Cantidad de llamadas concurrentes soportadas por la estación de comunicación móvil.
- Identificación de variables para medir el desempeño de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR.

2.2.3.2 Pruebas de Tipo Área de Cobertura

Con estas pruebas se busca identificar el área de servicio en la cual la estación de comunicación puede operar, de acuerdo con las diferentes posibilidades de parametrización y configuración.

Estas pruebas pueden ser en entornos interiores o exteriores, los cuales permitirán identificar el comportamiento de la estación en donde exista tipos de propagación diferentes. Algunas de las variables a tener en cuenta son:

- Área de cobertura en ambiente exterior con banda GSM definida.
- Área de cobertura en ambiente interior con banda GSM definida.
- Comparativo de áreas de cobertura en ambiente exterior e interior respecto al cambio de banda GSM.
- Influencia de potencia de transmisión y/o recepción en áreas de cobertura para ambientes exteriores e interiores.
- Influencia de la altura del emplazamiento de antena en áreas de cobertura para ambientes exteriores e interiores.

Las medidas en ambientes interiores y exteriores se realizarán con base en el diagrama de flujo de la Ilustración 14, en donde se fija la ubicación de la BTS, se establece la llamada y uno de los MS se deja fijo junto a la BTS, el otro MS se desplazará a las diferentes ubicaciones para tomar las variables de los canales establecidos.

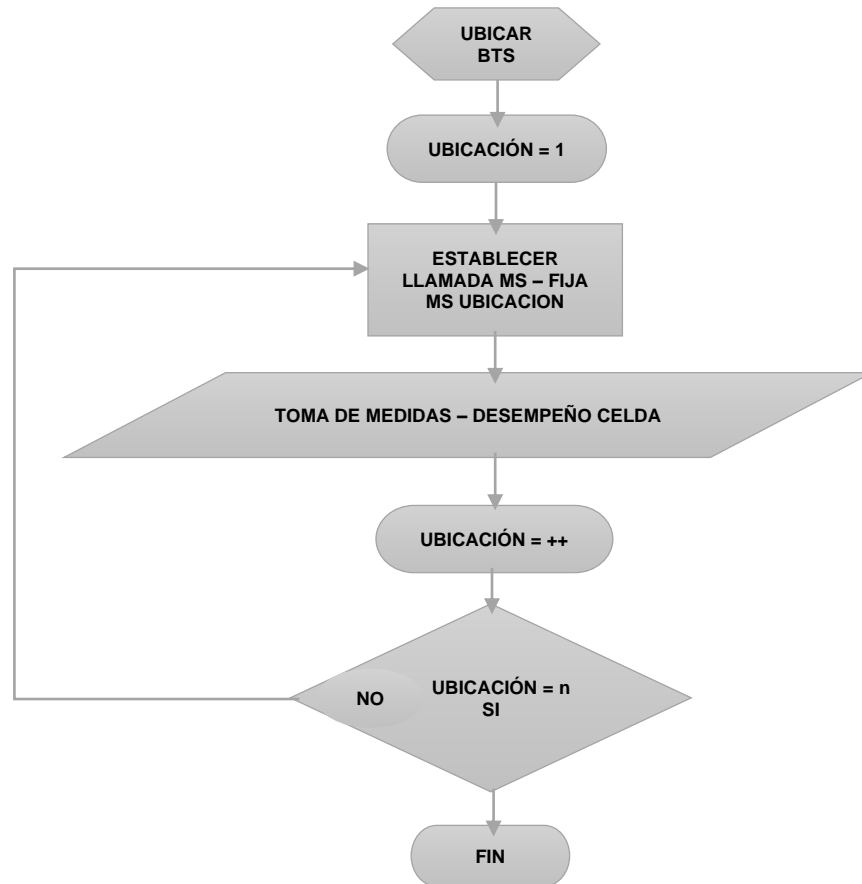


Ilustración 14. Diagrama flujo toma de medidas desempeño estación

2.3 Implementación Estación de Comunicación Móvil

En este apartado se presenta la generalidad del proceso de implementación de la estación, partiendo desde la instalación de los dispositivos hasta su configuración.

2.3.1 Instalación Infraestructura de Red

En la instalación de la infraestructura de red se muestran los componentes requeridos para la implementación de la estación de comunicación, es importante validar la compatibilidad entre los componentes hardware y software.

Como prerrequisitos de la instalación de la infraestructura de red se tiene en cuenta que la plataforma hardware USRP B210, debe ser reconocida inicialmente por el PC (en este caso Windows 10) que aloja el servidor virtualizado Ubuntu 16.04.6 LTS. Una vez el dispositivo USRP B210 sea reconocido por el sistema operativo Windows se puede validar su instalación ingresando al administrador de dispositivos.



Posteriormente se debe proceder con la instalación del sistema operativo que aloja el paquete OpenBTS, sistema operativo instalado en una máquina virtualizada con *Oracle VM Virtual Box 6.1.2 r135662*.

2.3.2 Instalación y Carga de Componentes

En la instalación del sistema operativo se define idioma, nombre de usuario administrador y una recomendación importante es activar la casilla que permite al sistema operativo actualizarse posterior a dar inicio, pues ello previene que las actualizaciones afecten el funcionamiento de los paquetes software de la estación base transceptora.

El detalle correspondiente a los siguientes ítems se encuentra descrito en el anexo 1 denominado “Instalación de estación de comunicación móvil GSM basada en SDR”.

- Actualización del sistema operativo Ubuntu.
- Actualización e instalación de paquetes adicionales.
- Activación reenvío de datos y configuración de tablas IP.
- Carga de bases de datos de componentes.
- Configuración de Asterisk.

2.3.3 Inicialización Estación de Comunicación GSM Basada en SDR

Una vez realizada la configuración de los componentes de la arquitectura de la estación de comunicación GSM, se inicializan por separado los módulos, en el orden presentado, para cada uno de forma independiente se hace uso de una línea de comandos.

2.3.3.1 Módulo Transceptor

Para la iniciar el módulo transceptor debe estar ubicado sobre la carpeta */sdr/dev/openbts/Transceiver52M/*, para conectarse al hardware USRP, en donde se ejecuta la siguiente sentencia, obteniéndose la salida de la Ilustración 15.

```
| sudo ./transceiver
```



```
diegofgalvisc@diegofgalvisc:~/sdr/dev/openbts/Transceiver52M$ sudo ./transceiver
linux; GNU C++ version 5.3.1 20151219; Boost_105800; UHD_003.009.002-0-unknown

Using internal frequency reference
-- Detected Device: B210
-- Operating over USB 3.
-- Initialize CODEC control...
-- Initialize Radio control...
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing register loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Performing CODEC loopback test... pass
-- Asking for clock rate 16.000000 MHz...
-- Actually got clock rate 16.000000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
-- Performing timer loopback test... pass
-- Setting master clock rate selection to 'automatic'.
-- Asking for clock rate 32.000000 MHz...
-- Actually got clock rate 32.000000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
-- Performing timer loopback test... pass
-- Asking for clock rate 26.000000 MHz...
-- Actually got clock rate 26.000000 MHz.
-- Performing timer loopback test... pass
-- Performing timer loopback test... pass
```

Ilustración 15. Inicialización módulo transceptor estación GSM

2.3.3.2 Módulo OpenBTS

El módulo OpenBTS se inicia desde la carpeta `/sdr/dev/openbts/apps/`, en donde se ejecuta la sentencia siguiente, obteniéndose la salida de las Ilustraciones 16,17.

| `sudo ./OpenBTS`

```
diegofgalvisc@diegofgalvisc:~/sdr/dev/openbts/apps$ sudo ./OpenBTS
[sudo] password for diegofgalvisc:
ALERT 5891:5891 2022-04-12T21:28:10.2 OpenBTS.cpp:595:main: OpenBTS (re)starting
, ver 5.0-master build date/time 2022-04-11T10:46:17
ALERT 5891:5891 2022-04-12T21:28:10.2 OpenBTS.cpp:596:main: OpenBTS reading conf
ig file /etc/OpenBTS/OpenBTS.db
1649816890.284719 139959151421248:

OpenBTS
Copyright 2008, 2009, 2010 Free Software Foundation, Inc.
Copyright 2010 Kestrel Signal Processing, Inc.
Copyright 2011-2021 Range Networks, Inc.
Release 5.0-master+7766ef94f2 CommonLibs:76b71d509b P formal build date 2022-04-
11T10:38:34
"OpenBTS" is a registered trademark of Range Networks, Inc.

Contributors:
Range Networks, Inc.:
  David Burgess, Harvind Samra, Donald Kirker, Doug Brown,
  Pat Thompson, Kurtis Heimerl, Michael Iedema, Dave Gotwisner
Kestrel Signal Processing, Inc.:
  David Burgess, Harvind Samra, Raffi Sevlian, Roshan Baliga
GNU Radio:
  Johnathan Corgan
Others:
  Anne Kwong, Jacob Appelbaum, Joshua Lackey, Alon Levy
  Alexander Chemeris, Alberto Escudero-Pascual
Incorporated L/GPL libraries and components:
  libortp, LGPL, 2.1 Copyright 2001 Simon MORLAT simon.morlat@linphone.org
```

Ilustración 16. Inicialización módulo OpenBTS estación GSM 1/2



```
The OpenBTS software applications and associated documentation are "Commercial Item(s)," as that term is defined at 48 C.F.R. Section 2.101, consisting of "Commercial Computer Software" and "Commercial Computer Software Documentation," as such terms are used in 48 C.F.R. 12.212 or 48 C.F.R. 227.7202, as applicable. Consistent with 48 C.F.R. 12.212 or 48 C.F.R. Sections 227.7202-1 through 227.7202-4, as applicable, the Commercial Computer Software and Commercial Computer Software Documentation are being licensed to U.S. Government end users (a) only as Commercial Items and (b) with only those rights as are granted to all other end users pursuant to the terms and conditions of Range Networks' software licenses and master customer agreement.
```

```
1649816890.302533 139959151421248:
Starting the system...
1649816890.916103 139959151421248:
system ready

1649816890.916141 139959151421248:
use the OpenBTSCLI utility to access CLI

1649816890.916243 139959151421248: OpenBTSCLI network socket support for tcp:49300

OpenBTS> Processing signal vector for sig 28
Done processing signal vector for sig 28
Rethrowing signal 28
system call during CLI select loop: Interrupted system call
```

Ilustración 17. Inicialización módulo OpenBTS estación GSM 2/2

2.3.3.3 Módulo Smqueue

El módulo Smqueue habilita el servicio de mensajería SMS, se debe estar ubicado sobre la carpeta `/sdr/dev/smqueue/smqueue/` en donde se ejecutará la sentencia presentada a continuación, obteniéndose la salida de las Ilustración 18.

```
| sudo ./smqueue
```

```
diegofgalvisc@diegofgalvisc:~/sdr/dev/smqueue/smqueue$ sudo ./smqueue
[sudo] password for diegofgalvisc:
ALERT 12100:12100 2022-04-13T22:19:46.3 smqueue.cpp:2798:main: smqueue (re)starting
smqueue logs to syslogd facility LOCAL7, so there's not much to see here
```

Ilustración 18. Inicialización módulo smqueue estación GSM

2.3.3.4 Módulo Sipauthserve

El módulo Sipauthserve habilita el servicio de autenticación, para ello se debe estar ubicado sobre la carpeta `/sdr/dev/subcriberRegistry/apps/` en donde se ejecuta la sentencia presentada a continuación, obteniéndose la salida de las Ilustración 19.

```
| sudo ./sipauthserve
```



```
diegofgalvisc@diegofgalvisc:~/sdr/dev/subscriberRegistry/apps$ sudo ./sipauthserve  
[sudo] password for diegofgalvisc:  
ALERT 21889:21889 2022-04-13T22:54:53.7 sipauthserve.cpp:328:main: ./sipauthserve (re)starting
```

Ilustración 19. Inicialización módulo sipauthserve estación GSM

El paquete SIPAuthServe se contiene el registro de suscriptores, es decir, cumple la función del HLR, VLR, AuC y EiR en una red GSM tradicional. Es el encargado de acceder a una base de datos de SQLite3, la misma base de datos a la que accede Asterisk para gestionar los usuarios y llamadas.

2.3.3.5 Asterisk

Asterisk es una central telefónica software, en este caso hace el papel de MSC, ya que es la encargada de enrutar las llamadas entre los diferentes usuarios mediante VoIP. Los usuarios se conectan mediante el protocolo SIP. En el caso de OpenBTS, cada usuario es un usuario SIP, OpenBTS trae por defecto una versión de Asterisk junto con un paquete de configuración automático, haciendo más sencilla su configuración.

Para ejecutar el Asterisk, es necesario tener sesión de súper administrador, ejecutando la sentencia:

```
| asterisk -vvvc // o en su defecto  
| asterisk -r
```

Obteniéndose las salidas que se muestran en las Ilustraciones 20 y 21.



```
Asterisk Console on 'diegofgalvisc' (pid 25178)
diegofgalvisc@diegofgalvisc:~$ sudo su
[sudo] password for diegofgalvisc:
root@diegofgalvisc:/home/diegofgalvisc# asterisk -vvvc
Privilege escalation protection disabled!
See https://wiki.asterisk.org/wiki/x/1gKfAQ for more details.
Asterisk 11.7.0.5, Copyright (C) 1999 - 2013 Digium, Inc. and others.
Created by Mark Spencer <markster@digium.com>
Asterisk comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY; type 'core show warranty' for details.
This is free software, with components licensed under the GNU General Public License version 2 and other licenses; you are welcome to redistribute it under certain conditions. Type 'core show license' for details.
=====
Running as user 'asterisk'
Running under group 'www-data'
[ Initializing Custom Configuration Options ]
== Parsing '/etc/asterisk/extconfig.conf': Found
== Parsing '/etc/asterisk/logger.conf': Found
== Manager registered action DBGet
== Manager registered action DBPut
== Manager registered action DBDel
== Manager registered action DBDelTree
== Registered custom function 'MESSAGE'
== Registered custom function 'MESSAGE_DATA'
== Registered application 'MessageSend'
== Manager registered action MessageSend
== Manager registered action DataGet
Asterisk Dynamic Loader Starting:
== Parsing '/etc/asterisk/modules.conf': Found
```

Ilustración 20. Inicialización Asterisk estación GSM 1/2

```
Asterisk Console on 'diegofgalvisc' (pid 25178)
== Registered translator 'testlawtolin' from format testlaw to slin, table cost, 900000, computational cost 31
codec_ulaw.so => (mu-Law Coder/Decoder)
== Registered custom function 'DB'
== Registered custom function 'DB_EXISTS'
== Registered custom function 'DB_DELETE'
== Registered custom function 'DB_KEYS'
func_db.so => (Database (astdb) related dialplan functions)
== Registered custom function 'AUDIOHOOK_INHERIT'
func_audiohookinherit.so => (Audiohook inheritance function)
== Registered bridge technology multiplexed_bridge
bridge_multiplexed.so => (Multiplexed two channel bridging module)
== Registered application 'Record'
app_record.so => (Trivial Record Application)
== Registered custom function 'MUTEAUDIO'
== Manager registered action MuteAudio
res_mutestream.so => (Mute audio stream resources)
res_realtime.so => (Realtime Data Lookup/Rewrite)
== Registered custom function 'CUT'
== Registered custom function 'SORT'
func_cut.so => (Cut out information from a string)
== Registered translator 'g726tolin' from format g726 to slin, table cost, 900000, computational cost 618
== Registered translator 'lintog726' from format slin to g726, table cost, 600000, computational cost 3935
== Registered translator 'g726aal2tolin' from format g726aal2 to slin, table cost, 900000, computational cost 868
== Registered translator 'lintog726aal2' from format slin to g726aal2, table cost, 600000, computational cost 2141
codec_g726.so => (ITU G.726-32kbps G726 Transcoder)
Asterisk Ready.
*CLI>
```

Ilustración 21. Inicialización Asterisk estación GSM 2/2



2.3.3.6 Consola OpenBTS

Es un software para gestionar y monitorear las configuraciones de la BTS. Al instalar OpenBTS, este gestor se instala en la carpeta principal de OpenBTS y también una copia en la carpeta personal del usuario “*openbts*”.

Para la inicialización de la consola OpenBTS se debe garantizar que el módulo OpenBTS se haya inicializado previamente y este ubicado sobre la carpeta */sdr/dev/openbts/apps/*, mediante esta consola se tendrá acceso a herramientas propias de OpenBTS, como es el caso del comando *TMSIS*, como una de las alternativas de encontrar el IMSI de los dispositivos móviles; para inicializar la consola se debe ejecutar la sentencia presentada a continuación, obteniéndose la salida de las Ilustración 22.

```
| sudo ./OpenBTSCLI
```

```
diegofgalvisc@diegofgalvisc:~/sdr/dev/openbts/apps$ sudo ./OpenBTSCLI
OpenBTS Command Line Interface (CLI) utility
Copyright 2012, 2013, 2014 Range Networks, Inc.
Licensed under GPLv2.
Includes readline, GPLv2.
Connecting to 127.0.0.1:49300...
Remote Interface Ready.
Type:
"help" to see commands,
"version" for version information,
"notices" for licensing information,
"quit" to exit console interface.
```

Ilustración 22. Inicialización consola OpenBTSCLI estación GSM

Algunos de los comandos a los que se puede acceder con la consola OpenBTS son:

- “*Help*” para identificar comandos disponibles; ver Ilustración 23.
- “*version*” para identificar la versión de OpenBTS; ver ilustración 24.
- “*config*” para validar configuración por defecto de GSM; ver ilustración 25,26.

```
OpenBTS> help
Type "help" followed by the command name for help on that command.

alarms      audit       calls
cbs         cellid     chans
config      crashme    devconfig
endcall     freqcorr   gprs
handover    help       load
memstat     neighbors  noise
notices     page       power
rawconfig   regperiod  restart
rmconfig    rxgain     sendsimple
sendsms     sgsn      shutdown
stats       sysinfo    tmsis
trxfactory  txatten    unconfig
uptime     version
```

Ilustración 23. Comando “help” en OpenBTSCLI



```
OpenBTS> version  
release 5.0-master+7766ef94f2 CommonLibs:76b71d509b+GPRS P built 2022-04-11T10:3  
8:34
```

Ilustración 24. Comando "version" en OpenBTSCLI

```
OpenBTS> config GSM.Radio  
GSM.Radio.ARFCNs 1 [default]  
GSM.Radio.Band 900 [default]  
GSM.Radio.C0 51 [default]  
GSM.Radio.MaxExpectedDelaySpread 4 [default]  
GSM.Radio.PowerManager.MaxAttenuation 10 [default]  
GSM.Radio.PowerManager.MinAttenuation 0 [default]  
GSM.Radio.RSSITarget -50 [default]  
GSM.Radio.SNRTarget 10 [default]
```

Ilustración 25. Comando "config" en OpenBTSCLI 1/2

```
OpenBTS> config GSM.Identity  
GSM.Identity.BSIC.BCC 2 [default]  
GSM.Identity.BSIC.NCC 0 [default]  
GSM.Identity.CI 10 [default]  
GSM.Identity.LAC 1000 [default]  
GSM.Identity.MCC 001 [default]  
GSM.Identity.MNC 01 [default]  
GSM.Identity.ShortName Range [default]
```

Ilustración 26. Comando "config" en OpenBTSCLI 2/2

Con esta interfaz se pueden configurar todos los parámetros de la estación base, así como enviar SMS, ver los canales activos, la carga de uso de la BTS, modificar parámetros de la interfaz radio (potencia de emisión, sensibilidad del receptor, entre otros). También es posible monitorear las llamadas en curso y terminarlas en caso de ser necesario.

2.3.4 Configuración Parámetros de Estación Base

Al inicializar los componentes de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, son cargados con los valores por defecto, para poner en funcionamiento la estación de comunicación, es necesario modificar algunos valores, de acuerdo a las necesidades, a continuación se mencionan los parámetros a modificar, proceso que realiza en la consola OpenBTSCLI.

2.3.4.1 Permiso de Registro en la Estación de Comunicación Móvil

Por defecto el acceso a los dispositivos móviles a la estación de comunicación móvil está restringido; razón por la cual se debe permitir que cualquier dispositivo móvil



acceda a la estación de comunicación GSM, para ello ejecutar la siguiente sentencia:

```
| config Control.LUR.OpenRegistration .*
```

La salida se presenta en la Ilustración 27.

```
OpenBTS> config Control.LUR.OpenRegistration .*  
Control.LUR.OpenRegistration changed from "" to ".*"
```

Ilustración 27. Configuración registro cualquier dispositivo móvil

2.3.4.2 Banda de Frecuencia de Trabajo

Es posible configurar la banda de trabajo GSM, para OpenBTS se puede trabajar en la banda de 850 MHz, 900 MHz o 1800 MHz teniendo en cuenta que al escoger los dispositivos hardware se decidió trabajar con una antena VERT900, se tiene la alternativa de hacer uso de una de las bandas anteriores, para ello ejecutar la sentencia:

```
| config GSM.Radio.Band 900
```

La Ilustración 28 muestra la salida de esta sentencia.

```
OpenBTS> config GSM.Radio.Band 900  
GSM.Radio.Band changed from "850" to "900"  
GSM.Radio.Band is static; change takes effect on restart
```

Ilustración 28. Configuración banda 900 MHz estación GSM

La validación de la modificación de esta sentencia se valida mediante la ejecución de `config GSM.Radio`, la cual se presenta en la Ilustración 29.

```
OpenBTS> config GSM.Radio  
GSM.Radio.ARFCNs 1 [default]  
GSM.Radio.Band 900 [default]  
GSM.Radio.C0 51 [default]  
GSM.Radio.MaxExpectedDelaySpread 4 [default]  
GSM.Radio.PowerManager.MaxAttendB 10 [default]  
GSM.Radio.PowerManager.MinAttendB 0 [default]  
GSM.Radio.RSSITarget -50 [default]  
GSM.Radio.SNRTarget 10 [default]
```

Ilustración 29. Validación cambio de banda estación de comunicación GSM



En este trabajo se consideran las tres bandas de trabajo de GSM, es decir 850 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, la configuración para seleccionar alguna de ellas se realiza mediante la consola OpenBTSCLI, tal como se muestra en la Ilustración 30.

```
OpenBTS> config GSM.Radio.Band 850
GSM.Radio.Band changed from "900" to "850"
WARNING: GSM.Radio.C0 (120) falls outside the valid range of ARFCNs 128-251 for
GSM.Radio.Band (850)
GSM.Radio.Band is static; change takes effect on restart
OpenBTS> config GSM.Radio.Band 1800
GSM.Radio.Band changed from "850" to "1800"
WARNING: GSM.Radio.C0 (130) falls outside the valid range of ARFCNs 512-885 for
GSM.Radio.Band (1800)
GSM.Radio.Band is static; change takes effect on restart
```

Ilustración 30. Configuración bandas 850 y 1800 MHz estación GSM

Cada una de las bandas GSM poseen un rango de frecuencias de trabajo, dentro de los cuales se encuentran los canales, los cuales deben ser configurados de acuerdo a la Tabla 13.

En una llamada se establecen dos canales de comunicación, uno de transmisión (Tx) y otro de recepción (Rx), los cuales poseen una separación y ancho de banda que varía de acuerdo a la banda GSM empleada, los cuales se exponen en la Tabla 13.

Tabla 13. Canalizaciones GSM [9]

Banda (MHz)	Delta Port. (MHz)	Ancho Banda (KHz)	ARFCNs	Frec. Up MHz	Frec. Down MHz
850	45	200	128<n<251	824.2 + 0.2*(n-128)	Frec. Up (n) +45
900	45	200	1<n<124	890 + 0.2*n	Frec. Up (n) +45
1800	95	400	512<n<885	1710.2 +0.2*(n-512)	Frec. Up (n) +95

De acuerdo a la Ilustración 30 es importante ubicar el canal en el rango correspondiente, para ello se debe hacer uso de la sentencia:

```
| config GSM.Radio.C0 XXX
```

En donde XXX corresponde al valor del canal n definido, de acuerdo a la Tabla 13. En la Ilustración 30, se muestra la selección del canal 130 para la banda de trabajo GSM de 850 MHz.

```
OpenBTS> config GSM.Radio.C0 130
GSM.Radio.C0 changed from "120" to "130"
GSM.Radio.C0 is static; change takes effect on restart
```

Ilustración 31. Configuración canal para banda GSM 850 MHz



2.3.4.3 Ganancia de Antena

Para un escenario de prueba de comunicación de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, en donde la distancia entre el dispositivo hardware SDR y los dispositivos móviles es posible que al tener la ganancia de la antena un valor alto, los dispositivos móviles puedan recibir la señal de la antena y estos queden en zona de saturación y no se conecten adecuadamente a la estación, razón por la cual es recomendable disminuir la potencia de la antena, en caso de que se decida realizar pruebas de alcance de la estación, este parámetro de ganancia debería ser máximo, la modificación a la potencia de la antena se ejecuta mediante la siguiente sentencia:

```
| devconfig GSM.Radio.RxGain 18
```

La salida de esta sentencia se aprecia en la ilustración 32.

```
OpenBTS> devconfig GSM.Radio.RxGain 18
GSM.Radio.RxGain changed from "47" to "18"
GSM.Radio.RxGain is static; change takes effect on restart

OpenBTS> rxgain          OpenBTS> txatten
current RX gain is 18 dB  current TX attenuation is 0 dB
```

Ilustración 32. Configuración ganancia de antena USRP

2.3.4.4 Nombre Estación de Comunicación Móvil

Para personalizar la estación de comunicación móvil es posible asignar un nombre, para esto se emplea la sentencia:

```
| config GSM.Identity.ShortName Mallorca
```

2.3.4.5 Mensaje Bienvenida

También posible configurar un mensaje de bienvenida a la estación de comunicación móvil haciendo uso de la sentencia:

```
| config Control.LUR.NormalRegistration.Message Bienvenido a Mallorca 1
```

La salida de estas acciones se visualizan en los teléfonos móviles cuando se registran en la estación de comunicación, el mensaje de bienvenida está acompañado del IMSI de cada uno de los teléfonos móviles, tal como muestran las Ilustraciones 33 y 34.

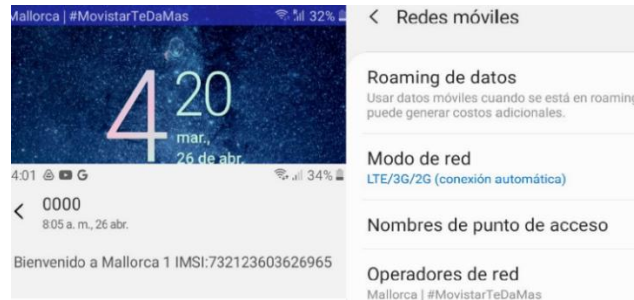


Ilustración 33. Conexión red y mensaje de bienvenida Samsung J6+

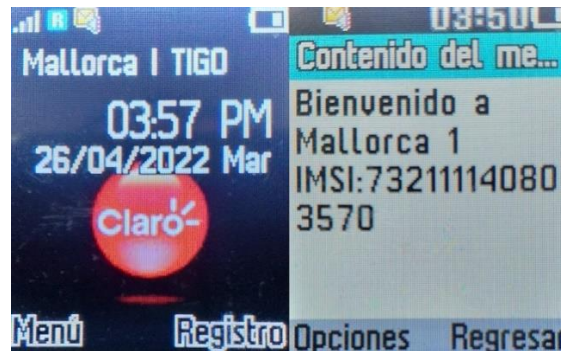


Ilustración 34. Conexión red y mensaje de bienvenida Alcatel Onetouch

2.3.4.6 IMSI

Se debe configurar la estación de comunicación GSM, con los parámetros correspondientes al país, es decir el MCC, de acuerdo a la Tabla 3, corresponde para Colombia el número 732 y para MNC correspondiente al código del operador local hacer uso de algún valor que no esté asignado a alguno de los operadores de Colombia, para evitar conflicto; estas configuraciones se realizan con ayuda de las siguientes sentencias:

- | `config GSM.Identity.MCC 732`
- | `config GSM.Identity.MNC 001`

La salida de las sentencias anteriores se identifica en la Ilustración 35.

