

# DISEÑO DE UNA SIMULACIÓN PARA CONOCER EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA CELULAR OFDMA

***Olivia Guerrero Méndez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*oliviagm801@hotmail.com*

***Josefina Castañeda Camacho***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*josefinacastaneda@yahoo.com.mx*

***Liliana Cortez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*cliliana23@gmail.com*

## **Resumen**

Este trabajo aborda una manera de conocer el desempeño de una red celular móvil de cuarta generación basada en OFDMA. La simulación que se presenta es realizada con el software MATLAB y está basada en la metodología Monte Carlo para eventos discretos. Los principales factores indicadores del desempeño de una red de este tipo son la SIR (Relación Señal a Interferencia), tasa de transmisión y *throughput*, los cuales en conjunto ofrecen una visión global del desempeño máximo alcanzable para estas redes donde dicho desempeño se mide en bits por segundo (bps).

**Palabra(s) Clave(s):** Cuarta generación, desempeño, OFDMA, simulación Monte Carlo, sistema celular.

## **1. Introducción**

La telefonía móvil es un área que continúa en desarrollo con el paso del tiempo, pues actualmente podemos decir que la evolución ha sido tal que la generación más reciente (4G) ofrece más y mejores características en comparación con las

generaciones predecesoras, entre estas características podemos mencionar que ofrece una comunicación rápida y fluida, velocidades mayores a 2Mbps, mayor seguridad, entre otras; es decir no está limitada a ofrecer únicamente el servicio de voz [1,2].

Haciendo un recuento de las diferentes generaciones de telefonía móvil podemos resumirlo de la siguiente manera:

- **Primera generación (1G):** Comenzó a funcionar a principios de los años ochenta y su característica principal es que utilizaba esquemas de modulación analógicos para la transmisión de voz; de hecho los sistemas móviles de esta generación realizaban la transmisión analógica de voz con baja calidad, con una velocidad de 2400 baudios y utilizaba para su funcionamiento la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), por lo que estos sistemas estaban limitados en relación al número de usuarios a los que podían dar servicio [3,4].
- **Segunda generación (2G):** Esta generación comenzó aproximadamente en 1990, y a diferencia de 1G ya es digital, gracias a esto se lograron reducciones en cuanto a tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, además de que se introdujeron nuevos servicios como los SMS (Short Message Service) y el identificador de llamadas. Se logró una velocidad de 9.6kbps/s, velocidad más alta respecto a 1G, pero muy limitada para la comunicación de datos. En esta generación se tuvieron avances significativos en términos de seguridad, calidad de voz y *roaming*. Las tecnologías predominantes desarrolladas para esta generación son: GSM, TDMA IS-136, CDMA IS-95 [4,5].
- **Tercera generación (3G):** La tercera generación se caracteriza por la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos. Los protocolos que se emplearon en estos sistemas tienen la capacidad de soportar velocidades más altas de información y están enfocados no solo en aplicaciones de voz sino de audio, video en movimiento, videoconferencia, acceso rápido a internet entre otros. En esta tercera generación los

sistemas están basados en UMTS, CDMA 2000, IMT-2000, ARIB (3GPP), UWC-136, entre otras [4,6]. Entre las características más importantes de 3G se pueden mencionar:

