

# **ANÁLISIS DE COBERTURA Y CAPACIDAD DE USUARIOS EN RED CELULAR GSM PARA SITUACIONES DE EMERGENCIA**

*ANALYSIS OF COVERAGE AND CAPACITY OF USERS IN GSM  
CELLULAR NETWORK FOR EMERGENCY SITUATIONS*

***Dulce Mayra Janet Martínez García***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*dulce.mjmartinez@outlook.com*

***Hugo Andrés Pérez Guerrero***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*hugoperez.nickell@gmail.com*

***Marco Aurelio Cárdenas Juárez***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*marco.cardenas@uaslp.mx*

***Ulises Pineda Rico***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*u.pinedarico@gmail.com*

***Enrique Stevens Navarro***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*estevens@galia.fc.uaslp.mx*

***Jorge Simón Rodríguez***

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología  
*jsimonro@conacyt.mx*

## **Resumen**

Las redes de comunicación celular son afectadas por los desastres naturales o provocados por el hombre, haciendo que sus servicios no estén disponibles parcial o totalmente. Aunque los desastres naturales son inevitables, sus efectos adversos en las redes de comunicación se pueden prevenir o minimizar. Es por eso que la resiliencia de los cuerpos de rescate es de gran importancia. En este trabajo, se presenta el análisis de cobertura y capacidad para una red de telefonía celular GSM de fácil implementación para ser utilizada tanto por los cuerpos de rescate y protección civil como por las víctimas de un siniestro. Los resultados cuantifican la

cobertura considerando el exponente de pérdida de trayectoria que se obtiene de mediciones en un ambiente real similar a un desastre y el número de usuarios que se pueden atender con el servicio básico de la red bajo estudio.

**Palabras Claves:** Celular, comunicación, emergencias, inalámbrica, resiliencia.

## **Abstract**

*Cellular communication networks are affected by natural or man-made disasters, making their services partially or totally unavailable. Although natural disasters are unavoidable, their adverse effects on communication networks can be prevented or minimized. That is why the resilience of the rescue bodies is of great importance. In this paper, we present the coverage and capacity analysis for a GSM mobile telephone network that can be easily used by both the rescue and civil protection entities and the victims of an accident. The results quantify the coverage considering the path loss exponent, which is obtained from measurements taken in an environment similar to that of a natural disaster, and the number of users that can be served with the basic service of the network under study.*

**Keywords:** Cellular, communication, emergencias, resilience, wireless.

## **1. Introducción**

Las redes de telefonía celular pueden resultar dañadas en eventos como terremotos, inundaciones, incendios, erupciones de volcán, entre otros. En el periodo posterior a estos, las redes celulares son necesarias para los cuerpos de protección civil y las víctimas en las tareas de rescate para minimizar la pérdida de vidas humanas. Las brigadas de emergencia deben actuar de manera rápida y eficiente utilizando sus propios sistemas de telefonía celular para restablecer la comunicación o para ofrecer un medio de comunicación alternativo a las víctimas, en beneficio de las poblaciones [Mauthe, 2016].

Recientemente han ocurrido diversos desastres en el planeta. El año pasado tres huracanes de categoría cuatro o superior afectaron seriamente el continente americano; como el huracán Harvey que a finales de agosto de 2017 golpeó con gran intensidad a Estados Unidos, dejando con numerosos daños materiales a

Texas. Posteriormente a principios de septiembre, tres huracanes más se formaron en el océano Atlántico: Irma, Katia y José; poniendo en riesgo nuevamente a Estados Unidos, México y el Caribe. Finalmente, el huracán María que a mediados de septiembre del mismo año puso en estado crítico a Puerto Rico dejando cuantiosos daños tanto materiales como humanos. Es importante mencionar también dos acontecimientos que ocurrieron en nuestro país, los terremotos del 7 y 19 de septiembre del 2017, que no sólo afectaron la ciudad de México sino también a estados vecinos. El primero de 8.2 grados en escala de Richter, que es el mayor ocurrido en el país, pero no tan desastroso como el del 19 de septiembre de 7.1 grados Richter. Aunque no ha sido el más catastrófico, ocasionó un gran desastre en cuanto a las comunicaciones, ya que las redes de telefonía celular se saturaron por la inmensa cantidad de llamadas realizadas por los usuarios; así como la necesidad de tener conexión a Internet para que las víctimas que se encontraban bajo los escombros de edificios caídos o en lugares de difícil acceso pudieran avisar a los equipos de rescate su ubicación. Más recientemente, a principios de junio de 2018, el volcán de Fuego en Guatemala hizo erupción, dejando centenares de víctimas mortales y devastación. Por esto es importante contar con un sistema que ofrezca servicio de telefonía e Internet durante estos sucesos para salvaguardar la vida humana y brindar resiliencia en términos de comunicación para los equipos de rescate y la población en general [Namuduri, 2017] - [Ferrus, 2012].

En este trabajo se presenta la integración un sistema portátil de comunicación móvil GSM para situaciones de emergencia y se analiza su cobertura y capacidad. En primera instancia, se implementa una estación base celular GSM, y se realizan pruebas para verificar su funcionamiento. Luego, se analiza el sistema en términos de cobertura y capacidad [Frolik, 2007]. Para lo anterior, se calcula el exponente de pérdida de trayectoria en un entorno similar a un desastre natural.

