

Medidas de calidad de voz en una red GSM sobre software libre

Voice quality measurements on a GSM network through free software

E. E. Gaona, S. Cárdenas, E. G. Muskus

Recibido Julio 29 de 2013 – Aceptado Noviembre 15 de 2013

Resumen - En este artículo se presentan los resultados obtenidos al medir los parámetros de calidad de una red de telecomunicaciones sobre GSM (Global System Mobile) en la banda DCS-1800 (Digital Cellular Service - 1800MHz); utilizada con el objetivo de articular un sistema de atención de desastres en situaciones de emergencia, empleando un USRP (Universal Software Radio Peripheral) en conjunto con sistema de telefonía IP basado en Asterisk. El USRP se encarga de emular la operación de una BTS (Base Transceiver Station) ejecutando las funciones de un PBX (Private Branch Exchange).

Las mediciones del desempeño de la red se realizaron a partir de tres parámetros probabilísticos: GoS (Grade of service), DCR (Dropped Call Rate) y MOS (Mean Opinion Score).

Con el uso de 8 terminales y escogiendo un GoS del 2% se generó un tráfico de hasta 3,6 Erlang, esta medición se realizó

empleando modelos probabilísticos de Erlang B. La cobertura de la red se obtuvo aplicando el modelo Okumura-Hata tanto para interiores como exteriores sin el uso de amplificadores, también se realizaron mediciones del consumo de potencia del sistema.

Palabras clave - GSM, USRP, GoS, Dropped Rate, MOS.

Abstract - This article presents the results obtained by measuring the quality parameters of a telecommunications network on GSM (Global System Mobile) in the DCS-1800 (Digital Cellular Service - 1800MHz) band; which is used in order to articulate a system of disaster relief in emergency situations, using a USRP (Universal Software Radio Peripheral) in conjunction with IP telephony system based on Asterisk. The USRP is responsible for emulating the operation of a BTS (Base Transceiver Station) performing the functions of a PBX (Private Branch Exchange).

The measurements of network performance were made from three probabilistic parameters: GoS (Grade of Service), DCR (Dropped Call Rate) and MOS (Mean Opinion Score). Traffic was generated using an 8 terminals and choosing a GoS of 2% to 3.6 Erlang, this measurement was performed using probabilistic models of Erlang B. The network coverage was obtained using the Okumura-Hata model for both indoors and outdoors, without the use of amplifiers. The consumption of power in the system was also measured.

Key Words - GSM, USRP, GoS, Dropped Rate, MOS.

I. INTRODUCCIÓN

El despliegue inmediato de un sistema de telecomunicaciones en situaciones de emergencia como catástrofes naturales o atentados terroristas, entre

¹ Producto derivado del proyecto de Investigación “Comunicaciones emergentes ante situaciones de emergencia”, apoyado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas a través del Grupo de Investigación GITUD.

E. E. Gaona. Ingeniero Electrónico, Magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Especialista en Telecomunicaciones Móviles, Docente y director del grupo de investigación GITUD en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, C/ 110821 Bogotá D.C. (correos e.: egaona@udistrital.edu.co; elvisgaona@ieee.org).

S. Cárdenas es Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, C/ 11001 Bogotá D.C. (correo e.: scardenasv@correo.udistrital.edu.co).

E. G. Muskus Ingeniero Electrónico, Especialista en Telecomunicaciones Móviles, Docente e investigador del grupo GITUD en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, C/ 11001 Bogotá D.C. (correos e.: egmuskusr@udistrital.edu.co).

otros, son una prioridad, ya que permite la coordinación de las entidades responsables de atender este tipo de emergencias.

La solución propuesta en el presente proyecto se centra en la implementación de un sistema de telecomunicaciones haciendo uso de software libre para interconectar llamadas, protocolos de comunicaciones empleados en las redes GSM, que dan flexibilidad a la solución, al facilitar el uso de cualquier terminal móvil comercial.

En [1] se reportan las experiencias del funcionamiento de una red sobre GSM utilizando dos tarjetas hijas en una unidad USRP combinado con software GNU, al igual que la implementación del sistema en zonas rurales. En [2]–[5] se muestran las ventajas de tener un sistema de bajo costo en lugares de difícil acceso sin presencia de operadores móviles.