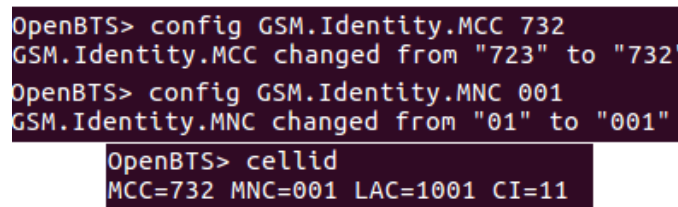


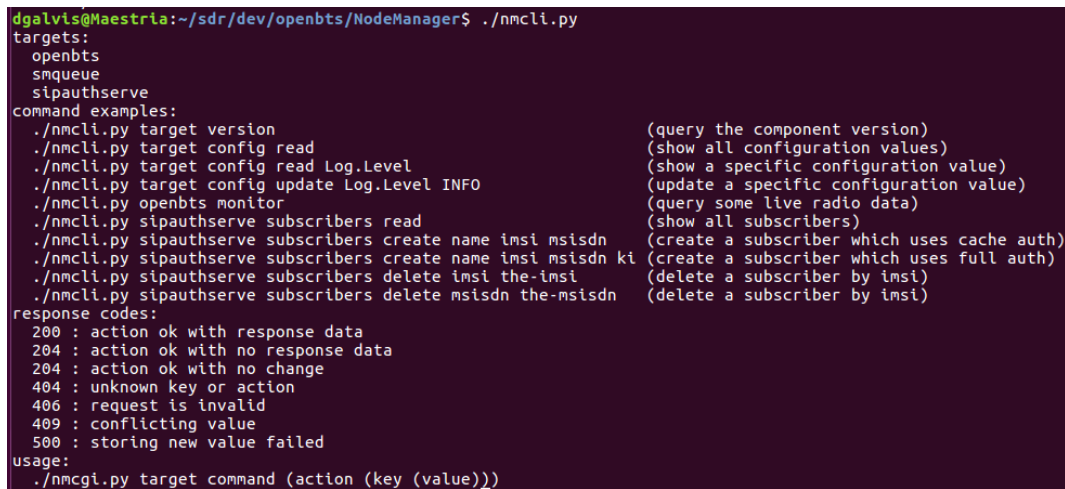
Ilustración 35. Salida configuración MCC MNC

2.3.4.7 NodeManger

NodeManager es una API que permite a aplicaciones de terceros administrar diferentes bases de datos y configuraciones del paquete OpenBTS: OpenBTS, SIPAuthServe y SMQueue. Para ello utiliza una interfaz JSON. Se indica que la versión comercial de OpenBTS hace uso de este paquete para realizar su configuración.

Para acceder a este paquete es necesario estar ubicado en la ruta `/sdr/dev/NodeManager` y en ella se ejecuta la sentencia:

```
| ./nmcli.py
```



```
dgalvis@Maestría:~/sdr/dev/openbts/NodeManager$ ./nmcli.py
targets:
  openbts
  smqueue
  sipauthserve
command examples:
  ./nmcli.py target version           (query the component version)
  ./nmcli.py target config read      (show all configuration values)
  ./nmcli.py target config read Log.Level (show a specific configuration value)
  ./nmcli.py target config update Log.Level INFO (update a specific configuration value)
  ./nmcli.py openbts monitor         (query some live radio data)
  ./nmcli.py sipauthserve subscribers read (show all subscribers)
  ./nmcli.py sipauthserve subscribers create name imsi msisdn (create a subscriber which uses cache auth)
  ./nmcli.py sipauthserve subscribers create name imsi msisdn ki (create a subscriber which uses full auth)
  ./nmcli.py sipauthserve subscribers delete imsi the-imsi (delete a subscriber by imsi)
  ./nmcli.py sipauthserve subscribers delete msisdn the-msisdn (delete a subscriber by imsi)
response codes:
  200 : action ok with response data
  204 : action ok with no response data
  204 : action ok with no change
  404 : unknown key or action
  406 : request is invalid
  409 : conflicting value
  500 : storing new value failed
usage:
  ./nmcli.py target command (action (key (value)))
```

Ilustración 36. Detalle paquete NodeManager

En la Ilustración 36 se muestra una imagen de la salida de las aplicaciones a las cuales se accede con la sentencia indicada.

2.3.4.8 Registro de Usuarios

En este caso particular NodeManager se utiliza para activar los nuevos usuarios en la red GSM. Una vez conocidos los IMSI de las MS (obtenidos en el mensaje de bienvenida enviado por la celda al MS) se deben añadir los usuarios al registro de suscriptores por medio de las sentencias:

```
| ./nmcli.py sipauthserve subscribers create IMSI732123603626965 1234567  
IMSI732123603626965  
| ./nmcli.py sipauthserve subscribers create IMSI732111140803570 1234578  
IMSI732111140803570
```



Con la sentencias anteriores, se han creado dos unas nuevas entradas en la tabla de suscriptores de la base de datos de SIPAuthServe, cuyos usuarios respectivamente son “IMSI732123603626965”y “IMSI732111140803570”.

2.3.4.9 Listado Usuarios Registrados

Es posible mostrar la lista con todos los suscriptores que se encuentran activos en la estación de comunicación móvil, ejecutando la sentencia en la misma ruta:

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

Cuya salida se muestra en la Ilustración 37.

```
dgavis@Maestria:~/sdr/dev/NodeManager$ ./nmcli.py sipauthserve subscribers read
raw request: {"command":"subscribers","action":"read","key":"","value":""}
raw response: {
  "code" : 200,
  "data" : [
    {
      "imsi" : "IMSI732123603626965",
      "msisdn" : "1234567",
      "name" : "IMSI732123603626965"
    },
    {
      "imsi" : "IMSI732111140803570",
      "msisdn" : "1234578",
      "name" : "IMSI732111140803570"
    }
  ]
}
```

Ilustración 37. Usuarios registrados Sipauthserve

2.3.4.10 Eliminación Usuarios

Es posible eliminar un usuario de la base de datos utilizando la sentencia:

```
| ./nmcli.py sipauthserve subscribers delete imsi IMSI732123603626965
```




3. RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados de la verificación de los servicios implementados, validando los parámetros de los canales, evaluando capacidades y limitaciones técnicas, en el establecimiento de la llamada o el envío de mensajes de texto.

3.1 Verificación de Servicios

En el capítulo anterior se activaron los servicios requeridos para el funcionamiento de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, es posible verificar su estado, en el PC donde se encuentra instalada la aplicación, validando los procesos activos en el sistema Ubuntu 16.04, para ello se ejecuta la siguiente sentencia en la línea de comandos:

```
| ps -e
```

La salida de esta sentencia se muestra en la Ilustración 38, en donde se verifican procesos activos en el sistema para Asterisk, sipauthserve, smqueue, OpenBTS, OpenBTCLI.

```
3854 pts/19 00:00:17 smqueue
3873 pts/20 00:00:00 bash
3958 ? 00:00:00 cupsd
3959 ? 00:00:00 cups-browsed
4023 pts/20 00:00:00 sudo
4024 pts/20 00:00:00 sipauthserve
4042 pts/21 00:00:00 bash
4053 pts/21 00:00:00 sudo
4054 pts/21 00:00:00 su
4055 pts/21 00:00:00 bash
4306 pts/21 00:04:11 asterisk
18154 pts/22 00:00:00 OpenBTCLI
18281 pts/4 00:00:00 sudo
18282 pts/4 00:04:40 OpenBTS
```

Ilustración 38. Validación servicios con procesos activos en Ubuntu 16.04

3.2 Búsqueda de Red en Terminales Móviles

Una vez realizada la configuración de la banda de frecuencia y la canalización de la portadora, es posible buscar la portadora como red en los terminales, proceso de que difiere según el sistema operativo del terminal, a continuación se ilustra el proceso para los terminales que se utilizaron en el marco de esta tesis, las cuales se describieron en la Tabla 9.

3.2.1 Alcatel Onetouch

Para buscar la red denominada Mallorca en el terminal móvil Alcatel Onetouch se sigue la secuencia:

- Ingresar a **Menú**
- Seleccionar **Ajustes**
- En configuración seleccionar **De red**
- **Selección de red Manual**
- Seleccionar la red difundida por la estación, en este caso **Mallorca**

La Ilustración 39 muestra evidencia de la red seleccionada.

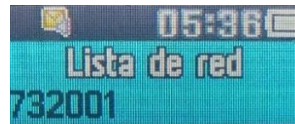


Ilustración 39. Lista de red en Alcatel Onetouch

En este caso particular la red mostrada no corresponde con el nombre de Mallorca, pero corresponde con la red configurada según la Ilustración 34, en donde se muestra la salida correspondiente al MCC y MNC.

3.2.2 Samsung Galaxy J6+

Teniendo en cuenta que el terminal móvil Samsung Galaxy J6+ es un teléfono inteligente se hace un poco diferente, buscando las configuraciones de red con los siguientes pasos:

- Ingresar a **Ajustes**
- Seleccionar **Conexiones**
- Escoger **Redes móviles**
- Seleccionar **Operadores de red**
- **Seleccionar manualmente**
- Seleccionar la red difundida por la estación, en este caso **Mallorca**

La evidencia de la red seleccionada se visualiza en la Ilustración 40.

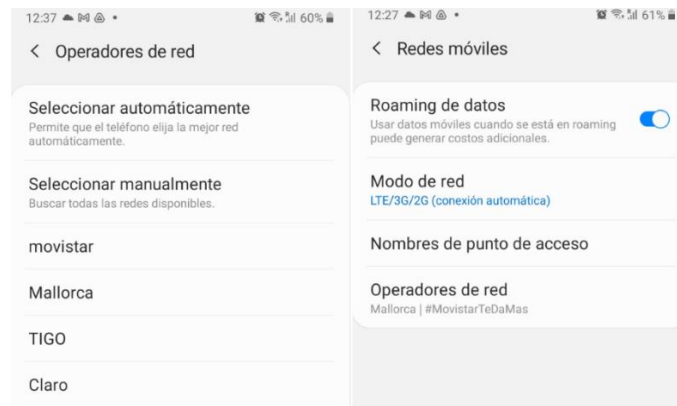


Ilustración 40. Lista de red en Samsung Galaxy J6+

Una vez la red se haya seleccionado, el dispositivo móvil ya se encuentra registrado en la estación de comunicación GSM, puede hacer uso de los servicios de llamadas 2G e intercambio de SMS con otros MS que estén en la misma red.

3.3 Pruebas de Conectividad

Una vez se encuentra en funcionamiento la estación de comunicación GSM basada en SDR, se verifica la frecuencia de trabajo de la estación, la conectividad de los usuarios móviles con la estación y la comunicación entre usuarios móviles mediante el envío de SMS y llamadas de voz GSM; estas pruebas corroboran el funcionamiento del paquete OpenBTS y en general de la arquitectura planteada e implementada.

3.3.1 Frecuencia de Trabajo

Para validar la frecuencia de trabajo se empleó un analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz, para determinar las frecuencias portadoras y el ancho de banda de los canales. En este caso se realizó el acople de una antena VERT900 al analizador R&S ZVL, para la recepción de las frecuencias, la Ilustración 41 muestra una imagen del esquema utilizado para la medición.

Las medidas realizadas con el analizador R&S ZVL se presentan en la Tabla 14.

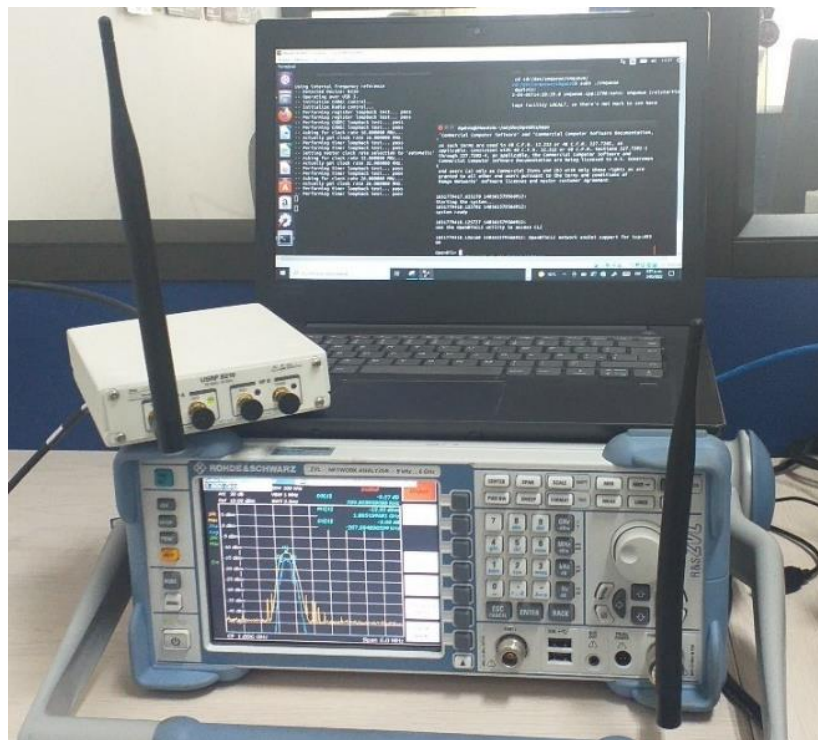


Ilustración 41. Conexión medidas de frecuencia con R&S ZVL

Tabla 14. Descripción medidas de frecuencia tomadas con R&S ZVL

Banda (MHz)	ARFCN	Frec. Up (MHz)	Frec. Down (MHz)	Delta Frec. (MHz)	Imagen
850	130	824.65	869.56	44.91	Ilustración 42
900	50	899.89	944.9	45.01	Ilustración 43
900	50	899.98	945.00	45.02	Ilustración 44
900	100	914.09	959.01	44.92	
1800	512	1710.18	1805.03	94.85	Ilustración 45

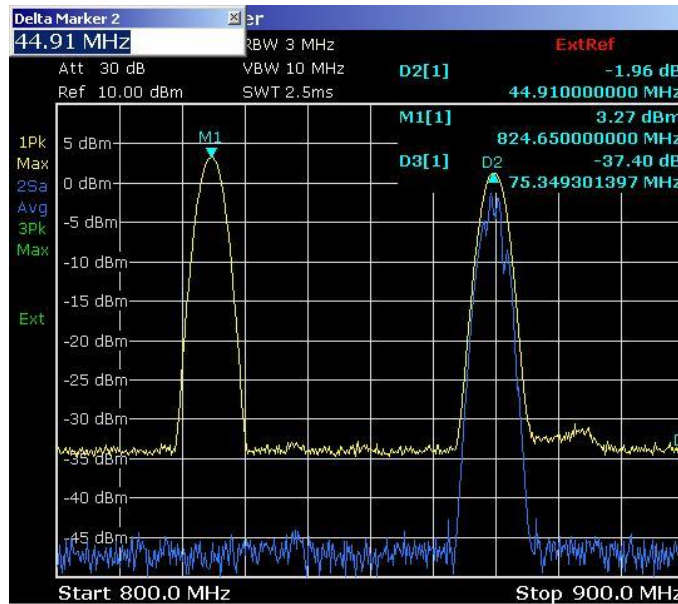


Ilustración 42. Frecuencias banda 850 GSM ARFCN 130

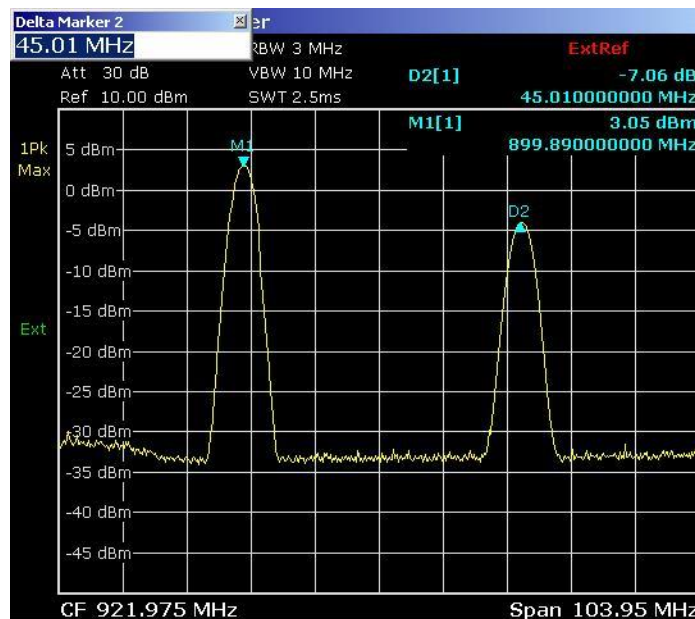


Ilustración 43. Frecuencias banda 900 GSM ARFCN 50

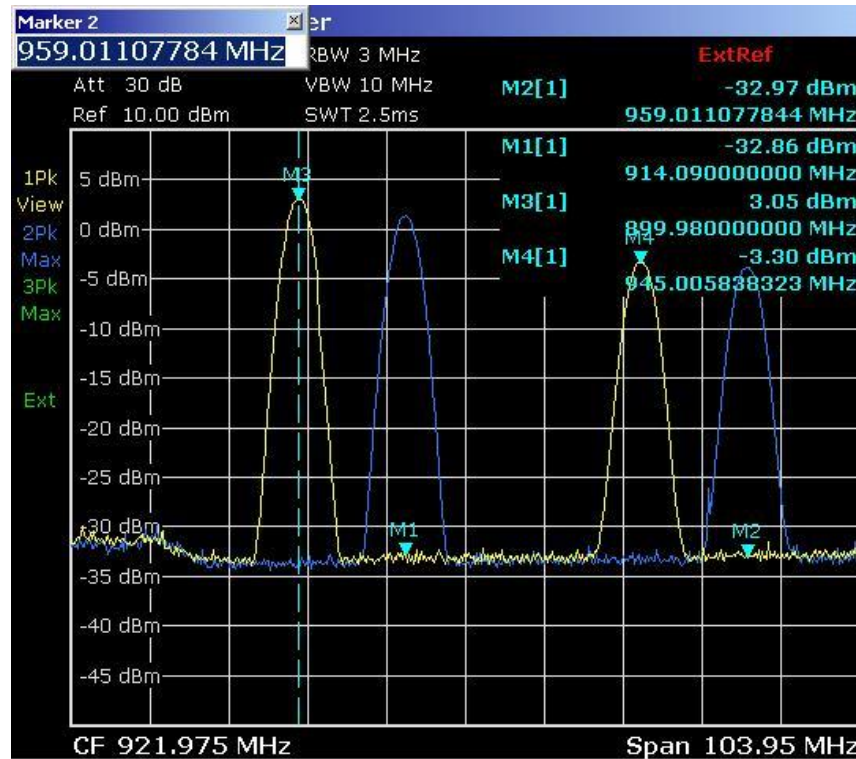


Ilustración 44. Frecuencias banda 900 GSM ARFCN 50 y 100

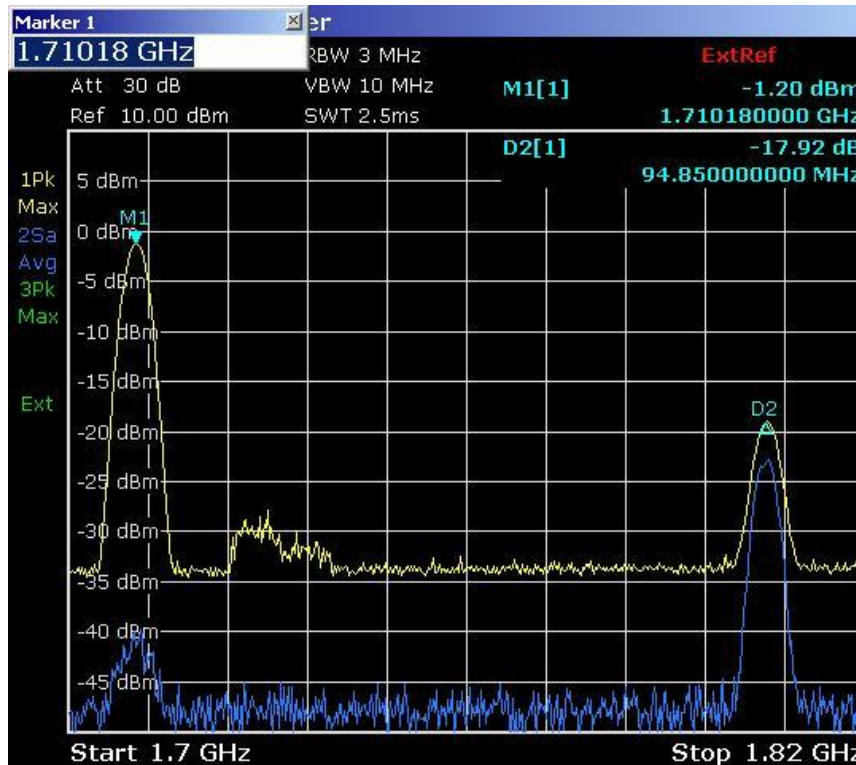


Ilustración 45. Frecuencias banda 1800 GSM ARFCN 512



Con base en las ilustraciones 42 a 45 y la Tabla 14, en donde se toman datos correspondiente a la separación entre portadoras para las bandas GSM 850, 900 y 1800, se encuentra que la separación entre portadoras está aproximada a lo planteado en el estándar de comunicación GSM, el cual corresponde a 45 MHz para las bandas GSM850, GSM900, mientras que para GSM 1800 es de 95 MHz; en la Tabla 15 se realiza una comparación entre los datos obtenidos y los indicados por el estándar GSM 05.05.

Tabla 15. Comparativo separación portadoras teórico vs obtenido

Banda (MHz)	Ch	Frec. Up (MHz)	Frec. Down (MHz)	Δ Frec. Obtenido (MHz)	Δ Frec. Teórico (MHz)	Dif Teórico vs Obtenido (KHz)
850	130	824.65	869.56	44.91	45	90
900	50	899.89	944.9	45.01		-10
900	50	899.98	945.00	45.02		-20
900	100	914.09	959.01	44.92		80
1800	512	1710.18	1805.03	94.85	95	150

3.3.2 Ancho de Banda

Por cada banda de trabajo GSM se realizó una medición del ancho de banda del canal, en donde se tienen en cuenta la frecuencia central de la banda, y las frecuencias laterales, las cuales se encuentran tomando una diferencia de -3 dB respecto de la frecuencia central; los datos obtenidos se exponen en la Tabla 16.

Tabla 16. Descripción medidas de ancho de banda tomadas con R&S ZVL

Banda (MHz)	Ch	Frec. Central (MHz)	Lat. Izquierda		Lat. Derecha		Ancho Banda (KHz)	Imagen
			Frec. (MHz)	Dif dB	Frec. (MHz)	Dif dB		
850	130	869.57	869.46	-3.09	869.70	-2.88	240	Ilustración 46
900	100	958.99	958.89	-3.21	959.10	-2.90	209	Ilustración 47
1800	512	1805.17	1805.05	-3.04	1805.29	-2.65	231.6	Ilustración 48

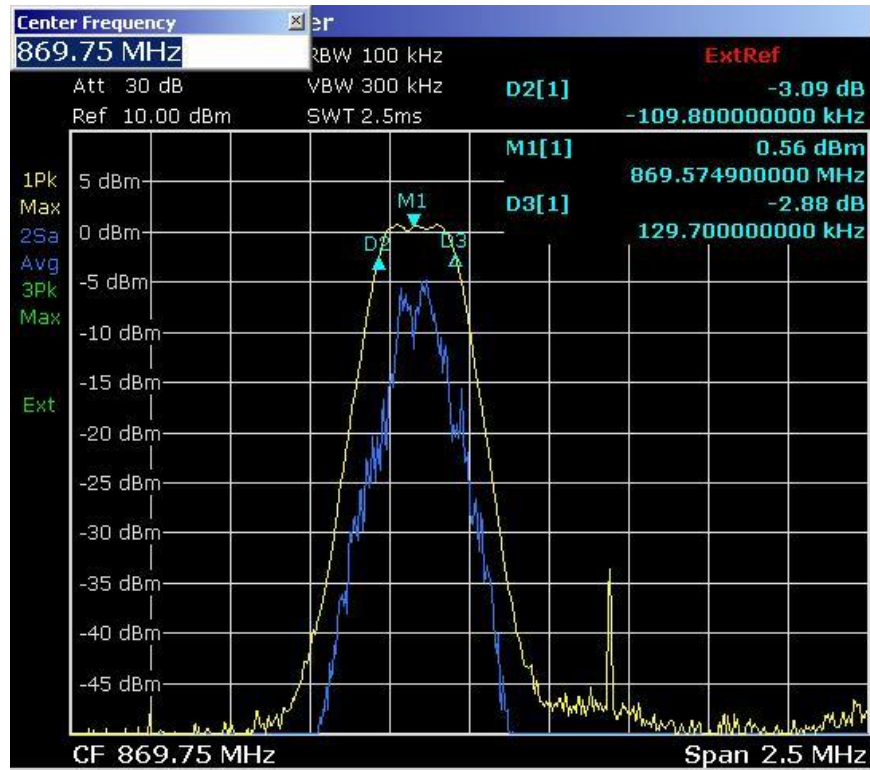


Ilustración 46. Ancho de banda GSM 850

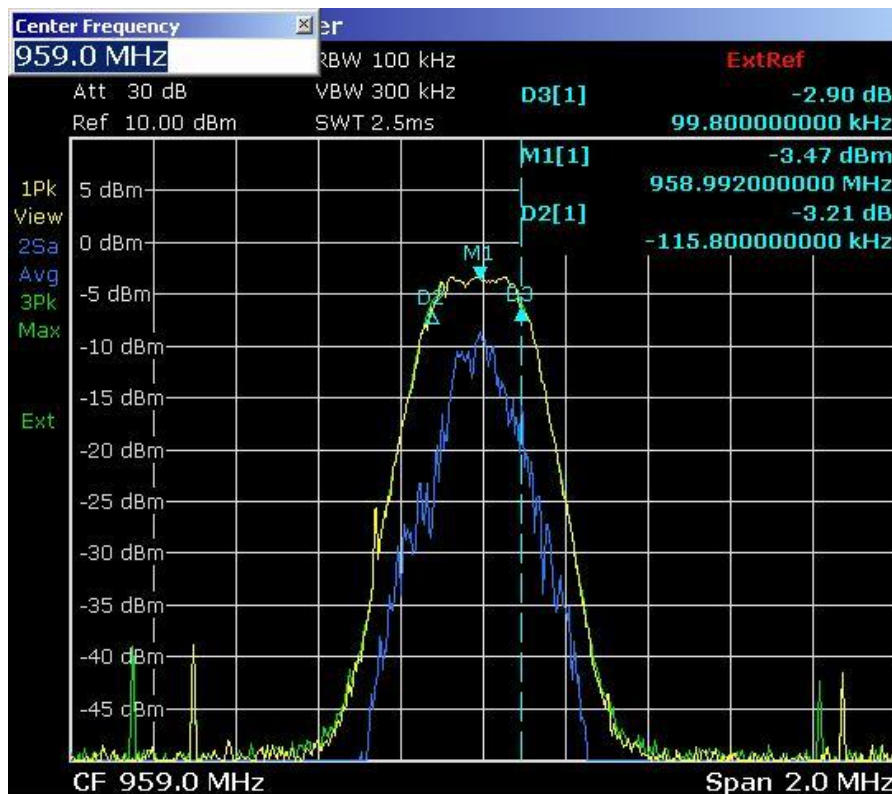


Ilustración 47. Ancho de banda GSM 900

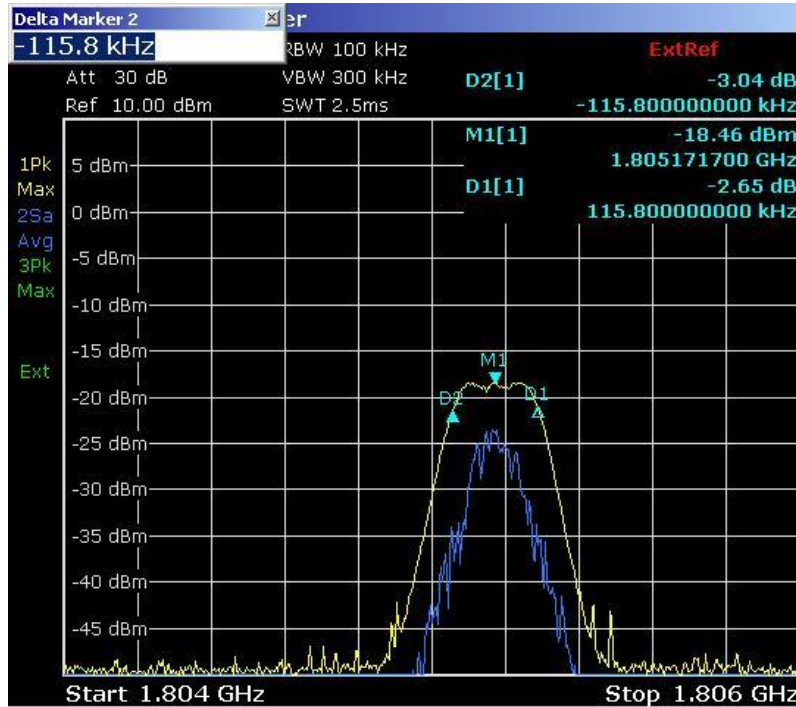


Ilustración 48. Ancho de banda GSM 1800

La Tabla 16 se construye con los datos obtenidos de las Ilustraciones 46 a 48, que corresponden a imágenes exportadas del analizador R&S ZVL, en donde se visualiza el ancho de banda de una portadora, en la Tabla 16 se calculan los anchos de banda experimentales de los canales y en la Tabla 17 se muestra un comparativo entre los anchos de banda experimentales y la especificación técnica de la ETSI GSM 05.05, que fija el ancho de banda teórico, en el comparativo se identifica una variación entre los datos experimentales respecto del estándar, la cual se atribuye a la precisión del equipo de medida, ya que requiere de una calibración periódica, la cual está pendiente de realizarse.

