

Evaluación de OPS para la Reducción de la PAPR en un Sistema OFDM con Canal Multitrayecto

Peñaherrera, María¹ ; Reinoso, Diego^{1*} 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

Resumen: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) es una tecnología de comunicación inalámbrica que tiene ventajas como alta eficiencia espectral, alta tasa de transmisión y es robusta a la propagación por multitrayecto. Sin embargo, su principal desventaja es que tiene alta PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). Este artículo presenta la evaluación de la técnica OPS (Orthogonal Pilot Sequence) para la reducción de la PAPR en un sistema OFDM con canal multitrayecto. Para la evaluación se consideran dos tipos de canales multitrayecto selectivos en frecuencia, con y sin línea de vista. Se evalúa la técnica OPS obteniendo la gráfica del BER (Bit Error Rate) vs Eb/No (energy per bit to noise power spectral density ratio) y la gráfica de la CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function) para distintos parámetros. Los resultados muestran una reducción de la PAPR cuando se utiliza la técnica OPS y una mejora en el BER.

Palabras clave. OPS, PAPR, OFDM, Canal multitrayecto.

Evaluation of OPS for PAPR Reduction in an OFDM System with Multipath Channel

Abstract: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is a wireless communication technology that has advantages such as high spectral efficiency, high transmission rate, and robustness to multipath propagation. However, its main disadvantage is the high PAPR (Peak-to-Average Power Ratio). This article presents the evaluation of OPS (Orthogonal Pilot Sequence) for PAPR reduction in an OFDM system with multipath channel. For the evaluation, two types of frequency selective multipath channels, with and without line of sight, are considered. OPS is evaluated obtaining the BER (Bit Error Rate) vs Eb/No (energy per bit to noise power spectral density ratio) graph and the CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function). The results show a reduction in the PAPR when using the OPS technique and an improvement in the BER.

Keywords. OPS, PAPR, OFDM, Multipath channel.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las comunicaciones inalámbricas se han convertido en parte fundamental de la vida diaria de las personas a nivel mundial, debido a que permiten mantener una comunicación sin la necesidad de estar conectados directamente a un enlace físico. Varios estándares para las comunicaciones inalámbricas utilizan la técnica de modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) por sus grandes ventajas, tales como alta tasa de transmisión, alta eficiencia espectral y robustez a la propagación por multitrayectoria. No obstante, OFDM también cuenta con desventajas como la alta PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) que esta posee, la misma que tiene una gran probabilidad de suceder en el transmisor. La alta PAPR puede ocasionar que el HPA (High Power Amplifier) provoque distorsiones no lineales y radiación fuera de banda en los símbolos OFDM que a su vez también influye en el BER (Bit Error Rate) (Toapanta, 2017). En la práctica todos los transmisores OFDM utilizan un HPA por lo que la reducción de la PAPR es un proceso muy importante.

La reducción de la PAPR puede ser posible mediante diversas técnicas dentro de las cuales se involucra la distorsión y la no distorsión de las señales. Entre las técnicas con distorsión se tienen: CAF (Clipping and Filtering), PW (Peak Windowing), CTs (Companding Transforms). Cada una de estas técnicas introducen radiación dentro y fuera de banda lo que como consecuencia degrada la tasa de error de bit. Entre las técnicas sin distorsión se tienen: SLM (SeLected Mapping), PTS (Partial Transmit Sequences), TR (Tone Reservation), TI (Tone Injection), Codificación (Coding), que son técnicas que podrían ocasionar reducción en la tasa de transmisión de datos además de no realizar un control de los datos que son transportados (Paredes, 2014).

También se tiene técnicas que no necesitan de información adicional, tales como: CS (Constellation Shapping) que busca la reducción de los picos de PAPR mediante esquemas que realizan modificaciones en los puntos de la constelación en el dominio de la frecuencia, a pesar de no afectar la tasa de transmisión de datos, esta técnica puede ocasionar un incremento considerable de la energía de bit por símbolo. La

diego.reinoso@epn.edu.ec

Recibido: 05/08/2019

Aceptado: 10/12/2019

Publicado: 31/01/2020

10.33333/tp.vol44n2.04

técnica OPS (Orthogonal Pilot Sequence) usa una rejilla 2D-PSAM (Two-Dimensional Pilot-Symbol Assisted Modulation) que generalmente se usa en la estimación de canales OFDM coherentes, las secuencias de pilotos son utilizadas tanto para estimar el canal como para la reducción de los picos de las señales y no requiere la transmisión de información secundaria (Fernandez-Getino et al., 2006).

Este artículo presenta la simulación de un sistema OFDM que usa la técnica OPS para reducir la PAPR. Para analizar el efecto del número de pilotos en la técnica OPS, se prueban dos casos con pilotos cada 4 y cada 8 subportadoras, respectivamente. El canal de comunicaciones utilizado se modela con un desvanecimiento selectivo en frecuencia que sigue una distribución de Nakagami y con ruido blanco AWGN (Additive White Gaussian Noise). Los resultados se presentan con gráficas del BER y la CCDF (Cumulative Complementary Distribution Function).

El resto del artículo es organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta una breve descripción de OFDM, el problema de la PAPR y el amplificador de potencia. La sección 3 presenta una descripción del canal inalámbrico y las principales distribuciones para modelar el mismo. Luego, la sección 4 explica la técnica OPS. La sección 5 presenta los resultados obtenidos en la simulación. Finalmente, la sección 6 presenta las conclusiones a las que se llegó con este trabajo.

