

Análisis Mediante Simulación del Algoritmo de Geometric Water-Filling en Sistemas OFDM

Darwin Darío Simba Sánchez, Diego Javier Reinoso Chisaguano
Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito-Ecuador

Resumen—En la actualidad se demandan cada vez más altas tasas de transmisión por lo que los sistemas de comunicaciones están llegando a los límites de la capacidad del canal. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es uno de los estándares más utilizados en comunicaciones inalámbricas debido a su alta eficiencia espectral y altas tasas de transmisión. Para incrementar la capacidad de un sistema OFDM se puede asignar de forma eficiente la potencia de transmisión entre la subportadoras OFDM usando un algoritmo de optimización conocido como Water-filling (WF). Este algoritmo permite distribuir la potencia de transmisión de manera que se maximiza la capacidad del sistema OFDM. Uno de los inconvenientes del algoritmo de WF tradicional es su alto costo computacional, por esta razón recientemente se desarrolló el algoritmo de Geometric Water-filling (GWF). Este algoritmo obtiene el mismo resultado que el algoritmo de WF pero con un menor costo computacional. En este artículo se presentan los resultados de la simulación de la capacidad de un sistema OFDM usando el algoritmo GWF para maximizar la capacidad. Además, se analiza el impacto del algoritmo sobre la BER (Bit error rate). Los resultados muestran que el algoritmo de GWF aumenta la capacidad del sistema, pero degrada la BER.

Palabras Clave— Water-filling, Geometric Water-filling, OFDM, SNR.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se ha evidenciado una notable integración de los servicios de telecomunicaciones en la sociedad. La interactividad, transmisión de información en tiempo real y alta calidad en experiencia de usuario, ha traído como resultado el incremento en la demanda de comunicaciones inalámbricas, mismas que a su vez requieren altas tasas de transmisión para un adecuado funcionamiento.

Un esquema de comunicaciones frecuentemente utilizado en ambientes inalámbricos es OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [1]. En este tipo de esquema un conjunto de datos en serie, de alta velocidad, es dividido en N sub-flujos de datos paralelos de baja velocidad que se modulan en N símbolos complejos y que se transmiten simultáneamente en N subportadoras ortogonales. Las ventajas de un sistema OFDM son alta eficiencia espectral, robustez contra la propagación multi-trayectoria y altas tasas de transmisión. En la actualidad, este esquema es utilizado en algunos de los principales estándares como IEEE802.11b/g/n/ac, LTE (Long Term Evolution), ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial), entre otros.

Los estándares de comunicaciones inalámbricas actuales pueden ofrecer altas tasas de transmisión muy cerca de la capacidad del canal, la cual se define como la máxima tasa a la que se puede transmitir información de forma confiable sobre un canal de comunicaciones [1]. Una de las formas de aumentar la capacidad es incrementar el ancho de banda. Sin embargo, el espectro radioeléctrico disponible para comunicaciones inalámbricas es escaso, por lo tanto, el uso del espectro radioeléctrico debe ser lo más óptimo posible. La capacidad también es afectada por el medio de transmisión inalámbrico, el cual es dinámico, es decir que está cambiando de forma continua. Por estas razones se han desarrollado algoritmos que permiten mejorar la capacidad a través de una eficiente administración de la potencia total de transmisión.

Considerando un sistema de usuario único como OFDM, la potencia total del sistema puede ser utilizada por dicho usuario para transmitir en las N subportadoras utilizadas para transmisión. El sistema previamente descrito puede ser optimizado, explotando la selectividad de frecuencia del canal y seleccionando dinámicamente la potencia de transmisión para cada subportadora. Estos esquemas dinámicos de asignación de potencia han mostrado un incremento en términos de capacidad del canal comparado con esquemas de asignación estáticos. Por tal motivo, para mejorar la capacidad del canal inalámbrico se propuso el algoritmo dinámico de WF (Water-Filling) [2], [3].

El algoritmo de WF, también conocido como el problema de WF, requiere la solución de un problema de optimización, lo que implica una alta complejidad. Recientemente se propuso un enfoque geométrico para resolver el problema de WF y es conocido como GWF (Geometric Water-filling) [4]. El algoritmo GWF puede alcanzar el mismo resultado que el WF convencional, pero reduciendo el costo computacional. Por este motivo, en este artículo se utiliza el algoritmo GWF para optimizar la asignación de la potencia de transmisión en un sistema OFDM que transmite sobre un canal inalámbrico multi-trayecto con desvanecimiento de Rayleigh.