El uso de BTS basada en software como sistema embebido ha ido en aumento con la implementación de pico celdas en [6], [7] y [8]. El uso de redes WMN (Wireless Mesh Network) en la solución de problemas de comunicaciones en situaciones de emergencia, presenta saltos entre dos o más nodos [9], para lograr un área de cobertura determinada aumentando la eficiencia y la eficacia del proceso de respuesta de emergencia [10]. El rango de cobertura de los sistemas WMN es limitado debido a que en cada salto entre nodos se generan pérdidas y/o retardos de la información (latencias), así su cobertura no es netamente proporcional al número de nodos usados; la cobertura de estos sistemas pueden alcanzar los 300 metros por salto, con retardos de hasta 100 ms en 10 saltos [11]; otros sistemas que emplean sistemas tipo walkie-talkie presentan una cobertura de 21m por salto con retardos de 641ms, con una medida de MOS de 2 y una tasa de pérdida promedio de 35,5% [12], [13] el alcance aumenta a 24m con un tiempo de retardo promedio de 1018ms, una tasa promedio de pérdidas del 11% y un MOS de 2 a 3. En redes Ad Hoc, las pruebas realizadas en [14] y [15] muestran la fiabilidad del sistema para una cantidad reducida de nodos, y el aumento en el manejo de peticiones utilizando una MANET, adaptando las técnicas de servicio sobre diferentes escenarios en [16].

II. ARQUITECTURA DE LA RED GSM DE EMERGENCIA

A. Central de Conmutación

Uno de los requerimientos del sistema de conmutación es su portabilidad y bajo costo, esto se logra utilizando el USRP; así mismo, el sistema ha de cumplir con las principales funciones que se desempeñan en una red móvil celular desde las estaciones base o BTS.

• PBX Asterisk

Asterisk es un software que implementa algunas funcionalidades de centrales telefónicas conocidas como PBX bajo licencia GPL (Licencia Pública General de GNU), permite su implementación sobre sistemas operativos Linux, aspectos que reducen notablemente el costo de implementación.

• OpenBTS

Aplicación que se encuentra en constante desarrollo, pretende implementar y desarrollar sistemas basados en USRP por medio de aplicaciones Unix de código abierto, haciendo uso de sistemas libres de conmutación o PBX para establecer comunicaciones mediante la interface aérea GSM (“Um”) con dispositivos móviles [17], siendo lo suficientemente robusta para igualar la operatividad de una BTS estándar.

En la Fig. 1 se presenta la arquitectura general de este punto de acceso llamado OpenBTS.

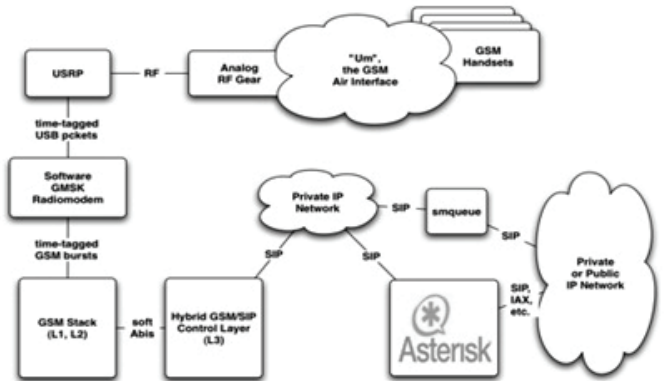


Fig. 1. Arquitectura OpenBTS [18]

B. Modulador

El modulador es la interfaz que toma los datos y la información encriptada dentro del protocolo del estándar GSM y la modula a la frecuencia portadora deseada (Para el caso 1800MHz). No se realiza amplificación de la señal, solo se modula buscando su compatibilidad con la banda GSM. Este tipo de sistemas deben emplear software libre como GNU Radio que permiten ser mediadores entre software y hardware, para este caso se emplea como medio de comunicación el puerto USB.

1) USRP

Permiten transmitir y recibir datos modulados. El modelo USRP1 se encuentra dentro de la gama media de USRP de Ettus Research [19], recibe y transmite las llamadas simultáneamente en tiempo real, el sistema embebido en el USRP solo se ocupa del procesamiento en alta frecuencia y de transmitir y recibir información empaquetada al procesamiento de baja frecuencia que ejecuta por medio software. Para esto se utiliza una tarjeta transceptora que opera en la banda 1,5-2,1 GHz (RFX1800). La frecuencia utilizada se da en la banda DCS-1800 por razones de congestión e interferencia en esta banda, evitando así conflictos legales con los demás operadores prestadores del servicio.

2) GNU Radio

Este software libre está desarrollado en lenguajes de programación Python y C++, provee de las herramientas necesarias para el procesamiento de señales en sistemas de radio en RF.

C. Estación Móvil

La estación móvil se utiliza como intercomunicador final; en este caso se aplica el término a los terminales móviles, habilitando el uso de cualquier terminal móvil que funcione en la banda de 1800MHz.

El esquema básico de un sistema GSM se muestra en la Fig. 2, con él se realizan las pruebas de muy corto alcance y se comprueba la conexión del sistema basado en software, así como el transceptor universal USRP1, la antena y la compatibilidad con los componentes y el dispositivo móvil.