- ✓ Transmisión simétrica y asimétrica confiable.
  - ✓ Velocidades de 384 kbps en espacios abiertos y de hasta 2 Mbps para usuarios con baja movilidad (transeúntes que se desplazan a menos de 10 km/h).
  - ✓ Uso de ancho de banda dinámico de acuerdo a la aplicación.
  - ✓ Soporte de conmutación de paquetes y de circuitos
  - ✓ Acceso a Internet incluyendo todos sus servicios como audio y video
  - ✓ Diferentes servicios simultáneos por medio de una sola conexión
  - ✓ Mayor capacidad y uso eficiente del espectro radioeléctrico debido al uso de CDMA, SCDMA, etc.
  - ✓ Cobertura mundial con servicios terrestres y por satélite.
- **Cuarta generación (4G):** Esta generación fusiona tecnologías y protocolos ya existentes obteniendo como resultado un rendimiento más alto, 4G pretende consolidar los sistemas de tal forma que el usuario tenga un servicio estable y sin interrupciones en cualquier parte del mundo con el mismo dispositivo móvil; además se tiene un incremento en la velocidad respecto a las generaciones anteriores, lo que sin duda permitirá ofrecer mayores servicios y facilidades. 4G está basada completamente en el protocolo IP, se dice que es un sistema que engloba a otros sistemas y una red de redes que se alcanza gracias a la convergencia entre las redes de cables y las redes inalámbricas. Teóricamente 4G tiene la capacidad de proveer velocidades de acceso mayores a 100 Mbps en movimiento. 4G mantiene una calidad de servicio de punto a punto que incluye seguridad y con el mínimo costo posible. Así, es posible resumir las principales características de 4G de la siguiente manera [7-9]:
    - ✓ Compatibilidad de servicios con las redes móviles y las redes fijas
    - ✓ Alta calidad en los servicios móviles, respecto a todas las generaciones anteriores (1G-3G)

- ✓ Gran cobertura y simplicidad del roaming entre sistemas
- ✓ Sistema de múltiples antenas MIMO (Múltiples Entradas, Múltiples Salidas)
- ✓ Antenas inteligentes, que son capaces de suprimir las señales no deseadas y autoajustar la ganancia, además de incluir algoritmos para el procesamiento de señales.

La evolución de los sistemas celulares como se ha podido ver ha permitido el desarrollo de más y mejores características ofreciendo al usuario una comunicación en casi cualquier lugar y en cualquier momento.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se explica la forma de funcionamiento de un sistema OFDMA, en la sección 3 se presenta el diseño de la simulación así como las ecuaciones del sistema, en la sección 4 se muestran los resultados a los que se llegaron tras haber implementado la simulación, en la sección 5 se presentan las conclusiones y finalmente en la sección 6 se encuentran las referencias utilizadas en este trabajo.

## **2. Sistema OFDMA**

Los sistemas celulares móviles de cuarta generación están basados en OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales), lo que implica que el ancho de banda es repartido en varios grupos de subportadoras, cada uno de estos grupos se denomina subcanal. Cada usuario puede ocupar uno o más subcanales; es posible asignar un número diferente de subportadoras a cada uno de los usuarios, de esta manera se logra una calidad de servicio diferente para cada uno de los usuarios y esto se determina en función del ancho de banda asignado. En OFDMA varios usuarios pueden transmitir datos simultáneamente a través de diferentes subcanales además de que OFDMA presenta un mecanismo de asignación flexible que hace posible asignar subportadoras dinámicamente dependiendo del tráfico mientras distintos tipos de modulación y potencias de transmisión son aplicados para tener una mejor utilización del espectro [10].

El sistema OFDMA que se emplea en la simulación tiene un ancho de banda de 10 MHz y cuenta con 1024 subportadoras, el número de usuarios es variable pero se considera un límite máximo de 50 mil usuarios para poder realizar las estimaciones necesarias, se consideran también 3 modulaciones para el sistema OFDMA que son QPSK, 16-QAM, 64-QAM, se utilizan antenas sectoriales y se hace el análisis del enlace descendente (estación base a usuario) pues se considera a este como el enlace limitante.

En un sistema OFDMA la cobertura es considerada como uno de los factores más importantes, es decir para los sistemas inalámbricos móviles de banda ancha satisfacer el requerimiento de cobertura significa que el enlace debe cumplir con una cierta SIR requerida además que las estaciones base deben entregar la potencia suficiente dentro del área de cobertura para que cada receptor en el sistema no experimente una interferencia excesiva [10].

El análisis del desempeño para sistemas OFDMA se realiza mediante factores indicadores tales la SIR,  $E_b/I_0$ , BER (*Bit Error Rate*, Tasa de Error de Bits), *Throughput* (Máxima tasa de bits), entre otros. En [10-15] se muestran algunos análisis hechos a sistemas de este tipo en los cuales es posible observar gráficas que muestran el desempeño en términos de las métricas ya mencionadas.