Este artículo presenta comparaciones entre el sistema de asignación dinámico de potencia, usando GWF, y un sistema con asignación convencional. Las comparaciones se realizarán en términos de capacidad y BER (Bit Error Rate). Se tomará en cuenta un sistema de usuario único, es decir, el usuario puede utilizar la potencia total para transmitir en todas las N subportadoras.

El resto del artículo es organizado de la siguiente manera: La sección II presenta una introducción de OFDM y su capacidad. Luego, la Sección III presenta el algoritmo de GWF. La Sección IV presenta los resultados de la simulación y la discusión de los mismos. Finalmente, la Sección V presenta las conclusiones de este trabajo.

II. OFDM

A. Introducción a OFDM

OFDM pertenece a una clase de modulación multi-portadora, que es utilizada en sistemas de comunicación, donde la información es llevada sobre muchas portadoras de baja velocidad. OFDM es espectralmente eficiente, esto quiere decir que se puede llevar más datos por unidad de ancho de banda comparado con los esquemas de modulación precedentes donde muchos de ellos se caracterizan por usar una sola portadora en toda la comunicación.

Inicialmente OFDM fue un esquema muy complejo ya que para poder ser implementado era necesario del uso de múltiples bancos de generadores de subportadoras sinusoidales y por ende múltiples demoduladores. Es por ello que, para su aplicación práctica, OFDM no era viable en términos de eficiencia. Con el transcurso del tiempo OFDM experimentó una reformulación teórica basándose en la transformada discreta de Fourier DFT (Discrete Fourier Transform), con ello se redujo la complejidad de implementación de moduladores/demoduladores OFDM [6].

Considerando que los N datos a transmitir son $X_k, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ donde X_k es un número complejo de una constelación dada, como por ejemplo QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) o 64-QAM. Además, la k -ésima frecuencia portadora para X_k es f_k . Con las anteriores consideraciones el valor complejo a la salida del transmisor multi-portadora es dado por [8]

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi f_k t}. \quad (1)$$

En la actualidad, los sistemas de comunicación por lo general implementan sus transmisores y receptores de manera digital. Un transmisor digital generará sus datos de salida en una forma de datos muestreados. Dado $t = nT_s$, donde T_s es el intervalo de muestreo y n es el índice de muestreo, la señal digital multi-portadora a transmitir a la salida es [8]

$$x(nT_s) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k f_s n T_s}. \quad (2)$$

Adicionalmente, si las frecuencias portadoras son uniformemente espaciadas, separadas en el dominio de la frecuencia por una frecuencia de separación f_s , es decir, $f_k = k f_s, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, entonces la salida del transmisor OFDM luego de la IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform) se puede expresar como

$$x_n = x(nT_s) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi n k}{N}}. \quad (3)$$

B. Capacidad del canal en OFDM

La teoría para determinar la capacidad de un canal de comunicaciones, fue propuesta inicialmente por Nyquist para una canal libre de ruido. En este entorno la única limitante para la tasa de transmisión es simplemente el ancho de banda de la señal. Nyquist determinó que, para un ancho de banda B la máxima velocidad de señal que puede alcanzar es dos veces el ancho de banda B . Posteriormente Claude Shannon [1], analizó al canal de comunicaciones con ruido blanco Gaussiano en 1948. La capacidad del canal indica el límite superior para el rendimiento total del sistema. La capacidad del canal de comunicaciones es una medida de la cantidad de información que puede llevar un canal de comunicaciones [9].

Según el teorema de Shannon, la capacidad máxima de un canal de comunicación de ancho de banda X y con ruido Gaussiano de potencia N y empleando señales de potencia S viene dada por [9]

$$C = X \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \left[\frac{\text{bits}}{s} \right]. \quad (4)$$

Esta relación indica el límite superior para cualquier esquema de codificación/modulación que se desee implementar, sin importar lo sofisticado que sea. La capacidad del canal también se puede expresar como

$$C = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \left[\frac{\text{bits/s}}{\text{Hz}} \right]. \quad (5)$$

En un sistema OFDM, la capacidad de la k -ésima subportadora en un canal con desvanecimiento selectivo en frecuencia viene dada por [2]

$$C(f_k) = \Delta f \log_2 \left(1 + |H[k]|^2 \frac{P[k]}{N_0} \right) \left[\frac{\text{bits}}{s} \right] \quad (6)$$

donde Δf es el ancho de banda por subportadora, $H[k]$ es la respuesta de frecuencia, $P[k]$ es la potencia de transmisión y N_0 es la varianza del ruido. Entonces, la capacidad total del sistema OFDM viene dada por [2]