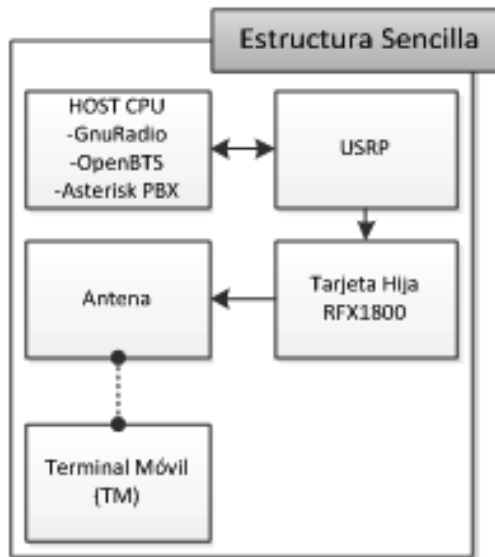


Fig. 2. Esquema básico del sistema GSM. Fuente: Autores.

III. DIMENSIONAMIENTO DE LA RED GSM DE EMERGENCIA

La red GSM se reduce a la implementación de una picocelda y su dimensionamiento inicia con la selección de los dispositivos de hardware de bajo costo y herramientas de software libre que se utilizarán en la implementación de la BTS, se definen los criterios de calidad y cobertura en la planificación de la red, los parámetros a configurar en los dispositivos, se realiza un presupuesto de potencia que garantice la calidad del enlace y su cobertura.

En la planeación y dimensionamiento del sistema de comunicaciones se realizaron las consideraciones de un enlace de microondas con línea de vista estándar, obteniendo las pérdidas totales de los enlaces (Pérdidas Isotrópicas del Enlace) y aplicando este cálculo a un modelo estándar de propagación se obtiene la cobertura del sistema.

A. Características del Hardware y Software de la BTS

La red GSM implementada opera en la banda DCS-1800, empleando un USRP en conjunto con el sistema de telefonía IP basado en Asterisk. El USRP emula la operación de una BTS ejecutando las funciones de un PBX.

En la tabla I se relacionan los dispositivos de hardware utilizados para la implementación de la BTS, así como los terminales móviles.

TABLA I
HARDWARE UTILIZADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA BTS.[19]

HARDWARE	ESPECIFICACIONES
Computador	Laptop Toshiba Satellite L655 – Máquina virtual Oracle VM VirtualBox: <input type="checkbox"/> 1.5 GB memoria base. <input type="checkbox"/> 12 MB memoria de video. <input type="checkbox"/> 15 GB de disco duro. <input type="checkbox"/> Procesador AMD Phenom II P960 Quad-Core 1.8 GHz (un núcleo dedicado). <input type="checkbox"/> Puerto USB e Internet.
USRP	USRP1: Altera Cyclone FPGA, 64 MSPS dual ADC, 128 MSPS dual DAC y USB 2.0.
Tarjeta Hija	1 RFX1800, transceptor (Rx/Tx) de 1.5 GHz a 2.1 GHz.
Antena	Vert 900: 824 a 960 MHz, 1710 a 1990 MHz de cuatro bandas Celular/PCS y banda ISM; antena vertical omnidireccional de 3dBi.
Terminales Móviles (TM)	TM1:Alcatel 217A, TM2:Alcatel

En la tabla II se muestra el listado del software y la versión utilizada en la implementación del sistema BTS.

TABLA II
SOFTWARE Y VERSIÓN UTILIZADA EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA BTS.[18]

SOFTWARE	VERSIÓN
Sistema operativo	Ubuntu Desktop 11.10 32-bit.
GNU Radio	Versión 3.4.2; última antes de prescindir de "libusrp" requerido por la USRP1.
Libosip2	Versión 3.5.0
Asterisk	Versión 1.4.42. Las nuevas versiones basadas en 1.8.xx poseen un error aún indeterminado a nivel de SIP.
OpenBTS	Versión P2.8 "Opelousas".

B. Criterios de Planificación de la red GSM

En esta consideran los parámetros de calidad y cobertura que la red GSM garantizará, estos tienen lugar antes de la planificación de la red.

El límite de potencia de la señal que determina el cubrimiento está dado por una potencia recibida de -75dBm, se estiman tres parámetros probabilísticos que determinan la calidad de la red; en primer lugar, se considera la tasa de llamadas exitosas mayor al 98%; el segundo es la tasa de llamadas rechazadas que se establece un 2% (de cada 100 llamadas se bloquean 2), mientras que el MOS que evalúa la calidad de la llamada debe ser mayor a 3,5 en una escala de 0 a 5.

C. Parámetros de los Dispositivos de la Red

En el dimensionamiento se requiere establecer los parámetros en los dispositivos involucrados, como la potencia del transmisor, las ganancias de las antenas, las pérdidas en del cable en la línea de transmisión, la sensibilidad del receptor, entre otras. En la tabla III se recopila una breve explicación de los parámetros usados en el cálculo de este presupuesto de potencia.