### 3. Diseño de la simulación

Para este trabajo se emplea una simulación de eventos discretos basada en la metodología Monte Carlo, dicha metodología se basa en el muestreo sistemático de variables aleatorias. Los métodos Monte Carlo abarcan una colección de técnicas que permiten obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetidas. Con este tipo de simulación se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios. El método Monte Carlo es una manera de dar solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. La simulación Monte Carlo es utilizada para cualquier esquema que emplee números aleatorios, usando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas, de esta

manera se resuelven ciertos problemas estocásticos y determinísticos donde el tiempo no juega un papel importante [16,17].

En la simulación que se realizó cada usuario generado es considerado un evento y puesto que la simulación está basada en la metodología Monte Carlo en las ecuaciones del sistema OFDMA se utilizan variables aleatorias para modelar los efectos del sistema.

Para tener una idea más clara del planteamiento de la simulación, en la figura 1 se muestra el diagrama de flujo empleado para la implementación de dicha simulación. El primer paso consiste en generar de manera gráfica en MATLAB la red celular, que consiste en 37 celdas hexagonales, donde en la celda central es donde se generan los  $n$  usuarios aleatorios con distribución uniforme, este modelo de red se muestra en la figura 2. Las estaciones base están colocadas en el centro de cada una de las celdas y se consideran antenas sectoriales cada  $120^\circ$ .

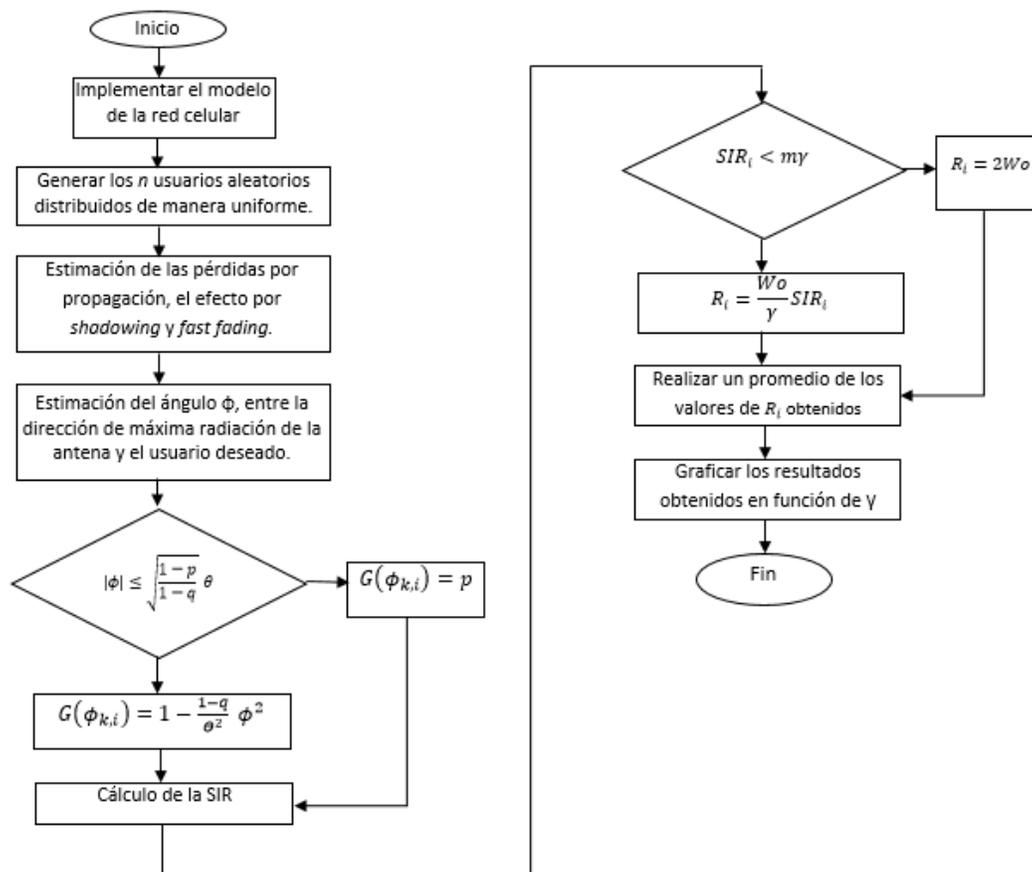


Figura 1 Diagrama de flujo para la simulación.