$$C = \sum_{k=0}^{N_c-1} C(f_k) \left[\frac{\text{bits}}{s} \right]. \quad (7)$$

III. ALGORITMO DE WATER-FILLING

A. Análisis del Algoritmo de Water-Filling.

Dada una potencia total $P > 0$, también descrita como el volumen de agua; la asignación de potencia para el i -ésimo canal es dado por s_i y la ganancia de trayecto de propagación para el i -ésimo sub-canal es representada por $a_i, i = 1 \dots K$, donde K es el número total de sub-canales. Sea $\{a_i\}_{i=1}^K$ una

por ende, se tiene cuatro sub-canales a los que se reasignará una potencia para mejorar la capacidad. Con el vector de la ganancia por sub-canal se puede obtener el vector con las profundidades de paso que se representa gráficamente en la Fig. 1 y su valor es

$$d = [1; 2; 4; 10]. \quad (15)$$

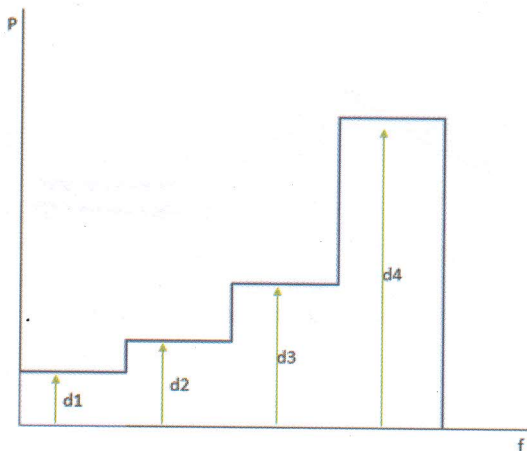


Fig. 1. Inverso de la ganancia por sub-canal.

Ahora se procede a determinar $P_2(k)$ sucesivamente de acuerdo con (12). $P_2(k = 1)$ se obtiene como

$$P_2(k = 1) = \left\{ 10 - \left[\sum_{i=1}^{1-1} \left(\frac{1}{a_k} - \frac{1}{a_i} \right) \right]^+ \right\} = 10. \quad (16)$$

Luego de forma similar se obtienen $P_2(k = 2)$, $P_2(k = 3)$ y $P_2(k = 4)$:

$$\begin{aligned} P_2(k = 2) &= \left\{ 10 - \left[\sum_{i=1}^{2-1} \left(\frac{1}{a_k} - \frac{1}{a_i} \right) \right]^+ \right\} \\ &= \left\{ 10 - \left[\left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} \right) \right]^+ \right\} \\ &= \{ 10 - (2 - 1) \} = 9 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_2(k = 3) &= \left\{ 10 - \left[\sum_{i=1}^{3-1} \left(\frac{1}{a_k} - \frac{1}{a_i} \right) \right]^+ \right\} \\ &= \left\{ 10 - \left[\left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_1} \right) + \left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_2} \right) \right]^+ \right\} \\ &= \{ 10 - [(4 - 1) + (4 - 2)] \} = 5 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_2(k = 4) &= \left\{ 10 - \left[\sum_{i=1}^{4-1} \left(\frac{1}{a_k} - \frac{1}{a_i} \right) \right]^+ \right\} \\ &= \{ 10 - [(10 - 1) + (10 - 2) + (10 - 4)] \} \\ &= \{-13\}^+ = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Como se puede observar, $P_2(k = 4) = 0$ por lo que se puede determinar que $k^* = 3$ y se puede calcular s_{k^*} con la expresión

$$s_{k^*} = \frac{1}{k^*} P_2(k^*) = \frac{1}{3} * 5 = \frac{5}{3} \quad (20)$$

Ahora se pueden calcular los nuevos niveles de potencia en base a la expresión

$$s_i = \begin{cases} s_{k^*} + (d_{k^*} - d_i) & 1 \leq i \leq k^* \\ 0 & k^* < i \leq K \end{cases} \quad (21)$$

obteniéndose los siguientes valores:

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{5}{3} + (4 - 1) = \frac{14}{3} = 4,66 \\ s_2 &= \frac{5}{3} + (4 - 2) = \frac{11}{3} = 3,66 \\ s_3 &= \frac{5}{3} + (4 - 4) = \frac{5}{3} = 1,66 \\ s_4 &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

De este modo la nueva potencia por sub-canal, se muestra en (23), donde la suma de todos los sub-canales da como resultado la potencia de transmisión.