2. SISTEMA OFDM

Los sistemas OFDM también son conocidos como sistemas MCM (Multicarrier Modulation) y son un método de modulación digital que utiliza múltiples portadoras ortogonales de banda estrecha en lugar de utilizar una sola banda que ocupe todo el ancho de banda, con el fin de evitar tener muchos moduladores y filtros en el transmisor. Es un sistema que soporta diferentes tasas binarias, es robusto frente al ruido, lo que lo hace un sistema adecuado para comunicación inalámbrica.

En un sistema OFDM se establece el número de subportadoras (N) en base al ancho de banda que tiene el canal, la velocidad con la que se transmiten los datos y el tiempo que dura el símbolo útil, el inverso de la duración de este tiempo útil ($N=1/T$) denota la separación a la que se encuentran las portadoras. El número de portadoras se encuentra relacionado con la cantidad de puntos complejos que son procesados por la FFT (Fast Fourier Transform) y el rango de subportadoras que se pueden emplear puede ser de varias decenas o hasta varios miles. De acuerdo con la aplicación, se puede reducir o aumentar la velocidad que tienen los datos y el valor del intervalo de guarda (Jiménez et al.).

La ortogonalidad es considerada como una de las principales diferencias entre los sistemas OFDM y otros procedimientos de multiplexación basados en frecuencia, esta característica hace que entre portadoras pueda existir una separación óptima y evitar la necesidad de una banda de guarda entre subportadoras.

A) PAPR

La PAPR es definida como la relación entre la potencia pico y la potencia media de una señal. Se puede representar la PAPR matemáticamente mediante N_m muestras de una señal, $x[n]$ con $0 \leq n \leq N_m-1$, las ecuaciones (1) y (2) representan la potencia pico y la potencia media, respectivamente.

$$P_{max} = \max |x[n]|^2 \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{N_m} \sum_{n=0}^{N_m-1} |x[n]|^2. \quad (2)$$

Tomando en cuenta las ecuaciones (1) y (2), la PAPR está dada por

$$PAPR = \frac{P_{max}}{\bar{P}} = \frac{\max |x[n]|^2}{\frac{1}{N_m} \sum_{n=0}^{N_m-1} |x[n]|^2} \quad (3)$$

B) Amplificador de potencia

El HPA es un amplificador de potencia que se encuentra en la última etapa de los transmisores, es el encargado de amplificar la potencia de la señal con el fin de entregar a la antena una potencia con la máxima eficiencia (Toapanta, 2017). Para la utilización del HPA se debe considerar el parámetro back-off o también conocido como punto de operación para calcular la eficiencia de HPA utilizado, este punto se basa en otros dos puntos importantes el IBO (Input Back-Off) y OBO (Out Back-Off) (Paredes, 2014).

El HPA está constituido de una zona lineal y una zona de saturación. Para mejorar la eficiencia del HPA se desea que opere lo más próximo a la región de saturación para una potencia promedio dada de la señal. Debido a los picos de potencia de la señal OFDM, en ciertos instantes la señal entraría en la zona de saturación causando distorsión dentro y fuera de banda. Una solución es mover el punto de operación del amplificador a la zona lineal realizando un "back-off" lo cual mejora el problema de la distorsión, pero aumenta el rango dinámico del amplificador y en consecuencia aumenta su costo. El parámetro IBO representa cuánto tiene que moverse el punto de operación en términos de la potencia de entrada. Si la PAPR supera el valor de IBO del amplificador la señal también sufrirá de distorsión dentro y fuera de banda (Paredes, 2014). Por este problema se hace indispensable el uso de una técnica para reducir la PAPR de la señal OFDM.

3. CANAL INALÁMBRICO

El canal inalámbrico es el medio no guiado por el cual viajan las señales en una comunicación inalámbrica. Este medio se encuentra expuesto a efectos y alteraciones causadas por las distancias a las que tienen lugar las comunicaciones, por las condiciones ambientales, por objetos presentes en la línea de vista entre transmisor y receptor, entre otros (Acuña y Terán, 2017).

Para modelar un canal inalámbrico comúnmente se considera únicamente el ruido blanco AWGN por facilidad. El ruido blanco indica la degradación a la que está sometida la señal

esperada debido a la presencia del ruido térmico en el canal de comunicación y en los diferentes circuitos de conforman el sistema de transmisión y recepción, sin embargo, el uso del canal AWGN no es suficiente para transmisiones inalámbricas terrestres, principalmente por la movilidad y el desvanecimiento.

El desvanecimiento a pequeña escala es otro de los fenómenos que afecta a un canal de comunicaciones. Este fenómeno presenta variaciones rápidas que se pueden modelar por variables aleatorias que siguen diferentes funciones de distribución de probabilidad. Las principales funciones de distribución consideradas en canales de comunicaciones inalámbricas son (Ramírez, 2015):

A) Rayleigh

Se utiliza este modelo cuando entre el transmisor y receptor no existe línea de vista, se usa generalmente en los lugares donde existe un gran número de elementos reflectores entre el transmisor y el receptor.

B) Rician

Se utiliza esta distribución cuando por parte de la señal dominante existe línea de vista entre el transmisor y receptor. La distribución de Rician generalmente se describe en base a un factor K , que representa la relación entre la potencia de la señal dominante y la potencia de las señales reflejadas y se encuentra definido por la ecuación (4):

$$K = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \text{ (dB)} \quad (4)$$

donde A es la amplitud pico de la señal dominante y σ^2 es la potencia de la señal reflejada.