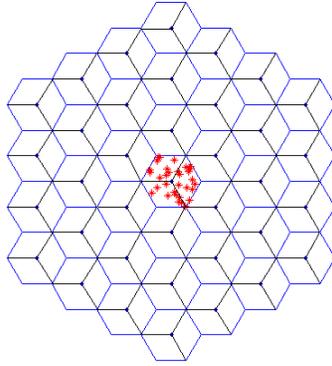


Figura 2 Modelo de la red celular.

Posteriormente se hace la estimación de las pérdidas por propagación, efectos por *shadowing* (oscurecimientos) y *fast fading* (caídas rápidas). Una vez realizadas estas estimaciones se hace el cálculo para poder conocer la ganancia de la antena y de acuerdo con esto poder calcular la SIR de cada usuario y poder asignar la tasa de transmisión que está en función de la modulación empleada (QPSK, 16-QAM, 64-QAM).

Finalmente se hace un promedio de los valores de  $R_i$  (tasa de transmisión de bits) para poder obtener los resultados en función de  $\gamma$  para posteriormente poder observar el comportamiento de la máxima tasa de transmisión.

Un paso muy importante en la simulación es la implementación de las ecuaciones que describen el sistema pues es por medio de ellas que se modelan los efectos del sistema ya mencionados como las pérdidas por trayecto, pérdidas por oscurecimientos, caídas rápidas, la ganancia de la antena, etc. y es posible determinar la máxima tasa de bits que puede ser alcanzada, es decir poder observar los factores indicadores del desempeño y de acuerdo con esto poder realizar un análisis acerca del sistema OFDMA. Es por ello que en la siguiente sección se explican cada una de las ecuaciones que utilizaron para la simulación.

### **Ecuaciones del sistema OFDMA**

Un sistema celular de cuarta generación basado en OFDMA es modelado a través de ecuaciones que describen el funcionamiento del sistema y gracias a las cuales es posible conocer su desempeño.

## Energía de bit a densidad espectral de interferencia

En la ecuación 1 se describe la relación de la energía de bit a densidad espectral de interferencia [18] y se define mediante ecuación 1.

$$\gamma = \left( \frac{E_b}{I_0} \right)_i = \frac{W_0}{R_i} SIR_i \quad (1)$$

Donde:

$SIR_i$  Relación Señal a Interferencia del i-ésimo usuario

$R_i$  Tasa de transmisión del i-ésimo usuario

$W_0$  Ancho de banda

## Tasa de transmisión

Partiendo de la ecuación 1 se obtiene la ecuación para la tasa de transmisión [10, 11,18] y queda definida, ecuación 2:

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < m\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq m\gamma \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

$\gamma$  Relación energía de bit a interferencia

$m$  Dimensionalidad de la modulación empleada.

$m$  toma los valores de 2, 4 y 6 cuando es Q-PSK, 16-QAM y 64-QAM.

En OFDMA se utilizan tres tipos de modulaciones que son QPSK, 16-QAM y 64-QAM [10-12]. Por lo que se tienen entonces tres casos para  $R_i$  y son los siguientes:

- Cuando el sistema emplea una modulación tipo QPSK, la ecuación de  $R_i$  queda descrita como se muestra en la ecuación 3:

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 2\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq 2\gamma \end{cases} \quad (3)$$

- Si el sistema emplea una modulación tipo 16-QAM se tiene que  $R_i$  es descrito en la ecuación 4:

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 4\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq 4\gamma \end{cases} \quad (4)$$

- Mientras que si se emplea una modulación 64-QAM  $R_i$  queda acotada mediante ecuación 5.