TABLA III
DESCRIPCIÓN DE LA LOS PARÁMETROS DEL PRESUPUESTO DE POTENCIA.

Parámetro	Descripción
S	Sensibilidad de la BTS o de la MS, que indica el grado de percepción de una señal en dBm.
P_T	Potencia de transmisión de la antena; en conjunto con la ganancia de la antena forman la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) del transmisor en W (Vatios).
G	Ganancia de la antena transmisora-receptora.
G_D	Ganancia por diversidad. Ésta ganancia comúnmente se usa para balancear el enlace de bajada con el de subida y se ubica en el enlace de recepción de la BTS; usualmente se emplean 5dB para esta ganancia.
L_{LT}	Pérdidas de la línea de transmisión que incluyen las pérdidas totales del medio conductor empleado en conjunto con los conectores.
L_D	Pérdidas del duplexor.
L_{BPF}	Pérdidas del filtro pasa banda.
M_{DI}	Margen de degradación por interferencia.

1) Estación Móvil

La estación móvil MS (Mobile Station) hace uso de dispositivos móviles comerciales en uso con diferente operador, sus características son similares, ya que adoptan los estándares impuestos por medio del estándar GSM.

Los datos a indagar sobre esta antena receptora constan de tres parámetros: la potencia transmitida por el MS, la ganancia de la antena receptora y la sensibilidad del receptor. Según el estándar GSM 05.05 de la ETSI [20], el nivel de referencia de sensibilidad que no puede sobrepasarse depende del tipo de canal usado y las condiciones de propagación, estando limitado a -100dBm en DSC1800 clase 1 y 2, y en -102dBm para clase 3. La producción actual de dispositivos móviles celulares se desarrolla para clase 1 en la banda 1800, con lo que se tiene:

$$S_{MS} = -100 \text{ dBm} \quad (1)$$

La potencia transmitida de la MS tiene un valor máximo de 36dBm, mientras que el valor típico es de 25dBm dependiendo de la clase de alimentación. El valor estándar de control para cualquier clase de MS es de 0dBm al igual que la ganancia estándar de las antenas receptoras, así se tiene:

$$P_{TMS} = 25 \text{ dBm} \quad (2)$$

$$G_{MS} = 0 \text{ dB} \quad (3)$$

2) Estación Transceptora Base (BTS)

La potencia de transmisión de la USRP1 en conjunto con las tarjetas RFX1800 son de 100mW (20dBm) y una figura de ruido de 8dB [5]. La sensibilidad recomendada de las BTS según la norma 05.05 de la ETSI es de , de esta forma se calcula la sensibilidad de la USRP1 utilizando la figura de ruido y la relación mínima de E_b/N_0 de 8dB definida en la norma ETSI 05.05. La ecuación que determina la sensibilidad se da a continuación:

$$S_{BTS} = 8\text{dB} + 8\text{dB} + (290K \times 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) + 54\text{dB}$$

$$S_{BTS} = 8\text{dB} + 8\text{dB} - 174\text{dBm} + 54\text{dB} = -104\text{dBm} \quad (5)$$

$$P_{TBTS} = 20\text{dBm}$$

3) Antena

La ganancia de una antena tipo dipolo es de 3dBi, potencia máxima de 100W y V_{SWR} menor a 1,3.

$$G_{BTS} = 3\text{dBi} \quad (6)$$

D. Presupuesto de Potencia

El cálculo del presupuesto de potencia se desarrolla tanto para el enlace de subida desde la MS a la BTS como para el enlace de bajada en la misma tabla, esto se proporciona con el propósito de balancear los enlaces; En el procedimiento de cálculo del presupuesto de potencia se plantea el modelo sin dimensionamiento de amplificadores, duplexores o filtros, tomando estas pérdidas iguales a cero.

Las pérdidas a lo largo de la trayectoria del enlace (L_{TT}) se derivan de los diferentes efectos físicos que afectan el enlace; en la tabla V se obtiene el valor total para el sistema implementado, obteniendo (7).

$$L_{TT} = 116,87\text{dB} \quad (7)$$

E. Modelo de propagación Okumura-Hata (OH)

El cálculo de cubrimiento incluyendo el tipo de terreno hace uso del modelo *Okumura-Hata (OH)*, regido por la ecuación (8), donde sus parámetros se explican en la tabla IV; este modelo cubre el rango de frecuencias 150MHz a 1920MHz.

$$a = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(H_{eff}) - c + (44,9 - 6,55 \log(H_{eff})) \log(d) \quad (8)$$

TABLAIV
DESCRIPCIÓN DE LA ECUACIÓN (11) DEL MODELO OKUMURA-HATA.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
a	Pérdidas en la trayectoria (dB).
f	Frecuencia en GHz.
H_{eff}	Altura a la que se ubica la antena de la BTS en m.
c	Término de correlación que depende del terreno; en este caso se da por [18].
d	Distancia entre BTS y MS (alcance) en m.

