



## Estudio y simulación de técnicas para reducir la PAPR en HACO-OFDM

### Study and simulation of PAPR reduction techniques in HACO-OFDM

**Evelyn Nathaly Bermeo Granda**

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador  
evelyn-150@hotmail.com

**Diego Javier Reinoso Chisaguano**

Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador  
diego.reinoso@epn.edu.ec  
ORCID: 0000-0003-0854-1250

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.09.17.005>

Recibido: Octubre 20, 2020

Aceptado: Enero 15, 2021

**Resumen:** Los sistemas de comunicación a través de luz visible (*Visible Light Communications, VLC*) se han propuesto recientemente como una nueva forma de comunicación inalámbrica. Las ventajas de VLC son que usa el espectro de luz visible el cual no requiere licenciamiento específico, además de proveer mayor tasa de transmisión de datos, proteger al usuario de posible espionaje y no sufrir interferencias del saturado espectro electromagnético. Una de las principales técnicas usadas para comunicaciones a través de luz visible es HACO-OFDM (*Hybrid Asymmetrically Clipped Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que proporciona una alta eficiencia espectral. Sin, embargo uno de sus principales problemas es su alta PAPR (*Peak-to-Average-Power Ratio*). Este artículo presenta un estudio y simulación de las técnicas *Clipping*, *CE-POCS* (*Constellation Extension – Project Onto Convex Sets*), *OPS* (*Orthogonal Pilot Sequences*) y *SAP* (*Simple Amplitude Predistortion*) para reducir la PAPR en un sistema HACO-OFDM. Los resultados de las simulaciones muestran que la técnica SAP es la que mejor resultados da en la reducción de la PAPR sin causar una degradación significativa del BER (*Bit Error Rate*).

**Palabras clave:** PAPR, HACO-OFDM, CE-POCS, OPS, SAP.

**Abstract:** VLC (Visible Light Communications) have been recently proposed as a new form of wireless communications. The VLC advantages are its usage of the spectrum of visible light which is not licensed; additionally, it gives high data rates, protects the user against espionage and does not suffer from interference of the electromagnetic spectrum. One of the main techniques used in VLC is HACO-OFDM (Hybrid Asymmetrically Clipped Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which offers a high spectral efficiency. However, one of its main problems is its high PAPR (Peak-to-Average-Power Ratio). This article presents a study and simulation of Clipping, CE-POCS (Constellation Extension – Project Onto Convex Sets), OPS (Orthogonal Pilot Sequences) and SAP (Simple Amplitude Predistortion) techniques for the reduction of the PAPR in HACO-OFDM

systems. The simulation results show that the SAP technique gives the best results in PAPR reduction without significant degradation in the BER (Bit Error Rate).

**Keywords:** PAPR, HACO-OFDM, CE-POCS, OPS, SAP.

## 1. Introducción

La necesidad del desarrollo de nuevos sistemas de comunicación que ofrezcan mayor velocidad y seguridad ha llevado a investigadores a explorar nuevas áreas y proponer los sistemas de comunicación a través de luz visible (*Visible Light Communications*, VLC) como una nueva forma de comunicación inalámbrica. Es así como nace Li-Fi (*Light Fidelity*) y se impone como una nueva tecnología complementaria a Wi-Fi (*Wireless Fidelity*). Hoy en día el espectro de radio frecuencia se encuentra saturado, además, las comunicaciones en radiofrecuencia enfrentan problemas de licenciamiento, seguridad, velocidad, entre otros. Li-Fi ofrece ventajas sobre Wi-Fi como el uso del espectro visible el cual no requiere licenciamiento específico, además de proveer mayor tasa de transmisión de datos, proteger al usuario de posible espionaje y no sufrir interferencias del saturado espectro electromagnético [1,2].

Para realizar la transmisión de datos en un sistema de comunicación óptico inalámbrico se implementa la modulación IM/DD (*Intense Modulation/Direct Detection*). La modulación de los datos se puede realizar con diferentes técnicas, para esto se debe tener en cuenta que la técnica seleccionada no debe sufrir de ISI (*Inter Symbol Interference*) de lo contrario se produciría una disminución en la tasa de transmisión. Los sistemas multiportadora presentan robustez frente al ISI debido a que la duración del símbolo es mucho más grande que el retardo RMS (*Root Mean Square*) del canal. Es por ello que los sistemas de modulación M-QAM (*M-Quadrature Amplitude Modulation*) y OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), pueden proporcionar altas tasas de transmisión de datos [3].

Las diferentes técnicas de multiplexación OFDM usadas para comunicaciones ópticas varían de cierto modo de las que se usan en RF (*Radio Frequency*), ya que, las señales VLC OFDM en el dominio del tiempo deben ser reales y positivas. Debido a esto, varias formas de OFDM se han desarrollado para comunicaciones ópticas una de ellas es HACO-OFDM (*Hybrid Asymmetrically Clipped Optical - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [2,4].

Como ya se ha mencionado, OFDM posee algunas ventajas, pero un problema muy conocido que aqueja a este tipo de multiplexación es la alta PAPR (*Peak-to-Average-Power Ratio*) que compromete el desempeño de OFDM y lo hace más susceptible a distorsiones no lineales. Los altos niveles de PAPR en un sistema OFDM producen saturación en los amplificadores, lo que provoca radiación fuera de banda que afecta a los canales adyacentes. También se produce radiación dentro de banda lo que provoca atenuación y desplazamiento de la señal incrementando la BER (*Bit Error Rate*). Para evitar estos problemas, la señal OFDM debe ser manipulada antes de pasar por el amplificador de potencia [4].

Las técnicas para reducción de la PAPR en comunicaciones ópticas no han sido ampliamente exploradas, es por ello que este artículo realiza un análisis de las técnicas para reducción de la PAPR basándose en algunas existentes para RF como: *Clipping*, CE-POCS (*Constellation Extension – Project Onto Convex Sets*), OPS (*Orthogonal Pilot Sequences*) y SAP (*Simple Amplitude Predistortion*) tomando en cuenta las consideraciones respectivas para aplicarlas en sistemas VLC. Una simulación en Matlab es implementada para analizar el efecto de estas técnicas sobre algunos parámetros de la señal.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta el estado del arte de las técnicas para reducción de la PAPR en sistemas HACO-OFDM. Luego, en la Sección 3 se presenta una descripción del sistema HACO-OFDM y de las técnicas de reducción de la PAPR que se utilizarán para reducir la PAPR de la señal que genera. La Sección 4 presenta los resultados de la simulación en Matlab de las técnicas de reducción de la PAPR. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones alcanzadas con este trabajo.