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 6\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq 6\gamma \end{cases} \quad (5)$$

## SIR

La ecuación de la SIR es muy importante puesto que como se verá es de este parámetro que depende la tasa de transmisión para cada uno de los usuarios. La SIR por definición es el cociente de la potencia recibida entre la interferencia recibida para el  $i$ -ésimo usuario [10, 18] y para un sistema OFDMA queda descrita según se muestra en la ecuación 6.

$$SIR_i = \frac{G(\phi_{0,i})u_{\ell}^{0,i}/r_{0,i}^{\mu} 10^{\zeta_{0,i}/10}}{\sum_{k=1}^{N_{BS}} G(\phi_{k,i})u_{\ell}^{k,i}/r_{k,i}^{\mu} 10^{\zeta_{k,i}/10}} \quad (6)$$

Donde:

- $G(\phi)$ , es la ganancia de la antena del  $i$ -ésimo usuario respecto a estación base.
- $u_{\ell}$ , pérdidas causadas por fast fading (caídas rápidas) para el  $i$ -ésimo usuario y son modeladas con variables aleatorias tipo Rayleigh.
- $r_i^{\mu} 10^{\zeta_i/10}$ , pérdidas por propagación para el  $i$ -ésimo usuario respecto a la estación base, este tipo de pérdidas son dadas por el producto de la  $\mu$ -ésima potencia de la distancia  $r$  (distancia entre el usuario de interés y la estación base) y una componente log-normal  $10^{\zeta_i/10}$  que representa las pérdidas por shadowing (oscurecimientos) cuyas características están en función de la variable aleatoria Gaussiana  $\zeta$  con media cero y desviación estándar  $\Delta$ .

En la ecuación 6 es importante mencionar que se utiliza el subíndice cero en el numerador es para indicar que estamos hablando de la estación base cero

ubicada en la celda central, es decir la celda en donde se están generando los usuarios mientras que el denominador nos indica las estaciones base interferentes.

### Ganancia de la antena

La ecuación 7 describe la ganancia de la antena y es una de las ecuaciones más importantes en un sistema OFDMA, en este caso se emplearon antenas sectoriales, es decir se utilizan antenas con una cobertura de 120° para cubrir los tres sectores de cada una de las celdas [18].

$$G(\phi_{k,i}) = \begin{cases} 1 - \frac{1-q}{\theta^2} \phi^2 & \text{si } |\phi_{k,i}| \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \theta \\ p & \text{si } |\phi_{k,i}| > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \theta \end{cases} \quad (7)$$

Donde:

“ $\phi$ ” Ángulo entre el usuario de interés y la dirección de máxima ganancia de la antena.

“ $q$ ” Representa el nivel de ganancia a  $\theta$  radianes desde el cruce de un sector a la dirección de máxima ganancia

“ $p$ ” Representa el nivel de ganancia promedio normalizada para el lóbulo lateral.

## 4. Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a través de la simulación, es importante decir que los resultados obtenidos están clasificados en términos de las modulaciones empleadas. En estos resultados se están considerando dos casos: en primer lugar se considera que únicamente se utiliza un bloque de frecuencia en los tres sectores de cada celda y en segundo lugar se considera que cada uno de los sectores utiliza un bloque de frecuencia diferente, es decir se cuenta con tres bloques de frecuencia por celda.

En la figura 3 se muestra el modelo de red en donde cada celda se encuentra dividida en tres sectores y se utiliza el mismo bloque de frecuencia en cada uno de ellos.

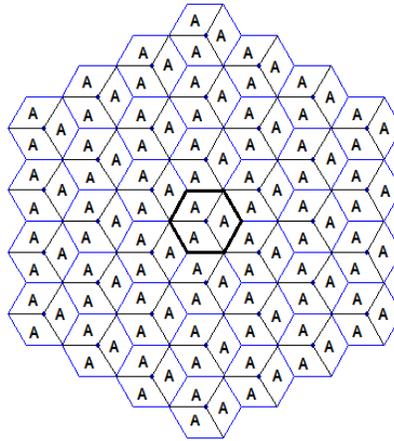


Figura 3 Modelo de red celular considerando un bloque de frecuencia.

El desempeño para este caso se muestra en la figura 4 donde es posible apreciar los resultados en términos de *throughput* que se define como la máxima tasa de transmisión, y están en términos de bits por segundo.