$$s = [4,66; 3,66; 1,66; 0] \quad (23)$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante una simulación Monte Carlo realizada en Matlab. Se implementó un transmisor OFDM, canal inalámbrico y receptor OFDM; para la simulación se considera un esquema OFDM sin codificación FEC. En el transmisor OFDM se generan bits que son modulados con QPSK, 16-QAM o 64-QAM; los símbolos modulados pasan por un conversor serial-paralelo y se realiza la IFFT. Luego, se añade el prefijo cíclico, los símbolos pasan por un conversor paralelo-serial para finalmente ser transmitidos por el canal inalámbrico. Se considera un canal multi-trayecto de dos rayos con desvanecimiento selectivo en frecuencia que sigue una distribución de Rayleigh. El PDP (Power delay Profile) del canal utilizado se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. PDP del canal

Rayo	Retardo [ns]	Potencia promedio [dB]
1	0	0
2	50	0

En el receptor OFDM, primero se retira el prefijo cíclico y luego se realiza una conversión serial-paralela de la información. A continuación, la señal pasa a la FFT y luego se ecualizan los símbolos considerando conocimiento del estado del canal. Finalmente, se realiza la demodulación para obtener los bits recibidos. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los parámetros utilizados para la simulación.

El análisis de los resultados se realizó en base a curvas correspondientes a la capacidad vs SNR (Signal to Noise Ratio) y al BER vs SNR. El presente estudio involucra tres tipos de modulación, QPSK, 16-QAM y 64-QAM, mismos que serán analizados para cada curva previamente descrita. Las unidades

de la SNR están en decibelios. La capacidad será expresada en bit/s/Hz, una capacidad normalizada, es decir la capacidad por unidad de ancho de banda. Debido a que el canal inalámbrico es aleatorio, la capacidad cambiará dependiendo del estado del canal. Por esta razón se obtiene la capacidad promedio al realizar 10^4 iteraciones de la simulación para cada SNR.

Tabla 2. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
Ancho de banda	20 MHz
Subportadoras de datos	56
Total de subportadoras	64
Modulación	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Ruido	AWGN
Tipo de Desvanecimiento	Selectivo en frecuencia (Distribución de Rayleigh)
Canal	Multi-trayecto (2 rayos)
Iteraciones	1e4 (10000)

A. Capacidad del Sistema OFDM

La Fig. 2 presenta la capacidad promedio normalizada en bits/s/Hz versus la SNR para modulación QPSK. Se puede observar que usando el algoritmo de GWF se puede incrementar la capacidad del sistema sobre todo para bajas SNR. Mientras va incrementándose la SNR va disminuyendo el incremento de la capacidad. Para un SNR de 15 dB la capacidad obtenida usando el algoritmo de GWF es similar a la capacidad original sin el algoritmo. Este incremento en la capacidad se debe a que la potencia ya no es asignada a todos los sub-canales por igual, como se hace convencionalmente en OFDM. La asignación de potencia con GWF es más eficiente ya que los mejores sub-canales reciben más potencia mientras que los malos, reciben poca potencia o incluso ninguna potencia.

De forma similar las Fig. 3 y Fig. 4 muestran la capacidad versus la SNR para modulaciones 16-QAM y 64-QAM, respectivamente. Se puede observar un resultado similar al obtenido con la modulación QPSK.

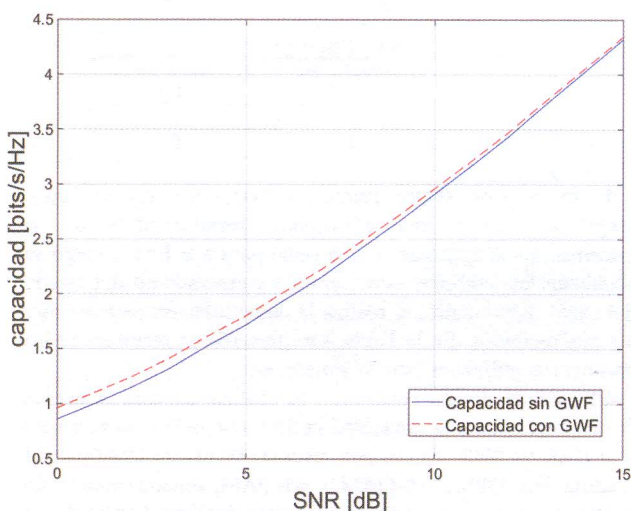


Fig. 2. Capacidad vs SNR(dB), modulación QPSK.