En la distribución de Rayleigh la potencia de la señal dominante es casi nula por lo que el factor K es muy grande, pero en la distribución de Rician con una señal dominante fuerte el factor K está en el orden de unidades o decenas.

C) Nakagami

Permite caracterizar señales terrestres móviles, ambientales interiores (indoor) y radio enlaces ionosféricos. De acuerdo con el factor m , la distribución de Nakagami se aproxima a las distribuciones de Rayleigh, Rician y Media Gaussiana. La función de densidad de probabilidad que describe a esta distribución se representa como

$$p(r) = \frac{2}{\tau(m)} \left(\frac{m}{\bar{P}_r}\right)^m r^{2m-1} e^{-m\left(\frac{r^2}{\bar{P}_r}\right)} \quad (5)$$

donde, \bar{P}_r es el promedio de la potencia recibida, τ es la función Gamma, y m es la figura de desvanecimiento (fading figure) cuyo valor debe ser mayor o igual a r^2 . La potencia instantánea de la señal recibida es $\frac{1}{2}$, y satisface la distribución Gamma.

Si se presentan valores reducidos del parámetro m en la distribución de Nakagami se pueden tener desvanecimientos severos en el canal. Por el contrario, en el caso de cuando m tiende al infinito, el canal converge a un canal ideal sin desvanecimiento o AWGN (Acuña y Terán, 2017).

Para cuando se utiliza la distribución de Rayleigh en el canal Nakagami el valor del parámetro m es 1, mientras que cuando se utiliza la distribución de Rician la constante k asignada a esta distribución genera el valor m y se obtiene mediante

$$m = \frac{(k+1)^2}{(2*k)+1} \quad (6)$$

A pesar de ser un modelo poco conocido, la distribución de Nakagami es igual o más útil que los modelos de Rayleigh y Rician para modelar desvanecimiento para las comunicaciones inalámbricas (Acuña y Terán, 2017).

4. TÉCNICA OPS

En los sistemas OFDM inalámbricos coherentes, los símbolos piloto se insertan usualmente en la rejilla 2D tiempo-frecuencia para la estimación del canal. La técnica OPS propone el uso de un conjunto predefinido de M secuencias piloto ortogonales, cada una de longitud N_p ($M \leq N_p$). Para cada símbolo OFDM, se selecciona la secuencia piloto que al combinarse con los datos proporcione la PAPR más baja del conjunto disponible. Este esquema subóptimo reduce la complejidad si se compara con el uso de valores de pilotos óptimos. Además, evita la transmisión de información adicional hacia el receptor, ya que es posible una detección ciega debido a las condiciones de ortogonalidad de las secuencias piloto. Para el símbolo OFDM, la secuencia $\tilde{p} = [\tilde{p}(0), \dots, \tilde{p}(N-1)]$ recoge los símbolos piloto en el dominio de la frecuencia en las correspondientes posiciones de los símbolos piloto, mientras que las demás posiciones se ponen en cero (Fernandez-Getino et al., 2006), según

$$\tilde{p}(k) = \begin{cases} \tilde{p}(k), & k \in \gamma \\ 0, & k \notin \gamma \end{cases} \quad (7)$$

donde $\tilde{p}(k)$ representa los símbolos piloto, k y γ representan el índice de subportadoras en el dominio de la frecuencia y un subconjunto de subportadoras, respectivamente (Paredes, 2014).

OPS cuenta con un conjunto finito de M secuencias piloto, \tilde{p}_m con $m \in \{1, \dots, M\}$, es decir $\{\tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_M\}$ (Paredes, 2014). Estas secuencias piloto son ortogonales entre sí, por lo que deben cumplir con la condición de ortogonalidad

$$\langle \tilde{p}_m, \tilde{p}_n \rangle = 0, \quad m \neq n \quad m, n = \{1, \dots, M\} \quad (8)$$

siendo $\langle \tilde{p}_m, \tilde{p}_n \rangle$ el producto escalar. Exclusivamente, si se emplean las secuencias Walsh-Hadamard para los símbolos piloto, entonces $\tilde{p}(k) \in \{1, -1\}$, y por tanto $\langle \tilde{p}_m, \tilde{p}_n \rangle =$

$N_p \delta[m - n]$, $m, n = \{1, \dots, M\}$, donde $\delta[\cdot]$ denota la función delta de Kronecker (Paredes, 2014).

En la técnica OPS se usan las secuencias piloto del conjunto disponible $\tilde{p}_m, m = \{1, \dots, M\}$ para formar M símbolos OFDM en el dominio de la frecuencia $\tilde{x}_m(k) k = \{0, \dots, N - 1\}$, después se obtienen los M símbolos OFDM en el dominio del tiempo a través de la operación IFFT (Inverse Fast Fourier Transform). Luego se selecciona el m -ésimo símbolo OFDM, que proporcione la PAPR menor del conjunto disponible. Por lo tanto, el algoritmo OPS lleva a cabo M operaciones IFFT por cada símbolo OFDM.