## **2. Métodos**

La tecnología de Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés) ha permitido avances significativos en el desarrollo de prototipos innovadores para comunicaciones inalámbricas en los últimos años. Como su nombre lo indica, un

SDR es un dispositivo de radiofrecuencia (RF) que implementa a través de software componentes como mezcladores, filtros, moduladores, demoduladores o detectores; los que típicamente se implementan en hardware en un sistema electrónico de RF convencional. Así, la característica principal de un SDR es la capacidad de reconfiguración de un transceptor (i.e. transmisor y receptor) de radio, que le permite adaptarse a diferentes interfaces de comunicación e incorporar nuevas aplicaciones y servicios conforme van emergiendo; así como de actualización de tecnología por medio de software.

La tecnología SDR ha establecido un nuevo paradigma en el diseño, desarrollo e implementación de sistemas de comunicación inalámbrica; haciendo posible la implementación de estaciones base de telefonía celular sin necesidad de utilizar los equipos de propósito específico tradicionales de los operadores de telecomunicaciones. Convenientemente, con la tecnología SDR los costos de implementación, puesta en marcha y de operación de estaciones base de telefonía celular se reducen significativamente. En situaciones de emergencia, las víctimas se quedan sin acceso a señales 2G o 3G son por lo general en lugares de difícil acceso. Por lo tanto, implementar en estos lugares la misma infraestructura que se encuentra en entornos urbanos no es factible económicamente, además de ser poco práctico, dado que el tiempo es una limitante. Esto nos motiva a buscar soluciones alternas estaciones base celulares en situaciones de emergencias. Por este motivo, la tecnología SDR es adecuada para solventar la necesidad de proveer servicio de telefonía celular a víctimas de desastres en ubicaciones de difícil acceso. [Pinar, 2011]. El SDR en conjunto con OpenBTS permite la implementación de una red de telefonía celular GSM de bajo costo, con las funciones básicas de voz y datos. Cabe mencionar que OpenBTS es un software de código abierto que crea una interfaz para los teléfonos móviles de conectarse a una red celular GSM, este software se instala en una PC que cuente con sistema operativo Linux, junto con GNU Radio Asterisk, que es un programa de software libre bajo licencia GPL, que proporciona la función de una central telefónica (PBX) [Iledema, 2015].

De este modo, es posible crear una red de telefonía celular GSM, que cuenta con una Central de Servicio en donde se ejecuta Asterisk, que hace la función de

conmutador, que es el que se encarga de conectar las llamadas, enviar y recibir mensajes de texto, así como la administración de los usuarios; y 2 estaciones base adicionales (o torres), en donde solamente se ejecuta OpenBTS. Las figuras 1 y 2 muestran el diagrama de bloques de la estación base celular GSM y su implementación, respectivamente. Los servicios que la red celular propuesta puede ofrecer son:

- a) Llamadas de voz y mensajes de texto entre teléfonos celulares que se encuentran en la red celular rural.
- b) Llamadas de voz desde teléfonos celulares en la red celular rural hacia teléfonos fijos y celulares de compañías comerciales en el exterior.
- c) Llamadas desde teléfonos fijos y celulares de compañías comerciales en el exterior hacia teléfonos dentro de la red celular rural.

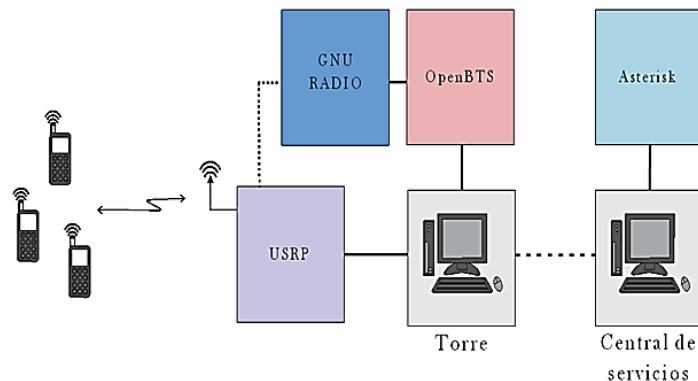


Figura 1 Diagrama de bloques de una estación base GSM basada en OpenBTS y SDR.



Figura 2 Implementación de la estación base GSM basada en OpenBTS y SDR.

## **Análisis de cobertura y cálculo de exponente de pérdida de trayectoria en escenarios de situaciones de emergencia**

En un escenario de emergencia provocada por desastres naturales o provocados por el hombre, pueden existir múltiples obstáculos que pueden interferir en la comunicación inalámbrica, por ejemplo, casas y edificios destruidos que pueden comportarse como dispersores naturales de las ondas electromagnéticas, creando ondas reflejadas. Es decir, la antena del móvil se encuentra rodeada de muchos obstáculos que ocasionan la atenuación de la señal durante la transmisión. A esta atenuación se le define como patrón de pérdida por propagación o pérdida de trayectoria (Path Loss - PL, por sus siglas en inglés). A continuación, se presenta un análisis numérico para el cálculo de pérdida de trayectoria y cobertura del prototipo propuesto conforme a [Lara, 1995], [Muñoz, 2002] y [Rappaport, 2001]. Adicionalmente, se toman mediciones de potencia en un escenario real para determinar experimentalmente el exponente de pérdida trayectoria de acuerdo con el método propuesto en [Frolik, 2007].

El modelo de propagación en el espacio libre es usado para predecir la potencia de la señal entre el transmisor y el receptor cuando no hay ninguna obstrucción en línea de visibilidad directa entre ellos; mientras que en un modelo a gran escala predice cuanta potencia decae en función de la distancia de separación entre Transmisor y Receptor. Para calcular la pérdida de trayectoria en un radioenlace en el espacio libre, primero se determina la potencia recibida por una antena receptora separada de una antena transmisora a una distancia  $d$ , esta potencia recibida está dada por la ecuación 1, conocida como ecuación de Friss en el espacio libre [Rappaport, 2001].