Tabla 17. Comparativo ancho de banda experimental, teórico

Banda (MHz)	ARF	Frec. Central (MHz)	Lat. Izquierda	Lat. Derecha	Ancho Banda Obtenido (KHz)	Ancho Banda Teórico (KHz)	Dif. Teórico vs Obtenido (KHz)
			Frec. (MHz)	Frec. (MHz)			
850	130	869.57	869.46	869.70	240	200	-40
900	100	958.99	958.89	959.10	209	200	-9
1800	512	1805.17	1805.05	1805.29	231.6	200	-31.6

3.3.3 OpenBTS

Es posible validar los MS registrados en la estación de comunicación GSM, y el tiempo de actividad de la celda, mediante la interfaz OpenBTSCLI ingresando las sentencias:

| tmsis



- | *uptime*
- | *stats GSM*

Como salida de la sentencia tmsis se muestran los MS registrados en el módulo OpenBTS identificando para ellos el IMSI, IMEI, tiempo de conexión a la estación; con el comando uptime es posible obtener la hora local registrada en la estación de comunicación y el tiempo de actividad de la misma; con el comando stats GSM se indican todos los eventos que están registrados en la estación de comunicación, tal como se visualiza en la Ilustración 49.

```
OpenBTS> tmsis
IMSI          TMSI IMEI          AUTH CREATED  ACCESSED  TMSI_ASSIGNED
732111140803570 -    014304007458500 1    21h   88m   0
732123603626965 -    351756100380790 1    21h   118m  0

OpenBTS> uptime
Local time 1651329465, 2022-04-30T09:37:45
watchdog timer expires in 0 minutes
uptime 19 hours, frame 0:2572457

OpenBTS> stats GSM
OpenBTS.GSM.MM.LUR.Start: 39 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.LUR.Timeout: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.Authenticate.Request: 29 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.Authenticate.Success: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.Authenticate.Failure: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.TMSI.Assigned: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.CMServiceRequest.MOC: 130 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.CMServiceRequest.MOSMS: 30 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.MM.CMServiceRequest.Unhandled: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.SMS.MOSMS.Start: 25 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.SMS.MOSMS.Complete: 25 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.SMS.MTSMS.Start: 45 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.SMS.MTSMS.Complete: 45 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.CC.MOC.Setup: 127 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.CC.MTC.Setup: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.CC.MTD.Release: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.CC.MOD.Disconnect: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.CC.CallMinutes: 217 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.CC.DroppedCalls: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.ChannelAssignment: 190 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.BeaconRegenerated: 65 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.ChannelSized: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.0: 335 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.1: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.2: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.3: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.4: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.5: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.6: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.7: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.8: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.9: 0 events over 464377 minutes
OpenBTS.GSM.RR.RACH.TA.Accepted.10: 0 events over 464377 minutes
```

Ilustración 49. MS conectados a OpenBTS, tiempo de actividad estación

3.3.4 Asterisk

De la misma manera que se verifican los MS en OpenBTS es posible validarlos en Asterisk, ejecutando las sentencias:

- | `sip show peers`
- | `sip show users`

```
*CLI> sip show peers
Name/username      Host                Dyn Forcerport ACL Port      Status      Description
00101100010        127.0.0.1           a                    5062        Unmonitored
IMSI732111140803570 (Unspecified)      D a          0          Unmonitored
IMSI732123603626965 (Unspecified)      D a          0          UNKNOWN
zoiper              (Unspecified)      D a          0          Unmonitored
4 sip peers [Monitored: 0 online, 1 offline Unmonitored: 1 online, 2 offline]
*CLI> sip show users
Username           Secret             Accountcode        Def.Context        ACL Forcerport
zoiper             3078923984        phones             No No
IMSI732111140803570 sip-external      No No
IMSI732123603626965 sip-external      No No
```

Ilustración 50. Validación conexión MS a Asterisk

Cuyas salidas se muestran en la Ilustración 50, en donde se valida que existen dos usuarios registrados con sus respectivos IMSI.

3.3.5 SMS

En la Tabla 18 se ilustran las pruebas realizadas con SMS, las cuales se realizaron teniendo los MS a 1 m del dispositivo USRP.

Tabla 18. Mensajes de texto en la estación de comunicación GSM

Origen	Destino	Mensaje	Evidencia
1234567	1234578	Desde J6 para Alcatel	Ilustración 51
1234578	1234578	Desde Alcatel para Alcatel	Ilustración 52
1234578	1234567	Desde Alcatel para j6	Ilustración 53
Estación base	1234567	Desde BS para J6	Ilustración 54
Estación base	1234578	Desde BS para Alcatel	Ilustración 55

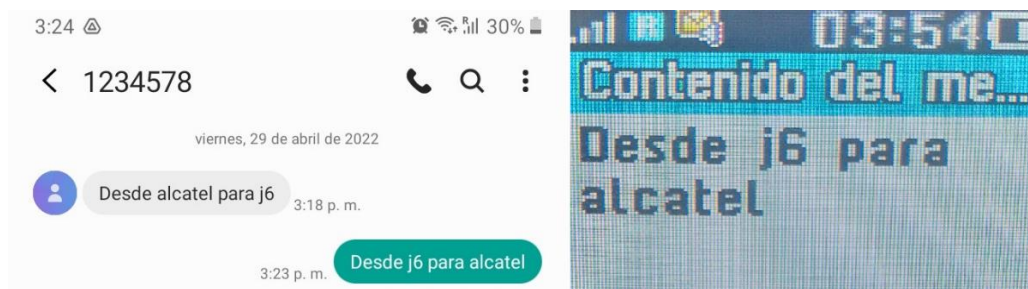


Ilustración 51. SMS desde Samsung J6 para Alcatel

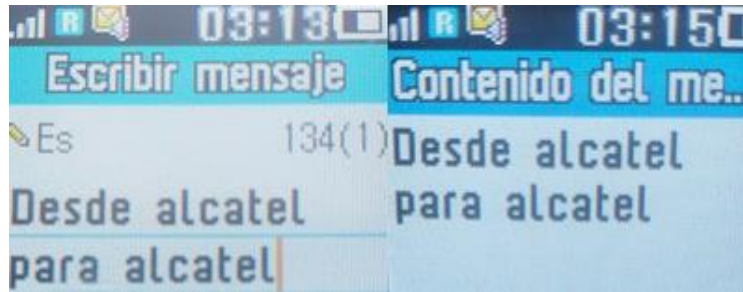


Ilustración 52. SMS desde Alcatel para Alcatel



Ilustración 53. SMS desde Alcatel para Samsung J6

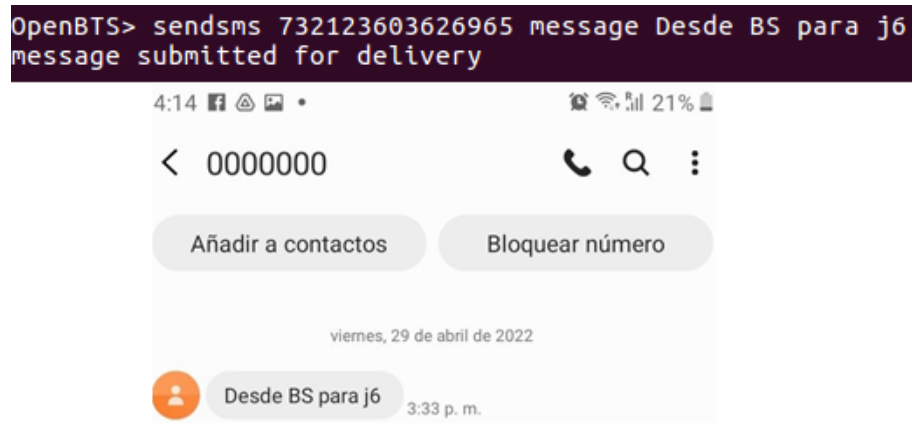


Ilustración 54. SMS desde OpenBTS para Samsung J6



```
OpenBTS> sendsms 732111140803570 message Desde BS para alcatel
message submitted for delivery
```

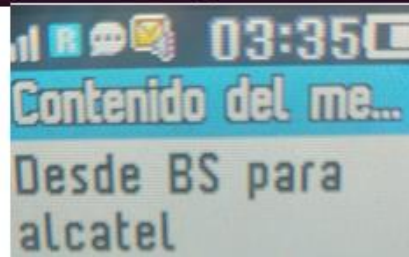


Ilustración 55. SMS desde OpenBTS para Alcatel

De acuerdo a las Ilustraciones 51 a 55 se verifica que los SMS enviados entre los MS y desde la BTS, llegaron a su destino, en este caso se intercambian mensajes entre dos dispositivos, pero en caso de tener registrados en la estación más dispositivos, se pueden intercambiar SMS entre ellos, para esta tesis se realizó el intercambio de mensajes entre 10 MS registrados.

3.3.6 Llamadas de Voz GSM

Se establecen llamadas de voz GSM haciendo uso de las MS de prueba, junto con las validaciones de establecimiento de canales en la interfaz OpenBTSCCLI y Asterisk, las cuales se muestran en la Tabla 19, las pruebas se realizaron teniendo los MS a 1 metro del dispositivo USRP.

Tabla 19. Evidencias llamadas de voz en estación GSM

Origen	Destino	Sentencia \ paquete	Observación	Evidencia
1234567	1234578	N.A.	Establecimiento de llamada.	Ilustración 56
		chans \ OpenBTSCCLI	Canal Tx, Rx levantados en la comunicación GSM.	Ilustración 57
		calls \ OpenBTSCCLI	Validación de la llamada establecida.	Ilustración 58
		load \ OpenBTSCCLI	Verificación canales GSM establecidos	Ilustración 59
		Salida automática en Asterisk.	Establecimiento de llamada.	Ilustración 60
		Sip ip channels \ Asterisk	Canal Tx, Rx levantados en la comunicación GSM.	Ilustración 61
		Sip ip channel XXXXXXXXXXXX \ Asterisk	Canal Tx, Rx detalle.	Ilustración 62



		<i>Sip show channelstats \ Asterisk</i>	Canal Tx, Rx levantados en la comunicación GSM, detalle estado del canal.	Ilustración 63
1234578	1234567	N.A.	Establecimiento de llamada.	Ilustración 64
		Salida automática en Asterisk.	Establecimiento de llamada.	Ilustración 65
		<i>Sip ip channels \ Asterisk</i>	Canal Tx, Rx levantados en la comunicación GSM.	Ilustración 66
		<i>Sip ip channel XXXXXXXXXXXX \ Asterisk</i>	Canal Tx, Rx detalle.	Ilustración 67
		<i>Sip show channelstats \ Asterisk</i>	Canal Tx, Rx levantados en la comunicación GSM, detalle estado del canal.	Ilustración 68

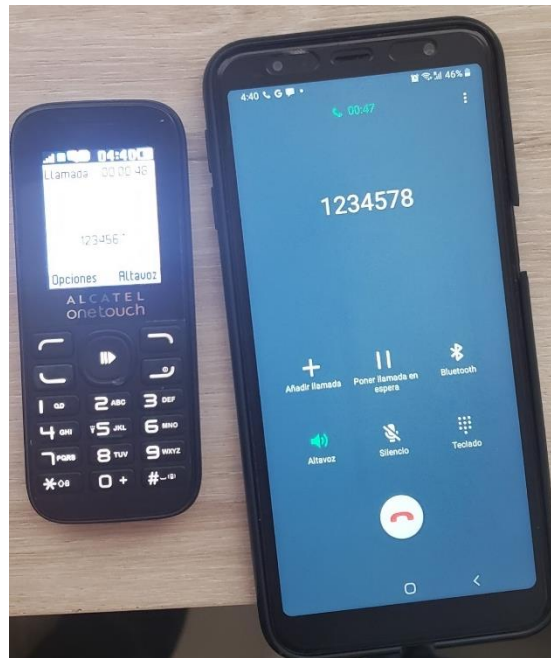


Ilustración 56. Establecimiento de llamada desde J6+ a Alcatel Onetouch

En el establecimiento de las llamadas se genera un canal de transmisión y otro de recepción, se estableció una llamada desde el MS Samsung J6+ al Alcatel Onetouch, los canales que se establecen al momento de realizar la llamada, se muestran al ejecutar en *OpenBTSCLI* la sentencia:



- *Chans -/*

Algunos de los items mostrados permiten obtener información relevante de potencias, intensidad de señal, porcentaje de pérdidas de tramas son:

- **CN** Número de canal.
- **TN** Número de intervalo de tiempo.
- **Chan type** Tipo de canal.
- **Transaction id** Transacciones capa 3 corriendo en el canal.
- **Signal** Potencia máxima en el canal de subida, si el MS transmite a máxima potencia.
- **RSSI** Nivel señal en el canal de subida medida por la BTS.
- **RSSP** Potencia RSSI posible si el MS transmite a máxima potencia.
- **SNR** Señal a ruido medida por la BTS.
- **BER** Canal de subida, Tasa de error de bit en porcentaje medida por la BTS.
- **FER** Porcentaje de tramas perdidas medidas por la BTS, en el canal de subida.
- **TXPWR** Canal de subida, potencia de transmisión de dB reportada por el MS.
- **RXLEV_DL** Canal de bajada, potencia de transmisión en dB reportada por el MS.
- **BER_DL** Canal de bajada, tasa de error de bit en porcentaje reportada por el MS.
- **Time** Duración en segundos de la conexión del canal.

```
OpenBTS> chans
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
   type id          dB      pct sym dBm dBm      pct
0  1 TCH/F T134      4     66.3 0.29 -1.2 29  -49    0.00  0:28 732123603626965
0  2 TCH/F T135     -5     56.7 0.26 -1.1 39  -48    0.00  0:25 732111140803570
```

Ilustración 57. Canales establecidos llamada desde J6+ a Alcatel

Mediante la sentencia calls también se evidencia el establecimiento de los dos canales por llamada, tal como se presenta en la Ilustración 58.

```
OpenBTS> calls
TranEntry( tid=134 GSMState=active chan=(C0T1 TCH/F state=Established) Subscriber=( Imsi=732123603626965 Tmsi=(no tmsi)
ce=MOC to=1234578 stateAge=(323 sec) stack=( Machine=(InCallMachine tid=134 C0T1 TCH/F CCState=active PopState=0)))
TranEntry( tid=135 GSMState=active chan=(C0T2 TCH/F state=Established) Subscriber=( Imsi=732111140803570 Tmsi=(no tmsi)
ce=MTC from=1234567 stateAge=(323 sec) stack=( Machine=(InCallMachine tid=135 C0T2 TCH/F CCState=active PopState=0)))

2 transactions in table
```

Ilustración 58. Llamadas establecidas llamada desde J6+ a alcatel



También es posible validar los canales que tienen carga en GSM, identificados en la Ilustración 59.

```
OpenBTS> load
== GSM ==
SDCCH load/available: 0/4
TCH/F load/available: 2/7
PCH load: active, total: 0, 0
AGCH load: active, pending: 0, 0
== GPRS ==
current PDCHs: 0
utilization: 0%
```

Ilustración 59. Canales con carga en GSM llamada desde J6+ a alcatel

En la Ilustración 60 se muestra el establecimiento de la llamada desde la consola de Asterisk.

```
*CLI> -- SIP/127.0.0.1:5062-00000013 answered SIP/IMSI732123603626965-00000012
> 0x7f8f48013b40 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16530
> 0x7f8f680294c0 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16528
== Spawn extension (sip-external, 1234578, 1) exited non-zero on 'SIP/IMSI732123603626965-00000012'
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Executing [1234578@sip-external:1] Dial("SIP/IMSI732123603626965-00000014", "SIP/IMSI73211140803570@127.0.0.1:5062") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMSI73211140803570@127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000015 is ringing
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000015 answered SIP/IMSI732123603626965-00000014
> 0x7f8f54013b40 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16534
> 0x7f8f68007f70 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16532
== Spawn extension (sip-external, 1234578, 1) exited non-zero on 'SIP/IMSI732123603626965-00000014'
```

Ilustración 60. Establecimiento llamada Asterisk desde J6+ a Alcatel

Desde Asterisk se pueden validar los canales establecidos, con su respectivo detalle e identificando el estado del canal, como se aprecia en las Ilustraciones 61 a 63.

```
*CLI> sip ip channels
No such command 'sip ip channels' (type 'core show help sip ip channels' for other possible commands)
*CLI> sip show channels
Peer      User/ANR      Call ID      Format      Hold      Last Message      Expiry      Peer
127.0.0.1  IMSI7321114080 36736dc24756b6f (gsm)      No        Tx: ACK
127.0.0.1  1234567       5127082a40f06d4 (gsm)      No        Rx: ACK
2 active SIP dialogs
```

Ilustración 61. Establecimiento canales desde J6+ a Alcatel desde Asterisk



```
*CLI> sip show channel 36736dc24756b6f          *CLI> sip show channel 5127082a40f06d4
* SIP Call                                     * SIP Call
Curr. trans. direction: Outgoing              Curr. trans. direction: Incoming
Call-ID: 36736dc24756b6ff2bd5addc6d7b3695@127.0.0.1:5060  Call-ID: 5127082a40f06d45
Owner channel ID: SIP/127.0.0.1:5062-00000017  Owner channel ID: SIP/IMS1732123603626965-00000016
Our Codec Capability: (gsm|ulaw|alaw)         Our Codec Capability: (gsm|ulaw|alaw)
Non-Codec Capability (DTMF): 1                Non-Codec Capability (DTMF): 0
Their Codec Capability: (gsm)                  Their Codec Capability: (gsm)
Joint Codec Capability: (gsm)                  Joint Codec Capability: (gsm)
Format: (gsm)                                  Format: (gsm)
T.38 support: No                               T.38 support: No
Video support: No                              Video support: No
MaxCallBR: 384 kbps                           MaxCallBR: 384 kbps
Theoretical Address: 127.0.0.1:5062           Theoretical Address: 127.0.0.1:5062
Received Address: 127.0.0.1:5062             Received Address: 127.0.0.1:5062
SIP Transfer mode: open                       SIP Transfer mode: open
Force rport: Auto (No)                       Force rport: Auto (No)
Audio IP: 127.0.0.1 (local)                   Audio IP: 127.0.0.1 (local)
Our Tag: as3b29a203                            Our Tag: as57ede106
Their Tag: OBTSppnpprjzqgthcfqhf             Their Tag: OBTSreqbrurwhvhodgc
SIP User agent: OpenBTS 5.0-master Build Date 2021-06-11T14:57:55  SIP User agent: OpenBTS 5.0-master Build Date 2021-06-11T14:57:57
Username: IMSI732111140803570                 Username: IMSI732123603626965
Peername: IMSI732111140803570                 Peername: sip:IMS1732123603626965@127.0.0.1:5062
Original uri: sip:IMS1732111140803570@127.0.0.1:5062  Original uri: 1234567
Need Destroy: No                               Need Destroy: No
Last Message: Tx: ACK                          Last Message: Rx: ACK
Promiscuous Redir: No                          Promiscuous Redir: No
Route: <slp:IMS1732111140803570@127.0.0.1:5062>      Route: <slp:IMS1732123603626965@127.0.0.1:5062>
DTMF Mode: rfc2833                             DTMF Mode: Info
SIP Options: (none)                             SIP Options: (none)
Session-Timer: Inactive                         Session-Timer: Inactive
```

Ilustración 62. Detalle canales en llamada desde J6+ a Alcatel

```
*CLI> sip show channelstats
Peer      Call ID      Duration Recv: Pack  Lost      (    %) Jitter Send: Pack  Lost      (    %) Jitter
127.0.0.1 36736dc2475 00:06:02 0000017550 0000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000017531 0000000000 ( 0.00%) 0.0016
127.0.0.1 5127082a40f 00:06:02 0000017531 0000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000017550 0000000000 ( 0.00%) 0.0027
2 active SIP channels
```

Ilustración 63. Estado canales llamada desde J6+ a Alcatel

En la Ilustración 64 se presenta la evidencia de establecer la llamada desde el Alcatel Onetouch a Samsung Galaxy J6+. En la Ilustración 65 se muestra el establecimiento de la llamada desde Asterisk, esta salida se genera de forma automática en Asterisk. En la Ilustración 65 se identifican los canales establecidos en la llamada, mientras que en la Ilustración 67 y 68 se muestran detalles de mediciones del canal, en la consola de Asterisk.

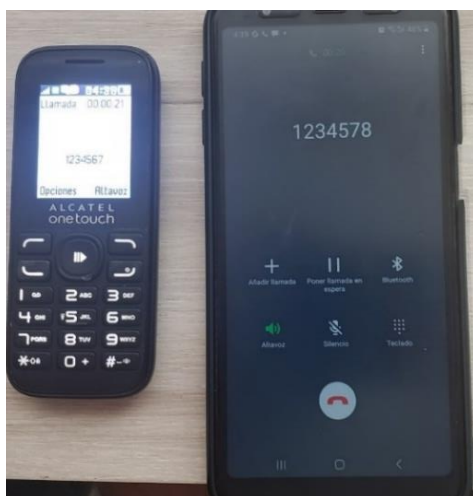


Ilustración 64. Establecimiento de llamada desde Alcatel Onetouch a J6+



```
*CLI> == Spawn extension (sip-external, 1234578, 1) exited non-zero on 'SIP/IMSI732123603626965-00000016'
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Executing [1234567@sip-external:1] Dial("SIP/IMSI73211140803570-00000018", "SIP/IMSI732123603626965@127.0.0.1:5062") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMSI732123603626965@127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000019 is ringing
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000019 answered SIP/IMSI73211140803570-00000018
> 0x7f8f5c013b60 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16542
> 0x7f8f6801fdc0 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16540
```

Ilustración 65. Establecimiento llamada Asterisk desde Alcatel a J6+

```
*CLI> sip show channels
Peer          User/ANR          Call ID          Format          Hold          Last Message    Expiry          Peer
127.0.0.1     IMSI73212360362  0f7555aa7a93f3c (gsm)          No           Tx: ACK
127.0.0.1     1234578          583f3f976a045de (gsm)          No           Rx: ACK
2 active SIP dialogs
```

Ilustración 66. Establecimiento canales Asterisk desde Alcatel a J6+

```
*CLI> sip show channel 0f7555aa7a93f3c
* SIP Call
Curr. trans. direction: Outgoing
Call-ID: 0f7555aa7a93f3ca7023ae8a620467e4@127.0.0.1:5062
Owner channel ID: SIP/127.0.0.1:5062-00000019
Our Codec Capability: (gsm|ulaw|alaw)
Non-Codec Capability (DTMF): 1
Their Codec Capability: (gsm)
Joint Codec Capability: (gsm)
Format: (gsm)
T.38 support: No
Video support: No
MaxCallBR: 384 kbps
Theoretical Address: 127.0.0.1:5062
Received Address: 127.0.0.1:5062
SIP Transfer mode: open
Force rport: Auto (No)
Audio IP: 127.0.0.1 (local)
Our Tag: as5ba45934
Their Tag: OBTSxenfxgqxjqjaalfa
SIP User agent: OpenBTS 5.0-master Build Date 2021-06-11T14:57:57
Username: IMSI732123603626965
Peername: IMSI732123603626965
Original uri: sip:IMSI732123603626965@127.0.0.1:5062
Need Destroy: No
Last Message: Tx: ACK
Promiscuous Redir: No
Route: <sip:IMSI732123603626965@127.0.0.1:5062>
DTMF Mode: rfc2833
SIP Options: (none)
Session-Timer: Inactive

*CLI> sip show channel 0f7555aa7a93f3c
* SIP Call
Curr. trans. direction: Outgoing
Call-ID: 0f7555aa7a93f3ca7023ae8a620467e4@127.0.0.1:5062
Owner channel ID: SIP/127.0.0.1:5062-00000019
Our Codec Capability: (gsm|ulaw|alaw)
Non-Codec Capability (DTMF): 1
Their Codec Capability: (gsm)
Joint Codec Capability: (gsm)
Format: (gsm)
T.38 support: No
Video support: No
MaxCallBR: 384 kbps
Theoretical Address: 127.0.0.1:5062
Received Address: 127.0.0.1:5062
SIP Transfer mode: open
Force rport: Auto (No)
Audio IP: 127.0.0.1 (local)
Our Tag: as5ba45934
Their Tag: OBTSxenfxgqxjqjaalfa
SIP User agent: OpenBTS 5.0-master Build Date 2021-06-11T14:57:57
Username: IMSI732123603626965
Peername: IMSI732123603626965
Original uri: sip:IMSI732123603626965@127.0.0.1:5062
Need Destroy: No
Last Message: Tx: ACK
Promiscuous Redir: No
Route: <sip:IMSI732123603626965@127.0.0.1:5062>
DTMF Mode: rfc2833
SIP Options: (none)
Session-Timer: Inactive
```

Ilustración 67. Detalle canales en llamada desde Alcatel a J6+

```
*CLI> sip show channelstats
Peer          Call ID          Duration Recv: Pack Lost ( %) Jitter Send: Pack Lost ( %) Jitter
127.0.0.1     0f7555aa7a9     00:01:22 0000003434 0000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000003427 0000000000 ( 0.00%) 0.0068
127.0.0.1     583f3f976a0     00:01:22 0000003427 0000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000003434 0000000000 ( 0.00%) 0.0074
2 active SIP channels
```

Ilustración 68. Estado canales llamada desde Alcatel a J6+

3.3.7 Llamadas de Voz Simultáneas en la Estación

Para el establecimiento de llamadas de voz simultáneas en la estación de comunicación GSM se garantizó que ocho dispositivos celulares estuviesen registrados en el OpenBTS, tal como se evidencia en la Ilustración 69. En la estación de comunicación, es posible registrar más de ocho dispositivos móviles, solo que se carecía de disponibilidad de equipos.


```
Running as user 'asterisk'
Running under group 'www-data'
Connected to Asterisk 11.7.0.5 currently running on Maestria (pid = 2849)
Maestria*CLI> sip show peers
Name/username      Host                               Dyn Forcerport ACL Port      Status      Description
00101100010        127.0.0.1                         D   a         0         5062       Unmonitored
IMSI732101176961521 (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
IMSI732101578628942 (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
IMSI732101638039992 (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
IMSI732101638066987 (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
IMSI732101638066989 (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
IMSI732111140803570 (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
IMSI732123603626965 (Unspecified)                   D   a         0         0         UNKNOWN
IMSI732123610558300 (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
zoiper              (Unspecified)                   D   a         0         0         Unmonitored
10 sip peers [Monitored: 0 online, 1 offline Unmonitored: 1 online, 8 offline]

Maestria*CLI> sip show users
Username           Secret      Accountcode  Def.Context  ACL  Forcerport
IMSI732101578628942 3078923984 sip-external No   No
IMSI732101638066989 3078923984 sip-external No   No
IMSI732101638066987 3078923984 sip-external No   No
zoiper              3078923984 phones       No   No
IMSI732111140803570 3078923984 sip-external No   No
IMSI732101638039992 3078923984 sip-external No   No
IMSI732101176961521 3078923984 sip-external No   No
IMSI732123610558300 3078923984 sip-external No   No
IMSI732123603626965 3078923984 sip-external No   No
Maestria*CLI>
```

Ilustración 71. Registro MS en Asterisk

Posterior al registro de los MS se validó el establecimiento de dos y tres llamadas en simultánea, entre pares de MS lo cual se evidencia en la Ilustración 72.