5. RESULTADOS

Se implementó en Matlab un transmisor y receptor OFDM sin corrección de errores. En el transmisor, los datos primero son modulados con QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying), 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) o 64QAM. Luego, a estos datos se añaden los símbolos piloto y subportadoras null, y se realiza la conversión serie-paralelo. A continuación, se realiza la IFFT y se vuelven a convertir los datos a serie. Finalmente, se añade el prefijo cíclico y se pasa la señal por el HPA. Para el HPA se usó el modelo de Rapp que se utiliza para modelar un SSPA (Solid State Power Amplifier) (Mohan, 2013).

A la señal transmitida se le añade ruido AWGN y se pasa por un canal inalámbrico con distribución de Rayleigh o Rician, que son casos especiales de la distribución de Nakagami. Para el receptor se considera una sincronización perfecta y conocimiento del estado del canal. En el receptor primero se remueve el prefijo cíclico y se convierte la señal de serie a paralelo. Luego, se aplica la FFT y se vuelve a convertir la señal a serie. A continuación, se realiza la ecualización y se demodula la señal para obtener los datos recibidos.

El sistema OFDM simulado utilizará diferentes valores de subportadoras pilotos (N_{pilotos}), diferentes IBO para el HPA, diferentes tipos distribuciones en el canal (Dis) y diferentes tipos de modulaciones (QPSK, 16QAM y 64QAM); estos valores se indican en el análisis de cada figura. La técnica OPS para la reducción de la PAPR se aplica a la señal luego de aplicar el prefijo cíclico y antes de que pase por el HPA. Para comparación, se presentan los resultados cuando se utiliza la técnica CEPOCS (Constellation Extension Projection Onto Convex Sets) (Toapanta, 2017). Se utiliza la técnica CEPOCS ya que obtiene una buena reducción de la PAPR con un costo computacional medio por lo que es un buen punto de comparación.

A. Análisis de las Técnicas de Reducción en términos de BER vs Eb/No

El análisis de los resultados de BER vs Eb/No obtenidos al aplicar las técnicas de reducción OPS y CEPOCS se presentarán de forma gráfica. Se realizaron cien mil iteraciones para obtener estos resultados.

• Canal con Distribución de Rayleigh

Para el análisis de resultados con distribución de Rayleigh se utiliza un PDP (Power Delay Profile), donde a todos los rayos se aplica una distribución de Rayleigh. Este PDP es obtenido de la recomendación ITU-R M.1225 (M.1225, 1997), y se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. PDP DEL CANAL RAYLEIGH

# de Rayos	Retraso relativo (ns)	retraso relativo /50ns	Potencia Promedio (dB)
1	0	0	0
2	100	2	-3.6
3	200	4	-7.2
4	300	6	-10.8
5	500	10	-18.0
6	700	14	-25.2

En la Figura 1 se presenta el BER para un sistema con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8 dB, Dis=1(Rayleigh) y modulación QPSK. En verde se presenta el BER de la señal OFDM sin aplicar ninguna técnica de reducción de PAPR, en azul se presenta el resultado cuando se aplica la técnica CEPOCS y en verde se presenta el BER con la técnica OPS. En la gráfica se puede observar que las curvas están casi sobrepuestas. En este caso se puede determinar que utilizando cualquiera de las dos técnicas no se obtiene una mejora en el BER.

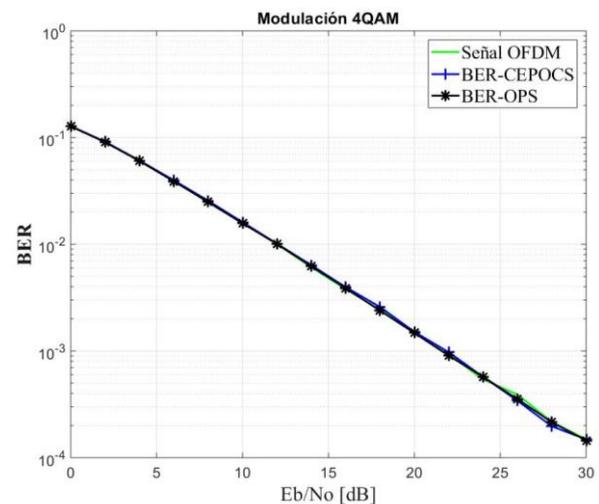


Figura 1. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8 dB, Dis=1(Rayleigh) y modulación QPSK.

La Figura 2 presenta el resultado con modulación QPSK, pero con $N_{\text{pilotos}}=12$. Como se puede observar el comportamiento es similar al de la Figura 1 a pesar de tener más subportadoras piloto.

La Figura 3 muestra el BER de un sistema OFDM para la modulación 16QAM con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=12 dB, Dis=1(Rayleigh). En este caso se puede observar que la técnica OPS es la que mejor BER obtiene. De forma similar la Figura 4 muestra el BER con $N_{\text{pilotos}}=12$, IBO=12 dB, Dis=1(Rayleigh). Se puede observar que en este caso también la técnica OPS es la que mejor BER obtiene. Además, se puede concluir que al aumentar el número de subportadoras piloto la técnica OPS logra mayor reducción de la PAPR y por ende la mejora en el BER es más representativa.