## 2. Estado del arte

Las técnicas para reducción de la PAPR para un sistema HACO-OFDM de comunicación óptica no han sido ampliamente exploradas. En [5], un esquema de reducción de la PAPR para un sistema HACO-OFDM usando la técnica PTS (*Partial Transmit Sequence*) es presentado. Este esquema presenta un transmisor que realiza la

reducción de la PAPR sin requerir la transmisión de información adicional, lo cual es una desventaja de la técnica PTS común usada en OFDM de RF. A pesar de la ventaja de no requerir la transmisión de información adicional, la técnica propuesta en [5] requiere de un receptor más complejo que utiliza un detector ML (*Maximal Likelihood*), el cual tiene un costo computacional alto. Los resultados muestran que el esquema propuesto puede reducir la PAPR, sin embargo, no hay resultados sobre el efecto en el espectro de la señal o la BER del sistema. En [6] se presenta una técnica basada en inyección de tonos para reducir la PAPR de un sistema HACO-OFDM. El esquema propuesto es de alta complejidad y se basa en el uso de *Compressed Sensing*. Los resultados muestran que la técnica obtiene una buena reducción de la PAPR sin perjudicar la BER. En [7] se utiliza el método de *Clipping* y *SLM (Selected Mapping)* para reducir la PAPR en un sistema HACO-OFDM. Primero se realiza el recorte de la señal usando *Clipping* y luego se aplica *SLM* para reducir la PAPR. Los resultados muestran una reducción de la PAPR sin perjudicar la BER.

De la revisión de literatura realiza se puede concluir que no existen trabajos que estudien las técnicas CE-POCS, OPS y SAP para la reducción de la PAPR en sistemas HACO-OFDM. Cabe recalcar que estas técnicas fueron creadas para reducir la PAPR de sistemas OFDM de RF y en este trabajo se las adapta para ser utilizadas en un sistema HACO-OFDM.

### 3. Materiales y métodos

HACO-OFDM es una técnica de multiplexación híbrida que utiliza ACO-OFDM en las subportadoras impares y PAM-DMT en las subportadoras pares para mejorar la eficiencia espectral. El recorte asimétrico que se realiza en la multiplexación ACO-OFDM en los símbolos impares solo distorsiona las subportadoras pares. En el receptor, los símbolos ACO-OFDM se demultiplexan primero considerando solo las subportadoras impares y luego se vuelven a multiplexar para estimar la distorsión ACO-OFDM en las subportadoras pares. Esto permite demodular los símbolos PAM-DMT en las subportadoras [8]. La eficiencia espectral que se tiene en HACO-OFDM es idéntico al de DCO-OFDM, sin embargo, PAM-DMT utiliza la modulación M-PAM en la mitad de las subportadoras. Se debe tomar en cuenta que ambos esquemas utilizan diferentes órdenes de modulación por lo que puede ocasionar problemas al momento de asignar la potencia [9]. En la Figura 1 se presenta un diagrama de bloques del transmisor y receptor para el esquema HACO-OFDM.

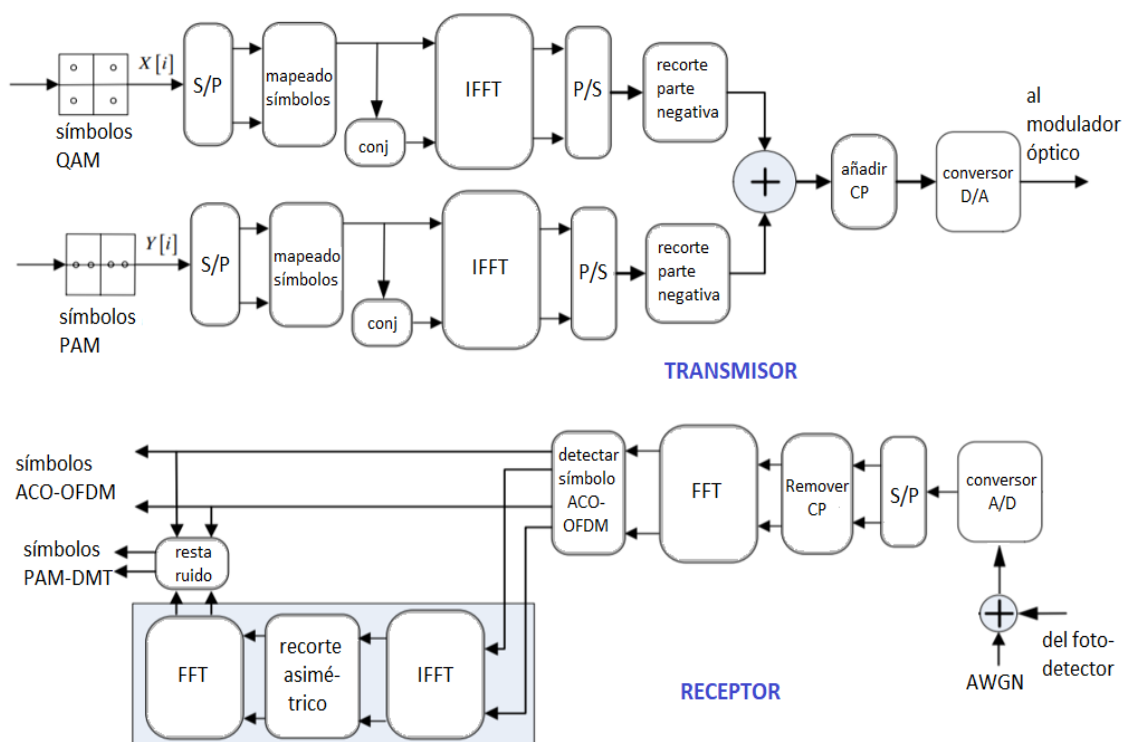


Figura 1. Diagrama de bloques para el esquema HACO-OFDM [8].