El término de correlación se emplea según el tipo de terreno donde se realice la implementación; en este caso se trabaja

terreno urbano y se emplea (9), donde h_r es la altura de la MS estimada de ser en promedio de 1,6m.

$$c = (1,1 \log(f) - 0,7)h_r - (1,56 \log(f) - 0,8) \quad (9)$$

$$c = 0,331055dB$$

Resolviendo la ecuación (8), teniendo en cuenta el valor de c en (9), donde la antena de la BTS está a una altura máxima de 5m y que las pérdidas de trayectoria se dan por el presupuesto de potencia calculado anteriormente ($=L_{TT}$), se calcula la cobertura del enlace con el valor de d en (10).

$$\log(d) = 1,255722 \rightarrow d = 18,01863m \quad (10)$$

El anterior cálculo muestra un alcance de 18m, considerando las condiciones de propagación en zonas urbanas y las de interiores como edificios, materiales de construcción; de esta forma la cobertura es mucho más cercana a la realidad que la de espacio libre (sin considerar el terreno). En la tabla V se listan los resultados del presupuesto de potencia para el sistema comercial.

TABLA V
PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DE POTENCIA PARA EL SISTEMA COMERCIAL.

PRESUPUESTO DE POTENCIA DEL RADIO ENLACE				MS CLASE I
Frecuencia [MHZ]:	1800	SISTEMA: GSM		
Terminal receptor	UNIDAD	BTS	MS	
Sensibilidad RF de entrada del RX	dBm	-104	-100	A
Margen de degradación por interferencia	dB	5	5	B
Pérdidas del cable + conectores	dB	1,86	0	C
Ganancia antena del RX	dBi	3	0	D
Ganancia por diversidad	dB	5	0	E
Potencia isotrópica	dBm	-	-95	F=A+B+C-D-E
Fuerza del campo	dB μ V/m	36,985 4	47,1 254	G=F+Z
Terminal transmisor	UNIDAD	MS	BTS	
Potencia RF pico de salida del TX	W	0,316	0,1	
Potencia media por ciclo de RF	dBm	25	20	K
Duplexor + filtro	dB	0	2,4	L
Potencia RF pico de la salida del combinator	dBm	25	17,6	M-K-L
pérdidas del cable + conectores	dB	0	1,13	N
ganancia de antena de Tx	dBi	0	3	O
EIRP	dBm	25	19,4 7	P-M-N+O
Pérdidas isotrópicas del trayecto	dB	130,14	114, 47	Q-P-F
Enlace de Bajada				
Potencia pico de salida del Tx de la BTS	dBm	35,14	P-Q +F	
Potencia media por ciclo de RF	dBm	35,67	K-M+L-P+N-O+L	
No es igual a K de la BTS, hay que usar LNA				

IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del sistema apuntan a medir el alcance y cobertura de la red bajo prueba, la fiabilidad y calidad

de la llamada, el tráfico generado y el consumo energético de los dispositivos en tres modos de funcionamiento.

A. Alcance y Cobertura

La distancia del enlace medida se obtuvo manteniendo una llamada de prueba entre una MS y el SoftPhone hasta interrumpir la llamada, en la tabla VI se muestran los resultados.

TABLA VI
MEDICIÓN DE LA COBERTURA POR LLAMADA Y SUJECCIÓN A LA RED.

ALCANCE DE COBERTURA (M)	CASO
45	Por sujeción a la red
19,25	Por pérdida de llamada

La cobertura se determinó con el nivel de señal recibida entre los -75dBm a -77dBm según el estándar GSM para zonas urbanas en interiores [20], utilizando una aplicación en el terminal móvil "antenas para android" se midió este valor, estas mediciones se realizaron en distintas direcciones y los resultados se pueden observar en la tabla VII, mostrando una estabilidad en el área de cobertura de forma radial al usar una antena monopolo de radiación isotrópica.

TABLA VII
MEDICIÓN DE LA COBERTURA POR LLAMADA Y SUJECCIÓN A LA RED.

DISTANCIA AL ORIGEN [m]	INTENSIDAD DE LA SEÑAL [dBm]	DIRECCIÓN DE LA MEDIDA
19,1	-73	SW
20	-73	SE
19,1	-73	NW

En la Fig. 3 se registra la intensidad de la señal recibida en un recorrido en línea recta.

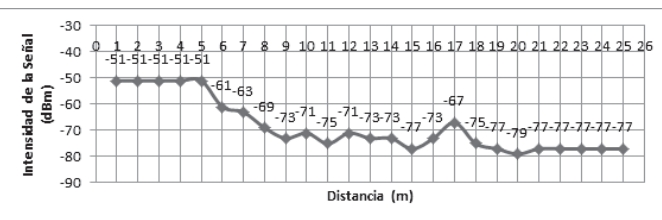


Fig. 3. Medición de la intensidad de señal recibida en el MS para interiores.