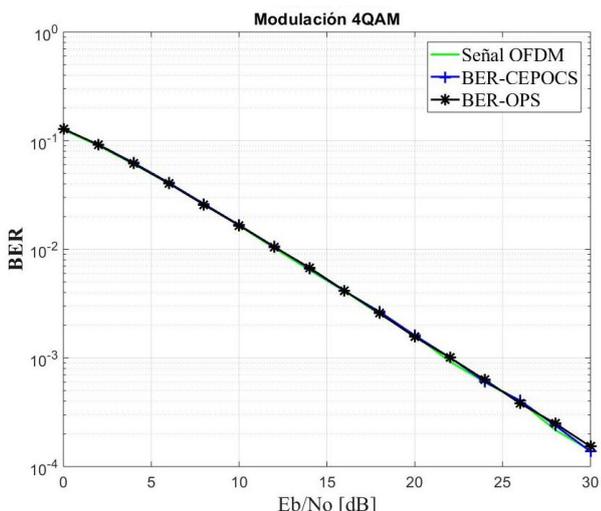


Figura 2. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, IBO=8 dB, Dis=1(Rayleigh) y modulación QPSK.

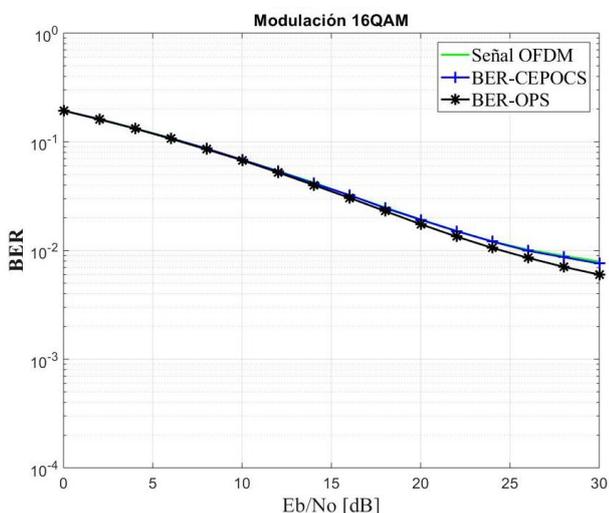


Figura 3. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=12, Dis=1(Rayleigh) y modulación 16QAM.

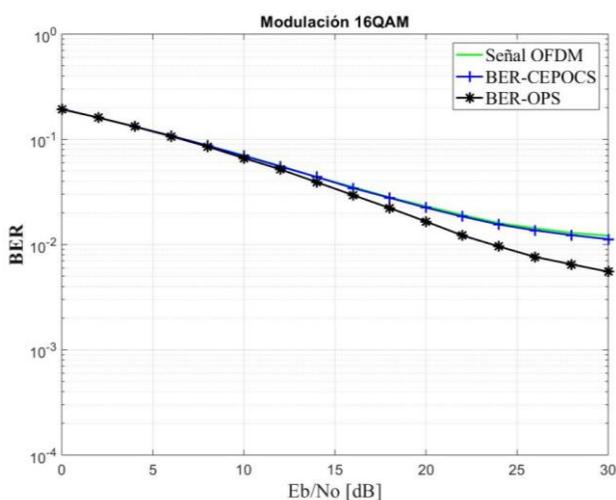


Figura 4. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, IBO=12 dB, Dis=1(Rayleigh) y modulación 16QAM.

- Canal con Distribución de Rician

Para el análisis de resultados con distribución de Rician se crea un PDP, donde el primer rayo es LOS (Line of Sight) por lo que se le aplica distribución de Rician y los restantes son NLOS (Non Light of Sight) y se les aplica distribución de Rayleigh. Este PDP se obtiene de la recomendación ITU-R M.1225 (M.1225, 1997), como se indica en la Tabla 2. El factor de Rice (K) que se considera para la trayectoria LOS es de 3 dB. El canal consiste en 5 trayectorias con los retardos y potencias promedio que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. PDP DEL CANAL RICIAN

# de Rayo	Retraso Relativo (ns)	Retraso relativo /50ns	Potencia Promedio (dB)	Factor Rice k(dB)
1	0	0	0	3
2	60	1	-17.0	-
3	100	2	-18.3	-
4	130	3	-19.1	-
5	250	5	-22.1	-

En la Figura 5 se presenta el BER de un sistema OFDM con modulación QPSK, $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8 dB, Dis=2(Rician). Lo que primero se puede observar es que el BER es mejor cuando se usa un canal Rician comparado con el canal Rayleigh. Esto se da porque el desvanecimiento de tipo Rician es menos severo que el de tipo Rayleigh. El otro resultado que se puede observar es que el BER de las tres curvas mostradas dan un BER similar.

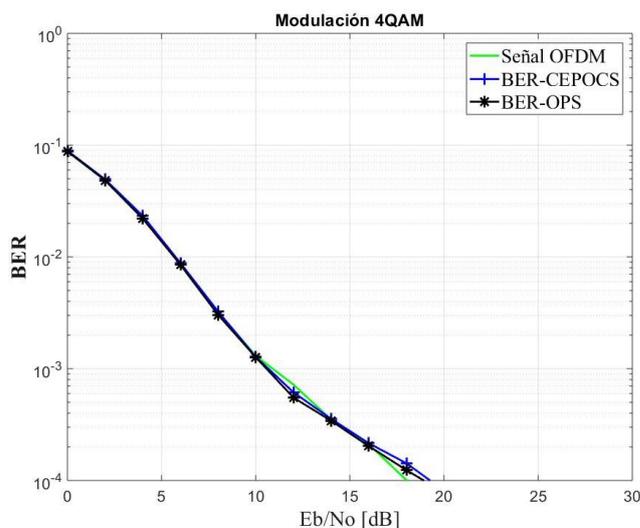


Figura 5. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=8 dB, Dis=2(Rician) y modulación QPSK.