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t}{4 \pi d^2} A_e \quad (1)$$

Donde  $P_t$  es la potencia transmitida,  $G_t$  es la ganancia de la antena transmisora y  $A_e$  es la apertura efectiva de la antena. Tomando en cuenta que la ganancia de cualquier antena está relacionada con su apertura efectiva como se muestra en la ecuación 2, donde  $A_e$  está relacionada con las características físicas de la antena y  $\lambda^2$  es la longitud de onda en metros, relacionada con la frecuencia de la portadora.

$$G = \frac{4 \pi A_e}{\lambda^2} \quad (2)$$

Entonces, la pérdida de potencia recibida por la antena queda representada por la ecuación 3.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4 \pi)^2 d^2} \quad (3)$$

La pérdida de trayectoria representa la atenuación de la señal como una cantidad positiva en dB, y está definida por la diferencia entre la potencia efectiva transmitida y la potencia recibida, por lo tanto, el  $PL$  en el espacio libre se describe por la ecuación 4.

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log_{10} \left( \frac{\lambda^2}{(4 \pi)^2 d^2} \right) \quad (4)$$

Sabemos que en una comunicación inalámbrica existen múltiples obstáculos que atenúan la señal de comunicación, en un canal de radio móvil se muestra que la intensidad de la señal recibida en cualquier punto decae como una ley de potencia de la distancia entre el Transmisor y el Receptor. Entonces, la potencia recibida promedio  $P_r$  a una distancia  $d$  de la antena transmisora es aproximada por la ecuación 5, y con base en el modelo de propagación que indica que la potencia promedio de la señal recibida disminuye logarítmicamente con la distancia, la pérdida de trayectoria promedio en un modelo a gran escala para cualquier separación arbitraria T-R es expresada como una función de distancia mediante el exponente de pérdida de trayectoria  $n$ , como se muestra en la ecuación 6.

$$\bar{P}_r(d) = P_r(d_0) \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-n} \quad (5)$$

$$\bar{PL}(d)[dB] = \bar{PL}(d_0)[dB] + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (6)$$

Donde  $n$  indica la velocidad en la que la pérdida de trayectoria aumenta con la distancia y  $P_r(d_0)$  es la potencia recibida a una distancia de referencia  $d_0$  cercana a la antena transmisora [Frolik, 2007].

El valor de  $n$  es diferente en los diversos entornos: espacio libre  $n = 2$ , urbanos  $n = 2.7$  a  $3.5$ , en edificios línea de vista  $n = 1.6$  a  $1.8$ , edificios con obstrucciones  $n = 4$  a  $6$ , y fabricas  $n = 2$  a  $3$ . Para obtener un valor del exponente de pérdida de trayectoria  $n$  en una situación de emergencia, el prototipo se puso en funcionamiento en un ambiente externo en donde se tomaron mediciones de pérdida de potencia como se indica en [Frolik, 2007]. Para tener un entorno lo más parecido a una zona de desastre se optó por realizar las pruebas en un área con edificios en construcción como se muestra en la figura 3. Se instaló una estación base para proporcionar una red GSM en un punto específico y posteriormente se tomaron datos en diferentes puntos del área alrededor de la estación base como se muestra en la figura 4. Para la obtención de los datos se utilizó el analizador Tektronix RSA306 y para el posicionamiento un GPS etrex 20x. Los datos obtenidos se pos-procesaron en MatLab para obtener gráficas del comportamiento de la red utilizando aproximaciones de mínimos cuadrados para obtener el valor de  $n$ .



Figura 3 Pruebas de la Red GSM en el escenario de emergencia.



Figura 4 Puntos de medición en el escenario de emergencia.



## Área de cobertura

Para definir el área de cobertura útil que ofrece el sistema se considera un clúster circundante como se muestra en la figura 5. Entonces el PL puede ser muy diferente en dos lugares diferentes que tienen la misma separación T-R, por lo tanto, esto nos dice que señales medibles son muy diferentes al valor promedio. Las mediciones han demostrado que en cualquier valor de  $d$ , el  $PL(d)$  es aleatorio y está distribuido como una variable log-normal sobre el valor medio dependiente de la distancia.

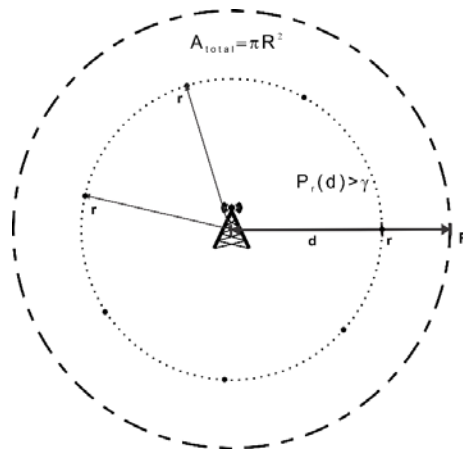


Figura 5 Área de cobertura útil de una celda circular.

Entonces se puede redefinir la pérdida de trayectoria mediante la ecuación 7.