Para esta multiplexación, se generan dos bloques separados de la señal ACO-OFDM de duración  $T$  que seguidamente se combinan para transmitir como un solo bloque. Para generar el primer bloque, los bits de datos en la entrada son mapeados usando un esquema de mapeo como M-QAM para obtener  $M=N/4$  símbolos de entrada que modulan las subportadoras impares ( $N$  representa las subportadoras totales disponibles). El segundo flujo de datos es mapeado usando una constelación 1D (Una-dimensión) como M-PAM lo que genera  $M-1$  símbolos PAM que van a modular la parte imaginaria de cada subportadora par.

### 3.1. Técnicas de reducción de la PAPR adaptadas para HACO-OFDM

La PAPR para una secuencia en el dominio del tiempo  $x = \{x[n]\}$  se define como el ratio entre la potencia máxima instantánea y su potencia promedio y se expresa por

$$\chi = PAPR\{s\} = \frac{\max(|x|^2)}{E\{|x|^2\}} \quad (1)$$

donde  $\max(\cdot)$  es el valor máximo de potencia de la señal OFDM y  $E\{\cdot\}$  representa el valor esperado [10].

Existen varias técnicas desarrolladas para reducir la PAPR en OFDM para sistemas RF, sin embargo, el campo de estudio de técnicas de reducción de la PAPR para sistemas ópticos no está explotado. Por ello, en esta sección se presentan algunos métodos de reducción de la PAPR para sistemas de RF de los cuales se tomarán cuatro técnicas como referencia para aplicarlas a los sistemas VLC, estas técnicas son *Clipping*, CE-POCS, OPS y SAP. A continuación, se presenta una base teórica de las técnicas de reducción de la PAPR usadas y cómo éstas se adaptaron para su uso en HACO-OFDM.

#### 3.1.1. Clipping

La técnica de *Clipping* es la más simple para reducir la PAPR pero puede añadir distorsión dentro y fuera de banda lo que produce que se destruya la ortogonalidad de las subportadoras [11]. Implementar una etapa de filtrado después del recorte puede eliminar la distorsión dentro de banda. La distorsión dentro de banda produce degradación de la BER que no puede ser mitigado por una etapa de filtrado, en cambio, la distorsión fuera de banda provoca una disminución en la eficiencia espectral.

La etapa de filtrado puede reducir los picos en el espectro de frecuencia, pero no garantiza que no vuelvan a aparecer posteriormente [12] y [13]. Para aplicar el método de *Clipping*, las muestras de los valores reales  $x$  se recortan hasta un nivel  $A$  predeterminado como se muestra a continuación

$$y = \begin{cases} -A, & x < -A \\ x, & -A \leq x \leq A \\ A, & x > A \end{cases} \quad (2)$$

En varios trabajos se utiliza un nivel de recorte o CR (*Clipping Ratio*) que se define como

$$CR = \frac{A}{\sigma} \quad (3)$$

donde  $\sigma$  es el valor RMS de la señal OFDM. Para señales OFDM con  $N$  subportadoras en banda base y pasa banda se tiene que  $\sigma = \sqrt{N}$  y  $\sigma = 1/\sqrt{N}$ , respectivamente.

El uso de la técnica de *Clipping* en HACO-OFDM es simple ya que solo se debe aplicar luego de que las señales resultantes del bloque ACO-OFDM y PAM-DMT se suman. A la señal sumada resultante se le aplica el recorte en base al nivel de recorte seleccionado y definido en (3).

### 3.1.2. CE-POCS

La técnica ACE fue desarrollada en [14] y se expone como un problema de optimización. ACE utiliza constelaciones no objetivas para reducir los picos de potencia al codificar de manera adecuada los símbolos de datos [15]. Matemáticamente el problema de minimización de la PAPR utilizando ACE se define como:

$$\min_{\mathbf{C} \in \mathcal{C}} \max_n |\bar{x}[n]|^2. \quad (4)$$

Se tiene que  $\mathbf{C} = [C(0), \dots, C(N-1)]$  es un vector  $1 \times N$  que almacena los valores de extensión de la constelación,  $C$  representa la zona de extensión permitida y  $\bar{x}[n]$  es el símbolo OFDM extendido definido como:

$$\begin{aligned} \bar{x}[n] &= x[n] + c[n] \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} (X_k + C_k) e^{j2\pi kn/NL} \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $0 \leq n \leq N-1$ ,  $X_k$  es el símbolo OFDM original y  $C_k$  es el factor de extensión de la  $k$ -ésima subportadora.

POCS es un método práctico que presenta buenos resultados teóricos pero una desventaja es que converge lentamente. Este método realiza la minimización al recortar los picos de la señal que superen cierto umbral. El algoritmo sigue los siguientes pasos:

1. Se empieza con los símbolos de datos  $\mathbf{X}$  de un bloque dado y luego se aplica la IFFT para obtener  $x[n]$ .
2. Realizar el recorte en caso de que  $|x[n]| \geq A$  para así obtener

$$\bar{x}[n] = \begin{cases} x[n], & |x[n]| \leq A \\ Ae^{j\theta[n]}, & |x[n]| > A \end{cases} \quad (6)$$

3. donde  $A$  es el umbral de recorte y  $x[n]$  se define como

$$x[n] = |x[n]|e^{j\theta[n]} \quad (7)$$

4. Se aplica la FFT a  $\bar{\mathbf{x}}$  para obtener el vector  $\bar{\mathbf{X}}$ .
5. Se debe cumplir todas las restricciones ACE que se han establecido para  $\bar{\mathbf{X}}$ . Para ello se debe reestablecer los puntos interiores a sus valores originales mientras se proyecta los puntos exteriores en la región que tenga un margen mayor.
6. Se debe volver al paso 1 hasta que no exista puntos que se deban cortar o hasta que la PAPR se haya minimizado.