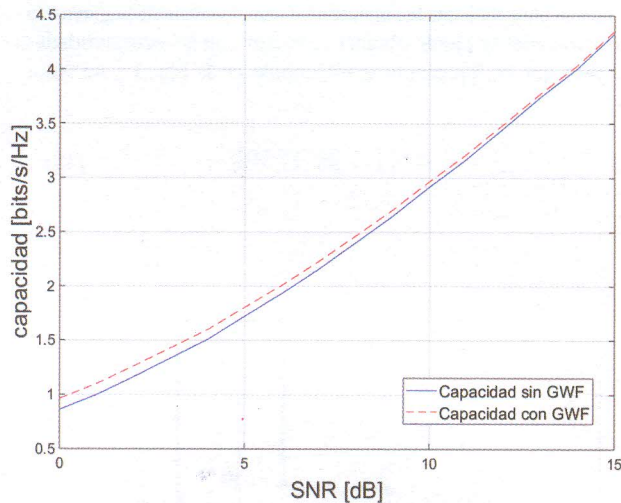


Fig. 3. Capacidad vs SNR(dB), modulación 16-QAM.

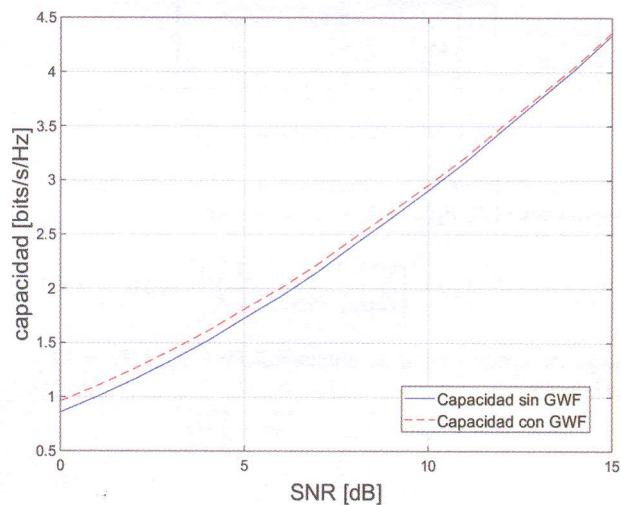


Fig. 4. Capacidad vs SNR(dB), modulación 64-QAM.

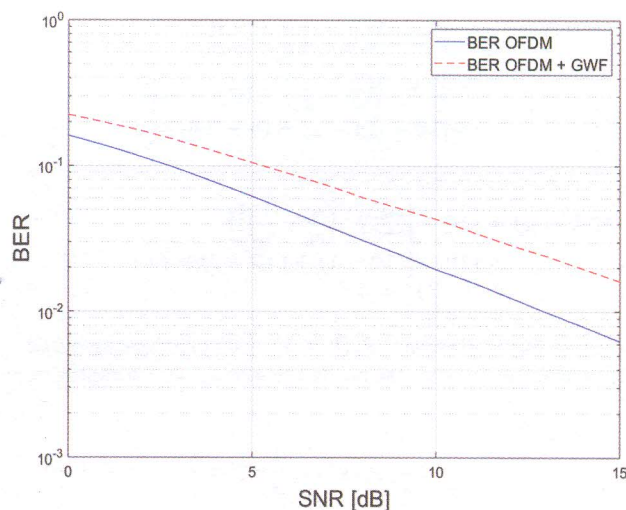


Fig. 5. BER vs SNR con modulación QPSK.

B. BER

La Fig. 5 presenta la tasa de bits errados versus la SNR para la modulación QPSK. La curva azul representa la BER de un sistema OFDM convencional y la curva roja representa la BER de un sistema OFDM que utiliza el algoritmo de GWF para asignar la potencia a las diferentes subportadoras en el transmisor. Se puede observar que la curva roja está por sobre la curva azul, esto indica que el número de errores es mayor cuando se utiliza el algoritmo de GWF. Esto indica un efecto adverso sobre la BER usando el algoritmo por lo que es necesario analizar su funcionamiento.

Debido al comportamiento aleatorio y la selectividad de frecuencia del canal inalámbrico considerado para la simulación, hay sub-canales cuya relación señal a ruido es baja, por lo que el algoritmo de GWF no les asigna potencia o su potencia asignada es menor comparada a un esquema OFDM tradicional. Este cambio de la potencia de las subportadoras cambia la posición de los símbolos transmitidos con respecto a la constelación original. Analizando la constelación resultante, los símbolos que fueron asignados mayor potencia serán desplazados hacia la parte exterior de la constelación; mientras que los símbolos a los que se les redujo la potencia serán movidos hacia el interior de la constelación. Este último efecto reduce la distancia mínima entre los símbolos de la constelación QPSK por lo que se afecta la BER. El efecto es aún más severo cuando a alguna subportadora no se le asigna potencia ya que esto implica que no se transmite ninguna información en esa subportadora por lo que habrá pérdida de información y una reducción aún mayor en la tasa de errores. Usando GWF, la capacidad se incrementa como se observó en la Fig. 2, pero la información que llevan los sub-canales a los que no fueron asignados potencia se pierde, por este motivo la tasa de errores es mayor que la tasa de errores en un sistema OFDM tradicional.