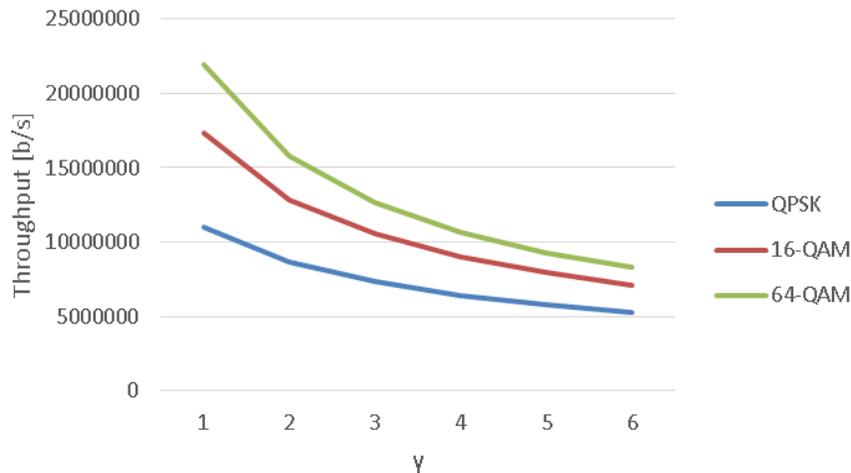


Figura 4 *Throughput* obtenido considerando un bloque de frecuencia.

Al considerar tres bloques de frecuencia, es conveniente mencionar que la comparación de los resultados se hace tomando como referencia uno de los sectores de la celda central (A, B, C) de tal forma que los sectores interferentes a considerar serán únicamente los sectores interferentes etiquetados con la misma letra de sector (A, B, C). En la figura 5 se muestra el modelo de la red celular tomando en cuenta esta consideración.

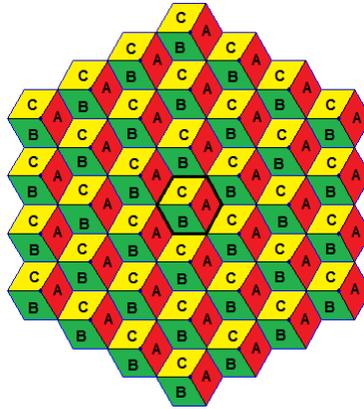


Figura 5 Modelo de la red celular con tres bloques de frecuencia.

Empleando el modelo de la red celular presentado en la figura 5, se obtienen los resultados en cuanto al desempeño del sistema (figura 6).

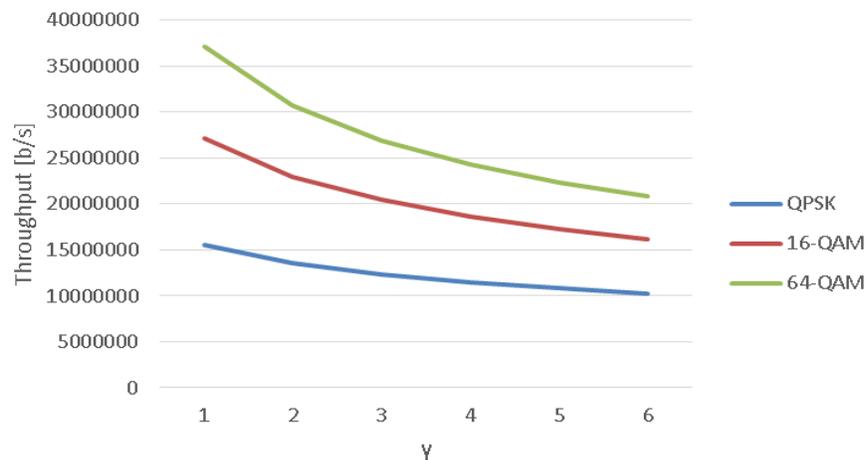


Figura 6 *Throughput* obtenido al considerar tres bloques de frecuencia.

Cuando se emplean tres bloques de frecuencia, es importante notar que debido a la distribución uniforme de los usuarios, el desempeño obtenido para un sector en particular, será muy similar al desempeño obtenido en los dos sectores restantes. Esta comparación se muestra en la tabla 1.