La Ecuación (6) se puede expresar también como:

$$\bar{x}[n] = x[n] + c_{clip}[n] \quad (8)$$

donde  $c_{clip}[n]$  representa la parte que se ha recortado de la señal y se expresa como

$$c_{clip}[n] = \begin{cases} 0, & |x[n]| \leq A \\ A - |x[n]|e^{j\theta[n]}, & |x[n]| > A \end{cases} \quad (9)$$

La aplicación de la técnica CE-POCS es más compleja ya que no puede aplicarse luego de que las señales de los bloques ACO-OFDM y PAM-DMT se sumen, sino que debe aplicarse a la señal de cada uno de los dos bloques por separado. Entonces, la técnica CE-POCS se aplica después de la IFFT de cada uno de los bloques. Además,

hay que tomar en cuenta que cada uno de los bloques utiliza una modulación diferente. Mientras el bloque ACO-OFDM utiliza modulación M-QAM, el bloque PAM-DMT utiliza modulación M-PAM. Por esta razón, las condiciones ACE aplicadas en cada bloque son diferentes. Para el caso del bloque ACO-OFDM las condiciones ACE aplicadas son las mismas que en [14] y un ejemplo para una modulación 4-QAM se puede observar en la Figura 2.a. Para el caso de la modulación M-PAM se definió que solo los puntos externos de la constelación puedan moverse de forma vertical hacia arriba o hacia abajo. La Figura 2.b muestra cómo se podrían mover los puntos externos para el caso de 4-PAM.

### 3.1.3. OPS

Para emplear la técnica con secuencias piloto, propuesta inicialmente en [16], se considera que el  $\ell$ -ésimo símbolo consiste de  $N$  subportadoras, donde se tiene un conjunto de subportadoras  $Y$  con cardinalidad  $N_p = |Y|$  que llevarán un símbolo piloto. Entonces, los símbolos transmitidos se definen como:

$$S^\ell(k) = \begin{cases} P^\ell(k), & k \in Y \\ X^\ell(k), & k \notin Y \end{cases} \quad (10)$$

donde  $P^\ell(k)$  y  $X^\ell(k)$ , representan los pilotos y los símbolos de datos transmitidos en la  $k$ -ésima subportadora. Los símbolos transmitidos en forma discreta se expresan como:  $s^\ell[n] = x^\ell[n] + p^\ell[n]$ . Los vectores  $\mathbf{X}^\ell$  y  $\mathbf{P}^\ell$   $N \times 1$  en el dominio de la frecuencia se expresan como:

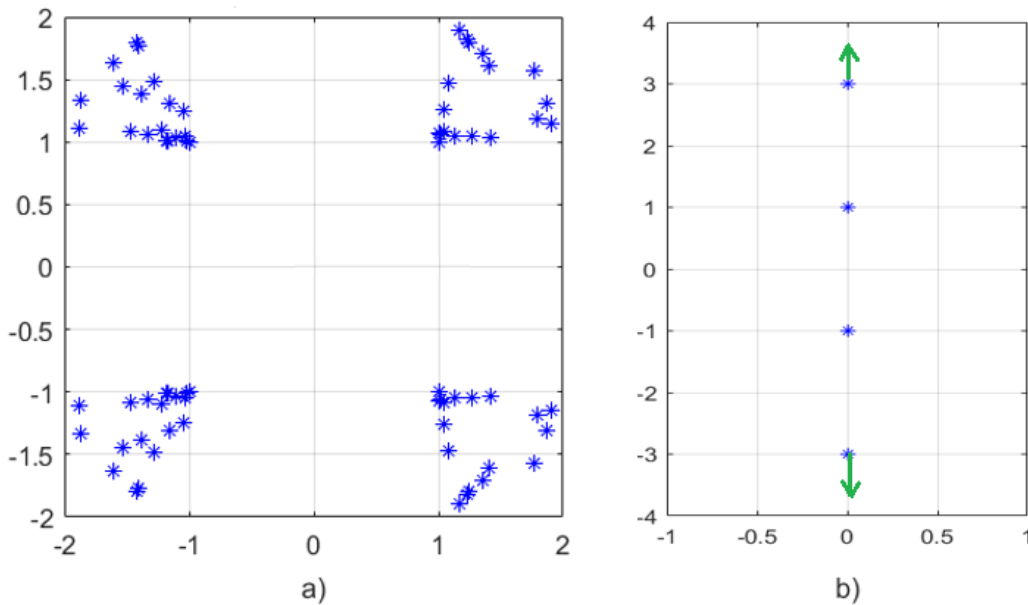


Figura 2. Ejemplos de extensión de los puntos de la constelación usando la técnica CE-POCS: a) 4-QAM, b) 4-PAM.

$$\mathbf{X}^\ell(k) = \begin{cases} 0, & k \in Y \\ X^\ell(k), & k \notin Y \end{cases} \quad (11)$$

$$\mathbf{P}^\ell(k) = \begin{cases} P^\ell(k), & k \in Y \\ 0, & k \notin Y \end{cases} \quad (12)$$

La técnica OPS tiene  $M$  secuencias piloto que permiten reducir la complejidad y mantener la información adicional requerida al mínimo. La secuencia piloto a transmitirse para el  $\ell$ -ésimo símbolo OFDM será aquella que proporcione el menor valor de PAPR del conjunto [16].

Se tiene que cada elemento del conjunto  $\mathbf{P}^\mu$ , donde  $0 < \mu \leq M$ , es un vector  $N \times 1$  en el dominio de la frecuencia.  $\mathbf{P}^\mu(k)$  representa el valor piloto en  $k \in Y$  para la  $\mu$ -ésima secuencia piloto y se expresa como:

$$\mathbf{P}^\mu(k) = \begin{cases} P^\mu(k), & k \in Y \\ 0, & k \notin Y \end{cases} \quad (13)$$

Los elementos del conjunto se eligen de tal manera que sean ortogonales para poder aplicar la técnica OPS. Para ello, se debe cumplir la condición de ortogonalidad expresada como:

$$\langle \mathbf{P}^\mu, \mathbf{P}^\lambda \rangle = 0 \quad \mu \neq \lambda \quad \mu, \lambda = 1, \dots, M \quad (14)$$

donde el término  $\langle ., . \rangle$  representa el producto escalar. El valor de  $M$  está limitado a  $M \leq N_p$  debido a que se debe diseñar  $M$  secuencias ortogonales de longitud  $N_p$ . Para desarrollar la técnica OPS, se va a usar las secuencias Walsh-Hadamard. Estas secuencias son ortogonales y tienen valores de -1 o +1 donde cada función Walsh tiene un valor de secuencia único [17].