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d) + X_\sigma \quad (7)$$

Donde  $X_\sigma$  es una variable aleatoria con distribución gaussiana con  $\mu = 0$  y varianza  $\sigma^2$ . La distribución log-normal describe los efectos aleatorios de sombreado o *shadowing* que se producen en un gran número de ubicaciones, medidas que tienen la misma separación T-R, pero que tienen diferentes niveles de  $PL$ . A este fenómeno se le conoce como efecto Log-Normal *shadowing*. Esto quiere decir que log-normal *shadowing* implica que los niveles de señal medidos en una separación T-R específica, tienen una distribución normal o gaussiana sobre la media dependiente de la distancia como se muestra en la ecuación 7. Ya que el  $PL(d)$  es una variable aleatoria con distribución normal dependiente de una distancia media, entonces, la potencia recibida a una distancia  $d$  del transmisor  $PR(d)$  y la función  $Q$  (o función

de error,  $erf$ ) definida por la ecuación 8, pueden ser utilizadas para determinar la probabilidad de que el nivel de potencia de la señal recibida exceda un umbral  $\gamma$  en particular como se ve en la figura 6, todo esto con el fin de encontrar el área de cobertura que ofrece un sistema de radio móvil.

$$Q(z) = \frac{1}{2\pi} \int_z^{\infty} e^{-x^2} dx = \frac{1}{2} \left[ 1 - erf\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (8)$$

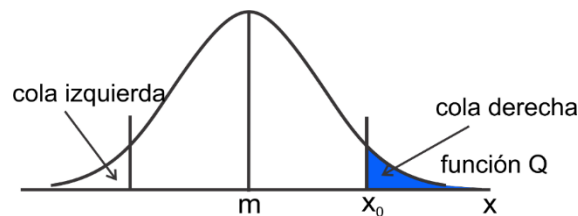


Figura 6 Función de densidad de probabilidad Gaussiana.

Entonces a partir de la figura 5 en donde la cobertura de un área circular que tiene un radio  $R$  desde una estación base hacia el borde de la celda, donde se deja un umbral  $\gamma$  deseado de señal recibida, nos interesa calcular el porcentaje de área de servicio útil  $U(\gamma)$  descrita por la ecuación 9, es decir, el porcentaje de área con una potencia de señal recibida que es igual o mayor que  $\gamma$ , dada la probabilidad de cobertura en el borde de la celda. Teniendo  $d = r$  que es la distancia radial desde la antena transmisora,  $prob[Pr(d) > \gamma]$  es la probabilidad que la señal aleatoria recibida en  $d = r$  excede el umbral  $\gamma$  dentro de un área incremental  $dA$ , como se muestra en las ecuaciones 10 y 11, donde puede ser calculada con la función de densidad acumulada (CDF), partiendo que la  $Pr(d)$  se comporta como una variable aleatoria con distribución gaussiana.

$$U(\gamma) = \frac{1}{\pi R^2} \int_A prob[Pr(d) > \gamma] dA = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R prob[Pr(d) > \gamma] r dr d\theta \quad (9)$$

$$prob[Pr(d) > \gamma] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\gamma}^{\infty} e^{-\frac{(Pr(d) - \bar{Pr}(d))^2}{2\sigma^2}} dPr(d) \quad (10)$$

$$prob[Pr(d) > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - \bar{Pr}(d)}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \left[ 1 - erf\left(\frac{\gamma - \bar{Pr}(d)}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \quad (11)$$

Por lo tanto, el porcentaje de área de cobertura útil que ofrece el sistema de comunicación se calcula por medio del desarrollo en las ecuaciones 12, 13 y 14, y finalmente es definido por la ecuación 15.

$$\begin{aligned} \text{prob}[P_r(d) > \gamma] &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - \bar{P}_r(d)}{\sigma\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - (P_r(d) - PL(d))}{\sigma\sqrt{2}} \right) \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - \left[ P_t(d) - \left( \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left( \frac{r}{d_0} \right) \right) \right]}{\sigma\sqrt{2}} \right) \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - P_t(d) + \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left( \frac{R}{d_0} \right) + \frac{10n \log \left( \frac{r}{R} \right)}{\sigma\sqrt{2}}}{\sigma\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Tomando:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\gamma - P_t + \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left( \frac{R}{d_0} \right)}{\sigma\sqrt{2}} \quad y \quad b = \frac{10n \log(e)}{\sigma\sqrt{2}} \\ \text{prob}[P_r(d) > \gamma] &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[ 1 - \text{erf} \left( a + b \ln \left( \frac{r}{R} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Evaluando:

$$U(\gamma) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[ 1 - \text{erf} \left( a + b \ln \left( \frac{r}{R} \right) \right) \right] \right) r dr d\theta \quad (14)$$

$$(\gamma) = \frac{1}{2} \left( 1 - \text{erf}(a) + \exp \left( \frac{1 - 2ab}{b^2} \right) \right) \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{1 - ab}{b} \right) \right] \quad (15)$$

### Análisis de capacidad de la red

El sistema de radio celular depende del enlace troncal para acomodar una gran cantidad de usuarios en un espectro de radio limitado. El *Trunking* o troncalización es un sistema dinámico de asignación de canal, es decir, las decisiones sobre la asignación de frecuencia son realizadas automáticamente por un centro de control y un conmutador o *switch* computarizado. Para realizar estimaciones de capacidad en un sistema troncalizado es necesario conocer tomar en cuenta múltiples variables importantes como: el número total de usuarios  $U$  a los que se les brindará

el servicio, el número total de canales  $C$  ofrecidos por el sistema, la intensidad de tráfico  $A$  que lleva el sistema, la duración promedio de una llamada telefónica  $H$  en segundos, la probabilidad de que una llamada sea bloqueada, el grado de servicio (GOS), y la tasa de Solicitud, que es el número promedio de solicitudes de llamadas por usuario por unidad de tiempo, se denota por  $\lambda$  en unidades de *segundos*<sup>-1</sup>. A continuación se analizará el comportamiento en un sistema de telefonía celular, teniendo como principal interés conocer la probabilidad de que una llamada no pueda ser atendida por el sistema, es decir que sea bloqueada. Primero es necesario conocer la intensidad de tráfico ofrecido por un usuario, así como la intensidad de tráfico existente en el sistema, definidos por las ecuaciones 16 y 17 respectivamente. Además, para un sistema troncal con  $C$  canales, si el tráfico se distribuye equitativamente entre los canales, la intensidad de tráfico ofrecido por canal se define por la ecuación 18.