Ilustración 72. Establecimiento 2 y 3 llamadas simultáneas

El establecimiento de las llamadas simultáneas se evidencia en el módulo OpenBTS y Asterisk como se visualiza en las Ilustraciones 73 y 74, en donde se identifican cuatro y seis canales establecidos, estos canales solo se establecen si la llamada está activa.



```
OpenBTS> chans
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
type id dB pct sym dBm dBm pct
0 1 TCH/F T172 -6 24.6 22.54 -1.5 30 -52 0.00 7:6 732123610558300
0 2 TCH/F T173 0 35.7 29.92 -1.5 30 -48 0.00 7:4 732123603626965
0 3 TCH/F T174 -9 20.5 28.70 -1.4 30 -48 0.00 2:38 732101578628942
0 4 TCH/F T175 7 55.7 0.00 -1.2 26 -48 0.00 2:28 732111140803570

OpenBTS> chans
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
type id dB pct sym dBm dBm pct
0 1 TCH/F T172 -6 24.6 22.54 -1.5 30 -52 0.00 12:18 732123610558300
0 2 TCH/F T173 0 35.7 29.92 -1.5 30 -48 0.00 12:16 732123603626965
0 3 TCH/F T174 -9 23.5 37.58 -1.4 30 -52 4.53 7:50 732101578628942
0 4 TCH/F T175 9 54.4 0.00 -1.4 24 -48 0.00 7:40 732111140803570
0 5 TCH/F T176 13 53.5 0.00 -1.1 20 -48 0.00 3:12 732101638039992
0 6 TCH/F T177 5 51 8.74 -1.5 30 -48 0.00 3:5 732101176961521
```

Ilustración 73. Validación 2 y 3 llamadas en OpenBTS

```
*CLI> sip show channelstats
Peer Call ID Duration Recv: Pack Lost ( %) Jitter Send: Pack Lost ( %) Jitter
127.0.0.1 d37fad4574b 00:08:02 000000504 000000000 ( 0.00%) 0.0000 000000610 000000000 ( 0.00%) 0.3382
127.0.0.1 5bb514d2368 00:03:34 0000009875 000000000 ( 0.00%) 0.0000 000000447 000000000 ( 0.00%) 0.0040
127.0.0.1 2ec1eb35235 00:08:02 000000610 000000000 ( 0.00%) 0.0000 000000504 000000000 ( 0.00%) 0.7063
127.0.0.1 d48b8d3468a 00:03:34 000000447 000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000009875 000000000 ( 0.00%) 0.0088
4 active SIP channels
sip show channelstats
Peer Call ID Duration Recv: Pack Lost ( %) Jitter Send: Pack Lost ( %) Jitter
127.0.0.1 d37fad4574b 00:10:05 000000504 000000000 ( 0.00%) 0.0000 000000610 000000000 ( 0.00%) 0.3382
127.0.0.1 d5a2ef177bd 00:00:58 0000002230 000000000 ( 0.00%) 0.0000 000000821 000000000 ( 0.00%) 0.0017
127.0.0.1 5bb514d2368 00:05:38 0000016034 000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000006865 000000000 ( 0.00%) 0.0022
127.0.0.1 2ec1eb35235 00:10:05 000000610 000000000 ( 0.00%) 0.0000 000000504 000000000 ( 0.00%) 0.7063
127.0.0.1 d48b8d3468a 00:05:38 0000006865 000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000016034 000000000 ( 0.00%) 0.0635
127.0.0.1 357921590b1 00:00:58 000000821 000000000 ( 0.00%) 0.0000 0000002230 000000000 ( 0.00%) 0.1743
5 active SIP channels
*CLI> sip show channels
Peer User/ANR Call ID Format Hold Last Message Expiry Peer
127.0.0.1 1234568 d37fad4574b9311 (gsm) No Rx: ACK IMSI732123
127.0.0.1 1234509 d5a2ef177bd98ed (gsm) No Rx: ACK IMSI732101
127.0.0.1 IMSI73211114080 5bb514d23686ff2 (gsm) No Tx: ACK <guest>
127.0.0.1 IMSI73212360362 2ec1eb35235d463 (gsm) No Tx: ACK <guest>
127.0.0.1 1234589 d48b8d3468af606 (gsm) No Rx: ACK IMSI732101
127.0.0.1 IMSI73210117696 357921590b14ec7 (gsm) No Tx: ACK <guest>
5 active SIP dialogs
```

Ilustración 74. Validación 2 y 3 llamadas en Asterisk

Aunque fue posible registrar ocho dispositivos móviles en OpenBTS y en Asterisk, de forma simultánea teóricamente se pudiesen establecer cuatro llamadas, lo cual no fué posible en la práctica, dado que sólo se establecieron tres llamadas de manera simultánea, al intentar la cuarta llamada, Asterisk indicaba que las redes para el establecimiento de las llamadas estaban ocupadas, tal como se muestra en la Ilustración 75.



```
-- Called SIP/IMS173211140803570@127.0.0.1:5062
== Spawn extension (sip-external, 1234578, 1) exited non-zero on 'SIP/IMS1732123603626965-0000000c'
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Executing [1234578@sip-external:1] Dial("SIP/IMS1732123603626965-0000000e", "SIP/IMS173211140803570@127.0.0.1:5062") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMS173211140803570@127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-0000000f is ringing
-- SIP/127.0.0.1:5062-0000000f answered SIP/IMS1732123603626965-0000000e
> 0x7f5e3c02e9d0 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16564
== Spawn extension (sip-external, 1234578, 1) exited non-zero on 'SIP/IMS1732123603626965-0000000e'
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Executing [1234578@sip-external:1] Dial("SIP/IMS1732123603626965-00000010", "SIP/IMS173211140803570@127.0.0.1:5062") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMS173211140803570@127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000011 is ringing
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000011 answered SIP/IMS1732123603626965-00000010
> 0x7f5e3c013b40 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16570
> 0x7f5e3c05e430 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16568
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Executing [1234589@sip-external:1] Dial("SIP/IMS1732101638039992-00000012", "SIP/IMS1732101578628942@127.0.0.1:5062") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMS1732101578628942@127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000013 is ringing
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000013 answered SIP/IMS1732101638039992-00000012
> 0x7f5e38013f10 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16574
> 0x7f5e3c036870 -- Probation passed - setting RTP source address to 127.0.0.1:16572
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Executing [1234560@sip-external:1] Dial("SIP/IMS1732101176961521-00000014", "SIP/IMS1732101638066989@127.0.0.1:5062") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMS1732101638066989@127.0.0.1:5062
-- Got SIP response 480 "No Paging_Response" back from 127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000015 is circuit-busy
== Everyone is busy/congested at this time (1:0/1/0)
[2022-05-07 17:02:28.572] WARNING[3768][c-0000000a]: pbx.c:6713 __ast_pbx_run: Timeout, but no rule 't' or 'e' in context 'sip-external'
```

Ilustración 75. Red ocupada en intento cuarta llamada

En la Ilustración 76 se observa que al intentar establecer la cuarta llamada, no es posible en vista de que los canales están ocupados, se evidencian seis canales ocupados, entre tanto en OpenBTS también se identifican seis canales físicos activos.

```
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMS173211140803570@127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000011 is ringing
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000011 answered SIP/IMS1732123603626965-00000010
> 0x7f5e3c013b40 -- Probation passed - setting RTP source
> 0x7f5e3c05e430 -- Probation passed - setting RTP source
ctive PopState=0)))
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Executing [1234589@sip-external:1] Dial("SIP/IMS1732101638039992-00000012", "SIP/IMS1732101578628942@127.0.0.1:5062") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
-- Called SIP/IMS1732101578628942@127.0.0.1:5062
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000013 is ringing
-- SIP/127.0.0.1:5062-00000013 answered SIP/IMS1732101638039992-00000012
> 0x7f5e38013f10 -- Probation passed - setting RTP source
> 0x7f5e3c036870 -- Probation passed - setting RTP source
OpenBTS> chans
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
type id dB pct sym dBm dBm pct
0 1 TCH/F T100 -11 14.8 23.87 -1.0 30 -51 0.00 6:19 732101
638066987
0 2 TCH/F T101 -5 37.8 62.60 -1.5 30 -48 0.00 6:15 732123
610558300
0 3 TCH/F T106 -8 32 22.83 -1.5 30 -48 0.00 4:28 732123
603626965
0 4 TCH/F T107 -1 42.8 0.00 -1.4 30 -48 0.00 4:26 732111
140803570
0 5 TCH/F T108 -5 42.1 0.00 -0.8 30 -54 0.00 3:47 732101
638039992
0 6 TCH/F T109 -3 43.3 3.21 -1.4 30 -49 0.00 3:44 732101
578628942
[2022-05-07 17:02:28.572] WARNING[3768][c-0000000a]: pbx.c:6713 __ast_pbx_run: Timeout, but no rule 't' or 'e' in context 'sip-external'
*CLI>
*CLI>
*CLI> chans
OpenBTS>
No such command 'chans' (type 'core show help chans' for other possible commands)
*CLI> sip show channels
Peer User/ANR Call ID Format Hold Last Message Expiry Peer
127.0.0.1 IMS173210157862 17b435232cbe496 (gsm) No Tx: ACK <quest>
127.0.0.1 1234509 ec3ae4e47478f5e (gsm) No Rx: ACK IMS1732101
127.0.0.1 1234567 ec11eec63bddcac (gsm) No Rx: ACK IMS1732123
127.0.0.1 IMS173212361055 08e0359e479a7bf (gsm) No Tx: ACK <quest>
127.0.0.1 IMS17321114080 4e4d44bd6890d81 (gsm) No Tx: ACK <quest>
127.0.0.1 1234590 eba2647128897e1 (gsm) No Rx: ACK IMS1732101
6 active SIP dialogs
*CLI> sip show calls
No such command 'sip show calls' (type 'core show help sip show calls' for other possible commands)
```

Ilustración 76. Canales activos en Asterisk y OpenbTS



La cuarta llamada no se establece dado que OpenBTS, en todos los casos, solo es capaz de generar siete canales físicos, como se aprecia en la Ilustración 77, en la parte superior hay siete canales físicos de los cuales dos están ocupados con una llamada, mientras que en la parte inferior hay siete canales físicos, de los cuales seis están ocupados con tres llamadas, por lo tanto al no existir un par de canales adicionales es imposible establecer la cuarta llamada.

```
OpenBTS> chans -a
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
   type id      dB      pct sym dBm dBm      pct
0 0 SDCCH/4-0 10 139 0.00 -1.1 27 -48 0.00 0:0 no-MMChannel
0 0 SDCCH/4-1 5 57.8 0.00 -0.5 33 -48 0.00 0:0 no-MMChannel
0 0 SDCCH/4-2 10 87.2 0.00 -1.2 33 - - - 0:0 no-MMChannel
0 0 SDCCH/4-3 - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
0 1 TCH/F T134 3 58.8 0.00 -1.4 29 -51 2.26 2:11 732123603626965
0 2 TCH/F T135 -4 58.2 0.00 -1.0 39 -48 2.26 2:8 732111140803570
0 3 TCH/F - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
0 4 TCH/F - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
0 5 TCH/F - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
0 6 TCH/F - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
0 7 TCH/F - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel

OpenBTS> chans -a
CN TN chan transaction Signal SNR FER TA TXPWR RXLEV_DL BER_DL Time IMSI
   type id      dB      pct sym dBm dBm      pct
0 0 SDCCH/4-0 24 86.8 0.00 0.4 33 - - 0:0 no-MMChannel
0 0 SDCCH/4-1 12 104 0.00 -0.9 33 -48 0.00 0:0 no-MMChannel
0 0 SDCCH/4-2 - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
0 0 SDCCH/4-3 - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
0 1 TCH/F T102 29 40.4 0.00 -0.5 5 -48 2.26 9:34 732111140803570
0 2 TCH/F T103 8 45.2 0.00 -1.1 23 -56 2.26 9:31 732101638066989
0 3 TCH/F T105 34 57.9 0.24 -1.0 5 -48 2.26 6:46 732123603626965
0 4 TCH/F T106 25 33.9 0.00 -0.4 7 -48 2.26 6:40 732101638066987
0 5 TCH/F T108 29 33.7 0.00 -0.8 7 -48 2.26 0:35 732101578628942
0 6 TCH/F T109 26 37.9 0.04 0.2 7 -48 1.13 0:31 732101638039992
0 7 TCH/F - 0 0.00 - - - - 0:0 no-MMChannel
```

Ilustración 77. Canales disponibles en OpenBTS

3.4 Análisis de Desempeño de la Estación de Comunicación

Se busca analizar el desempeño de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, en un entorno real de funcionamiento, donde el canal de comunicación se somete a diferentes factores que afectan su rendimiento. Para ello se emplean entornos diferentes, modificando variables controladas que permitan identificar el efecto que causan a nivel de los canales de comunicación establecidos en una llamada telefónica.

Se hace uso de las medidas que muestra OpenBTS mediante su interfaz CLI, al ejecutar el comando chans – l.

Para ello se consideran dos escenarios uno en interiores y otro en exteriores.

3.4.1 Escenario Exteriores

Las pruebas en el escenario exterior se realizaron en el Diamante, instalaciones deportivas de la Universidad del Cauca ubicadas en el Campus Tulcán, en donde existe un espacio abierto de más de 120 m², con las cuales se busca verificar el

comportamiento de la señal en este entorno, en la Ilustración 78 se muestra el escenario utilizado.



Ilustración 78. Escenario de pruebas exterior

Para la toma de variables en el escenario exterior, se siguió el diagrama de flujo del capítulo 2 “diseño de pruebas”; las variables tomadas se presentan en la Tabla 20, en cada una de las distancias se analiza la potencia máxima en el canal de subida, si el MS transmite a máxima potencia; nivel de señal en el canal de subida medida por la BTS; relación señal a ruido medida por la BTS, tasa de error de bit en porcentaje medida por la BTS, en el canal de subida; porcentaje de tramas perdidas medidas por la BTS, en el canal de subida; potencia de transmisión de dB reportada por el MS, en el canal de subida; potencia de transmisión en dB reportada por el MS, en el canal de bajada; tasa de error de bit en porcentaje reportada por el MS, en el canal de bajada. La Tabla 20 se complementa con las dos últimas columnas en donde se valora la calidad de la señal de audio de escucha, en una escala de buena, regular o sin señal⁸, en cada uno de los MS, de acuerdo a la percepción de quienes establecen la llamada.

Tabla 20. Datos canal escenario exterior 1

Banda GSM 1800 Canal 512 Ganancia antena RX 50											
DIST (m)	SIGNAL (dBm)	RSSI (dBm)	RSSP (dBm)	SNR	FER (%)	BER (%)	TXPWR (dBm)	RXLEV DL (dBm)	BER DL (%)	Calidad Escucha	
										MS Fijo	MS Móvil
0	34	-43	-16	60,2	0	0	6	-55	0,57	Buena	Buena
1	24	-49	-26	45,2	1,77	0,351	10	-62	9,05		
2	19	-50	-31	51,7	0,01	0,00983	14	-52	9,05		

⁸ Las escalas de escucha se definen como buena, cuando la voz se presenta de manera fluida, con pocos retardos; regular cuando la experiencia de la escucha de la voz es entrecortada y con retardos en la transmisión, y sin señal cuando a pesar de que el canal se encuentra establecido no es posible escuchar la voz del canal de comunicación.



3	15	-48	-35	39,5	0,58	0,0297	20	-56	4,53		
5	9	-50	-41	38,8	2,48	0,454	24	-65	9,05		
10	-8	-61	-58	8,64	4,62	6,62	30	-73	0		
15	-8	-61	-58	8,25	10,75	7,42	30	-73	0		
20	-9	-62	-59	5,59	10,29	2,75	30	-69	0		
25	-7	-60	-57	9,78	11,74	5,7	30	-77	0		
30	-6	-59	-56	8,1	20,25	1,34	30	-76	0		
40	-9	-62	-59	15,9	40,47	8,3	30	-72	2,26	Regular	Buena
50	-9	-62	-59	5,24	45,41	6,76	30	-72	1,13	Sin señal	Buena
60	-10	-63	-60	5,32	48,76	6,94	30	-72	1,13		
70	-10	-63	-60	4,89	50,7	6,94	30	-72	1,13		
80	-10	-63	-60	5,01	50,4	6,94	30	-72	1,13		
90	-10	-63	-60	5,53	51,86	7,09	30	-72	1,13		
100	-10	-63	-60	5,53	51,86	7,09	30	-72	1,13		
110	-10	-63	-60	5,43	51,86	7,09	30	-72	1,13		

De acuerdo a la Tabla 20 se establece que se escucha la voz en ambos sentidos hasta los 40 metros, en adelante para las demás distancias solo se escucha en el MS móvil distante, pero en el MS fijo no tiene audio, esto se debe a que la señal del MS móvil distante se recibe con un nivel de potencia bajo, que el dispositivo USRP no posee la sensibilidad para decodificar, así que no es posible transmitir el audio hasta el MS fijo; mientras que la señal del MS fijo se recibe con suficiente potencia para que el USRP pueda transmitirla al MS distante.

En la Ilustración 79 se grafica la potencia de recepción contra la distancia, en la cual se verifica que la potencia disminuye al aumentar la distancia. Esta relación permite estimar la región cubierta por el transmisor, y el estudio de las interferencias entre estaciones que hagan uso de las mismas frecuencias. También en la curva se observa que para las distancias de 3, 25 y 30 metros la potencia se incrementa levemente, debido a que la señal está llegando a ese punto de manera directa y también por reflexión de una o varias trayectorias, lo que genera que haya un nivel de potencia mayor, que en el punto inmediatamente anterior.

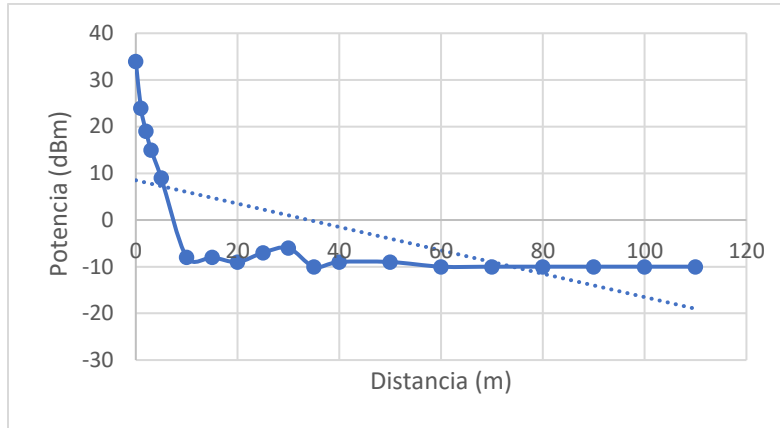


Ilustración 79. Potencia canal subida escenario exterior 1

La relación establecida entre distancia RSSI y RSSP se aprecia en la Ilustración 80, RSSP es la potencia máxima que puede tener la potencia RSSI en el canal de subida, medida por la BTS; estos valores disminuyen con la distancia.

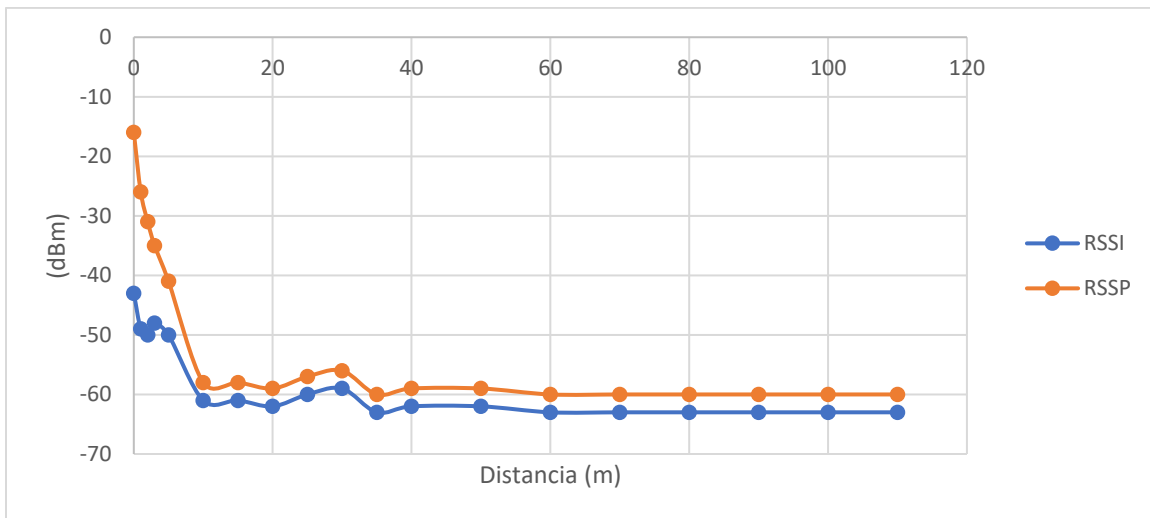


Ilustración 80. RSSI RSSP canal subida escenario exterior 1

La relación entre SNR y distancia se muestra en la Ilustración 81, en donde se aprecia que la relación señal a ruido es inversamente proporcional a la distancia, esta relación es mejor cuanto más grande sea, donde se encuentran los valores mayores para la SNR es en las cercanías de la BTS, pues llega la señal con mayor intensidad y con menor interferencia. Teniendo en cuenta los datos del escenario exterior 1, se establece que para valores de SNR menores a 5, no es posible escuchar la voz en el canal de comunicación establecido, para el receptor, con una relación entre la señal y el ruido tan baja se dificulta diferenciar adecuadamente los datos de audio transmitidos.

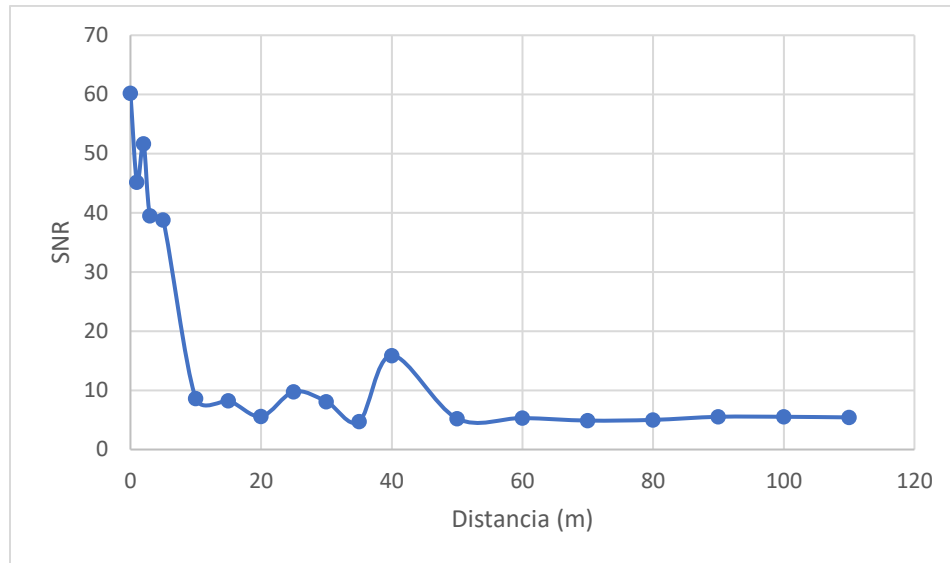


Ilustración 81. SNR canal subida escenario exterior 1

Los parámetros de FER (tasa de error de trama en canal de subida medida por la BTS), BER (tasa de error de bit en el canal de subida medida por la BTS), BER_DL (tasa de error de bit, en canal de descarga reportada por el MS), poseen porcentajes bajos para las distancias cercanas a la BTS ya que las tramas y los bits se pierden menos dado que la intensidad de la señal es más fuerte, estas son inversamente proporcionales a la distancia. En la Ilustración 82 se muestra la relación entre distancia FER, BER y BER_DL.

De acuerdo a la ilustración 82 comparando BER del enlace de subida con BER del enlace de bajada se determina que se presenta un mayor porcentaje de error de bits en el canal de subida comparado con el de bajada, dado que la BTS envía por el canal de bajada el audio recibido del MS cercano para alcanzar el MS lejano, a quien llega con mejor nivel de Potencia y a su vez una mayor relación SNR, lo cual permite que la calidad de voz sea buena.

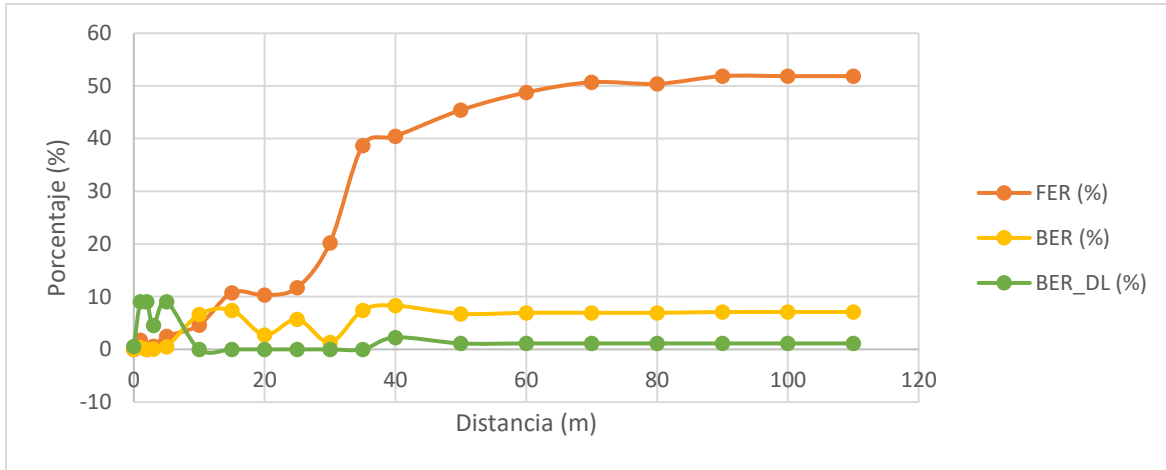


Ilustración 82. FER, BER, BER_DL escenario exterior 1

La relación entre distancia, y la potencia de señal en el canal de subida (TXPWR), la potencia en el canal de bajada (RXLEV_DL) reportada por el MS, se muestra en la Ilustración 83; de acuerdo a la teoría la potencia en el canal de bajada debe ser inversamente proporcional a la distancia, a menor distancia mayor potencia recibida y viceversa, esto se cumple para la mayoría de las distancias. La medida del TXPWR es directamente proporcional, pues a mayor distancia se requiere mayor nivel de potencia de transmisión desde el MS para llegar hasta la BTS, pero después de 10 metros, este valor se mantiene constante lo que indica que es la máxima potencia con la que el MS es capaz de transmitir hacia la BTS. Manteniendo una comunicación adecuada solo hasta los 40 metros cuando se empiezan a degradar otros parámetros, como la SNR, generando que se pierda la comunicación.