El alcance de la red GSM diseñada difiere en un 6.8% del resultado obtenido utilizando el modelo Okumura-Hata. Las mediciones obtenidas en interiores a una distancia de 19 y 21 metros registran niveles de señal recibida de -77dBm y -73dBm respectivamente.

En la Fig. 4 se muestran los equipos del sistema GSM bajo prueba.



Fig. 4. Disposición de equipos para las pruebas de la medición: generador y USRP1, PC, terminal móvil. Fuente: Autores

La medición del área de cobertura en espacio libre determinó el alcance de la red, utilizando como nivel de intensidad de señal recibida -85dBm a -87dBm en áreas despejadas (aproximadamente 10dB menos que en áreas interiores); la intensidad de señal recibida obtenida fue de -85dBm a una distancia de 26.397m , mostrando un aumento del 38.9% en la potencia recibida con respecto a las medidas realizadas en interiores, estos resultados se muestran en la Fig. 5.

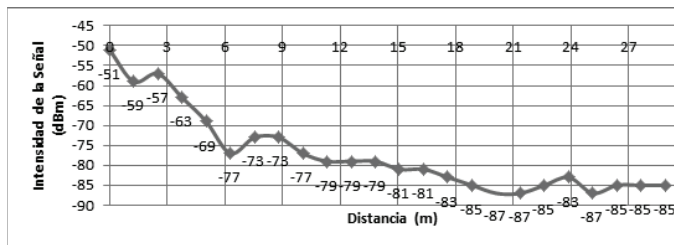


Fig. 5. Medición de la intensidad de señal recibida en exteriores.

B. Fiabilidad y Calidad

Para estas mediciones se realizaron varios intentos de llamada entre los terminales móviles *MS*, generando un reporte del número de llamadas realizadas, aceptadas y contestadas; utilizando los reportes generados por la herramienta Asterisk. En la primera prueba se realizaron 206 llamadas entre 7 *MS*, en la segunda prueba 47 llamadas entre 3 *MS* y la última prueba entre una *MS* y el SoftPhone en espacio libre; los resultados de estas pruebas se muestran con los indicadores de desempeño KPI en la tabla VIII.

TABLA VIII
TRÁFICO EN EL PBX ASTERISK SOBRE LA USRP1.

ESTADÍSTICAS DE LLAMADAS DE VOZ	KPI
Primera prueba	
Tasa de llamadas exitosas	88%
Tasa de llamadas rechazadas	2,0%
Tiempo de establecimiento de la llamada de voz < 10seg	53%
Marcador promedio de opinión (MOS)	3,89848
Segunda prueba	
Tasa de llamadas exitosas	83%
Tasa de llamadas rechazadas	1.5%
Tiempo de establecimiento de la llamada de voz < 10seg	88%

Marcador promedio de opinión (MOS)	4.08125
Prueba en espacio libre	
Tasa de llamadas exitosas	93%
Tasa de llamadas rechazadas	0%
Tiempo de establecimiento de la llamada de voz < 10seg	90%
Marcador promedio de opinión (MOS)	4.1677

TABLA IX
MARCADORES O CONTADORES DE LOS RESULTADOS ARROJADOS POR EL REGISTRO DE LA PBX ASTERISK.

MARCADORES DE LLAMADAS DE VOZ	RESULTADOS
Primera prueba	
Número de intentos de llamada	206
Número de llamadas exitosas	181
Número de llamadas fallidas	22
Número de llamadas rechazadas	3
Promedio duración de la llamada (seg.)	10,52913
Promedio tiempo de establecimiento de la llamada (seg.)	2,5
Marcador promedio de opinión (MOS de 0 a 5)	3,898485
Total de muestras del marcador promedio de opinión	66
Segunda prueba	
Número de intentos de llamada	47
Número de llamadas exitosas	39
Número de llamadas fallidas	2
Número de llamadas rechazadas	6
Promedio duración de la llamada (seg.)	7,213592233
Promedio tiempo de establecimiento de la llamada (seg.)	6,787234043
Marcador promedio de opinión (MOS de 0 a 5)	4,08125
Total de muestras del marcador promedio de opinión	32
Prueba en espacio libre	
Número de intentos de llamada	44
Número de llamadas exitosas	41
Número de llamadas fallidas	3
Número de llamadas rechazadas	0
Promedio duración de la llamada (seg.)	34,72727273
Promedio tiempo de establecimiento de la llamada (seg.)	3,14893617
Marcador promedio de opinión (MOS de 0 a 5)	4,167742
Total de muestras del marcador promedio de opinión	31

En la primera prueba, la probabilidad de bloqueo total fue del $12,1\%$ entre llamadas fallidas y rechazadas; sin embargo, ponderando solo las llamadas rechazadas, esta probabilidad de bloqueo resultante fue del 2% . En cuanto a calidad, se otorgó una valoración subjetiva de 1 a 5 (donde 5 es muy buena calidad) para el audio; de las 66 llamadas contestadas se obtuvo un promedio de valoración de $4,0$ entre las dos pruebas, siendo de menor calidad cerca del límite del alcance de la red a los 20m .