$$A_U = \lambda H \quad (16)$$

$$A = UA_U \quad (17)$$

$$A_C = \frac{UA_U}{C} \quad (18)$$

Para este análisis se utiliza la fórmula de Erlang B definida en la ecuación 19, que determina la probabilidad de que una llamada sea bloqueada, y es una medida del GOS para un sistema troncalizado que no proporciona una cola para llamadas bloqueadas.

$$Prob[bloqueo] = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = GOS \quad (19)$$

### 3. Resultados

Para realizar el análisis numérico de la red celular en MatLab se considera que el prototipo cuenta con un total de 7 canales disponibles para ofrecer servicio a los usuarios, es configurado para trabajar en la frecuencia GSM de los 900 MHz y una potencia de transmisión de 100 mW.

## Exponente de pérdida de trayectoria en escenarios de emergencia

Las figuras 7 y 8 muestran la pérdida de potencia recibida, obtenidas numéricamente en un ambiente real fuera de laboratorio, respectivamente. Estos resultados se utilizan para calcular, a través de aproximaciones de mínimos cuadrados, un valor de  $n$  en un escenario de emergencia.

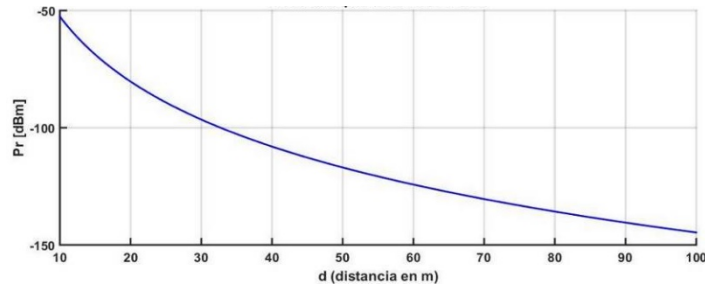


Figura 7 Análisis numérico de la pérdida de potencia con  $P_t = 0.1 W$ .

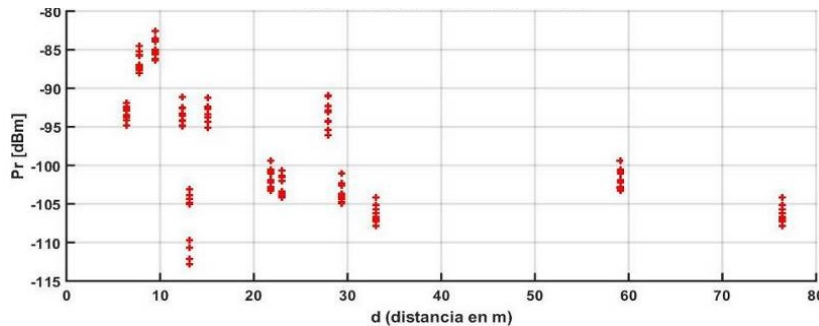


Figura 8 Pérdida de potencia en el escenario de emergencias bajo evaluación.

En la figura 9 se muestra el resultado en donde  $n = 2.9413$  y  $\sigma = 4.3391 dB$ . En la figura 10 se muestra el modelo de pérdida de trayectoria con valores de  $n = 4$  y  $d_0 = 10 m$  para el análisis numérico, y  $n = 2.9413$  para el análisis en un ambiente real, el radio total de la celda es de 100 y 78 metros respectivamente.

## Área de cobertura de la red

Para el cálculo de las áreas de cobertura mostradas en las figuras 11 y 12 se definió una probabilidad de umbral del 20% ( $\gamma = 0.2$ ) y una sensibilidad del receptor de  $-115 dBm$ . Para el análisis numérico se tomó un valor de  $n = 4$  y  $\sigma = 9 dB$ , mientras que para las mediciones reales de  $n = 2.9413$  y  $\sigma = 4.3391 dB$ .

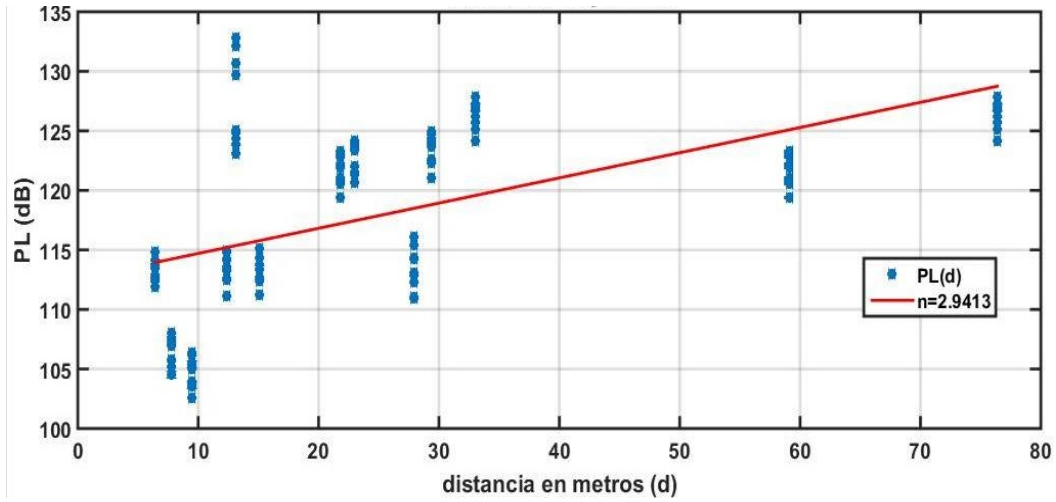


Figura 9 Pérdida de trayectoria en el escenario de emergencias bajo evaluación.