La Fig. 6 presenta la BER vs SNR con modulación 16-QAM. En este tipo de modulación, el diagrama de constelaciones involucra dieciséis símbolos representados con cuatro bits cada uno, por lo que con este tipo de modulación se puede llevar más información. Además, en esta modulación la separación entre símbolos en la constelación disminuye por lo que es más susceptible a errores. Esto se puede evidenciar si se compara la BER de un sistema convencional con QPSK vs la modulación 16-QAM. Para alcanzar una BER de 10^{-1} , en QPSK se requiere 6 dB menos de SNR comparado con 16-QAM. La ventaja de 16-QAM es que se puede enviar más información, pero es más susceptible a errores. En la Fig. 6 también se puede observar que cuando se utiliza el algoritmo de GWF la BER se degrada, aunque es menor la degradación comparada con la modulación QPSK. La razón de la degradación es la misma que se discutió para la modulación QPSK.

En la Fig. 7 se observa la BER vs SNR con modulación 64-QAM. Comparada con la Fig. 6, se puede evidenciar que hay una degradación de la BER debido a que en la constelación hay 64 símbolos lo que reduce la separación mínima entre los mismos y causa un impacto en la BER. También se puede observar que la BER de un sistema OFDM tradicional es similar a cuando se usa el algoritmo GWF.

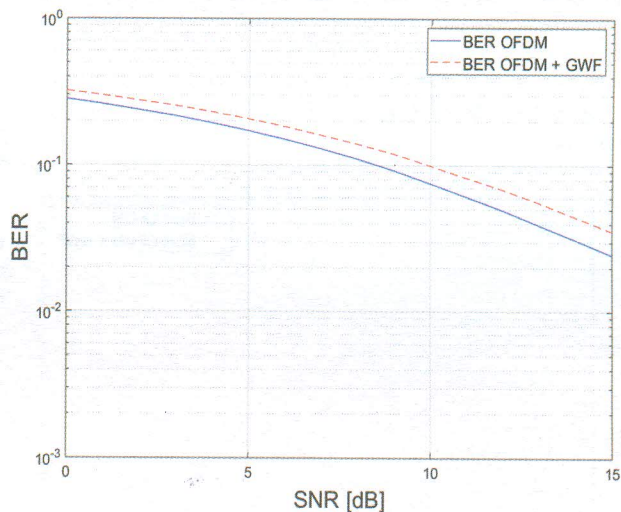


Fig. 6. BER vs SNR con modulación 16-QAM.

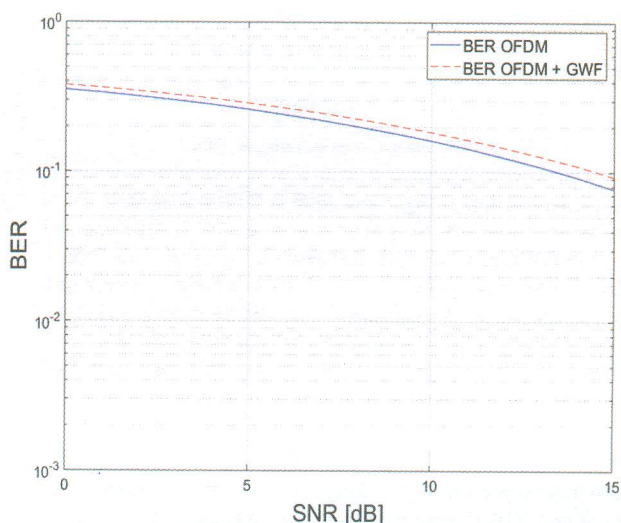


Fig. 7. BER vs SNR con modulación 64-QAM.

C. BER MEJORADA

Como se observó en las figuras obtenidas de la BER, el algoritmo de GWF causa una degradación en la tasa de errores debido principalmente a las subportadoras que son asignadas potencia cero. Esto sucede porque el receptor no posee información sobre las subportadoras que han sido transmitidas con potencia cero y esto genera errores. Una solución para mejorar la BER sería considerar que el receptor tiene conocimiento de las subportadoras que fueron asignadas potencia cero por el transmisor y de esa forma reducir el número de bits errados en el receptor. Esta información adicional tendría que ser enviada como parte de los datos transmitidos, aunque reduciría la tasa de transmisión efectiva del sistema.