C. Tráfico

Se generó un tráfico de llamadas de duración determinadas con la aplicación SIPP de Linux, esta aplicación genera llamadas de forma periódica, paralela entre otras opciones; el tráfico va en aumento hasta que por medio de la herramienta de Ubuntu “vmstat” se verifique que la CPU se encuentra al 100% de capacidad (idle en 0%).

La PBX Asterisk empezó a congestionarse al alcanzar las 200 llamadas en paralelo, debido al acceso al medio de audio usado para realizar la prueba; en este estado, se determinó un uso de la CPU del 76% (id=24%, inactividad).

El sistema soportó entre 200 y 263 llamadas en paralelo a una tasa de 10 llamadas por segundo bajo las características del hardware empleado. El tráfico transportado por el sistema se obtuvo al saturar el sistema y determinar la cantidad de abonados soportada por la USRP con las características del equipo. El sistema se probó con terminales móviles de los fabricantes Alcatel, Motorola, Samsung, Siemens y Nokia, sin reportar problemas de conexión, soportando 7 MS y un SoftPhone a la vez con su tráfico generado.

Con la probabilidad de rechazo o de bloqueo obtenida del 12,1% se emplean las tablas de Erlang B (Bloqueo de no espera) para calcular el tráfico soportado por la USRP1; donde se han desarrollado las pruebas con siete abonados y un SoftPhone dando un total de 8 líneas habilitadas; el resultado del uso de las tablas o de una calculadora de Erlang B en [21] es de 5,95 Erlang. Esto implica que por cada línea se usan 0,744 Erlang, generando 9 llamadas por hora por cada línea con una duración de 5 minutos. Para el caso del uso de la probabilidad de bloqueo del 2% se obtiene un tráfico de 3,6 Erlang, con lo que el tráfico calculado por línea es de 0,45 Erlang, generando así 5 llamadas por hora por línea con una duración de 5 minutos.

D. Consumo de Energía

Se midió el consumo eléctrico del sistema completo (Laptop, USRP1 y Generador) bajo condiciones de reposo, en operación a mediana y completa capacidad. Las medidas se resumen en la tabla X.

TABLA X
CONSUMO ELÉCTRICO DE LOS SISTEMAS DE LA BTS.

ESTADO	CONSUMO GENERADOR (RMS)	UNIDAD
GENERANDO	0,00707107	A
0	,6 W	
	Consumo portátil (RMS)	
CAPACIDAD MEDIA 0	,23546656	A
1	9,98 W	
CAPACIDAD COMPLETA	0,35355339	A
3	0	W
	Consumo USRP1 (RMS)	
ENCENDIDO	0,6	A
	50,9116882 W	
OPERANDO	1,37 A	
1	16,248355 W	
DETENIDO 0	,73	A
6	1,942554 W	
	total consumo	
ENCENDIDO	71,4916882 W	
CAPACIDAD MEDIA OPERANDO	136,828355 W	
Operando a plena capacidad	146,848355 W	
GENERANDO	0,00707107	A

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron los resultados obtenidos del desempeño de una red GSM alterna, con el propósito de utilizarse en condiciones de emergencia. El despliegue de la red de bajo costo operacional permite garantizar el GoS (Grade of service) del 2%, con porcentaje de DCR (Dropped Call Rate) menor al 5% y el MOS (Mean Opinion Score) del 3,89.

Se midió la cobertura de la red, contrastándola con el modelo de propagación Okumura-Hata; logrando un alcance de 21 metros máximo para mantener los parámetros de calidad de la llamada.

La portabilidad y bajo consumo de la red GSM de emergencia permiten una autonomía eléctrica de la red hasta 12h con un consumo eléctrico de apenas 146,8 W; el tamaño y peso ligero hacen del sistema de emergencia un competidor fuerte contra otras propuestas, incluso con las pruebas limitadas en alcance.