## 5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados mostrados en la sección anterior el desempeño de una red celular de este tipo depende en gran medida del tipo de modulación

empleado, pues es posible observar que el mayor desempeño se logró con la modulación 64-QAM donde se alcanzaron como máximo 21.96 Mbps y como mínimo 8.27 Mbps, en segundo lugar se encuentra la modulación 16-QAM donde el valor máximo quedó establecido en 17.3 Mbps y como mínimo 7.1 Mbps y finalmente con la modulación Q-PSK es con la que se alcanzaron valores más pequeños puesto que como máximo se lograron 11.03 Mbps como máximo y como mínimo se alcanzaron 5.26 Mbps, todos estos valores son para el caso cuando se utiliza el mismo bloque de frecuencia en cada uno de los tres sectores de la celda.

Tabla 1. Comparación entre el desempeño al considerar tres bloques de frecuencia.

Modulación y sector	Throughput (b/s)					
	$\gamma=1$	$\gamma=2$	$\gamma=3$	$\gamma=4$	$\gamma=5$	$\gamma=6$
QPSK, sector A	15,501,967.78	13,604,964.37	12,391,380.23	11,498,877.64	10,797,756.72	10,223,986.75
16-QAM, sector A	27,209,928.74	22,997,755.28	20,447,973.49	18,641,789.25	17,276,152.34	16,192,233.40
64-QAM, sector A	37,174,140.70	30,671,960.24	26,874,137.54	24,288,350.10	22,350,129.35	20,822,201.19
QPSK, sector B	15,517,368.09	13,663,465.46	12,450,538.38	11,555,085.63	10,851,656.07	10,280,816.29
16-QAM, sector B	27,326,930.91	23,110,171.27	20,561,632.58	18,779,499.28	17,414,442.88	16,320,334.61
64-QAM, sector B	37,351,615.13	30,842,448.87	27,085,703.66	24,480,501.91	22,526,353.47	20,978,445.70
QPSK, sector C	15,500,413.23	13,633,160.34	12,439,350.10	11,560,165.80	10,867,256.68	10,297,952.16
16-QAM, sector C	27,266,320.69	23,120,331.60	20,595,904.32	18,805,981.88	17,435,222.84	16,335,157.51
64-QAM, sector C	37,318,050.30	30,893,856.48	27,119,451.02	24,502,736.26	22,529,959.00	20,961,935.10

Cuando se utilizan tres bloques de frecuencia el desempeño del sistema aumenta pues ahora se tiene que para el caso de la modulación 64-QAM se alcanzan como máximo 37.3 Mbps y como mínimo 20.96 Mbps, para el caso de la modulación 16-QAM se alcanza un valor máximo de 27.2 Mbps y como mínimo 16.3 Mbps y finalmente para el caso de la modulación QPSK se alcanzó como máximo 15.5 Mbps y como mínimo 10.2 Mbps.

Hablando en términos de promedio para el caso en que se utilizó un solo bloque de frecuencia se obtiene en promedio se obtuvieron 13.11 Mbps para el caso de la modulación 64-QAM, para 16-QAM se obtuvieron 10.79 Mbps y para QPSK se obtuvieron solamente 7.41 Mbps. Mientras que al utilizar tres bloques de frecuencia se alcanzaron valores promedio mucho más altos, pues con la

modulación 64-QAM se obtuvieron 27.22 Mbps, con la modulación 16-QAM se alcanzaron 20.50 Mbps y con la modulación QPSK se obtuvieron 12.38 Mbps.

Sin embargo, es importante decir que todos los valores obtenidos por medio de esta simulación sufren de un cierto nivel de degradación entre el valor máximo obtenido y el valor mínimo al que decaen. En los resultados mostrados anteriormente fue posible observar que el nivel de degradación sufrido por el sistema es mucho mayor con la modulación 64-QAM, en segundo lugar se encuentra la modulación 16-QAM y finalmente la modulación QPSK la cual tiene el menor nivel de degradación, es decir mantiene sus niveles de *throughput* con menor variación en comparación con las otras dos modulaciones.