La Figura 6 presenta los resultados cuando el número de pilotos es 12. El comportamiento que se puede observar es similar al de la Figura 5. Se puede concluir que cuando se usa modulación QPSK no se tiene mejora en el BER a pesar de utilizar las técnicas de reducción de la PAPR.

La Figura 7 muestra el BER de un sistema OFDM para la modulación 16QAM con $N_{\text{pilotos}}=4$, IBO=12 dB, Dis=2(Rician). En esta figura se puede observar que usando la técnica OPS con 4 pilotos y modulación 16QAM se consigue una pequeña mejora en el BER comparada con la técnica CEPOCS. Un resultado similar se presenta en la Figura 8 usando 12 pilotos para la técnica OPS. En esta figura se

observa una mejora más importante en el BER comparado con la técnica CEPOCS.

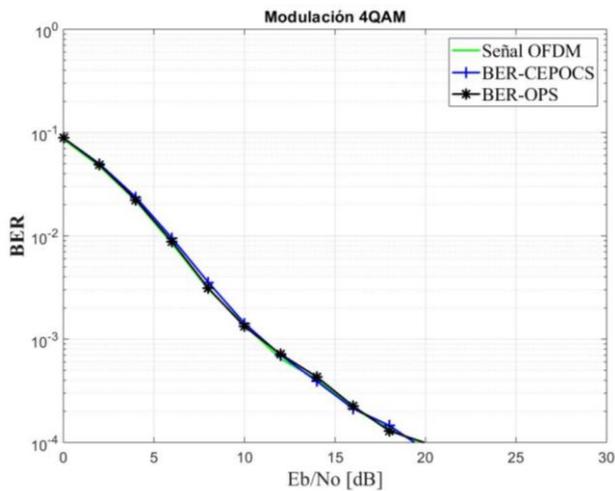


Figura 6. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=8$ dB, $\text{Dis}=2$ (Rician) y modulación QPSK.

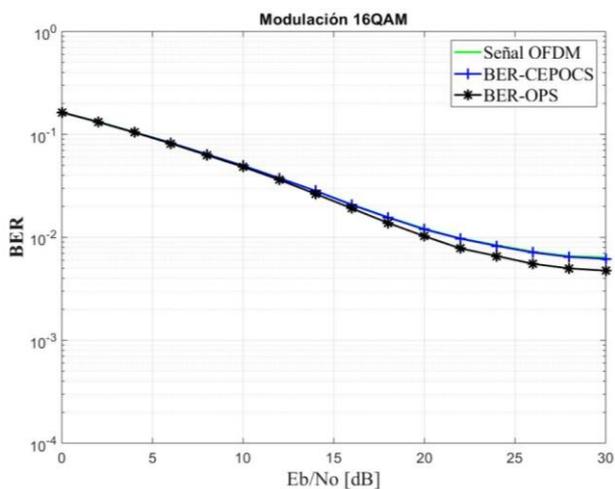


Figura 7. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=12$ dB, $\text{Dis}=2$ (Rician) y modulación 16QAM.

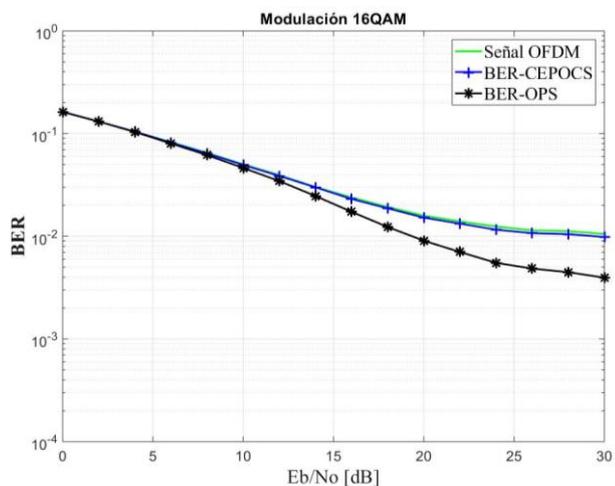


Figura 8. BER vs Eb/No con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=12$ dB, $\text{Dis}=2$ (Rician) y modulación 16QAM.

De los resultados de esta sección se puede concluir que la técnica OPS obtiene mejores resultados en el BER para la

modulación 16QAM. Otro resultado que se puede obtener es que, a mayor número de pilotos utilizados, la técnica OPS obtiene un mejor resultado en el BER. Por otro lado, se pudo observar que en el caso de la modulación QPSK, ninguna de las dos técnicas de reducción de la PAPR pudo obtener una mejora en el BER. Este resultado se da por la mayor robustez que tiene la modulación QPSK ante el ruido e interferencia.

B. Análisis de las Técnicas de Reducción en términos de CCDF

La comparación de los resultados obtenidos del cálculo de la CCDF se presenta mediante una curva que represente los valores de PAPR del símbolo OFDM sin aplicar ninguna técnica de reducción en línea continua (con asteriscos) color cian mientras que las curvas en las que se aplicó las técnicas OPS y CEPOCS se presentarán en línea continua (con cruces) color magenta y rojo, respectivamente.

Debido a que el análisis de CCDF se realiza antes de la aplicación del HPA, no influye el valor del IBO ni el tipo de distribución utilizada en la simulación. Por esta razón se realiza únicamente el análisis para la distribución de Rayleigh y para un solo valor de $\text{IBO}=8$ dB.