La técnica OPS para HACO-OFDM se aplica en el bloque de *mapping* antes de la IFFT en cada uno de los bloques ACO-OFDM y PAM-DMT. La inserción de pilotos se realiza cada 8 o 4 subportadoras de datos con la finalidad de analizar los resultados obtenidos luego de ubicar los pilotos de estas dos formas, ya que, para sistemas VLC no se ha establecido aún en la teoría una forma de ubicar los pilotos. La Figura 3.a muestra la ubicación de los pilotos para ACO-OFDM y PAM-DMT cada 8 subportadoras de datos. Las posiciones de los pilotos para PAM-DMT varían ya que se tiene 63 subportadoras. Para cumplir con la inserción de un piloto cada 8 subportadoras de datos en el bloque PAM, se debe recorrer una posición a la izquierda por lo que se tendría una subportadora *null* menos en la parte central del símbolo PAM. La primera posición se reserva para DC. De forma similar en la Figura 3.b se observa cómo se insertan los pilotos cada 4 subportadoras de datos.

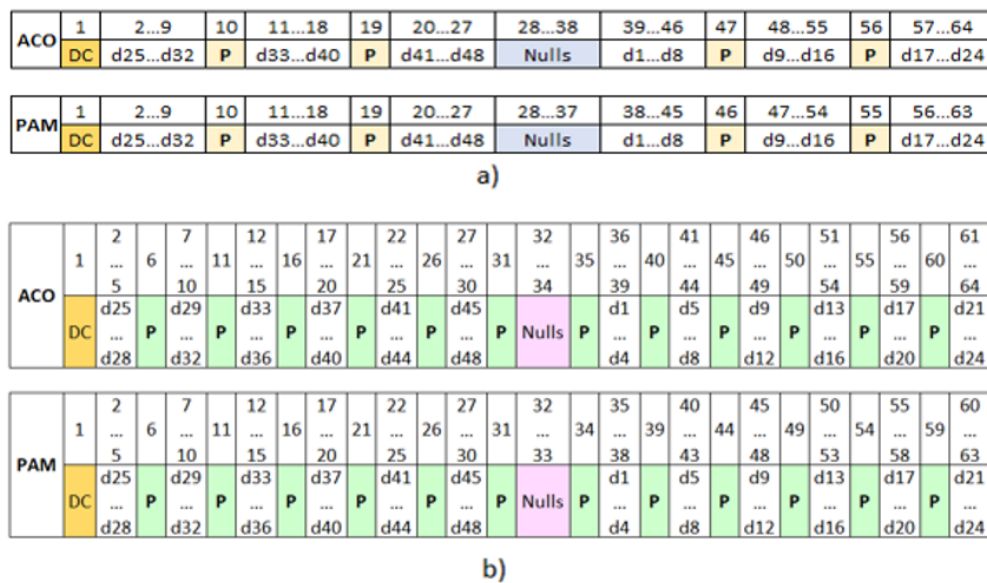


Figura 3. Ubicación de pilotos cada: a) 8 subportadoras de datos, b) 4 subportadoras de datos.

### 3.1.4. SAP

En los trabajos [18] y [19] se propone el uso de una métrica para escoger los símbolos complejos que se deben extender en el dominio de la frecuencia. El algoritmo tiene como base la predistorsión de un subconjunto de cada bloque en los símbolos de entrada. A la salida de la IDFT o IFFT se mide lo que contribuye cada subportadora a los picos de la señal a través de esta métrica. Para SAP la predistorsión del símbolo se lo realiza en las amplitudes. Para emplear esta técnica, se utiliza un factor de escalamiento  $d_k > 1$  y así poder realizar la predistorsión del símbolo, el subíndice  $k$  representa al conjunto de los símbolos de entrada que se va a predistorsionar. La métrica para SAP se define como:

$$\mu(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n \omega(n) f(n, k) \quad (15)$$

donde  $f(n, k)$  es una función que mide la contribución de entrada del símbolo  $x[k]$  a la IFFT de la muestra de salida  $x[n]$  y  $\omega(n)$  es una función de pesos de  $x[n]$ .  $f(n, k)$  se define como:

$$f(n, k) = -\cos(\varphi_{nk}). \quad (16)$$

La función de pesos  $\omega(n)$  se define como:

$$\omega(n) = |x[n]|^p \quad (17)$$

donde  $p$  es un parámetro que se selecciona apropiadamente. La función  $\cos(\varphi_{nk})$  se expresa como:

$$\cos(\varphi_{nk}) = \frac{\operatorname{Re}\left\{x[n]x^*[k]e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}\right\}}{|x[n]||x[k]|} \quad (18)$$

La métrica final en base a las definiciones anteriores se expresa como:

$$\mu(k) = -\frac{1}{K\sqrt{N}|x[k]|} \sum_{n \in S_K} |x[n]|^{p-1} \operatorname{Re}\left\{x[n]x^*[k]e^{-\frac{j2\pi nk}{N}}\right\} \quad (19)$$

donde  $K$  es el factor de normalización y representa el tamaño del conjunto  $S_K$ . Los elementos de  $S_K$  son los índices de las muestras de salida que superan un umbral de valor  $A$ .

La métrica se calcula para todos los símbolos de entrada del bloque, así los  $L$  símbolos que posean la métrica positiva de mayor valor serán los elegidos para ser predistorsionados con su correspondiente factor de escalamiento  $d_k > 1$ .

SAP utiliza un factor de escalamiento constante denominado  $d_k = \alpha$ , para todo  $k \in S_L$ , que tiene un valor mayor a 1. Para hacer la implementación más simple, se utiliza la misma constante para expandir la parte real e imaginaria de los símbolos  $L$  que van a ser predistorsionados [19].