La Fig. 8 presenta la BER vs SNR para modulación QPSK y considerando que el receptor conoce las subportadoras que fueron transmitidas con potencia cero, a este esquema se lo va

a denominar “BER mejorada”. Como se puede observar en esta figura, el BER obtenido usando el algoritmo GWF es mejor que usando el sistema tradicional OFDM. Esto demuestra que el esquema de BER mejorada usando el algoritmo de GWF es capaz de mejorar la BER además de incrementar la capacidad del sistema.

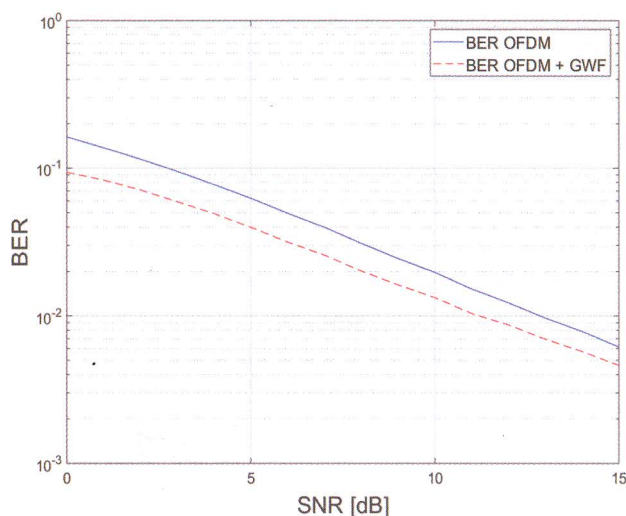


Fig. 8. BER mejorada con modulación QPSK.

De forma similar, la Fig. 9 presenta la BER mejorada usando modulación 16-QAM. Se puede observar que la BER con el algoritmo GWF es mejor que el sistema tradicional para SNR < 10 dB sin embargo, para SNR > 10 dB se puede observar que la BER con y sin GWF es similar. Algo similar sucede en la Fig. 10 que presenta la BER mejorada para modulación 64-QAM. Se puede ver una pequeña mejora de la BER usando GWF comparada con el sistema tradicional pero solo para SNR bajos.

V. CONCLUSIÓN

Este trabajo presentó un análisis del algoritmo de Geometric water-filling (GWF) para maximizar la capacidad en un sistema OFDM a través de una eficiente distribución de la potencia de transmisión a las subportadoras ortogonales. Para que el algoritmo de GWF asigne potencia a un canal y a otro no, toma en consideración la premisa de que sub-canales con una buena relación señal a ruido sean asignados mayor cantidad de potencia y canales con una relación señal a ruido baja reciban menos potencia o inclusive potencia cero. La ventaja del algoritmo GWF es que no necesita calcular el nivel de agua que es parte del algoritmo de water-filling tradicional, de esta forma GWF es menos complejo que el WF tradicional.

Los resultados de las simulaciones muestran que el algoritmo de GWF incrementa la capacidad de un sistema OFDM en un canal selectivo en frecuencia sobre todo en la zona de bajas SNR. Este comportamiento es similar para QPSK, 16-QAM y 64-QAM que son las modulaciones utilizadas en las simulaciones. Sin embargo, las simulaciones también mostraron que GWF degrada la tasa de errores debido a que ciertas subportadoras pueden tener potencia cero y esto causa

una pérdida de información ya que el receptor desconoce que estas subportadoras no llevan información.

Para mejorar la BER se presentó un esquema de “BER mejorada”, el cual consiste en informar al receptor de las subportadoras que no fueron asignadas potencia. De esta forma es posible mejorar la BER del sistema OFDM, aunque esto implique la necesidad de información adicional desde el transmisor al receptor.

Como trabajo futuro se piensa extender el análisis del algoritmo de GWF a un sistema OFDMA para determinar cómo maximizar la asignación de recursos a los múltiples usuarios de este tipo de sistema.

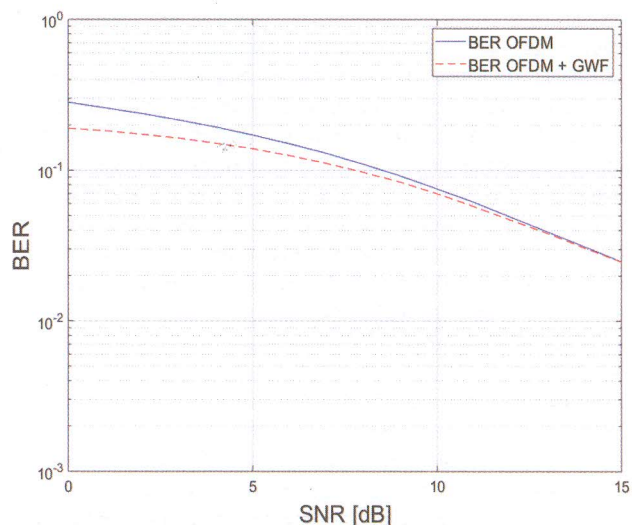


Fig. 9. BER mejorada con modulación 16-QAM.