La Figura 9 presenta las curvas de CCDF para la modulación QPSK con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$, $\text{Dis}=1$ (Rayleigh). Se puede observar que ambas técnicas reducen la PAPR comparada con la señal original. En este caso, la técnica CEPOCS (color rojo) es la que mejor reducción de la PAPR obtiene mientras la reducción usando la técnica OPS es menor.

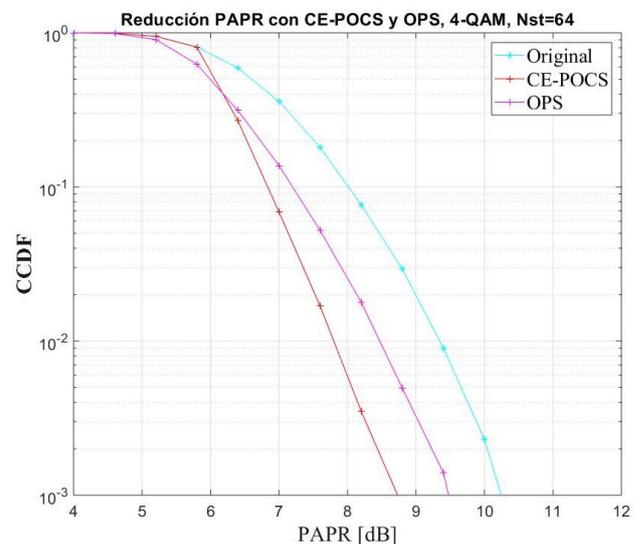


Figura 9. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$ dB y modulación QPSK.

La Figura 10 presenta las curvas de CCDF para la modulación QPSK con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=8$, $\text{Dis}=1$ (Rayleigh). Se puede observar que ambas técnicas reducen la PAPR comparada con la señal original. Sin embargo, el resultado es inverso comparado con la figura anterior. Cuando se tienen 12 pilotos, la técnica OPS (magenta) es la que mejor reducción de la PAPR obtiene. Este resultado se da porque al tener más subportadoras piloto, la técnica tiene más combinaciones de pilotos que pueden dar una mejor reducción de la PAPR.

La Figura 11 y Figura 12 presentan las curvas de CCDF de un sistema para la modulación 16QAM con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$, $\text{Dis}=1$ (Rayleigh) y $N_{\text{pilotos}}=12$, respectivamente. Se puede observar que en ambas figuras la reducción de la PAPR obtenida por la técnica CEPOCS es pequeña. Este resultado se da porque la técnica CEPOCS no es muy eficiente cuando se utiliza las modulaciones 16QAM y 64QAM. Por otro lado, se puede observar que cuando se usan 4 pilotos la técnica OPS obtiene una mediana reducción de la PAPR. Para el caso cuando se utilizan 12 pilotos, la técnica obtiene una muy buena reducción de la PAPR.

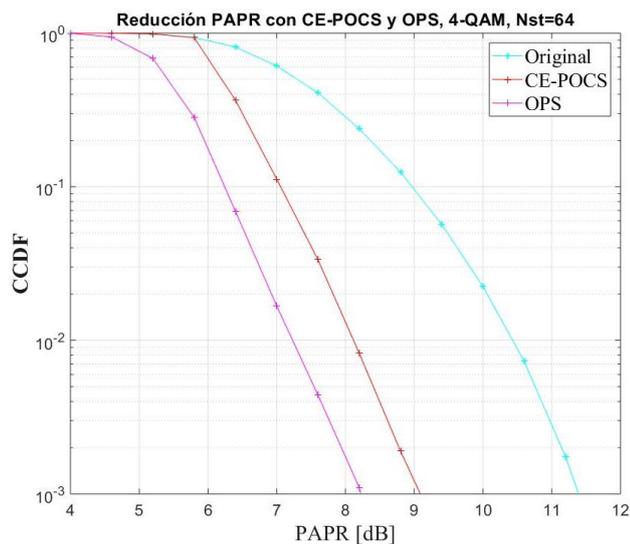


Figura 10. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=8$ dB y modulación QPSK.

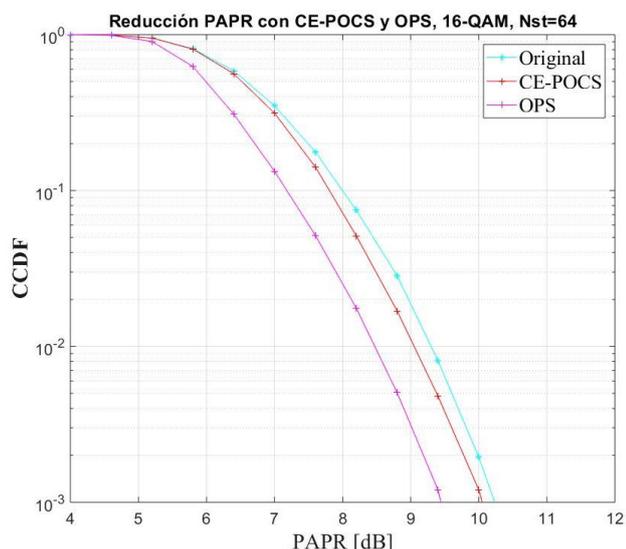


Figura 11. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=4$, $\text{IBO}=8$ dB y modulación 16QAM.