Los parámetros  $\alpha$  y  $L$  se escogen en base a la mayor reducción promedio de la PAPR dado un umbral  $A$ . Para SAP la métrica se evalúa como en (19) y se obtiene la siguiente ecuación que expresa las muestras a la salida como

$$\bar{x}[n] = x[n] + \frac{\alpha - 1}{\sqrt{N}} \sum_{k \in S_L} x[k] e^{j2\pi nk/N}. \quad (20)$$

La aplicación de la técnica SAP se realiza para HACO-OFDM en cada uno de los bloques por separado y después del bloque de la IFFT. Tanto para la modulación M-QAM como M-PAM, la predistorsión solo se realiza con los símbolos más externos de la constelación.

### 3.2 Simulación en Matlab



La simulación implementada en Matlab del sistema de comunicación HACO-OFDM y de las técnicas de reducción de la PAPR se basó en los códigos propuestos en los trabajos [20], [21] y [22]. Los parámetros utilizados para la simulación del sistema HACO-OFDM con las técnicas de reducción de la PAPR se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Parámetros de la simulación del sistema HACO\_OFDM.

Parámetros de entrada	Valor
# de subportadoras totales $N$	256
# de subportadoras ACO-OFDM que llevan información útil	64
# de subportadoras PAM-DMT que llevan información útil	63
Modulación para ACO	4-QAM
Modulación para PAM	4-PAM
# de subportadoras piloto	4 y 12
# de subportadoras de datos con 4 pilotos y 12 pilotos	48
# de nulls con 4 pilotos	11 para ACO y 10 para PAM
# de nulls con 12 pilotos	3 para ACO y 2 para PAM
Tamaño del prefijo cíclico	36

#### 4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación en Matlab del sistema HACO-OFDM y las técnicas de reducción de la PAPR. Se presentarán las gráficas en términos de CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function*), PSD (*Power Spectral Density*) y BER. Los resultados se analizan a partir de la transmisión de 5000 símbolos. Las simulaciones se realizaron fijando la corriente máxima del amplificador a 0.5 A de acuerdo con la ficha técnica del diodo Golden DRAGON LA W57B. El canal utilizado en el sistema es un canal AWGN.

##### 4.1. Escenario 1: Inserción de 1 piloto cada 8 subportadoras de datos

En este escenario de simulación se inserta 1 piloto cada 8 subportadoras de datos dando como resultado la inserción de 4 pilotos. Debido a que el bloque PAM transmite 63 subportadoras con información útil, la inserción de pilotos y subportadoras de datos se debió modificar a fin de que se pueda insertar un piloto cada 8 subportadoras, por lo que para poder ubicar todos los datos se debió quitar una subportadora *null*.

En la Figura 4 se muestran los resultados de las curvas de reducción de la PAPR de cada técnica para el escenario 1. La técnica que más reduce la PAPR es la de *Clipping*, se puede apreciar que mientras mayor sea el parámetro  $\sigma$ , más se va a reducir la PAPR, esto se debe a que el CR (*Clipping Ratio*) es inversamente proporcional a  $\sigma$  lo que significa que si el valor de  $\sigma$  aumenta el CR disminuye. Para una CCDF de  $10^{-2}$  la reducción de *Clipping* con  $\sigma = 1.75$  es de 3.5 dB. La siguiente técnica que presenta mejores resultados en términos de reducción de la PAPR es SAP. En la gráfica se aprecian 3 curvas en color negro para SAP, donde se observa que la curva con parámetros  $L_a = 10$ ,  $L_p = 10$  y  $dk = 2$ , reduce 0.8 dB, la curva de puntos y estrellas con parámetros  $L_a = 15$ ,  $L_p = 25$  y  $dk = 1.5$  reduce 0.7 dB y la curva de líneas entrecortadas y marcador de diamante reduce 0.6 dB para una CCDF de  $10^{-2}$ . La técnica OPS con 4 pilotos reduce 0.4 dB para una CCDF de  $10^{-2}$ . La curva de color magenta que representa la técnica CE-POCS es la que menos reduce la PAPR para un sistema HACO-OFDM ya que aproximadamente reduce 0.1 dB.

En un sistema OFDM convencional, la técnica CE-POCS presenta gran reducción de la PAPR para una modulación 4-QAM, pero para el sistema HACO-OFDM la técnica CE-POCS presenta resultados casi nulos en cuanto a la reducción de la PAPR para una modulación. Esto se debe a que HACO-OFDM es una técnica híbrida que combina el bloque ACO-OFDM y PAM-DMT por lo que el efecto de la técnica CE-POCS se ve afectado por el bloque PAM ya que, en las gráficas de las constelaciones de PAM, ningún punto de la constelación se extendía lo que perjudica gravemente el desempeño de esta técnica.

La Figura 5 muestra la PSD de la señal original y de las señales con las técnicas de reducción de la PAPR para el escenario 1. La frecuencia de las gráficas para la PSD está normalizada a 1 Hz por subportadora. Se observa que las señales con la técnica *Clipping* producen radiación fuera de banda de alrededor de 10 dB. La señal con la

técnica SAP en color negro con los parámetros  $L_a = 10$ ,  $L_p = 10$  y  $dk = 2$  es la que mejores resultados presenta en cuanto a la reducción de radiación fuera de banda, y su valor oscila alrededor de 0.6 dB. La señal de color amarillo corresponde a la técnica SAP con los parámetros  $L_a = 15$ ,  $L_p = 25$  y  $dk = 1.5$  es la segunda señal que más reduce la radiación fuera de banda. Las demás técnicas de reducción de la PAPR presentan sus colas similares a la señal original por lo que reducen la radiación fuera de banda en valores muy pequeños.