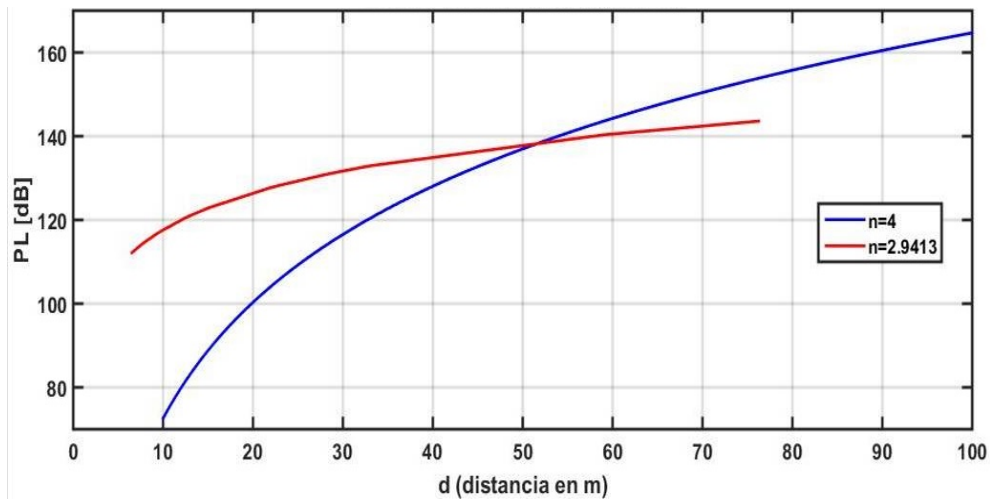


Figura 10 Modelo de pérdida de trayectoria.

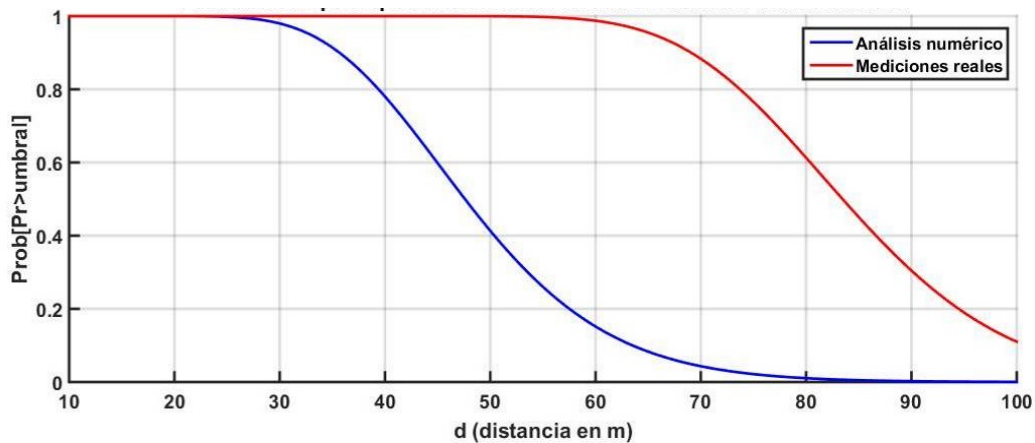


Figura 11 Probabilidad de que  $P_r$  sea mayor a un umbral a una distancia  $d$  ( $P_r > \gamma$ ).

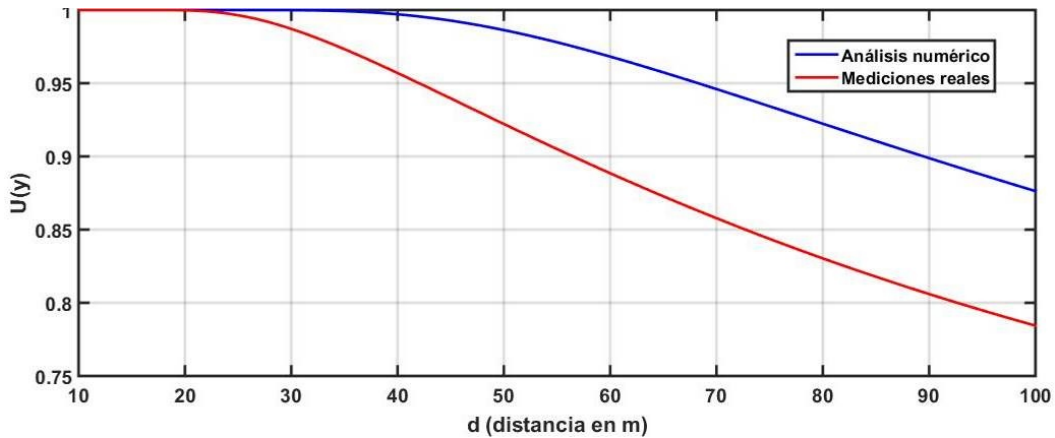


Figura 12 Porcentaje del área de cobertura útil.