Finalmente es conveniente agregar que la simulación presentada en este trabajo ofrece resultados del desempeño global para un sistema celular basado en OFDMA; en esta simulación se considera a cada usuario como un evento, puesto que como se mencionó es una simulación de eventos discretos basada en la metodología Monte Carlo. Con esta simulación es posible ofrecer una buena perspectiva del desempeño de este tipo de redes en términos de la máxima tasa de transmisión.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] R. Esmailzadeh. M, Nakagawa, "TDD-CDMA for the 4th Generation of Wireless Communications". IEEE Wireless Commun. 2003.
- [2] T. S. Rappaport, Wireless Communications. Principles and Practice. 2a Ed. 2002. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 2002.
- [3] D. Muñoz Rodríguez, Sistemas Inalámbricos de comunicación personal. 2002. Marcombo.
- [4] O. Rodríguez Gamez, R. Hernández Perdomo, "Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas". Red de Revistas científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal. Vol. XI. núm.1. enero-marzo 2005.
- [5] C. M. De Bernardo González, T. Priede Bergamini, Marketing móvil: una nueva herramienta de comunicación. 2007. Netbiblio.

- [6] J. Ghe Voinea, *Redes de Comunicaciones. Administración y Gestión*, Fylred Radiocomunicaciones. 2012.
- [7] J.J Cárdenas Páez, José Joel, *Seminario de Titulación, Procesamiento Digital de Señales, Redes de Comunicación 4G WiMAX*. 2009. Instituto Politécnico Nacional.
- [8] *Tecnología 4G*. <http://www.ecured.cu/index.php/Tecnología4G>. Marzo de 2016.
- [9] *Redes Wimax*. <http://www.ecured.cu/index.php/WiMAX>. Marzo de 2016.
- [10] S. Yang, *OFDMA System Analysis and Design*. Artech House. USA. 2010. 319 págs.
- [11] J. Bae Park, Y. J. Sang, Seong-Lyun Kim, K. Soon Kim. "Adaptative Inter-cell interference management for downlink FH-OFDMA systems". Yonsei University, Shinchon Dong, Seodaemun Gu, Seoul. 2008. Korea.
- [12] Zheng Xie and Bernhard Walke. "Frequency Reuse Techniques for Attaining both Coverage and High Spectral Efficiency in OFDMA Cellular Systems". Chair of Communication Networks (ComNets) RWTH Aachen University Aachen, Germany, 2010.
- [13] H. Jia, "On the Performance of IEEE 802.16 OFDMA System under different Frequency Reuse and Subcarrier Permutation Patterns". IEEE International Conference on Communications. June 2007.
- [14] M. S. Al-Janabi, C. Charalampos, Tsimenides, S. Bayan, Sharif, Y. Stéphane, Le Goff, "Simulated and Semi-Analytical Throughput Evaluation for AMC- OFDMA Systems". School of Electrical, Electronics and Computer Engineering Newcastle University, Merz Court. UK. 2010.
- [15] B. Mathewos Hambebo, M. M. Carvalho, F. M. Ham, "Performance Evaluation of Static Frequency Reuse Techniques for OFDMA Cellular Networks". Florida Institute of Technology. 2014.
- [16] *Simulación Método Monte Carlo*. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Pcia de Buenos Aires. Curso de Investigación Operativa I.

- [17] P. Kroese, Dirk. Taimre, Thomas. I. Botev, Zdravko. "Handbook of Monte Carlo Methods". Wiley Series in Probability and Statistics. United States of America, 2011. 775 págs.
- [18] J. Castañeda-Camacho, G. Mino-Aguilar, L. Cortez, J. E. M. Gutiérrez Arias, J. F. Guerrero-Castellanos, G. A. Muñoz-Hernández, "A Monte Carlo Simulation Applied to Measurement of the impact of the smart antenna technology in digital celular systems". *Revista de Ingeniería Investigación y Tecnología UNAM*. volumen XVI. Número 2. Abril-junio 2015. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.

## **7. Autores**

Olivia Guerrero Méndez. Estudió la licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, actualmente es estudiante de la maestría en Ingeniería Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Dra. Josefina Castañeda Camacho. Es profesora investigadora de tiempo completo en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Imparte clases en licenciatura y a nivel posgrado.

Dra. Liliana Cortez. Es profesora investigadora de tiempo completo en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.