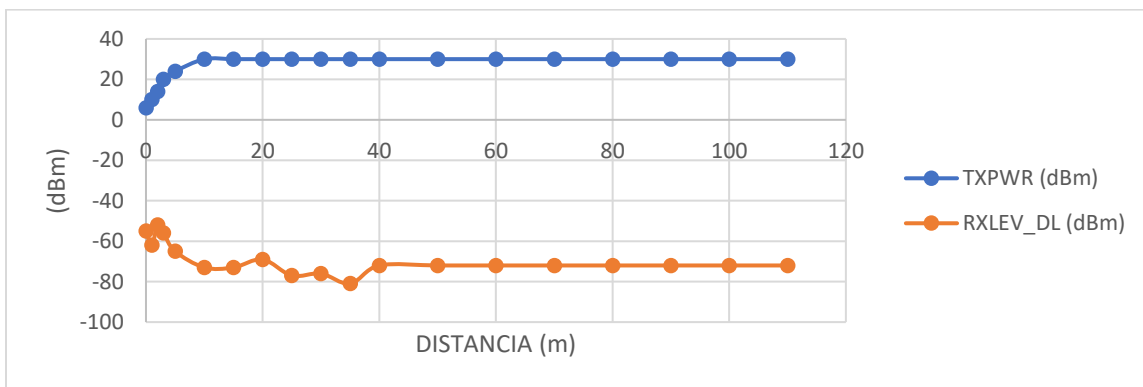


Ilustración 83. TXPWR, RXLEV_DL escenario exterior 1

En la Tabla 21 se muestran los datos correspondientes al escenario exterior 2, en donde se cambió la banda de frecuencia de GSM1800 a GSM850 y el canal, del 512 al 130.



Tabla 21. Datos canal escenario exterior 2

Banda GSM 850 Canal 130 Ganancia antena RX 50										Calidad Escucha	
DIST (m)	SIGNAL (dBm)	RSSI (dBm)	RSSP (dBm)	SNR	FER (%)	BER (%)	TXPWR (dBm)	RXLEV_DL (dBm)	BER_DL (%)	MS fijo	MS Móvil
0	33	-45	-17	52,4	0,01	0,0391	5	-48	0	Buena	Buena
1	17	-47	-33	42,1	0,81	0,243	19	-53	4,53		
2	16	-50	-34	46,1	1,27	0,204	17	-48	1,13		
3	11	-49	-39	40,5	2,18	0,335	23	-53	4,53		
5	13	-49	-37	43	0,54	0,171	21	-49	0		
10	1	-51	-49	40,8	0,41	0,21	31	-62	2,26		
15	-2	-52	-52	43,1	4,76	0,807	33	-63	0		
20	-4	-58	-58	24	29,19	4,63	33	-64	4,53		
25	-5	-55	-55	18,98	29,15	7,55	33	-62	2,26		
30	-2	-52	-52	14,1	56,37	11,2	33	-68	4,53		
40	-3	-63	-63	12,4	61,75	8,05	33	-68	0	Regular	Buena
50	-8	-46	-42	49,4	63,82	7,55	29	-79	18,1	Sin señal	Buena
60	-6	-48	-44	50,1	64	7,95	29	-79	18,1		
70	-9	-45	-41	54,5	65,24	8,72	29	-79	18,1		
80	-7	-47	-43	25,3	67,57	8,81	29	-79	18,1		
90	-8	-58	-58	53,1	45,95	8,12	33	-68	0		
100	-7	-57	-57	44,4	47,04	8,14	33	-68	0		
110	-8	-58	-58	36,4	47,34	8,24	33	-68	0		

Con base en los datos de la Tabla 21, en la Ilustración 84 se muestra la relación distancia, potencia de señal recibida, se observa en línea punteada la tendencia la cual es inversamente proporcional a la distancia, para algunos de los puntos a pesar de estar más distantes que otros, la potencia se incrementa, pese a estar en un espacio abierto, es posible que la señal para ese punto específico llegue de manera directa y por reflexión, presentándose para el punto en particular una suma constructiva, en donde la potencia de la señal es mayor en referencia a punto que está más cercano. La curva tiene un comportamiento similar al del escenario exterior 1, comparativo que se observa en la Ilustración 85.

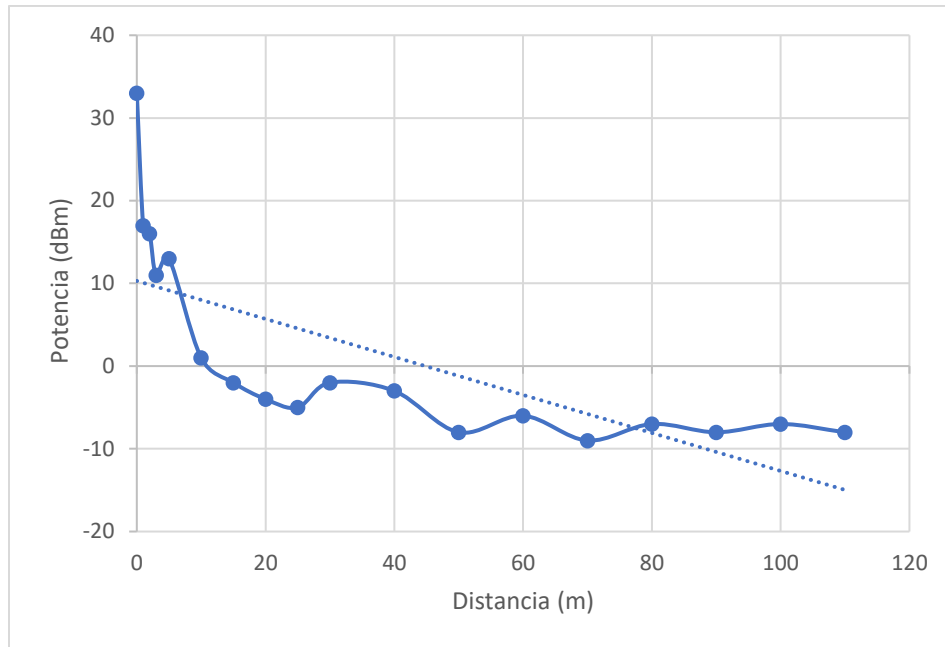


Ilustración 84. Potencia canal subida escenario exterior 2

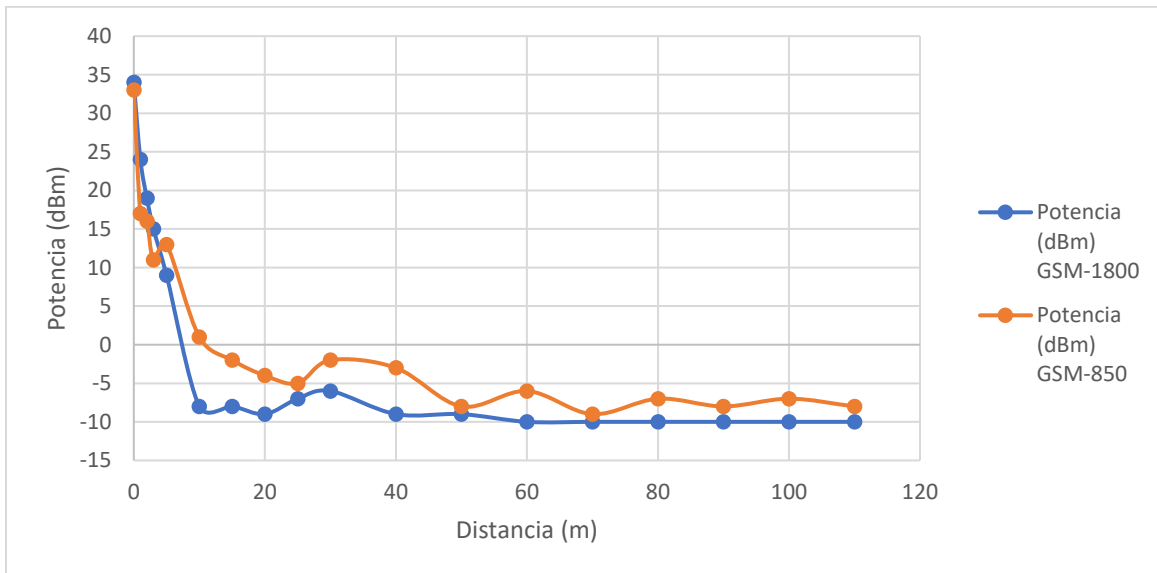


Ilustración 85. Potencia canal subida GSM1800 GSM850

De acuerdo a la comparación entre los escenarios 1 y 2 en la Ilustración 85, se identifica que la potencia del canal GSM850 es mayor que la de GSM1800, corroborando que al hacer uso de una frecuencia menor es posible alcanzar una mayor distancia.

La relación establecida entre distancia RSSI y RSSP para el escenario exterior 2, que se aprecia en la Ilustración 86, presenta un comportamiento irregular para

distancias entre 50 - 80 metros, los valores de RSSI y RSSP son mayores que los presentados para distancias entre 0 y 40 m, lo que lleva a concluir que en ese rango de distancias (entre 50 -80 m) la señal medida desde la BTS no solo está llegando de manera directa sino también por multitrayecto, lo que genera un incremento de potencia.

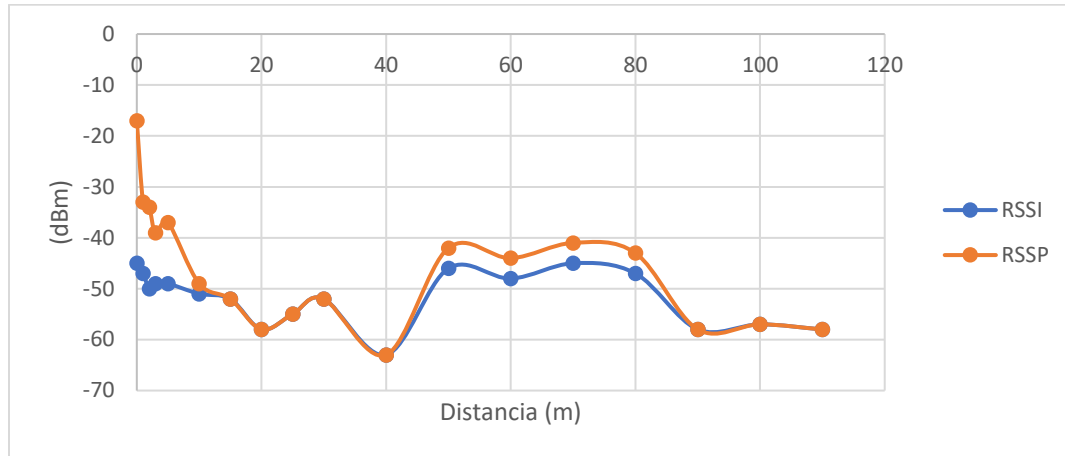


Ilustración 86. RSSI RSSP canal subida escenario exterior 2

En la Ilustración 87 se comparan las medidas obtenidas en RSSI y RSSP entre escenario 1 y 2, en donde se encuentra que la potencia RSSI y RSSP correspondiente a GSM850, casi siempre está por encima de la potencia de GSM1800, debido a la frecuencia de trabajo.

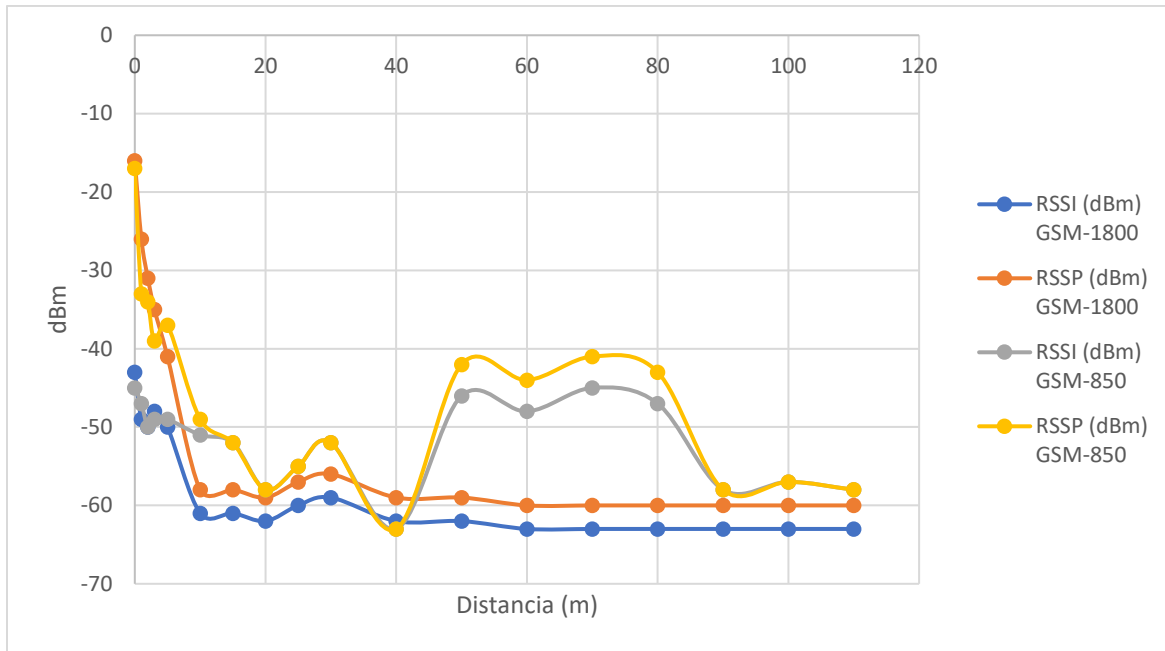


Ilustración 87. RSSI RSSP canal subida escenario exterior 1 y 2

En la Ilustración 88 se muestra la relación distancia, SNR del escenario exterior 2, en la cual se evidencia que posee un comportamiento atípico, dado que la relación señal a ruido debería ser inversamente proporcional, es decir que a menor distancia mayor SNR, pero se observa que para distancias de 50 a 110 m la SNR está por encima de los valores obtenidos en distancias de 20 a 40 m, lo que indica que es posible que la señal esté llegando por diferentes trayectorias o posea algún tipo de reflexión que incremente su potencia y esta permita que a su vez se incremente la relación señal a ruido, lo que es coherente también para el RSSI y RSSP cuyos valores para dichas distancias también se incrementan.

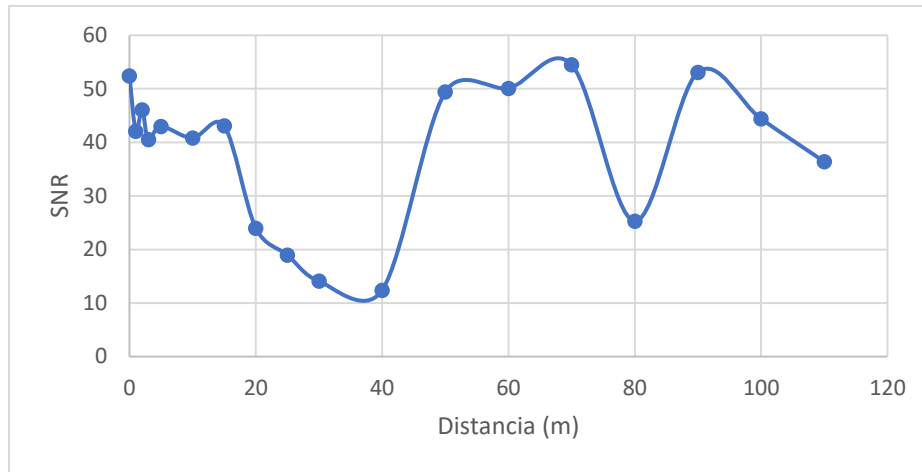


Ilustración 88. SNR canal subida escenario exterior 2

En la Ilustración 89 se muestra la comparación de SNR entre el escenario exterior 1 y 2, en donde la generalidad es que existe una mejor relación SNR para las frecuencias en la banda GSM850.

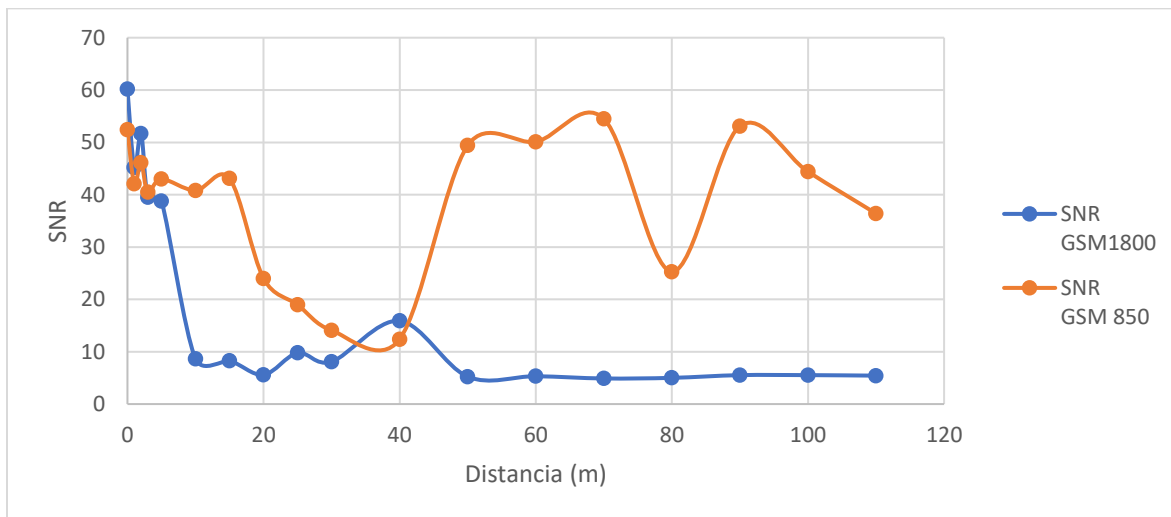


Ilustración 89. SNR canal subida escenario exterior 1 y 2

En la Ilustración 90 se muestra la relación entre distancia y FER, BER en el canal de subida, BER en el canal de bajada, cuyo comportamiento debería ser directamente proporcional a la distancia; es atípico para las distancias de 90 a 110 metros pues los valores disminuyen para FER y BER, lo que lleva a concluir que en el canal de subida para esas distancias, por fenómenos de reflexión se mejora la potencia de la señal; comparando los valores entre FER, BER con los de BER_DL, se encuentra la razón por la cual la llamada solo se escucha en el sentido MS fijo hacia MS móvil y no en sentido contrario, pues los porcentajes de pérdidas de bits y tramas en los canales de subida son muy altos, mientras que el porcentaje de

pérdida de bits en el canal de descarga, son bajos lo que permite lleguen los datos de audio, en recepción para el MS distante.

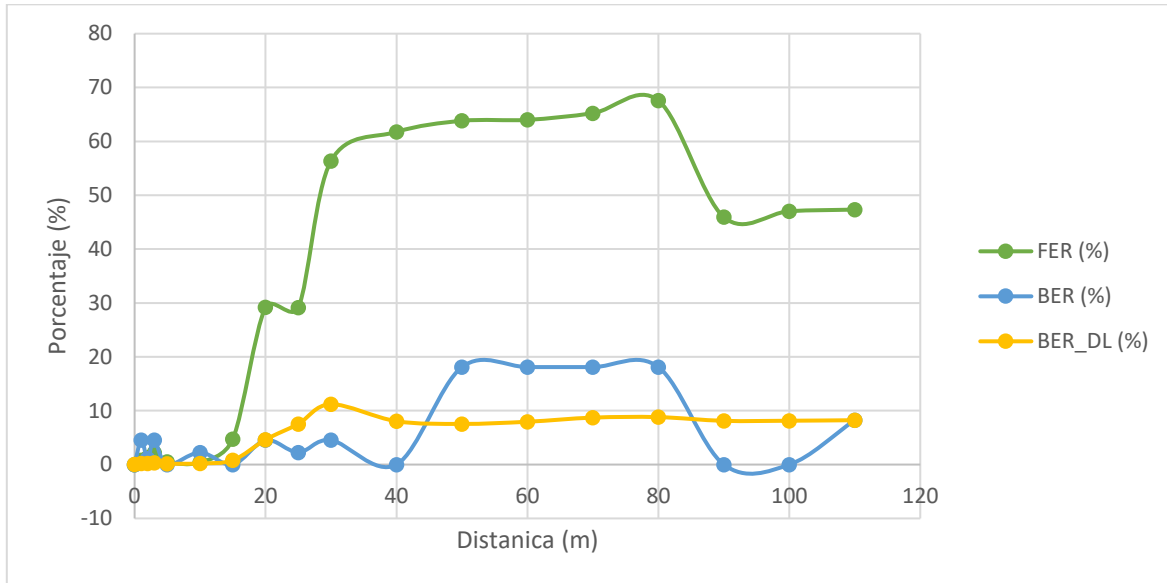


Ilustración 90. FER, BER, BER_DL escenario exterior 2

En la Ilustración 91 se muestra la relación distancia, TXPWR y RXLEV_DL, la cual muestra un comportamiento normal al ser inversamente proporcional a la distancia, en el caso de TXPWR que es la potencia reportada por el MS con la cual está radiando la BTS, se encuentra que después de determinada distancia la BTS no incrementa su valor de potencia dado que es el máximo posible, sin embargo la potencia en el canal descendente es suficiente para establecer la comunicación hasta una distancia de 110 metros.

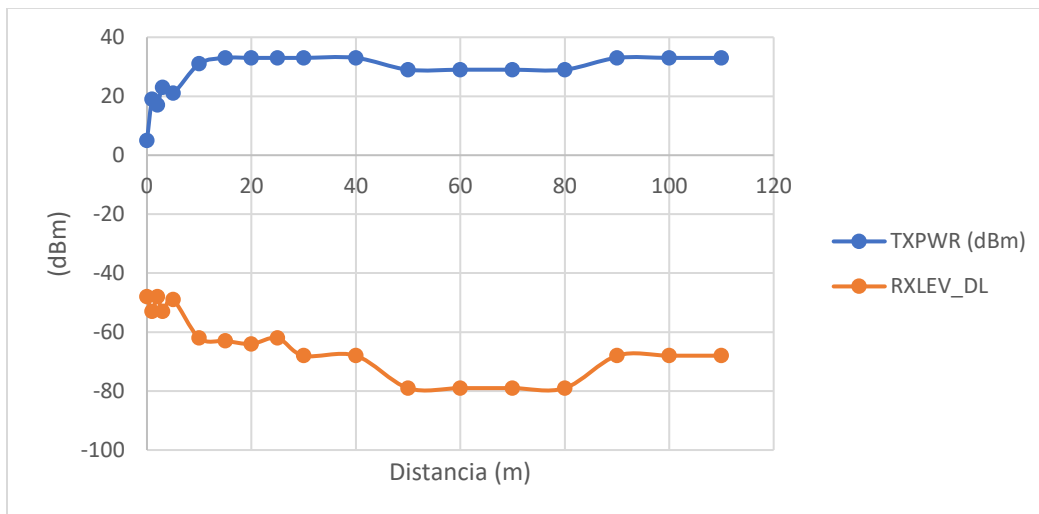


Ilustración 91. TXPWR, RXLEV_DL escenario exterior 2

En la Ilustración 92 se muestra un comparativo para TXPWR, RXLEV_DL para los escenarios exteriores 1 y 2, en donde se identifica que su comportamiento es similar independiente de la frecuencia de trabajo.

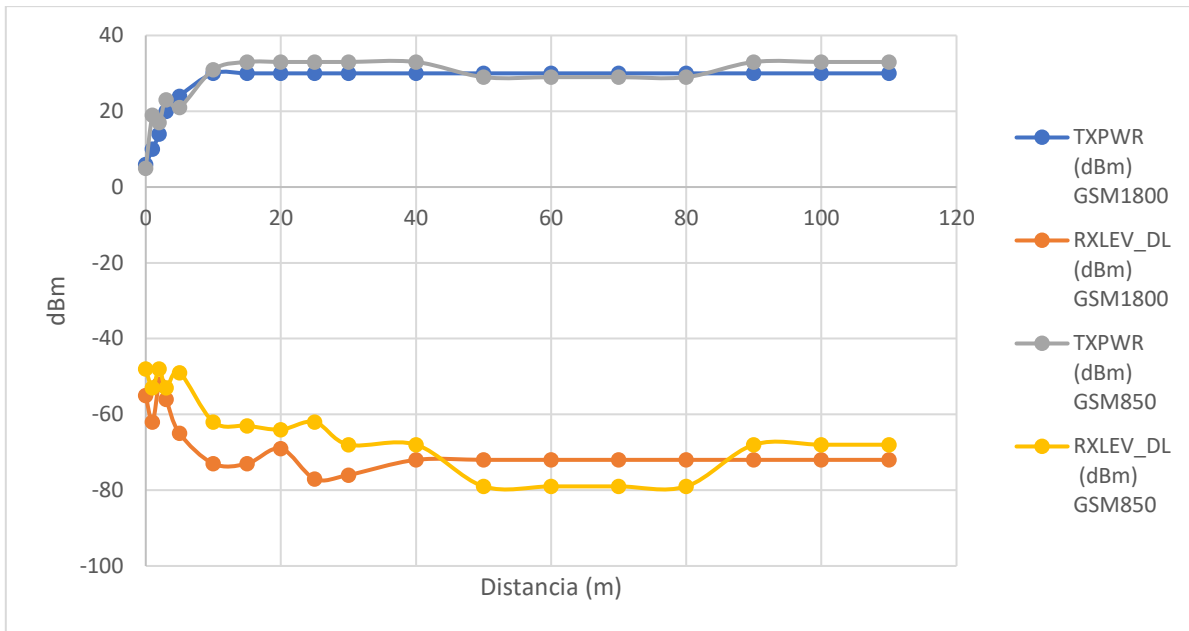


Ilustración 92. TXPWR, RXLEV_DL escenario exterior 1 y 2

3.4.2 Escenario Interiores

Las pruebas en el escenario interior se realizaron en una casa de habitación de dos pisos, el plano se observa en la Ilustración 93.

Se determinaron localizaciones específicas en el escenario interior, las cuales se identificaron con números, tal como se presenta en la Ilustración 93, en estas se ubican las estaciones móviles con la llamada establecida, para analizar los parámetros que permiten evaluar el desempeño de la estación de comunicación móvil en un entorno interior.

El procedimiento realizado para la toma de variables se tomó del capítulo 2 “diseño de pruebas”.



Ilustración 93. Plano escenario interior

Para las localizaciones se determinó una distancia medida desde la ubicación de la BTS, en la Tabla 22 se muestra la distancia a cada una de las localizaciones. La diferencia de piso indica si la localización en donde se tomó la medida se encuentra o no en el mismo piso respecto de la BTS, es decir cero si la BTS y la localización están en el mismo piso y -1 si la localización se encuentra en un piso inferior a la BTS.



Tabla 22. Distancias localizaciones escenario interior

BTS	Ubicación	Línea vista	Recorrido (m)	Diferencia Piso
1	2	si	2	0
	3	no	6,5	0
	4	no	5	0
	5	no	3,5	0
	6	no	6	-1
	7	no	9	-1
	8	no	10	-1
	9	no	5,5	-1
	10	no	4,5	-1

En la Tabla 23 se encuentra la configuración del escenario interior 1 y los datos obtenidos.