### Capacidad de la red

Se plantearon diferentes escenarios con casos específicos tomando en cuenta la probabilidad de bloqueo, número máximo de usuarios a los que se les brinda el servicio, total de canales disponibles en el sistema, y la duración promedio de una llamada telefónica. En la figura 13 se muestra el análisis del comportamiento del sistema actual, sabiendo ofrece hasta 7 canales disponibles, se encuentra el número máximo de usuarios que se pueden atender en 1 hora, suponiendo que una llamada tiene una duración promedio de  $H$  minutos y una probabilidad de bloqueo del 5%. Es importante mencionar que una llamada de emergencia tiene una duración de aproximada de 1 minuto.

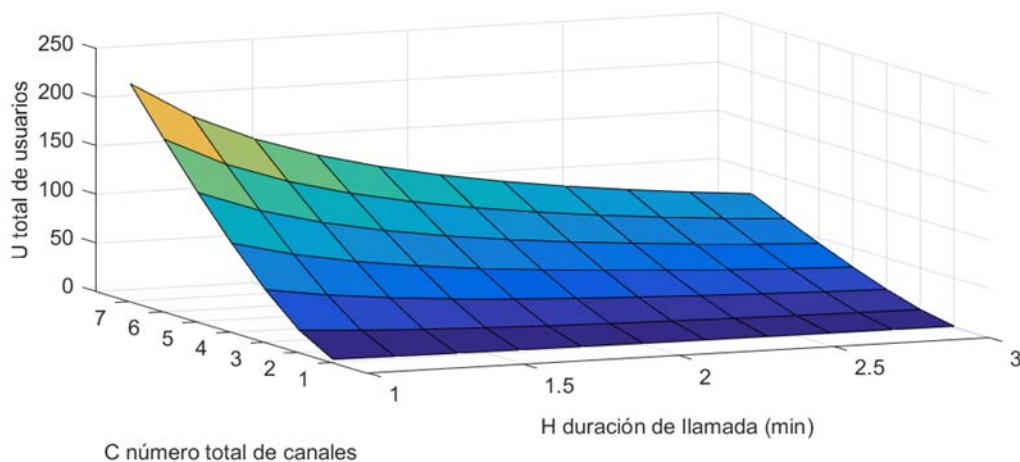


Figura 13 Modelo de Análisis de tráfico, con  $prob[bloqueo] = 5\%$ .

En la figura 14 se muestra que con un sistema que brinda servicio a una población de  $U$  usuarios con  $C$  canales disponibles, se determina cual es la probabilidad de bloqueo del sistema, suponiendo que una llamada tiene duración promedio de  $H=3$  minutos y que los usuarios solamente intentan realizar una llamada por hora.

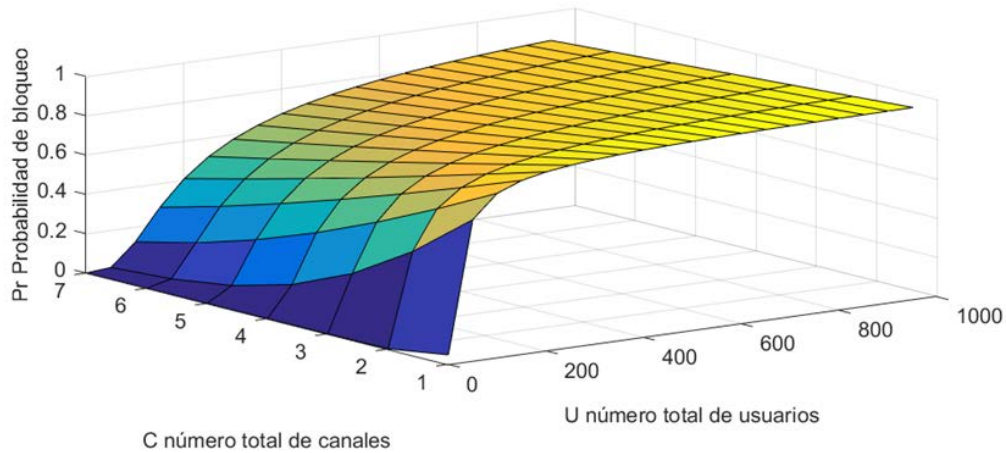


Figura 14 Modelo de Análisis de tráfico con  $C$  canales y  $H = 3$ .

Al igual que en el caso anterior, en la figura 15 se muestra que con un sistema que brinda servicio a una población de  $U$  usuarios, pero nos interesa conocer el número de canales disponibles  $C$ , para satisfacer la demanda de llamadas de la población, considerando la probabilidad de bloqueo del sistema,  $H=3$  minutos y los usuarios solamente intentan realizar una llamada por hora.

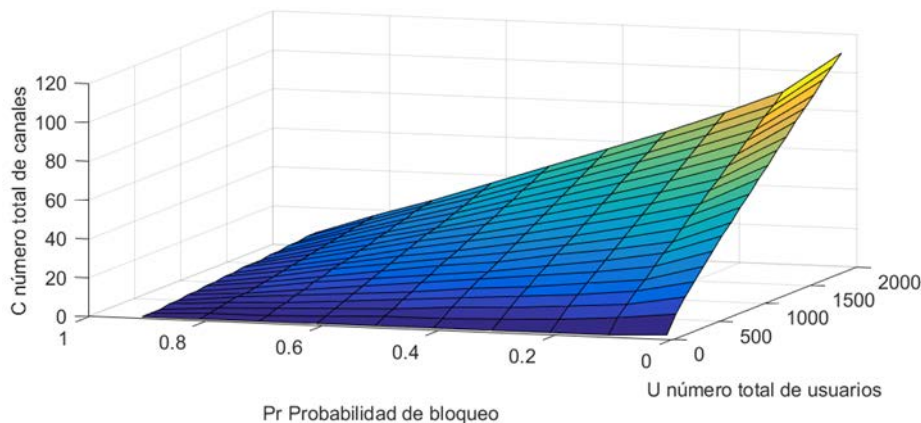


Figura 15 Modelo de Análisis de tráfico con  $P_r$  y  $H = 3$ .