Analizando todas las gráficas de la CCDF se concluye que solo en el primer caso con la modulación QPSK la técnica CEPOCS tiene más reducción de PAPR que la técnica OPS. En el resto de las modulaciones siempre se tiene mejores resultados aplicando la técnica OPS, siendo mayor la reducción de PAPR cuando se tiene 12 subportadoras piloto.

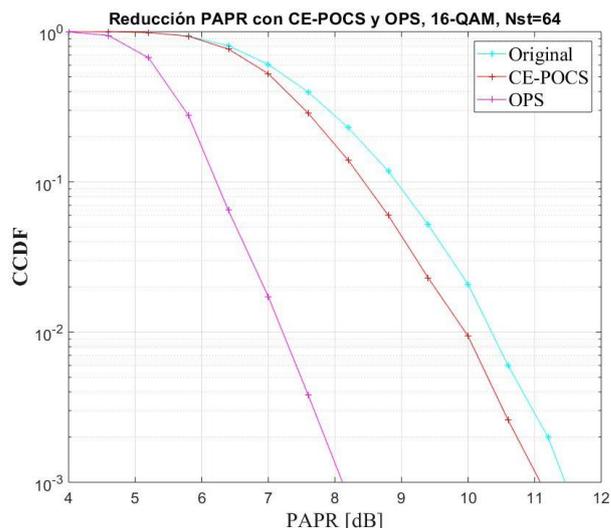


Figura 12. CCDF con $N_{\text{pilotos}}=12$, $\text{IBO}=8$ dB y modulación 16QAM.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentaron los resultados de la simulación de un sistema OFDM utilizando la técnica OPS para la reducción de la PAPR usando un canal con distribución de Nakagami. De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que a medida que el número de pilotos en un sistema OFDM aumenta se tienen mejores resultados de reducción de la PAPR usando la técnica OPS. Sin embargo, hay que considerar que a mayor número de pilotos la eficiencia espectral del sistema OFDM disminuye. Por esta razón es muy importante seleccionar adecuadamente el número de pilotos para obtener una reducción en la PAPR sin perjudicar substancialmente la eficiencia espectral. Otra conclusión que se pudo obtener es que el uso de la técnica OPS mejora la BER cuando se utilizan las modulaciones 16QAM y 64QAM, independientemente del número de pilotos que se consideren.

Utilizando la técnica CEPOCS se tienen mejores resultados de reducción de la PAPR en términos de CCDF para sistemas con modulación QPSK. Para sistemas con modulaciones más altas, 16QAM y 64QAM, la reducción es mínima. Esto debido a que los puntos de la constelación de QPSK tiene mayor posibilidad de estar dentro de las restricciones de la técnica, mientras que en las otras modulaciones gran parte de los puntos están fuera del límite permitido.

De las simulaciones del BER vs E_b/N_0 se pudo apreciar que el BER es mejor cuando se utiliza un canal de Rician ya que este desvanecimiento es menos severo comparado con uno de tipo Rayleigh. Ambos tipos de desvanecimiento fueron obtenidos a partir de una distribución de Nakagami lo que demuestra la versatilidad de utilizar esta distribución para una simulación de un canal inalámbrico.

REFERENCIAS

Jenny E. Acuña Molina, M. José Terán Jaramillo. (2017). *Simulación en Matlab de los métodos de acceso OFDMA y SC-FDMA para la tecnología LTE sobre un canal inalámbrico AWGN y un canal multitrayectoria con*

- distribución Nakagami. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17385>
- M. J. Fernandez-Getino Garcia, O. Edfors and J. M. Paez-Borralló. (Jan, 2006). Peak power reduction for OFDM systems with orthogonal pilot sequences. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, 47-51.
<https://doi.org/10.1109/TWC.2006.1576525>
- Leonardo Jiménez, Joaquin Parrado, Carlos Quiza, Carlos Suárez. (s.f.). *Modulación multiportadora ortogonal*. Obtenido de <file:///C:/Users/DELL/Downloads/Dialnet-ModulacionMultiportadoraOFDM-4797263.pdf>
- M.1225, R. I.-R. (1997). GUIDELINES FOR EVALUATION OF RADIO TRANSMISSION TECHNOLOGIES FOR IMT-2000.
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-I!!PDF-E.pdf
- Mohan Seshadri, Yasir. Rahmatallah. (Fourth Quarter 2013). Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey and Taxonomy. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 15, no. 4, 1567–1592.
<https://doi.org/10.1109/SURV.2013.021313.00164>
- Paredes, D. M. (2014). *Algoritmos para la reducción de picos de potencia en los sistemas OFDM*. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20549/tesis_martha_cecilia_pa-redes_paredes_2014.pdf. Madrid, España
- Ramírez, G. L. (2015). *Análisis de un sistema MB-OFDM-UWB en canales Nakagami-m con modulación adaptativa M-PSK siguiendo la propuesta IEEE 802.15.3a*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/12335>. Valencia, España
- Toapanta, L. A. (2017). *Simulación de la técnica Constellation Extension de reducción de la PAPR de los sistemas OFDM*. Quito. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17071>

BIOGRAFÍAS



María Mercedes Peñaherrera Murillo, nació en La Maná-Cotopaxi el 24 de septiembre de 1993, sus estudios secundarios fueron realizados en el Instituto Tecnológico Superior La Maná donde obtuvo el título de bachiller en Físico-Matemático. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional en la carrera de ingeniería en Electrónica y

Telecomunicaciones.



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.