REFERENCIAS

- [1] E. Natalizio, V. Loscri, and G. Aloï, “The practical experience of implementing a GSM BTS through Open Software/Hardware,” in *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL)*, 2010, pp. 1–5.
- [2] J. Mpala and G. Van Stam, “Open BTS, a GSM experiment in rural Zambia,” *Africomm, Yaounde, Cameroon*, pp. 1–9, 2012.
- [3] A. Dhananjay and M. Tierney, “WiRE: a new rural connectivity paradigm,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 41, no. 4, pp. 462–463, 2011.
- [4] M. Cabral, I. Almeida, C. Melo, and a. Klautau, “Low-cost GSM telephony in the Amazon region based on open-source / open-

- hardware projects,” *2009 IEEE Latin-American Conference on Communications*, pp. 1–6, Sep. 2009.
- [5] I. E. Hashem, A. ElShaarany, A. Y. Abdelbarr, E. S. Hassan, and M. Fikri, “Implementing an Enhanced base station using the software defined radio (CUOPENBTS),” *2012 2nd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)*, pp. 39–42, Dec. 2012.
- [6] T. Tsou and T. Cooper, “Development of an open-source GSM femtocell and integrated core infrastructure,” in *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE*, 2012, pp. 1–6.
- [7] T. A. Cooper, J. H. Reed, and T. C. Clancy, “Integration of Open-Source GSM Networks Integration of Open-Source GSM Networks,” Virginia Polytechnic Institute and State University, 2012.
- [8] S. Liao and L. Bao, “Implementing a base station using the sdr platform for coexistence of heterogeneous wireless systems,” in *SDR Forum Technical Conference and Product Exposition*, 2009, no. 0725914, pp. 1–4.
- [9] Y. Bai, W. Du, Z. Ma, and C. Shen, “Emergency communication system by heterogeneous wireless networking,” in *Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS)*, 2010, pp. 488–492.
- [10] S. F. Ochoa and R. Santos, “Human-centric wireless sensor networks to improve information availability during urban search and rescue activities,” *Information Fusion*, pp. 9–11, Jun. 2013.
- [11] W. Song, F. Wang, and J. Dai, “A Emergency Communication System based on WMN in underground mine,” *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCA SM 2010)*, no. Iccasm, pp. V4–624–V4–627, Oct. 2010.
- [12] Y.-N. Lien, L.-C. Chi, and C.-C. Huang, “A Multi-hop Walkie-Talkie-Like Emergency Communication System for Catastrophic Natural Disasters,” *2010 39th International Conference on Parallel Processing Workshops*, pp. 527–532, Sep. 2010.
- [13] Y.-N. Lien, L.-C. Chi, and Y.-S. Shaw, “A Walkie-Talkie-Like Emergency Communication System for Catastrophic Natural Disasters,” *2009 10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks*, pp. 309–314, 2009.
- [14] F. Hong, T. Yi, H. Zhao, and B. Xin, “Developing Test System of Ad Hoc Network for Emergency Communications,” *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, pp. 5–9, 2009.
- [15] Z. Shao, Y. Liu, Y. Wu, and L. Shen, “A Rapid and Reliable Disaster Emergency Mobile Communication System via Aerial Ad Hoc BS Networks,” in *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2011, no. 2007, pp. 1–4.
- [16] Y. Gadallah and M. A. Serhani, “A WSN-driven service discovery technique for disaster recovery using mobile ad hoc networks,” *2011 IFIP Wireless Days (WD)*, pp. 1–5, Oct. 2011.
- [17] A. Azad, “Open BTS Implementation with Universal Software Radio Peripheral,” Virginia Polytechnic and State University, 2011.
- [18] Gnuradio, “openBTS,” 2013. [Online]. Available: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki/OpenBTSBackground>.
- [19] “Ettus Research™,” 2013. [Online]. Available: www.ettus.com. [Accessed: 20-Jul-2013].
- [20] ETSI (European Telecommunications Standards Institute), “ETSI TC-SMG ; ‘GSM Technical Specification. GSM 05.05’ phase 2+ Radio transmission and reception,” Francia, 1996.
- [21] Westbay Engineers, “Telecommunications software and services,” 2013. [Online]. Available: <http://www.erlang.com/calculator/erlb/>. [Accessed: 20-Jul-2013].
- Elvis E. Gaona G.** nació en Arauca, Arauca, el 30 de Enero de 1979. Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2001. Como especialista en Telecomunicaciones Móviles, 2003. Como Magíster en Ciencias de la Información y las comunicaciones, 2007 en la misma institución. Ejerce actualmente como docente asociado de planta en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Distrital, es director del grupo de investigación GITUD.
- Santiago Cárdenas V.** nació en Bogotá D.C. Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2012. Hizo parte del grupo de investigación GITUD. Actualmente trabaja en Fox Telecolombia.
- Elkin G. Muskus R.** nació en Barrancabermeja, Santander, el 9 de Febrero de 1979. Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2001. Como especialista en Telecomunicaciones Móviles de la misma institución, 2003. Como Magíster en Mecatrónica en la Universidad Militar Nueva Granada, 2013. Ejerce actualmente como docente de medio tiempo en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Distrital, es miembro del grupo de investigación GITUD.