#### **4. Discusión**

En las gráficas de las figuras 7 a 10 se observa que la potencia recibida disminuye respecto a la distancia, por lo tanto, la pérdida de trayectoria aumenta con la distancia hasta llegar a un punto en donde la señal se pierde y se obtiene solamente ruido. En el análisis de área de cobertura mostradas por las gráficas de las figuras 11 y 12 podemos observar que cuando la antena receptora se aleja a una distancia  $d$  del transmisor la probabilidad de que la potencia recibida sea mayor que el umbral (sensibilidad del receptor) es menor, por lo tanto el área de cobertura útil en un sistema de telefonía es mayor cuando la distancia T-R es menor, ya que se logra tener buenos niveles de recepción cubriendo la mayor parte del área a la que se brinda servicio.

Por último para el análisis de tráfico es necesario tomar en cuenta múltiples variables es por ello que para tener un mejor entendimiento se definieron 3 escenarios diferentes: En el primer caso que se muestra en la gráfica de la figura 13, se tiene un sistema de telefonía con  $C$  canales disponibles y una probabilidad de bloqueo del 5%, es posible encontrar el número máximo de usuarios que se pueden atender en 1 hora con la red que proporciona actualmente el prototipo, suponiendo que una llamada tiene una duración promedio de  $H$  minutos, en la gráfica se puede ver que usando los 7 canales y con una duración de llamada de 1 minuto que es lo que en promedio dura una llamada de emergencia, se puede atender solamente a máximo 200 usuarios aproximadamente; es un número relativamente bajo por tanto es necesario aumentar esa población. Entonces llegamos al segundo caso mostrado por la gráfica de la figura 14 en donde teniendo un sistema de telefonía que brinda servicio a una población de mayor de usuarios con hasta 7 canales disponibles, se determina cual es la probabilidad de bloqueo del sistema, suponiendo que una llamada tiene duración promedio de 3 minutos y que los usuarios solamente intentan realizar una llamada por hora. Aquí se presenta un grave problema ya que la probabilidad de que una llamada sea bloqueada aumenta por tanto la mayoría de los usuarios no podrán ser atendidos por la red, una solución para esto es aumentar el número de canales que ofrece el sistema. Finalmente, en el tercer caso que nos presenta la gráfica de la figura 15 nos dice que teniendo un

sistema de telefonía que brinda servicio a una población de  $U$  usuarios con una probabilidad de bloqueo de  $Pr$ , podemos determinar cuál es el número de canales disponibles  $C$  que se necesitan que ofrezca el sistema para que pueda satisfacer la demanda de llamadas de la población, suponiendo que una llamada telefónica tiene una duración promedio de 3 minutos.

## 5. Conclusiones

Se implementó una estación base de telefonía celular GSM que puede ser utilizada por los equipos de rescate y protección civil en situaciones de emergencia. Los conceptos de las redes celulares se utilizaron para caracterizar el prototipo desarrollado en este trabajo. Se realizaron pruebas controladas en laboratorio para obtener un análisis específico del funcionamiento de la red, para identificar los requerimientos necesarios para un óptimo funcionamiento que pueda brindar un buen servicio a los usuarios en un ambiente real de emergencia. Se realizó un análisis numérico en MatLab del prototipo, para obtener un estudio de pérdida de trayectoria, análisis de cobertura y análisis de tráfico, para visualizar el comportamiento del sistema y determinar los requerimientos necesarios para un óptimo funcionamiento en un entorno real. Además, se obtuvo experimentalmente el coeficiente de pérdida de trayectoria en un escenario similar a una situación de emergencia, donde se probó además el funcionamiento de la estación base celular. De estas pruebas se determinó la factibilidad de utilizar el prototipo en los escenarios propuestos, ya que el tiempo de levantamiento de la red fue de apenas 20 minutos.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] A. Mauthe et al., Disaster-resilient communication networks: Principles and best practices, in 2016 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM), pp. 1-10, Sept 2016.
- [2] D. Lara and D. Muñoz and S. Rosas, *Sistemas de comunicación móvil*, Alfaomega, 1995.
- [3] D. Muñoz, *Sistemas inalámbricos de comunicación personal*, Alfaomega, 2002.

- [4] Ledema Michael, *Getting Started with OpenBTS: BUILD OPEN SOURCE MOBILE NETWORKS*, Foreword by Harvind Samra, Published by O'Reilly Media, Inc., First Edition, Jan 2015.
- [5] J. Frolik, Implementation of Handheld, RF Test Equipment in the Classroom and the Field, in *IEEE Transactions on Education*, vol. 50, no. 3, pp. 182-187, Aug 2007.
- [6] K. Namuduri, When disaster strikes, Fying cell towers could aid search and rescue, Aug 29, 2017. *IEEE Spectrum*.
- [7] Pinar D. I., Murillo F. J., *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software*, Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Sevilla, Primera Edición, 2011.
- [8] R. Ferrus, O. Sallent, G. Baldini and L. Goratti, Public Safety Communications: Enhancement Through Cognitive Radio and Spectrum Sharing Principles, in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 54-61, June 2012.
- [9] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles Practice*, Prentice-Hall, Inc, Second Edition, 2001.