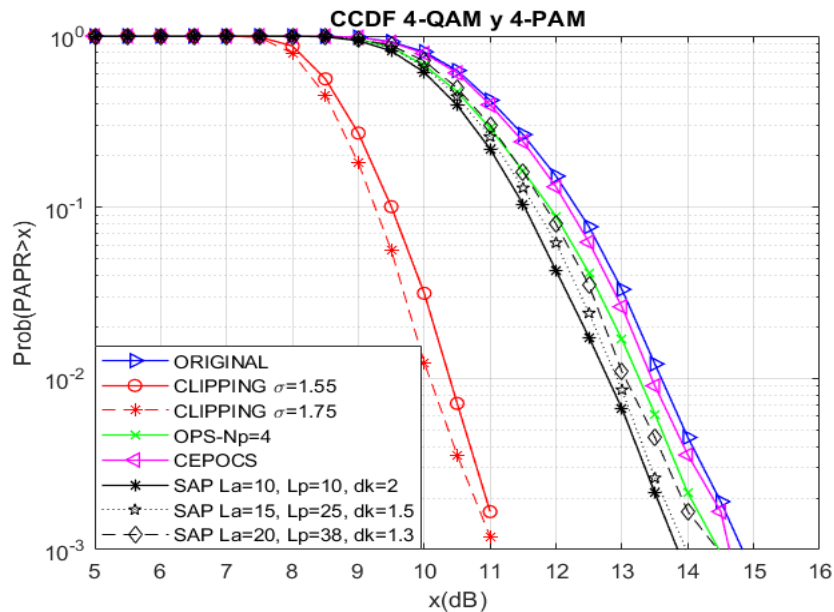


Figura 4. CCDF para HACO-OFDM con 4 pilotos modulación 4-QAM y 4-PAM.

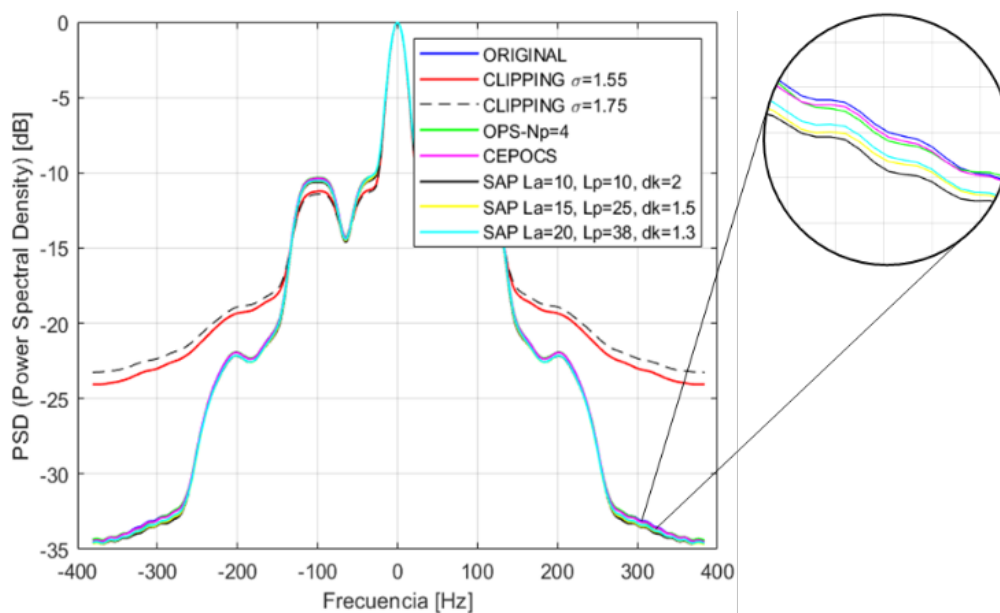


Figura 5. PSD de HACO-OFDM con 4 pilotos, modulación 4-QAM y 4-PAM.

En la Figura 6 se muestran las curvas del BER de las subportadoras impares con 4 pilotos y una modulación 4-QAM y 4-PAM. Se observa que las curvas de color rojo que corresponden a la técnica *Clipping* son las que degradan la BER en gran medida. Las técnicas CE-POCS y OPS siguen la curva de la señal original y su degradación del BER es casi nula, mientras que las curvas de la técnica SAP se distancian un poco de la señal original.

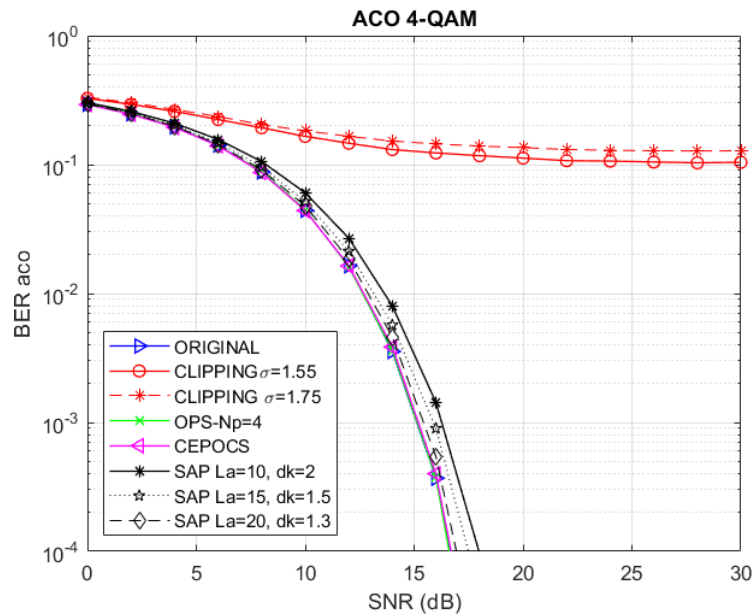


Figura 6. BER de las subportadoras impares con 4 pilotos, modulación 4-QAM y 4-PAM.

En la Figura 7 se muestran las curvas del BER de las subportadoras pares para una modulación Q-PSK y 4-PAM, de igual manera que en las subportadoras impares, se puede observar que las curvas de las señales con *Clipping* degradan en gran medida el BER. La técnica SAP también degrada el BER, pero en pequeños valores y dependerá de los parámetros  $L_a$ ,  $L_p$  y  $dk$ .