Tabla 23. Datos canal escenario interior 1

Banda GSM 850 Canal 130 Ganancia antena RX 50											Calidad Escucha	
Loc.	DIST (m)	SIGNAL (dBm)	RSSI (dBm)	RSSP (dBm)	SNR	FER (%)	BER (%)	TXPWR (dBm)	RXLEV_DL (dBm)	BER_DL (%)	MS Fijo	MS Móvil
1	0	22	-50	-28	55,9	0,01	0,00157	11	-48	0	Buena	Buena
2	2	13	-47	-37	48,8	0,43	0,0822	23	-48	0		
5	3,5	3	-53	-47	38,5	0,49	0,128	27	-53	0		
10	4,5	0	-54	-50	10,4	0,6	0,949	29	-54	0		
4	5	13	-51	-37	34,4	0,03	0,00643	19	-48	0		
9	5,5	-3	-53	-53	37	0,62	0,185	33	-65	0		
6	6	8	-50	-42	33,1	0,12	0,0222	25	-49	0		
3	6,5	4	-46	-46	18,9	1,24	0,203	33	-51	0		
7	9	-12	-62	-62	7,79	5,67	4,11	33	-61	0	Regular	
8	10	-6	-56	-56	22	0,06	0,0657	33	-65	0	Buena	

Los sistemas móviles en principio deben proporcionar servicio en cualquier localización de la zona de cobertura, lo que implica una multiplicidad de trayectos, con variadas situaciones de propagación, razón por la cual los datos obtenidos en los escenarios interiores pueden diferir respecto del escenario exterior, al pasar la señal de propagarse en espacios abiertos con propagación en condiciones de LOS (*Line Of Sight*, línea de vista) a espacios confinados, en donde es factible recibir señal por LOS, pero también por múltiples difracciones en las esquinas de muros y reflexiones en las paredes.

La relación entre la distancia y la potencia de señal recibida en el escenario interior 1 se identifica en la Ilustración 94.

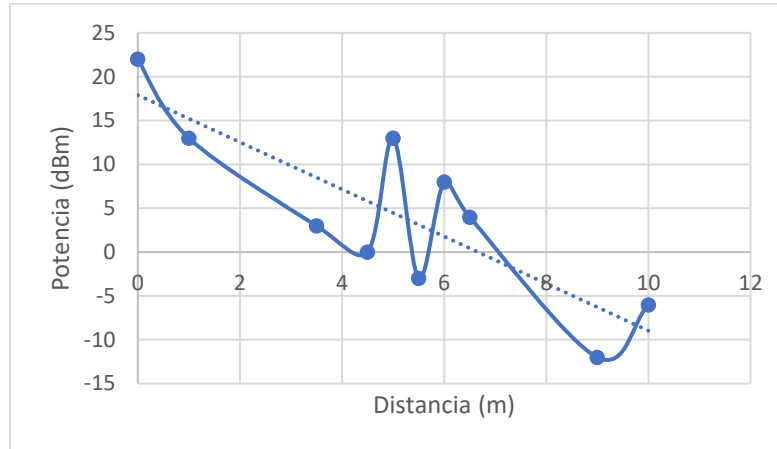


Ilustración 94. Potencia canal subida escenario interior 1

De acuerdo a la Ilustración 94, la potencia de la señal recibida es inversamente proporcional a la distancia, sin embargo para algunas localizaciones a 5, 6, 6.5 y 10 metros la potencia de señal se incrementa, ya que al encontrarse en un escenario interior, la señal recibida por el MS se propaga en un entorno NLOS (*No Line Of Sight*, Sin Línea de Vista), por varias trayectorias incrementando la potencia recibida por el MS.

La relación establecida entre distancia RSSI y RSSP en el escenario interior 1, se muestra en la Ilustración 95, la potencia RSSI siempre es menor o igual que la potencia RSSP, se presentan situaciones atípicas para las distancias de 5, 6, 6.5 y 10 metros, en donde se incrementa la señal recibida, lo cual corresponde a fenómenos de multitrayectoria, dado que estas distancias están asociadas a ubicaciones en donde no existe línea de vista en el establecimiento de la llamada entre la BTS y el MS.

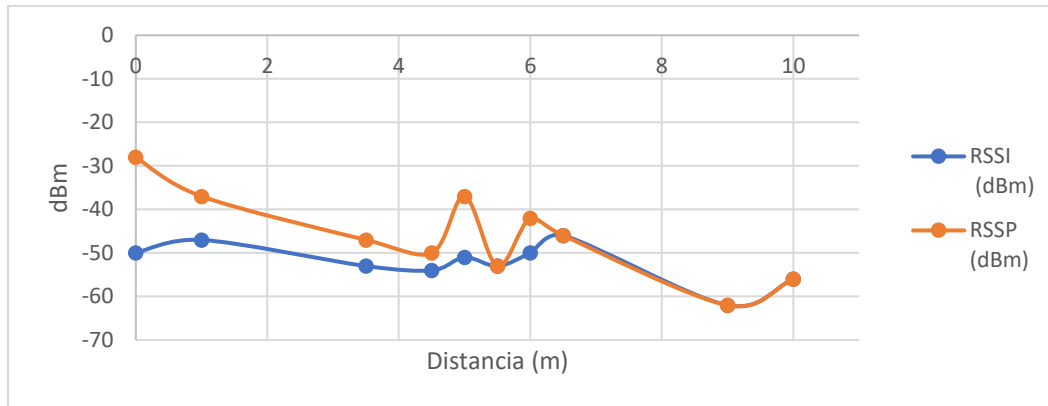


Ilustración 95. RSSI RSSP canal subida escenario interior 1

En la Ilustración 96 se muestra la relación distancia a SNR, para las localizaciones ubicadas a 5, 5.5, 6 y 10 metros, la SNR se incrementa debido a que la multitrayectoria de la propagación incrementó la potencia de la señal en la localización, señal que llega con buena calidad, la cual incrementa la SNR, mejorando la capacidad recibir la señal de audio transmitida.

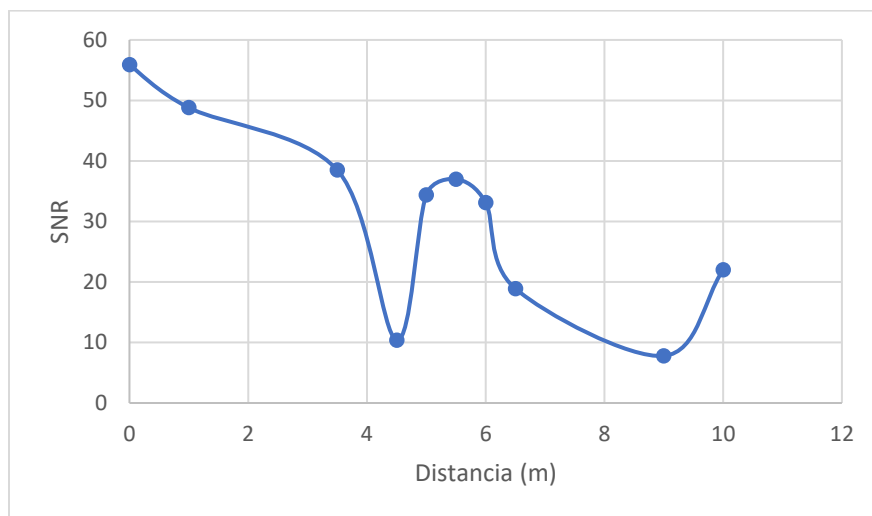


Ilustración 96. SNR canal subida escenario interior 1

Las tasas de error de bits y tasa de error de tramas, cuantifican el porcentaje de bits y tramas perdidas, idealmente estos porcentajes deben ser con tendencia a cero, la pérdida de bits y tramas dificultan una buena comunicación al presentarse silencios esporádicos.

En la Ilustración 97 se muestra la relación distancia FER, BER, BER_DL para el escenario interior 1, en la cual se observa que existe una similitud en las curvas obtenidas al graficar FER y BER, dado que es normal que si se pierden bits, también en una proporción similar se puedan perder tramas sobre el mismo canal; de forma

particular se identifica que para una distancia de 6.5 y 9 metros la pérdida de bits y tramas se incrementan, pues estas distancias corresponden a localizaciones para las cuales la propagación de la señal se realiza por NLOS, con una cantidad significativa de reflexiones. El BER_DL se mantiene con porcentaje de pérdidas muy cercanos a cero, lo que se corrobora con el hecho de que el audio que se transmite desde la BTS se escucha en el MS distante, desde todas las localizaciones, mientras que el audio que se transmite desde la MS distante hacia la BTS solo se escucha en algunas localizaciones.

En el escenario interior 1 se analiza la localización ubicada a 9 metros, inicialmente el nivel de potencia recibido es -12 dBm (Ilustración 93), debido a que la señal llega a su destino después de ser reflejada o refractada, pues la propagación es NLOS, posteriormente en la Ilustración 95 se aprecia que la misma localización tiene una SNR de 7.79, que es una relación pobre y como consecuencia se obtienen unos porcentajes altos de pérdidas de bits y paquetes, como se aprecia en la Ilustración 96, encontrándose una relación directa entre cada una de las variables tomadas para validar el desempeño de la estación de comunicación.

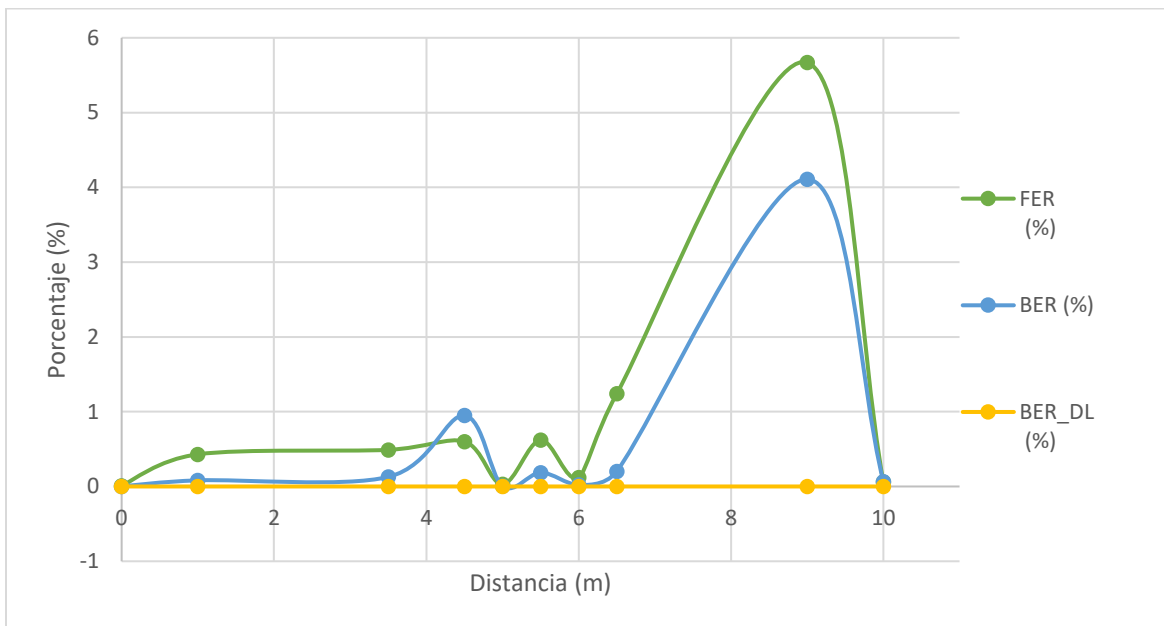


Ilustración 97. FER, BER, BER_DL escenario interior 1

En la Ilustración 98 se muestra la relación distancia contra TXPWR, RXLEV_DL en el escenario interior 1, la potencia de transmisión del MS se incrementa en la medida que está más distante, hasta llegar a un nivel tope en donde ya es la máxima potencia con la que puede transmitir, en este caso es de 33 dBm, este fenómeno se presenta para localizaciones ubicadas a 6.5, 9 y 10 metros de distancia. Para localizaciones ubicadas a 5 y 6 metros debido al control automático de ganancia el MS baja su nivel de potencia en la señal transmitida, pues se tiene una propagación por NLOS que hace llegar la señal a la BTS por reflexiones, requiriendo un nivel de potencia menor.



Los niveles de señal recibida desde la BTS, son menores e inversamente proporcionales a la distancia, en concordancia con la tendencia de la potencia de señal recibida en el canal de subida, reportada por el MS (TXPWR); para las localizaciones a 5 y 6 metros los niveles de potencia de recepción son mayores, razón por la cual la potencia de transmisión se disminuye.

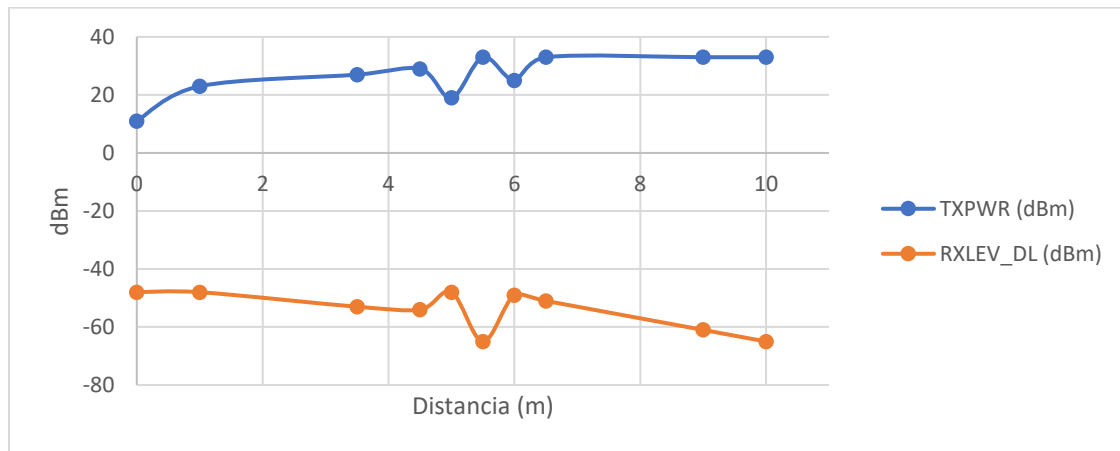


Ilustración 98. TXPWR, RXLEV_DL escenario interior 1

En la Tabla 24 se encuentra la configuración del escenario interior 2 y los datos obtenidos. La diferencia respecto del escenario interior 1 es la banda de trabajo, pasando de GSM850 a GSM1800, con su correspondiente cambio de canal de operación. A diferencia del escenario interior 1, en el escenario interior 2 solo existe comunicación audible clara en ambos sentidos para las localizaciones 1, 2, 3, 4, 8 dado que las condiciones del canal se degradan, comparándolas con el escenario 1.

Tabla 24. Datos canal escenario interior 2

Banda GSM 1800 Canal 512 Ganancia antena RX 50												
Ub	DIST (m)	SIGNAL (dBm)	RSSI (dBm)	RSSP (dBm)	SNR	FER (%)	BER (%)	TXPWR (dBm)	RXLEV_DL (dBm)	BER_DL (%)	Calidad Escucha	
											MS Fijo	MS Móvil
1	0	19	-54	-31	32,9	0,01	0,0042	10	-48	0,57	Buena	Buena
2	2	5	-48	-45	57,5	3,3	0,535	30	-62	0	Buena	Buena
5	3,5	-3	-56	-53	11,1	0,81	0,263	30	-66	0	Regular	Buena
10	4,5	-10	-63	-60	6,14	35,48	4,99	30	-81	0	Sin	Regular
4	5	-2	-55	-52	28	0,36	0,075	30	-67	0,28	Buena	Buena
9	5,5	11	-62	-39	7,93	14,68	2,81	10	-63	0,57	Sin	Regular
6	6	-8	-61	-58	7,94	15,77	7,64	30	-71	0,57	Sin	Regular
3	6,5	-6	-59	-56	9,19	9,78	2,75	30	-66	0	Buena	Buena
7	9	4	-61	-46	5,85	20,99	2,18	18	-66	0	Regular	Regular
8	10	3	-62	-47	7,07	26,49	3,64	18	-66	0	Buena	Regular

La relación entre la distancia y la potencia de señal recibida en el escenario interior 2 se identifica en la Ilustración 99. Se muestra que para las distancias de 5, 5.5 ,9 y 10 metros la potencia de la señal recibida se incrementa, debido a que la señal para llegar a la ubicación, posee menos obstrucciones.

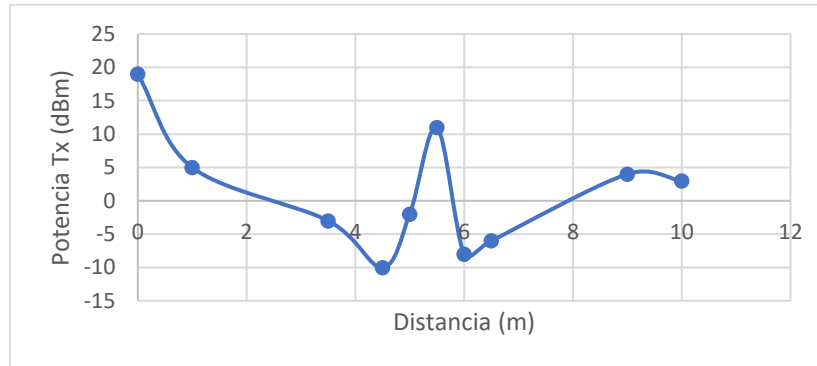


Ilustración 99. Potencia canal subida escenario interior 2

En la Ilustración 100 se muestra un comparativo entre las señales recibidas en los escenarios interiores 1 y 2, se identifica que los puntos ubicados a distancias inferiores a 6.5 metros la potencia de la señal es mayor para GSM850, esto se debe a que es posible alcanzar mayores distancias con menores frecuencias, como también bordear obstáculos para cubrir una mayor área en la zona de cobertura. También es posible interpretar de esta ilustración, que dependiendo de la frecuencia de trabajo de la señal portadora, llega de una u otra manera a una localización dada, pues la reflexiones, refracciones a las cuales está sometida la señal propagada son diferentes.

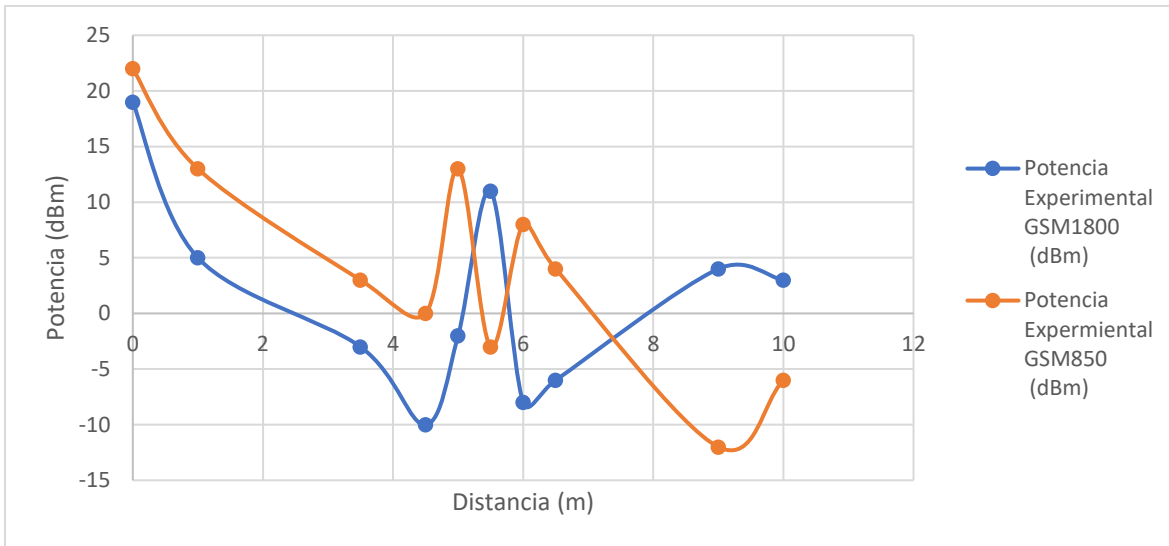


Ilustración 100. Potencia canal subida escenario interior 1 y 2

La relación establecida entre distancia, RSSI y RSSP en el escenario interior 2, se aprecia en la Ilustración 101, en donde hay situaciones atípicas, para las distancias de 5, 6, 6.5, 9 y 10 metros se incrementa la señal recibida, lo cual se atribuye a fenómenos de multitrayectoria, dado que para estas localizaciones la propagación de la señal se realiza en un entorno NLOS.

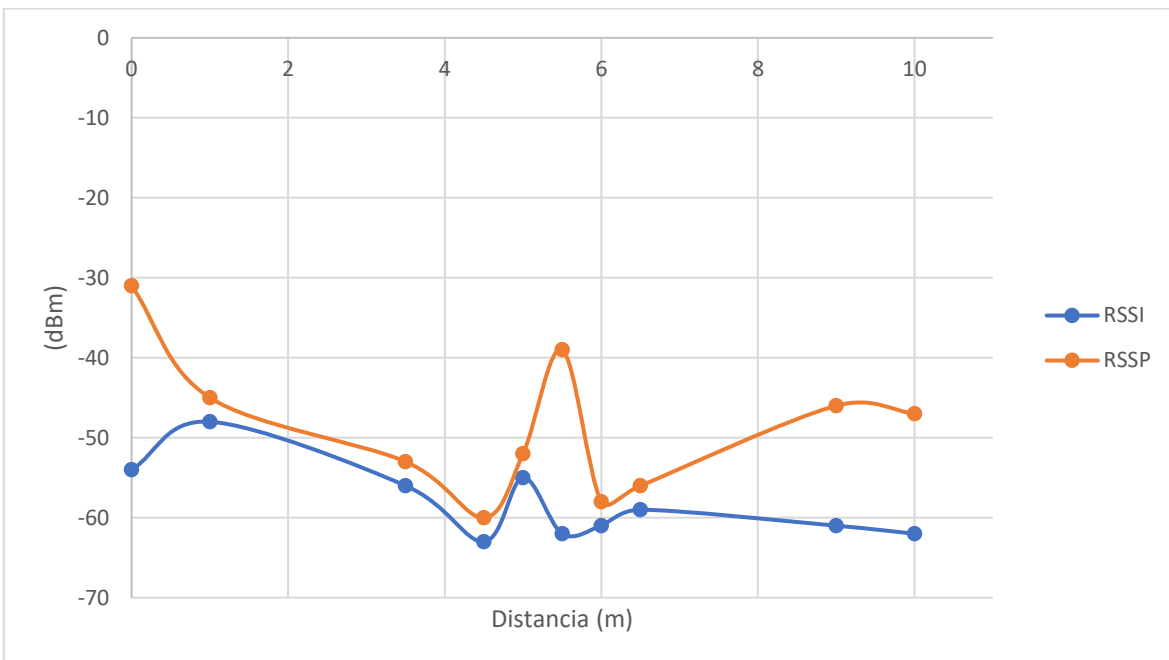


Ilustración 101. RSSI -RSSP canal subida escenario interior 2

En la Ilustración 102 se muestra la relación entre distancia a SNR; para una distancia de cero metros la relación SNR es menor que para un metro, esto se debe a que el dispositivo móvil se encontraba en la zona cercana de la antena BTS, ocasionando niveles de ruido⁹ interno altos. Para las localizaciones ubicadas a 5, 5.5, 6 y 9 metros la SNR se incrementa debido a la multitrayectoria de la señal, la cual incrementa la potencia y la calidad de la señal recibida, mejorando la SNR.

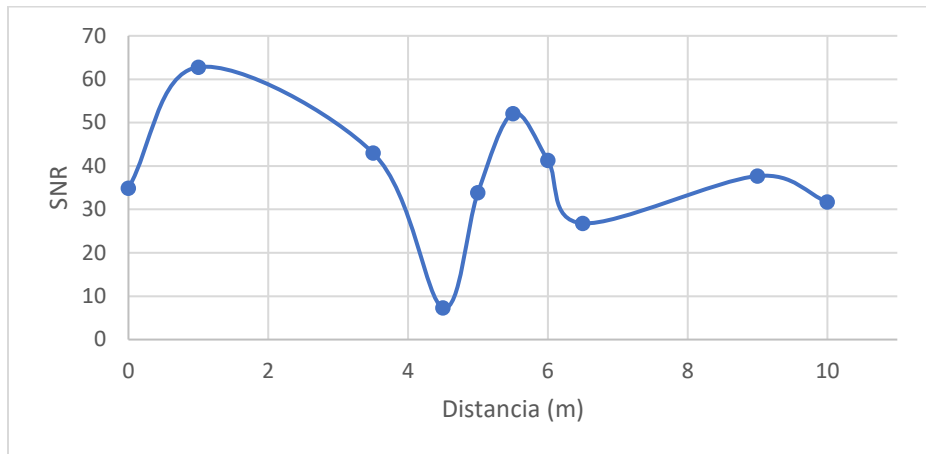


Ilustración 102. SNR canal subida escenario interior 2

En la Ilustración 103 se muestra un comparativo para BER, FER, BER_DL de los escenarios en interior 1 y 2, en donde se identifica que la BER y FER para la banda GSM850 son menores que para la banda GSM1800, esto es debido a que propagación en la banda de GSM850 bordea mejor los obstáculos y llega con mejores niveles de potencia a cada uno de los sitios del entorno interior, incrementando la SNR y disminuyendo el porcentaje de pérdidas de bits y tramas.

⁹ El ruido es una perturbación eléctrica que impone un límite a la calidad de funcionamiento de un sistema radioeléctrico. Las fuentes de ruido pueden ser naturales o artificiales; también pueden ser internas o externas al sistema. Las externas se deben a la radiación producida por elementos naturales y los efectos del medio, mientras que las internas son inherentes al sistema [9] L. M. T. Jose M Hernando Rábanos, Jose Manuel Riera Salís, "Comunicaciones móviles," Tercera edición ed. Madrid España: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2015.

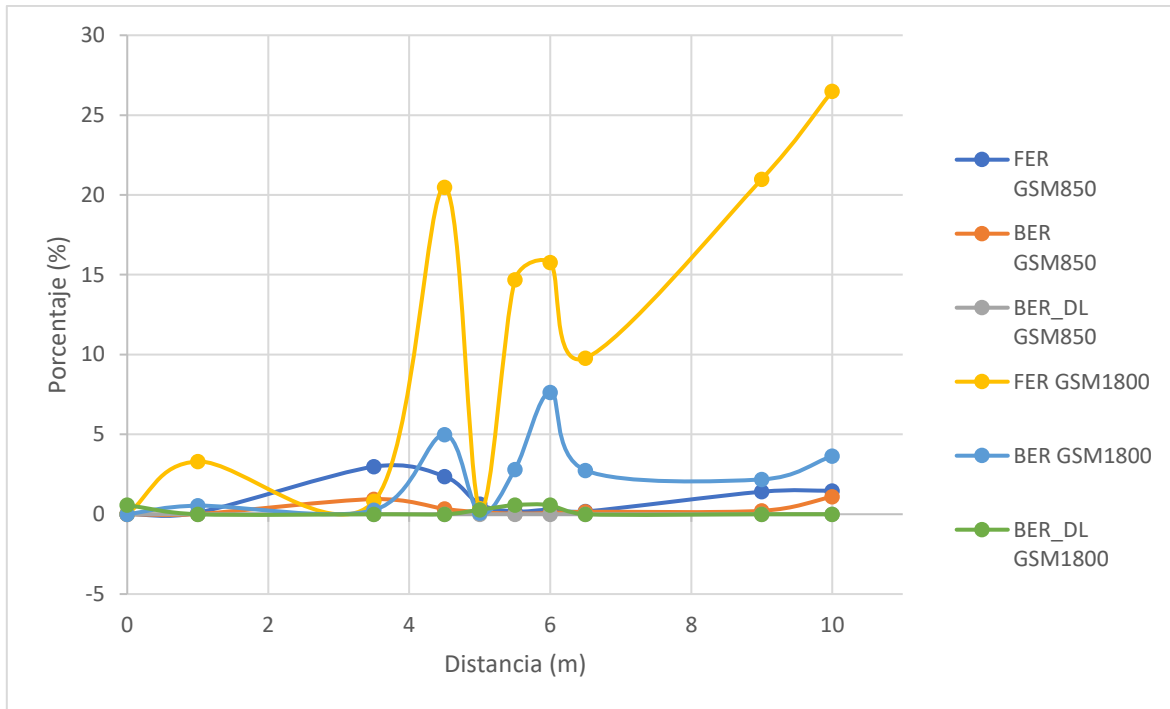


Ilustración 103. SNR canal subida escenario interior 1 y 2

En la Ilustración 104 se muestra la relación distancia contra las variables de potencia de transmisión en dB del canal de subida reportada por el MS (TXPWR) y potencia de transmisión en dB en el canal de bajada reportada por el MS (RXLEV_DL) para el escenario interior 2; la potencia de transmisión reportada por el MS se incrementa en la medida que el MS está más distante, a excepción de la distancia a 5,5 metros en donde el nivel de potencia disminuye, debido a que el nivel de potencia de recepción se incrementa.