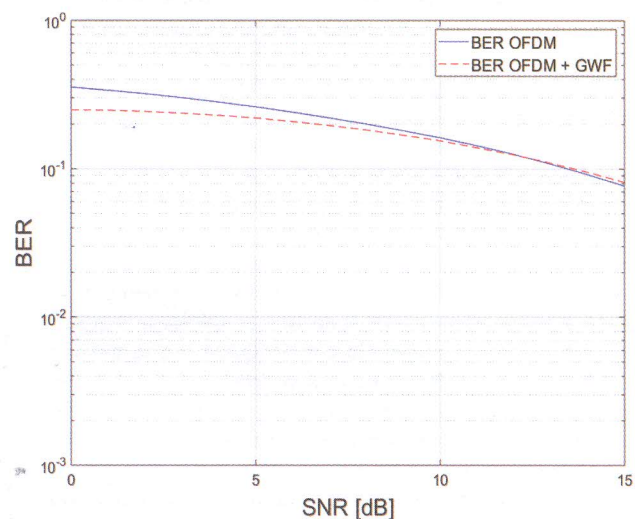


Fig. 10. BER mejorada con modulación 64-QAM.

VI. REFERENCIAS

- [1] C. E. Shannon, "Communication in the Presence of Noise," in *Proceedings of the IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, Jan. 1949.
- [2] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, y Chung G. Kang.

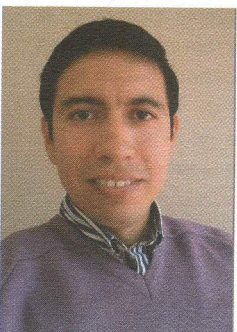
- MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. Singapur: Wiley Publishing, 2010.
- [3] D. Tse y P. Viswanath. *Capacity of wireless channels*. Cambridge University Press, 2005.
- [4] P. He, J. Katz, S. Zhou, L. Zhao, and Z. Niu, *Radio Resource Management Using Geometric Water-Filling*. New York: Springer, 2014.
- [5] R. Ramírez Luz, *Sistemas de Radiocomunicaciones*. Madrid, España: Paraninfo, 2015.
- [6] E. Bezerra Rodrigues and F. Casadevall, "Fairness Adaptive Resource Allocation in OFDMA networks", Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [7] J. J. Escudero Garzáa, "Optimización de Energía y Eficiencia de Transmisión con Análisis de Imparcialidad en Comunicaciones Inalámbricas Adaptativas", Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [8] T.-D. Chiueh, P. Tsai, and I.-W. Lai, *Baseband Receiver Design for Wireless MIMO-OFDM Communications*. Nodia-India: WILEY, 2012.
- [9] C. J. Pertuz, "Capacidad de Canal y Asignación de Potencia con Propagación Rayleigh Haciendo uso del Algoritmo Water-filling", *UDEC*, pp. 1-6, 2010.
- [10] H. Wang, Q. Cui, X. Tao, M. Valkama, and Y. J. Guo, "Optimal Cooperative Water-Filling Power Allocation for OFDM System", *IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC*, pp. 3742-3747, 2013.

VII. BIOGRAFÍAS



Darwin Darío Simba Sánchez, nace en el Distrito Metropolitano de Quito-Ecuador el primero de marzo de 1992. Estudió en el Colegio, Unidad Educativa Municipal Experimental Antonio José de Sucre donde recibió el Título de Bachiller en Físico Matemático. Recibió el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador,

en el 2018. Sus principales áreas de interés son los sistemas de comunicación, OFDM, radio enlaces, networking y procesamiento de señales.



Diego Javier Reinoso Chisaguano, recibió el Título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional en 2009. Realizó sus estudios de postgrado en Japón, en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Nara (NAIST) a través de una beca del Ministerio de Educación, Cultura, Deportes, Ciencia y Tecnología de Japón (MEXT). Recibió el Título de Máster en Ingeniería y Doctor en

Ingeniería en los años 2013 y 2016, respectivamente. Desde septiembre de 2017 es Profesor Titular a Tiempo Completo en la Escuela Politécnica Nacional. Sus campos de investigación incluyen: sistemas OFDM, televisión Digital, estimación de canales inalámbricos y procesamiento digital de señales.