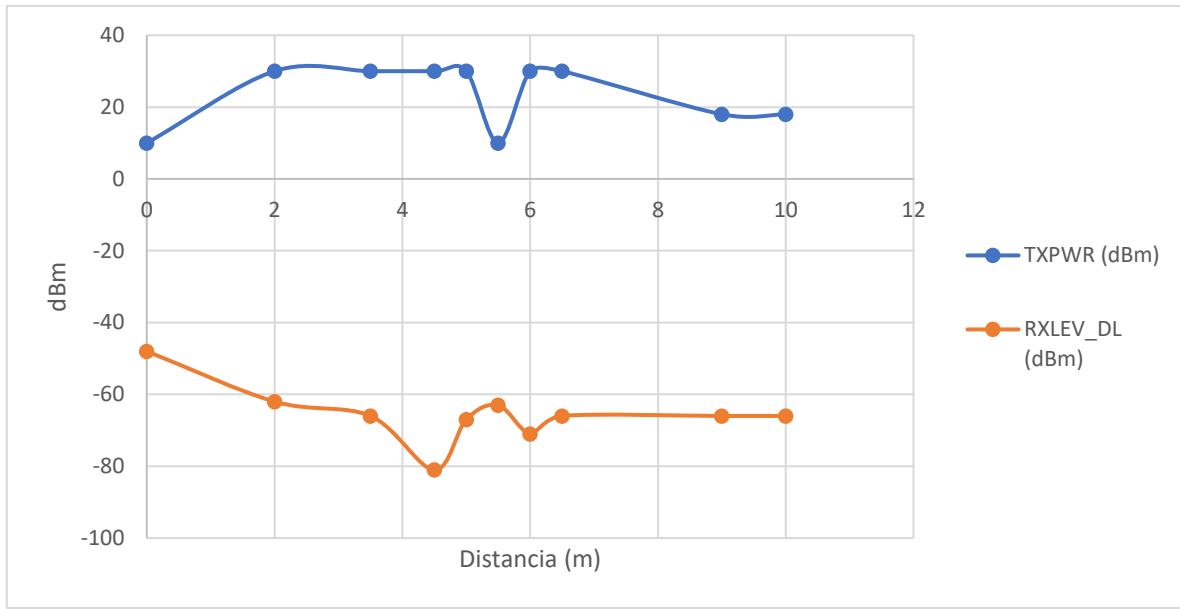


Ilustración 104. TXPWR, RXLEV_DL escenario interior 2

3.5 Comparación Resultados Experimentales con Métodos Empíricos

El crecimiento de los sistemas de comunicaciones móviles, la utilización de nuevas tecnologías y la extensión de su ámbito de aplicación, han hecho que los métodos empleados para evaluar la propagación de los canales móviles se incrementen, en donde surgen los métodos empíricos, que se fundamentan en amplias campañas de mediciones, con una posterior correlación de las medidas con características generales respecto del medio. Estos métodos estiman la pérdida de propagación en función de la distancia y de parámetros geométricos del entorno; utilizando en sus fórmulas de cálculo coeficientes determinados mediante las rectas de ajuste por regresión lineal a los resultados de las mediciones [9].

Las señales se propagan en ambientes LOS y NLOS, existen métodos empíricos para cada tipo de propagación.

Para el caso de esta tesis se considera, un método empírico con LOS en ambiente exterior y otro método para interiores el cual considera propagación LOS y NLOS.

3.5.1 Modelo LOS Exterior

Se basa en la variación de la pérdida de propagación con la distancia, en ambiente exterior. En las mediciones se ha encontrado que existe un exponente n que toma valores diferentes antes de un punto crítico y después del mismo, obteniéndose sendas expresiones para antes y después del punto crítico, las ecuaciones (1), (2) permiten realizar el cálculo de la pérdida básica de propagación de manera empírica [9]:



$$L_1(d) = L_0 + 10 n_1 \log d \quad d \leq d_{tp} \quad (1)$$

$$L_1(d) = L_0 + 10 n_1 \log d + 10 n_2 \log (d/d_{tp}) \quad d > d_{tp} \quad (2)$$

Donde

d = Distancia para el cálculo de la pérdida de propagación

$L_1(d)$ = Atenuación a una distancia d determinada en metros

L_0 = Atenuación a la distancia unitaria de referencia

n_1 = Coeficiente cálculo pérdida propagación si $d \leq d_{tp}$

n_2 = Coeficiente cálculo pérdida propagación si $d > d_{tp}$

$$d_{tp} = \text{distancia al punto crítico} = \frac{4 h_b h_m}{\lambda}$$

h_b = Altura de antena de la estación base

h_m = Altura de antena de la estación móvil

λ = longitud de onda de la frecuencia de trabajo

En la Tabla 25 se muestran valores medios obtenidos en medidas realizadas en Barcelona en la banda de 1800 MHz.

Tabla 25. Tipos de entornos LOS [9]

Entorno LOS	n_1	n_2	d_{tp} (m)
Calle regular	2.3	6.9	770
Avenida amplia	2.1	5.7	516
Calle Irregular	2.2	13.3	270

De acuerdo a las expresiones (1) y (2) se calculan los valores requeridos para estimar la atenuación a las distancias medidas en el ambiente exterior 1.

Inicialmente se calcula el d_{tp} para identificar con cual expresión trabajar en las localizaciones.

Donde:

$$h_b = 0.75 \text{ m}$$

$$h_m = 1.6 \text{ m}$$



$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{1.8 * 10^9} = 0.1667 \text{ m}$$

$$d_{tp} = \frac{4 h_b h_m}{\lambda} = \frac{4 * 0.75 * 1.6}{0.1667} = 28.8 \text{ m}$$

Así que:

Se hace uso de n_1 para distancias menores de 28,8 metros, mientras que para distancias superiores a 28,8 m se emplea n_1, n_2 .

De acuerdo a la Tabla 20 se tiene que:

$$L_0 = Potencia_{cero \text{ metros}} - Potencia_{1 \text{ metro}} = 34 - 24 = 10 \text{ dBm}$$

En la Tabla 26 se presenta el resumen de los cálculos realizados para el modelo LOS empírico por ubicación y su comparativo con los datos experimentales escenario exterior 1, en donde se toman los valores de n_1, n_2 correspondientes a avenida amplia de la Tabla 25, dado que es el escenario más parecido al espacio abierto donde se realizó la prueba.

Tabla 26. Comparación experimental, empírico LOS, escenario exterior 1

Banda GSM 1800 Canal 512 Ganancia antena RX 50								
DIST (m)	Potencia Experimental (dBm)	Atenuación Experimental (dBm)	Atenuación Empírica con n_1 y n_2 (dBm)	Atenuación Empírica con n_1 (dBm)	Potencia Señal Empírico n_1 (dBm)	Potencia Señal Empírico n_1, n_2 (dBm)	% error n_1	% error n_1, n_2
0	34				34	34	0	0
1	24	10	10	10	24	24	0	0
2	19	15	16,322	16,321	17,678	17,678	-7	-7
3	15	19	20,02	20,02	13,98	13,98	-7	-7
5	9	25	24,678	24,678	9,322	9,322	4	4
10	-8	42	31	31	3	3	138	138
15	-8	42	34,698	34,698	-0,698	-0,698	91	91
20	-9	43	37,322	37,322	-3,322	-3,322	63	63
25	-7	41	39,357	39,357	-5,357	-5,357	23	23
30	-6	40	42,03	41,02	-7,02	-8,03	-17	-34
40	-9	43	51,775	43,643	-9,643	-17,78	-7	-98
50	-9	43	59,334	45,678	-11,678	-25,334	-30	-181
60	-10	44	65,51	47,341	-13,341	-31,51	-33	-215
70	-10	44	70,732	48,747	-14,747	-36,732	-47	-267
80	-10	44	75,256	49,965	-15,965	-41,256	-60	-313
90	-10	44	79,246	51,039	-17,039	-45,246	-70	-352



100	-10	44	82,815	52	-18	-48,815	-80	-388
110	-10	44	86,043	52,869	-18,869	-52,043	-89	-420
% Error Promedio							-7	-109

En la Ilustración 105 se muestra la gráfica de la potencia de señal experimental y la calculada mediante el modelo empírico LOS para un ambiente exterior 1, se visualiza que el modelo empírico calculado con n_1 para todas las distancias se acerca a los datos tomados experimentalmente, mientras que el modelo empírico calculado con n_1, n_2 es distante de los datos tomados de forma experimental. En la Tabla 26, se observa que $potencia\ empírica\ n_1 \leq potencia\ empírica\ n_1, n_2$. Se encuentra también que existe una mayor cercanía entre los datos experimentales y los empíricos para valores $0 \leq d \leq 3\ m$, pues el porcentaje de error es inferior al $\pm 10\%$ mientras que para distancias $5 \leq d \leq 25\ m$ los valores empíricos son mayores que los niveles de potencia tomados de forma experimental, para distancias $30 \leq d \leq 110\ m$, los valores tomados experimentalmente están por encima de los calculados empíricamente; de manera general, se identifica que los cálculos empíricos tienen una cercanía con los valores experimentales, teniendo en cuenta que los datos empíricos corresponden a un modelo y serán siempre un acercamiento a lo que es está pasando en la práctica. De acuerdo al promedio de error para n_1, n_1 y n_2 se verifica que la que curva que está más cercana a los datos experimentales es la que corresponde a n_1 , pues ella presenta un promedio de error menor.

En el modelo empírico con n_1 se tiene una curva suave regular para distancias hasta de 110 m, así que existe una mejor aproximación entre los datos experimentales y la curva solo con n_1 , mientras que al considerar n_2 a partir de $d_{tp} = 28,8\ m$ existe un incremento en la atenuación respecto de la distancia.

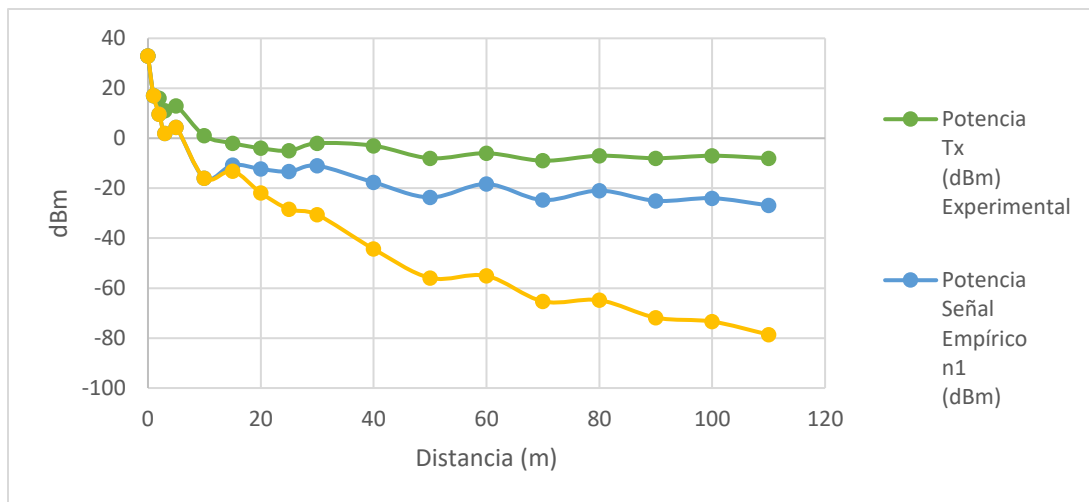


Ilustración 105. Potencia señal empírico, experimental, escenario exterior 1



Para realizar el análisis comparativo del escenario exterior 2 se procede a calcular el d_{tp} , que cambia respecto del escenario anterior, ya que se trabaja en una frecuencia diferente, identificando con cuál de las expresiones se debe calcular la atenuación en las diferentes distancias.

Donde:

$$h_b = 0.75 \text{ m}$$

$$h_m = 1.6 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{0.85 * 10^9} = 0.353 \text{ m}$$

$$d_{tp} = \frac{4 h_b h_m}{\lambda} = \frac{4 * 0.75 * 1.6}{0.353} = 13.6 \text{ m}$$

De esta manera :

Se hará uso de n_1 para $d \leq 13,6 \text{ metros}$, mientras que para $d > 13,6 \text{ metros}$ se hará uso de n_1, n_2 .

De acuerdo a la Tabla 21 se tiene que:

$$L_0 = \text{Potencia}_{\text{cero metros}} - \text{Potencia}_{1 \text{ metro}} = 33 - 17 = 16 \text{ dBm}$$

En la Tabla 27 se encuentra el resumen de los cálculos realizados para el modelo LOS empírico correspondiente al escenario exterior 2, comparado con los datos experimentales. Al graficar los datos de potencia de señal obtenidos de forma experimental y los obtenidos empíricamente, presentados en la Ilustración 106, se encuentra que los datos empíricos tienen la misma tendencia de los datos experimentales, pero con unos mayores niveles de atenuación con la distancia pues el modelo empírico considera los escenarios más críticos y adicional este modelo que está aún en estudio se realizó para una frecuencia de trabajo en la banda de 1.8 GHz [9], mientras que los datos experimentales se tomaron en la banda de 850 GHz, lo que implica unos niveles de pérdidas por atenuación menores. Adicional a que en este modelo se toman los valores de n_1, n_2 para un entorno que no corresponde a espacio abierto, sino a una avenida amplia que no corresponde a un espacio completamente abierto. El error porcentual que se presenta respecto de los datos experimentales es en promedio es de -558% para n_1 y de -922% para n_1 y n_2 lo que indica que la potencia empírica calculada es 5 y 9 veces más pequeña porcentualmente que la experimental, lo cual constituye un valor bastante alejado de la realidad.

Al realizar el comparativo entre la señal medida de forma experimental y las calculadas empíricamente con n_1, n_1 y n_2 , se visualiza que para todos los casos los valores experimentales están por encima de los valores empíricos. Este hecho se puede validar al calcular el error el cual en todos los casos es negativo.



Tabla 27. Comparación experimental, empírico LOS, escenario exterior 2

Banda GSM 850 Canal 130 Ganancia antena RX 50								
DIST (m)	Potencia Experimental (dBm)	Atenuación Experimental (dBm)	Atenuación Empírica con n1 y n2 (dBm)	Atenuación Empírica con n1 (dBm)	Potencia Señal Empírico n1 (dBm)	Potencia Señal Empírico n1, n2 (dBm)	% error n1	% error n1, n2
0	33				33	33	0	0
1	17	16	16	16	17	17	0	0
2	16	17	22,322	22,322	-5,322	-5,322	-133	-133
3	11	22	26,020	26,020	-9,020	-9,020	-182	-182
5	13	20	30,678	30,678	-13,678	-13,678	-205	-205
10	1	32	37,000	37,000	-20,000	-20,000	-2100	-2100
15	-2	35	43,123	40,698	-23,698	-26,123	-1085	-1206
20	-4	37	52,869	43,322	-26,322	-35,869	-558	-797
25	-5	38	60,428	45,357	-28,357	-43,428	-467	-769
30	-2	35	66,604	47,020	-30,020	-49,604	-1401	-2380
40	-3	36	76,349	49,643	-32,643	-59,349	-988	-1878
50	-8	41	83,908	51,678	-34,678	-66,908	-333	-736
60	-6	39	90,084	53,341	-36,341	-73,084	-506	-1118
70	-9	42	95,306	54,747	-37,747	-78,306	-319	-770
80	-7	40	99,829	55,965	-38,965	-82,829	-457	-1083
90	-8	41	103,819	57,039	-40,039	-86,819	-400	-985
100	-7	40	107,388	58,000	-41,000	-90,388	-486	-1191
110	-8	41	110,617	58,869	-41,869	-93,617	-423	-1070
% Error Promedio							-558	-922

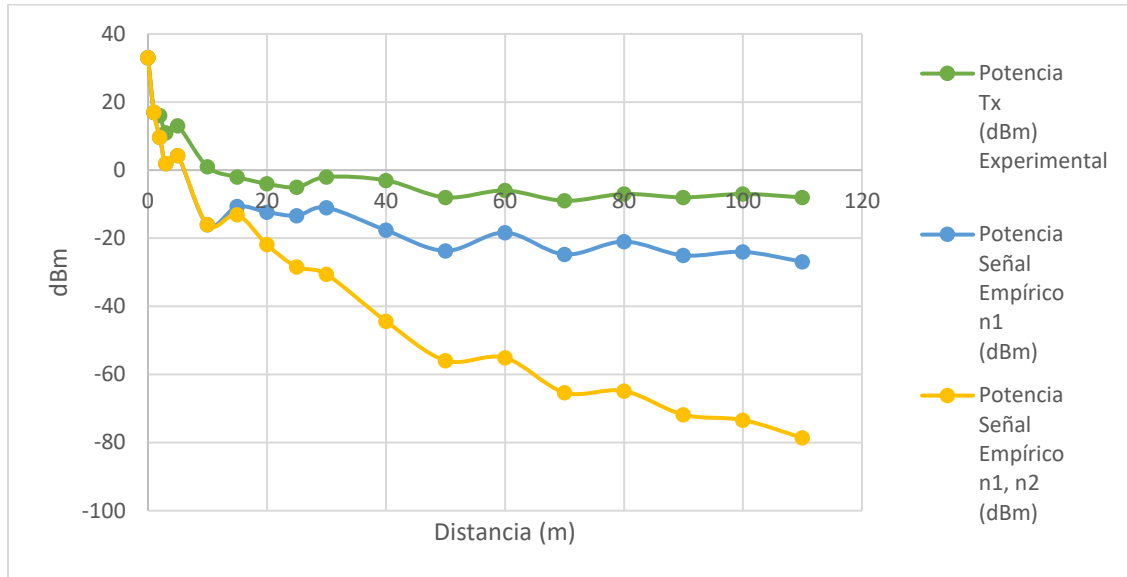


Ilustración 106. Potencia señal empírico, experimental, escenario exterior 2

3.5.2 Modelo LOS – NLOS Interior

La propagación en entornos interiores se puede presentar con LOS, pero también con NLOS, ya que la señal directa puede ser bloqueada por elementos como paredes, losas, techos entre otros, dando lugar a que la señal llegue al receptor a través de multitrayectos.

Un modelo de propagación propuesto por el Grupo Europeo de Trabajo COST 231, es el tenido en cuenta para realizar los cálculos empíricos en entornos interiores, denominado Modelo 1 [9].

Es un modelo empírico que se basa en la determinación de una línea de ajuste por regresión a las medidas, que solo tiene en cuenta la frecuencia y la distancia, cuya expresión para la propagación corresponde a la ecuación (3).

$$L(dB) = L_0 + 10 * n * \log d \quad (3)$$

Donde:

$$L (dB) = \text{Pérdidas a una distancia } d$$

$L_0 =$ Constante pérdidas a distancia de referencia de 1 metro

$n =$ Índice de variación de la potencia con la distancia

$d =$ Distancia en metros para el cálculo de las pérdidas de propagación



Los parámetros L_0, n dependen de la frecuencia y del entorno de propagación, en un modelo que aún está en estudio, pues la mayor parte de los datos se han sacado para frecuencias en la banda de 1.7 – 1.9 GHz, es un modelo que no tiene en cuenta información detallada de los materiales constructivos y arquitectura del entorno interior [9].

En este modelo se encontró que a partir de las mediciones de la desviación típica del error, considerando un solo modelo de propagación era de 11.2 (dB), valor muy grande, para mejorar la exactitud de la desviación típica se hace una separación entre trayectos LOS y NLOS [9].

En la Tabla 28 se exponen los valores propuestos para el índice de variación n según el tipo de trayecto y entidad proponente.

Tabla 28. Índice variación n escenario interior [9]

Trayecto	n	Origen del modelo
LOS	1.7	UIT- Finlandia
NLOS	5.5	
LOS	2.9	Universidad Lund (Suecia)
NLOS	4.1	
LOS	1.5	Universidad Bristol (R.U.)
NLOS	3.2	

Teniendo en cuenta que el modelo para interiores empírico hace uso de un índice de variación de potencia para LOS y otro para NLOS, se especifica el entorno de propagación en la Tabla 29 para cada una de las localizaciones en el escenario interior, así de esta manera calcular con el índice n correspondiente.

Tabla 29. Tipo de entorno de propagación interior según ubicación

BTS	Ubicación	Entorno	Recorrido (m)
1	2	LOS	2
	3	LOS	6,5
	4	LOS	5
	5	NLOS	3,5
	6	NLOS	6
	7	NLOS	9
	8	NLOS	10
	9	NLOS	5,5
	10	LOS	4,5

En la Tabla 30 se presenta el resumen de los cálculos realizados para el modelo interior empírico por ubicación y su comparativo con los datos experimentales, para un escenario interior 1, en donde se han tomado los valores de n para diferentes modelos, en el cálculo empírico se debe considerar L_0 que es la constante de



pérdidas de referencia a un metro, la cual se calcula en la ecuación (4) con base en los datos experimentales.

$$L_0 = Potencia_{cero\ metros} - Potencia_{1\ metro} = 22 - 13 = 9\ dBm \quad (4)$$

Tabla 30. Comparación experimental, modelo empírico, escenario interior 1

Banda GSM 850 Canal 130 Ganancia antena RX 50												
Loc	DIST (m)	Pot. Exp. (dBm)	Aten. Exp. (dBm)	Aten. Emp. UIT (dBm)	Aten. Emp. Lund (dBm)	Aten. Emp. Bristol (dBm)	Pot. Sx Emp. UIT (dBm)	Pot. Sx Emp. Lund (dBm)	Pot. Sx Emp. Bristol (dBm)	% Error UIT	% Error Lund	% Error Bristol
1	0	22					22	22	22	0	0	0
2	1	13	9	9	9	9	13	13	13	0	0	0
5	3,5	3	10	38,9	31,3	26,4	-16,9	-9,3	-4,4	-664	-410	-247
10	4,5	0	3	20,1	27,9	18,8	1,9	-5,9	3,2			
4	5	13	-13	20,9	29,3	19,5	1,1	-7,3	2,5	-91	-156	-81
9	5,5	-3	16	49,7	39,4	32,7	-27,7	-17,4	-10,7	-824	-479	-256
6	6	8	-11	51,8	40,9	33,9	-29,8	-18,9	-11,9	-472	-336	-249
3	6,5	4	4	22,8	32,6	21,2	-0,8	-10,6	0,8	-121	-364	-80
7	9	-12	16	61,5	48,1	39,5	-39,5	-26,1	-17,5	-229	-118	-46
8	10	-6	-6	64,0	50,0	41,0	-42,0	-28,0	-19,0	-600	-367	-217
% Error Promedio										-429	-319	-168

En la Tabla 30 se identifican las columnas correspondientes a:

- Loc Identificación de la localización en el escenario interior.
- Dist Distancia en metros de la localización a la BTS.
- Pot. Exp. Potencia de señal en dBm para la localización.
- Aten. Exp. Atenuación experimental para la localización.
- Aten. Emp. UIT Atenuación empírica en dBm para la localización, calculada con las constantes de la UIT mediante la ecuación (3).
- Aten. Emp. Lund Atenuación empírica en dBm para la localización, calculada con las constantes de la Universidad de Lund mediante la ecuación (3).
- Aten. Emp. Bristol Atenuación empírica en dBm para la localización, calculada con las constantes de la Universidad de Bristol mediante la ecuación (3).
- Pot. Sx Emp. UIT Potencia empírica en dBm para la localización, calculada con la atenuación de la UIT.
- Pot. Sx Emp. Lund Potencia empírica en dBm para la localización, calculada con la atenuación de la Universidad de Lund.



- Pot. Sx Emp. Bristol Potencia empírica en dBm para la localización, calculada con la atenuación de la Universidad de Bristol.
- % Error UIT Porcentaje de error de la potencia empírica de la UIT respecto de la potencia experimental.
- % Error Lund Porcentaje de error de la potencia empírica de la Universidad de Lund respecto de la potencia experimental.
- % Error Bristol Porcentaje de error de la potencia empírica de la Universidad de Bristol respecto de la potencia experimental.

En la Ilustración 107 se muestra la potencia de señal de Tx obtenida experimentalmente (Tabla 23) y la teórica para un ambiente interior 1 (Tabla 30). En donde se ha reemplazado la constante del modelo L_0 por el valor de atenuación de las medidas experimentales. Las curvas obtenidas para los modelos empíricos se acercan a la curva experimental, solo que con atenuaciones mayores en cada uno de los puntos, este hecho se valida en la Tabla 30 ya que para los tres modelos el promedio del porcentaje de error es negativo ; debido a que el modelo 1 empírico está dado para frecuencias en la banda entre 1.7-1.9 GHz, mientras que los datos experimentales se tomaron en la banda de 0.850 GHz, lo que implica menores pérdidas respecto de la distancia.

Al realizar una comparación entre los tres modelos empíricos, para este escenario interior, porcentualmente el modelo que más se acerca a la potencia de señal experimental es el de la Universidad de Bristol.

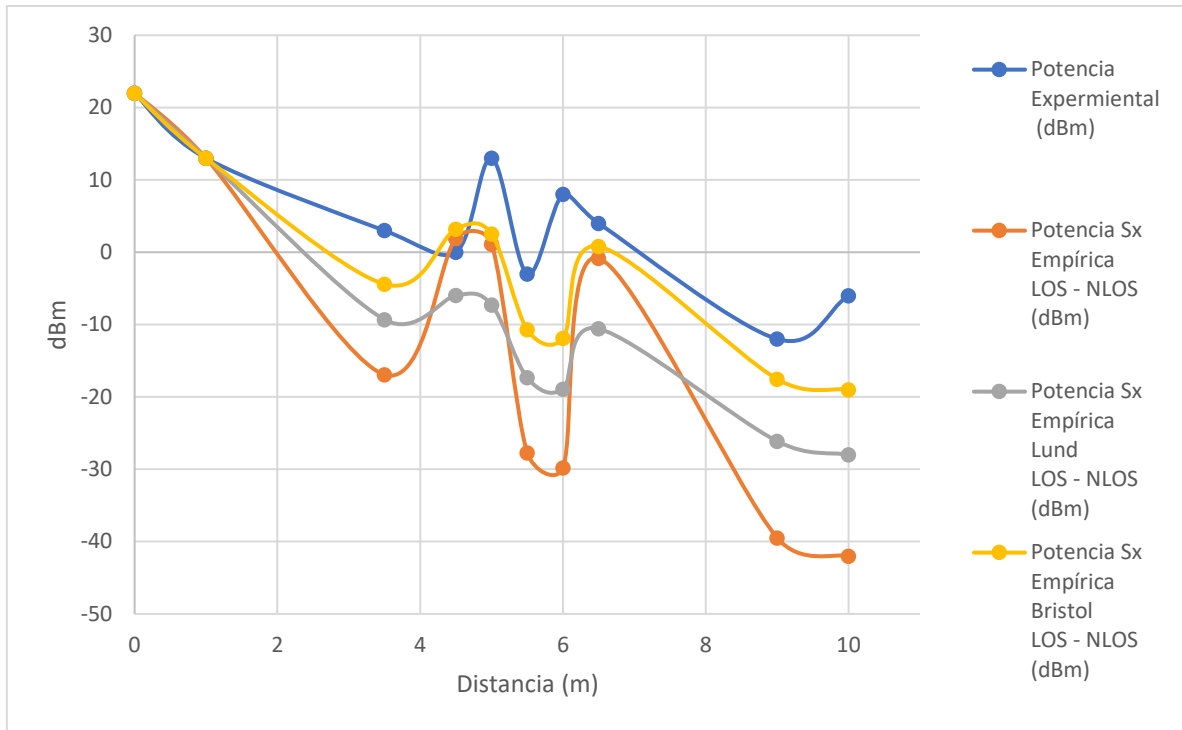


Ilustración 107. Potencia señal empírico, experimental, escenario interior 1

Considerando un escenario interior 2, se ha realizado una segunda comparación entre los datos experimentales y los empíricos, de acuerdo al modelo de propagación propuesto por el Grupo Europeo de Trabajo COST 231 [9], estos datos que se exponen en la Tabla 31.

Teniendo en cuenta que la expresión para el cálculo de las pérdidas (ecuación (3)), considera L_0 como la constante de pérdidas de referencia a un metro, esta constante se calcula con base a los datos experimentales del escenario interior 2, de acuerdo a la ecuación (5).

$$L_0 = Potencia_{cero\ metros} - Potencia_{1\ metro} = 19 - 5 = 14\ dB$$

Tabla 31. Comparación experimental, modelo empírico, escenario interior 2

Banda GSM 1800 Canal 512 Ganancia antena RX 50												
Loc	DIST (m)	Pot. Exp. (dBm)	Aten. Exp. (dBm)	Aten. Emp. UIT (dBm)	Aten. Emp. Lund (dBm)	Aten. Emp. Bristol (dBm)	Pot. Sx Emp. UIT (dBm)	Pot. Sx Emp. Lund (dBm)	Pot. Sx Emp. Bristol (dBm)	% Error UIT	% Error Lund	% Error Bristol
1	0	19					19	19	19	0	0	0
2	1	5	14	14	14	14	5	5	5	0	0	0



5	3,5	-3	8	43,9	36,3	31,4	-24,9	-17,3	-12,4	-731	-477	-477
10	4,5	-10	7	25,1	32,9	23,8	-6,1	-13,9	-4,8	39	-39	39
4	5	-2	-8	25,9	34,3	24,5	-6,9	-15,3	-5,5	-244	-664	-664
9	5,5	11	-13	54,7	44,4	37,7	-35,7	-25,4	-18,7	-425	-331	-331
6	6	-8	19	56,8	45,9	38,9	-37,8	-26,9	-19,9	-372	-236	-236
3	6,5	-6	-2	27,8	37,6	26,2	-8,8	-18,6	-7,2	-47	-210	-210
7	9	4	-10	66,5	53,1	44,5	-47,5	-34,1	-25,5	-1287	-953	-953
8	10	3	1	69,0	55,0	46,0	-50,0	-36,0	-27,0	-1767	-1300	-1300
% Error Promedio										-483	-421	-413

Las curvas de la Ilustración 108 se trazan de acuerdo a los datos de la Tabla 31, y corresponden a la señal experimental medida en campo, junto con los valores de la señal empírica calculada, para el modelo interior con índice de variación n de diferentes modelos, casi para todos los casos y los tres orígenes de los modelos el valor de la señal experimental está por encima de los valores empíricos a excepción de la localización ubicada a 4,5 metros. Se aprecia que el modelo más aproximado a la señal experimental es el empírico Lund en cuanto a la tendencia de sus datos, pues se acerca en cada una de las tendencias que tiene la señal experimental; pero porcentualmente en promedio existe un menor error con el modelo de la Universidad de Bristol, este con datos que se apartan de la tendencia de los datos experimentales. Es posible afirmar que el modelo con índice de variación proveniente de la ITU y Bristol son más estrictos y consideran escenarios que degradan más la potencia de la señal respecto de la distancia.

En la Ilustración 109 se muestra un comparativo de la potencia de señal en los dos escenarios interiores con el cálculo empírico que mejor se ajusta, el cual en ambos casos corresponde al modelo sueco de la Universidad de Lund. En esta ilustración se identifica que en la propagación de la señal influye significativamente la frecuencia de la portadora, ya que se están considerando las mismas condiciones en los dos escenarios a excepción de la frecuencia de trabajo; el fenómeno se manifiesta debido a que las reflexiones, refracciones en la propagación se presenta de diferentes formas, las cuales dependen directamente de la frecuencia de la portadora. El cálculo empírico para el modelo de Lund con diferente frecuencia se observa en esta ilustración, en el cual existen mayores niveles de atenuación para la frecuencia correspondiente a la banda de GSM1800.

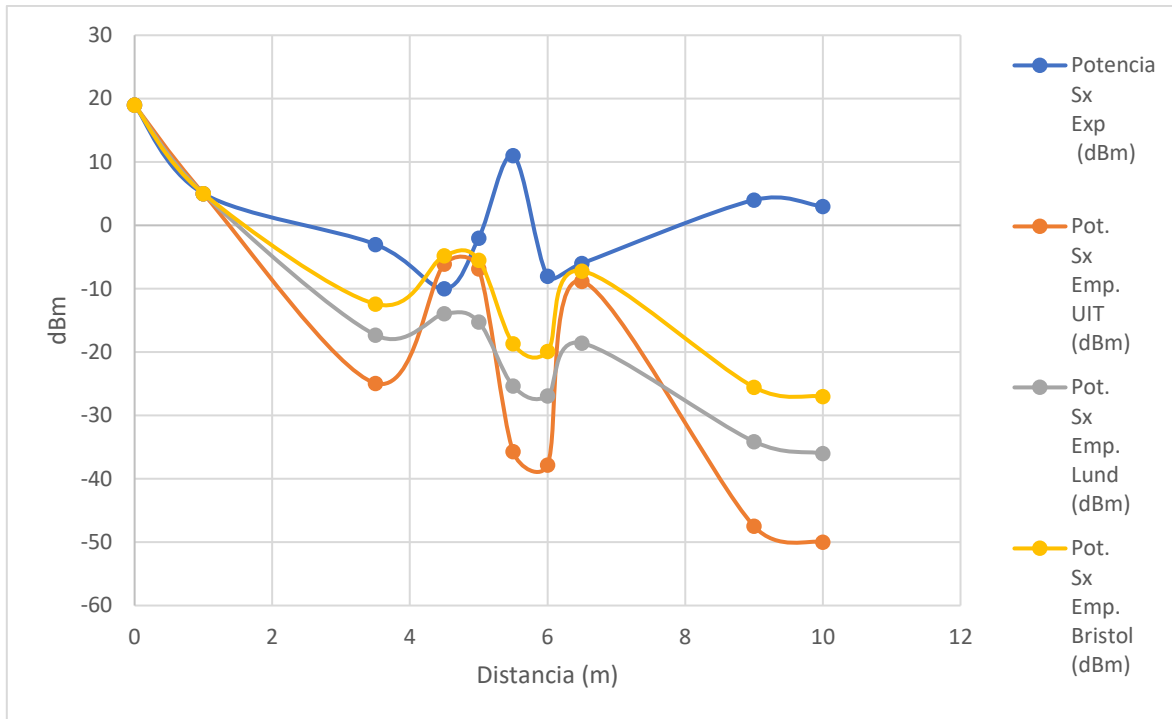


Ilustración 108. Potencia señal empírico, experimental, escenario interior 2

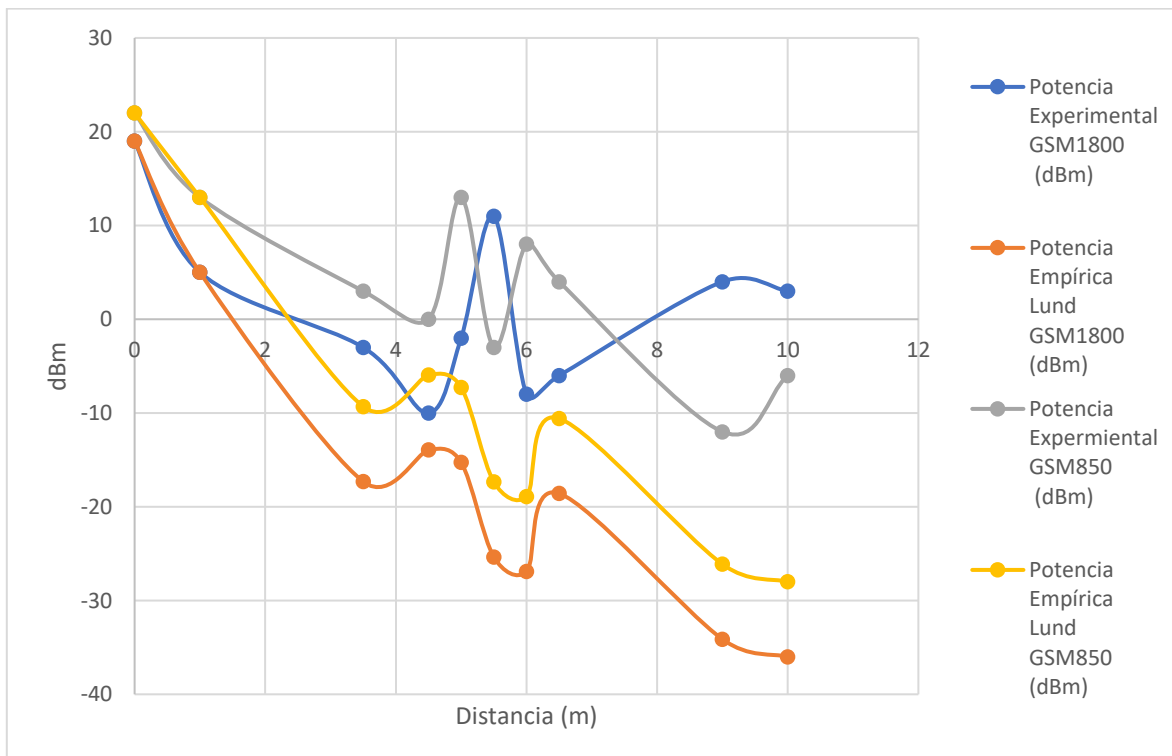


Ilustración 109. Potencia. señal empírico, experimental escenario interior 1 y 2

3.6 Rendimiento Máquina Virtual

Es importante establecer el cambio en el consumo de recursos de la máquina virtual, es así que en la Ilustración 110 se valida el consumo de recursos del servidor Ubuntu antes de poner en funcionamiento la estación de comunicación, con todos sus módulos y una vez se han establecido las 3 llamadas de forma simultánea.

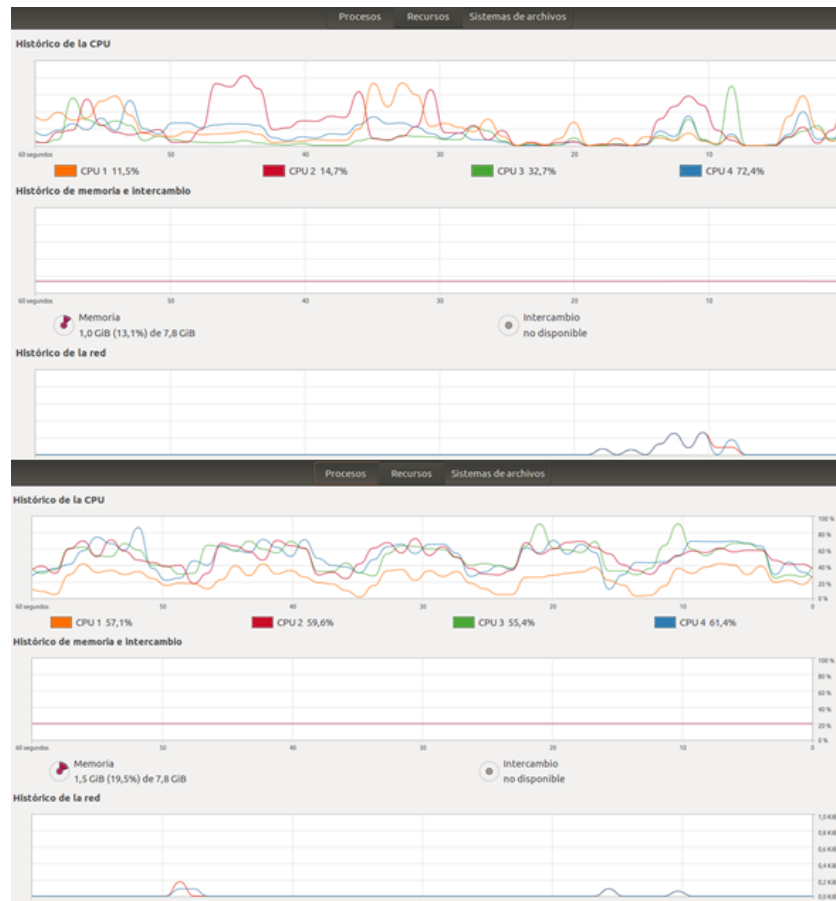


Ilustración 110. Consumo recursos máquina virtual

En el comparativo se aprecia que en promedio el uso de la capacidad de procesamiento pasó de 35% a 60%, mientras que la memoria usada pasó de 13.1% a 19.5%.

En la Ilustración 111, se registra el comportamiento de los recursos de la máquina física una vez está funcionando la estación de comunicación móvil, con el establecimiento de las tres llamadas simultáneas. En donde se identifica que en promedio de uso de procesamiento es de 55%.

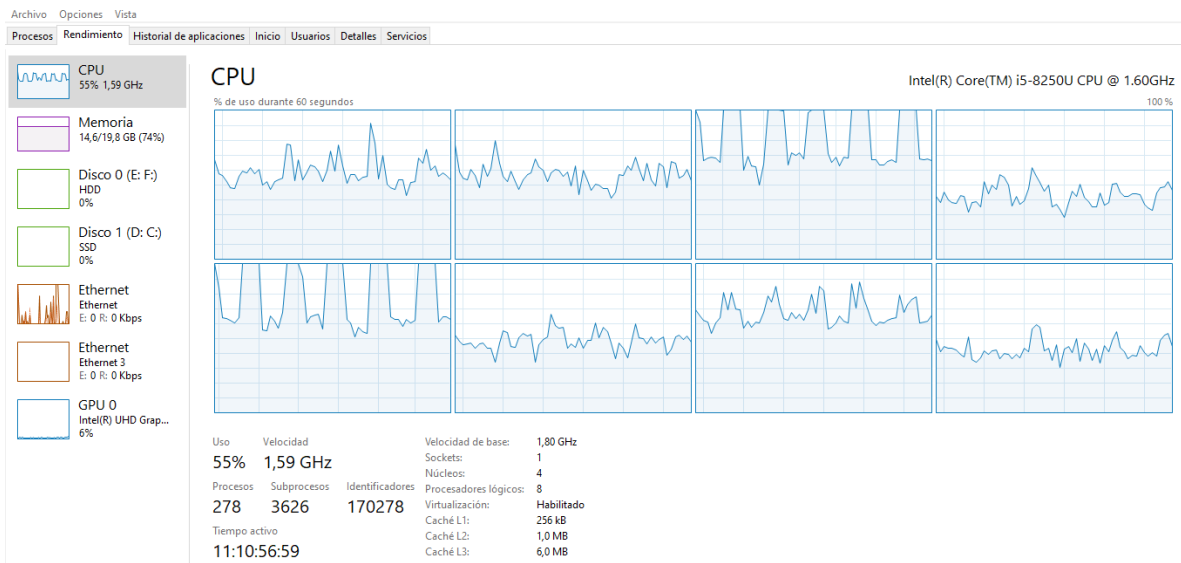


Ilustración 111. Consumo recursos máquina física



4. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 Conclusiones

La arquitectura GSM tradicional está cimentada en módulos funcionales físicos, los cuales ejecutan las actividades propias del sistema de comunicaciones; también posee interfaces que corresponden a las fronteras establecidas entre los módulos. Este conjunto organizado de módulos funcionales e interfaces constituyen el diseño funcional GSM; en una arquitectura GSM basada en SDR, cada uno de los módulos tradicionales basados en hardware posee su equivalente hardware y/o software, en su gran mayoría son software, para poner en funcionamiento el estándar de comunicación GSM haciendo uso de SDR.

- Para validar el desempeño, las capacidades y limitaciones de la estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, es necesario a nivel de la capa física realizar mediciones de potencia de señal; sin embargo se debe complementar con otras mediciones que cualifican la señal en cada uno de los canales, ellas indican la calidad de la señal recibida, representada en la relación señal a ruido para conocer cual es el porcentaje de pérdidas a nivel de bits y tramas.
- En un canal es posible tener una potencia de señal y SNR alta, para contar con una buena calidad de llamada, pero si el canal tiene una potencia de señal alta con una SNR baja (inferior a 10 dB), la calidad de llamada es baja, pues al existir mucho ruido en la señal recibida, existen dificultades para decodificar la señal, por falta de claridad en los datos. También se puede presentar el escenario contrario en donde a pesar de tener una potencia de señal baja (superior al umbral de sensibilidad del receptor) con una relación SNR superior a 20, la calidad de la llamada es buena, pues la señal llega con potencia baja, pero la calidad de los datos es buena debido a un SNR alto, el dispositivo MS. es capaz de decodificar los datos transmitidos.
- Se realiza el diseño de una estación de comunicación móvil GSM basada en SDR, el cual cumple con los requisitos funcionales y no funcionales, dado que existen en el mercado dispositivos hardware que sirven como interfaz para enviar y recibir señales RF propias del estándar de comunicación GSM; como también paquetes software organizados modularmente que facilitan la ejecución de funciones para el establecimiento de la llamada de voz y el intercambio de SMS.
- Es posible realizar una implementación de una estación de comunicación GSM basada en SDR, en donde la cantidad de elementos hardware sea la menor posible, para cumplir con requerimientos de fácil configuración y programación en módulos software, los cuales a su vez son fácilmente implementables.



- La estación de comunicación GSM basada en SDR implementada, es muy útil para la academia, pues mediante ella se pueden identificar cada uno de los elementos de una red GSM tradicional, lo que facilita el aprendizaje y la aprehensión del estándar de comunicación para ingenieros en formación, pero esta estación posee restricciones en áreas de cobertura y en establecimiento simultáneo de llamadas, las cuales impiden que sea implementada en entorno productivo, al tener una relación costo beneficio baja.
- La relación SNR está inversamente relacionada con las medidas porcentuales de BER y FER ya que estos últimos están referidos a la pérdida porcentual de bits y tramas en un enlace respectivamente, los cuales es más factible perder cuando existe una relación señal a ruido baja, mientras que si la SNR es alta, las relaciones BER y FER serán porcentualmente bajas pues la calidad de la señal es buena, facilitando la el proceso de recepción de los datos.

Las medidas de potencia de señal tomadas con referencia a la BTS al establecer una llamada se contrastaron con un modelo empírico específico para un entorno exterior e interior, obteniéndose que para casi todos los datos la curva posee la misma tendencia, solo que los valores empíricos están por debajo de los valores experimentales, esto se debe a que los modelos empíricos son el resultado de estudios para condiciones en un entorno definido de propagación, los cuales tiene origen en continentes diferentes, que posiblemente difieran de las condiciones del medio Colombiano y particularmente Caucaño.

- En las medidas realizadas mediante el analizador R&S ZVL, se observa que el estándar de comunicación GSM hace uso de dos canales en el establecimiento de una llamada, ascendente (MS – BTS) y descendente (BTS -MS), el canal descendente siempre está establecido, pues es usado para sensar al móvil, mientras que el canal ascendente solo se establece en el momento justo de la llamada o envío del SMS, cada uno de estos canales son independientes, en una misma llamada, es decir un canal para hablar, otro para escuchar y es la razón por la cual es posible en una llamada escuchar al MS distante y no ser escuchado.
- Al realizar las validaciones de las frecuencias portadoras mediante el analizador R&S ZVL, es posible incurrir en algún porcentaje de error, pues por la precisión del dispositivo de medida es difícil identificar exactamente la frecuencia central de la portadora, lo que se obtiene es una aproximación, razón por la cual la diferencia entre portadoras también es aproximada, el mismo fenómeno ocurre para el cálculo del ancho de banda de cada una de las portadoras, en donde se debe encontrar la frecuencia central de la portadora y las frecuencias laterales en donde la señal tenga -3 dB, respecto de la frecuencia central.
- Durante las prácticas en los diferentes escenarios, tanto interiores como exteriores, se evidenció una diferencia en las llamadas tanto en calidad, como en estabilidad, debido a que en el escenario exterior no se presentaban



obstáculos ni objetos que incidieran en la propagación de la señal, sin embargo en el escenario interior, al encontrarse diferentes obstáculos, estos factores causaban una incidencia directa en la señal, generando atenuación y bloqueo para la señal directa, lo que afecta en la calidad de las llamadas.

- Existe una mejor propagación de la señal en escenarios internos o externos en la banda de GSM850, dado que las frecuencias menores pueden bordear más fácilmente obstáculos en espacios confinados, mientras que espacios abiertos poseen un menor nivel de atenuación respecto de la distancia.
- Al realizar el análisis de los escenarios interiores, se puede concluir que pese a que se están tomando las medidas de potencia para las mismas localizaciones, al trabajar con las frecuencias correspondientes a la bandas GSM850 y GSM1800, los niveles de potencia en cada punto difieren, ya que cada banda de frecuencia bordea los obstáculos de una manera diferente, seguramente llegando a la misma localización por reflexiones distintas en la señal.
- Al realizar el análisis en un escenario interior se encuentra que se obtienen mejores niveles de potencia de señal cuando la antena de la BTS se encuentra con mayor altura (en el segundo piso), que cuando se encuentra en el primer piso, esto indica que el patrón de radiación en tres dimensiones favorece la propagación cuando la antena se encuentra a una altura mayor.

4.2 Recomendaciones

- Al implementar una estación de comunicación móvil de prueba es posible realizarlo en una máquina virtual, pero considerando una estación en un ambiente productivo se recomienda realizarla en una máquina física dedicada con sistema operativo nativo Ubuntu 16.04, pues el consumo de recursos hardware es importante, ya que el procesamiento que debe realizar el PC en la digitalización de paquetes es significativo y al no poseer los suficientes recursos la llamada se puede establecer, pero no existe intercambio de audio.
- En el proceso de implementación el PC que se escoja para alojar el paquete OpenBTS debe tener disponible un puerto USB 3.0, lo que garantizará una adecuada velocidad en la recepción y transmisión de los datos, pues en caso contrario se puede experimentar un jitter muy alto en la comunicación, degradando la calidad de la llamada.
- Para realizar las pruebas de desempeño de la llamada telefónica es necesario definir localizaciones en las cuales se mantenga la misma altura, azimut e inclinación del dispositivo móvil, dado que ante todo en escenarios interiores las reflexiones que tiene la señal propagada varía con pequeños desplazamientos del MS.



4.3 Trabajos Futuros

- Para que la implementación de la estación de comunicación GSM basada en SDR sea atractiva teniendo una relación costo beneficio mayor, debe tener una zona de cobertura más extensa, permitiendo también establecer una mayor cantidad de llamadas de manera simultánea, para ello es viable trabajar con transceivers SDR que puedan tener unas potencias de transmisión mayores y levantar una mayor cantidad de canales físicos, en este caso particular se puede realizar la implementación con la USRP N210.
- La implementación de la estación de comunicación GSM basada en SDR pueden ser medido su desempeño cuando la USRP B210 tenga una fuente de poder externa, para identificar si mediante ella es posible incrementar los niveles de potencia de transmisión en los diferentes escenarios y de esta manera ampliar su área de cobertura.
- Los servicios que se validaron en el presente trabajo de grado fueron las llamadas y la mensajería SMS para usuarios dentro de la estación, es posible extender a una nueva estación con adicionales usuarios, en la cual se puedan prestar los mismos servicios estableciendo comunicación entre usuarios de diferentes celdas.
- Extender los servicios de la estación de comunicación a datos para uso de aplicaciones e interacción entre usuarios dentro de la estación.
- La tecnología evoluciona día a día, así es que hoy ya existe un paquete OpenLTE que a nivel de software libre permite la implementación de una estación de comunicación LTE basada en SDR, la cual puede tener como base la presente tesis, en donde se pruebe el establecimiento de llamadas, intercambio de SMS e intercambio de paquetes de datos, con arquitectura LTE.
- Realizar diseño e implementación de una celda GSM basada en SDR, que haga uso de algún software y hardware propietario, como es el caso de YATE, para comparar con el desempeño de la estación de comunicación basada en software libre.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. V. Giró Uribaz, A. R. Selva Castañeda, and Y. Almaguer Lora, "Implementación de un radio receptor definido por software (SDR) para la banda de (30 kHz - 40 MHz) ",
- [2] "OpenBTS / Wiki / Inicio." www.OpenBTS.org (accessed 25 dic 2019).
- [3] GSMA, "Explicación de roaming móvil,"
- [4] Á. Pachón de la Cruz, "Evolución de los Sistemas Móviles Celulares GSM,"
- [5] F. Hillebrand, "The Creation Of Standards For Global Mobile Communication: Gsm And Umts Standardization From 1982 To 2000," (in English), *Ieee Wireless Communications*, Article vol. 20, no. 5, pp. 24-33, Oct 2013, doi: 10.1109/mwc.2013.6664470.
- [6] W. Andreas, "The GSM Air Interface Fundamentals and Protocols,"
- [7] *Plan de Identificación Internacional para redes públicas y suscripciones. Enmienda 2: Nuevo Anexo G - Asignación de indicativos de país móviles (MCC) E.212*, U.-T. U. I. d. T.-S. N. d. I. Telecomunicaciones, 2020.
- [8] *Indicativos de red para el servicio móvil (MNC) del plan de identificación internacional para redes públicas y suscripciones (Según la Recomendación UIT-T E.212 (09/2016)) (Situación Al 15 De Diciembre De 2018)*, U. I. d. T.-O. d. n. d. I. Telecomunicaciones, Ginebra, 2018.
- [9] L. M. T. Jose M Hernando Rábanos, Jose Manuel Riera Salís, "Comunicaciones móviles," Tercera edición ed. Madrid España: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2015.
- [10] *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Channel coding (GSM 05.03)*, 1996
- [11] M. Sauter, *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*, . 2017.
- [12] R. Akeela and B. Dezfouli, "Software-defined Radios: Architecture, state-of-the-art, and challenges,"
- [13] E. research. "Networked software defined radio (SDR)." <https://www.ettus.com/> (accessed 03/09/2021, 2021).
- [14] L. M. Systems. "Software Defined Radio - Lime Micro." <http://www.limemicro.com/products/software-defined-radio/> (accessed 06/09/2021).
- [15] K. Tan, H. Liu, J. Zhang, Y. Zhang, J. Fang, and G. M. Voelker, "Sora: high-performance software radio using general-purpose multi-core processors,"
- [16] YateBTS. https://wiki.yatebts.com/index.php/Main_Page (accessed 22-02-2022)
- [17] G. X. N. Prasannan, A. Manikoth, R. Gandhiraj, R. Peter, and K. Soman,, "Openbts based microtelecom model: A socio-economic boon to rural communities,," presented at the International Mutli-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing Kottayam, India., 2013.
- [18] M. Iedema. F. B. Harvind Samra, "Getting Started with OpenBTS, 2015".
- [19] R. Networks, *OpenBTS Application Suite Release 4.0 User Manual*, 2014.
- [20] *European digital cellular telecommunications system (Phase 2); Multiplexing and multiple access on [1]the radio path (GSM 05.02)*, 1994.
- [21] *European digital Cellular telecommnuications system (phase 1); Radio Sub-System Link Control*, 1991.
- [22] *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile Station -Base Station System (MS -BSS) interface; Data Link (DL) layer specification (GSM 04.06)*, 2000.
- [23] *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Mobile radio interface layer 3 specification (GSM 04.08)*, 1995.
- [24] R. P. a. J. Troya, "Ingeniería del software," vol. 1, ed, 2007.
- [25] T. Killian. "SDR showdown: HackRF vs. Blade RF vs. USRP." <http://www.taylorkillian.com/2013/08/sdr-showdown-hackrf-vs-bladerf-vs-usrp.html> (accessed 22-02-2022, 2022).
- [26] Ubuntu, Ed. *Ubuntu releases*. 2022. [Online]. Available: https://releases.ubuntu.com/?_ga=2.189218667.1396847540.1646101328-160886732.1646101328.