#### 4.2. Escenario 2: Inserción de 1 piloto cada 4 subportadoras de datos

En este escenario de simulación se inserta 1 piloto cada 4 subportadoras de datos teniendo 12 pilotos en total. Al igual que en los demás escenarios de simulación, los pilotos y subportadoras de datos se ubican en diferentes posiciones en el bloque PAM.

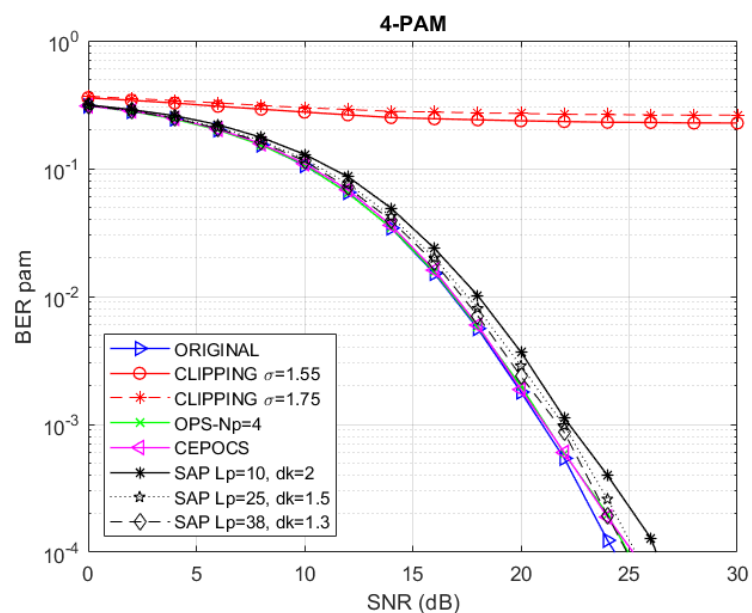


Figura 7. BER de las subportadoras pares con 4 pilotos, modulación 4-QAM y 4-PAM.

En la Figura 8 se presentan las gráficas de reducción de la PAPR donde se observa que *Clipping* es la técnica que presenta mejores resultados. Para esta técnica se presentan dos curvas de color rojo, siendo la curva de líneas entrecortadas y con marcador de asterisco la que más reduce la PAPR ya que el valor de sigma es mayor. Se tiene que para la técnica *Clipping*, la reducción es de 3.5 dB cuando se tiene  $\sigma = 1.75$  para una CCDF de  $10^{-2}$ .

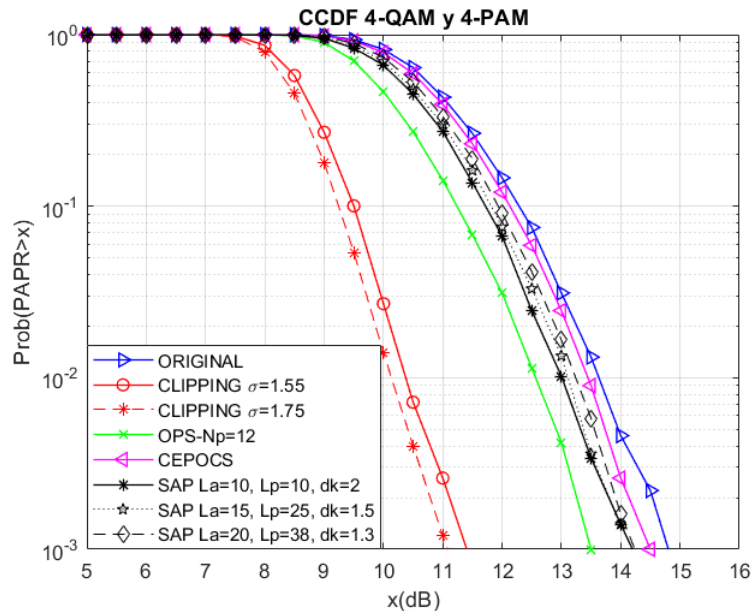


Figura 8. CCDF para HACO-OFDM con 12 pilotos, modulación 4-QAM y 4-PAM.

La siguiente técnica que ofrece mejores resultados es OPS. En la gráfica se muestra que la técnica OPS con 12 pilotos reduce mucho más la PAPR lo que es un comportamiento esperado ya que, mientras más secuencias ortogonales se tiene la reducción de la PAPR es mayor. Para OPS con 12 pilotos la reducción es de 1.1 dB para una CCDF de  $10^{-2}$ . La técnica SAP es la tercera técnica que presenta los mejores resultados, siendo la curva de color negro, línea continua y con parámetros  $L_a = 10$ ,  $L_p = 10$  y  $dk = 2$  la más eficiente ya que reduce la PAPR en 0.6 dB para una CCDF  $10^{-2}$ . CE-POCS es la menos eficiente de las 4 técnicas para HACO-OFDM ya que, se ve afectada por los puntos de la constelación que no se extienden en el bloque PAM-DMT.

Comparando el escenario 1 con el 2 se observa que las curvas de reducción de la PAPR presentan valores muy similares, excepto para la técnica OPS donde se evidencia que cuando se insertan 12 pilotos la reducción aumenta aproximadamente 3 veces con respecto a los valores obtenidos al insertar 4 pilotos.

La Figura 9 muestra la PSD de la señal original y de las señales con las técnicas de reducción de la PAPR. Las señales con la técnica *Clipping* producen radiación fuera de banda de alrededor de 10.3 dB. La técnica SAP es la que presenta mejores resultados en cuanto a la reducción de radiación fuera de banda. La señal en color negro con los parámetros  $L_a = 10$ ,  $L_p = 10$  y  $dk = 2$  es la que más reduce la radiación fuera de banda, y su valor oscila alrededor de 0.6 dB. La señal de color amarillo con los parámetros  $L_a = 15$ ,  $L_p = 25$  y  $dk = 1.5$  y la señal en color verde que representa a la técnica OPS son las segundas señales que más reducen la radiación fuera de banda y en un valor aproximado de 0.52 dB. La señal de color cyan con parámetros  $L_a = 20$ ,  $L_p = 38$  y  $dk = 1.3$  tiene un valor cercano a las señales de color amarillo y verde. La técnica CE-POCS es la que reduce la radiación fuera de banda en menor medida.

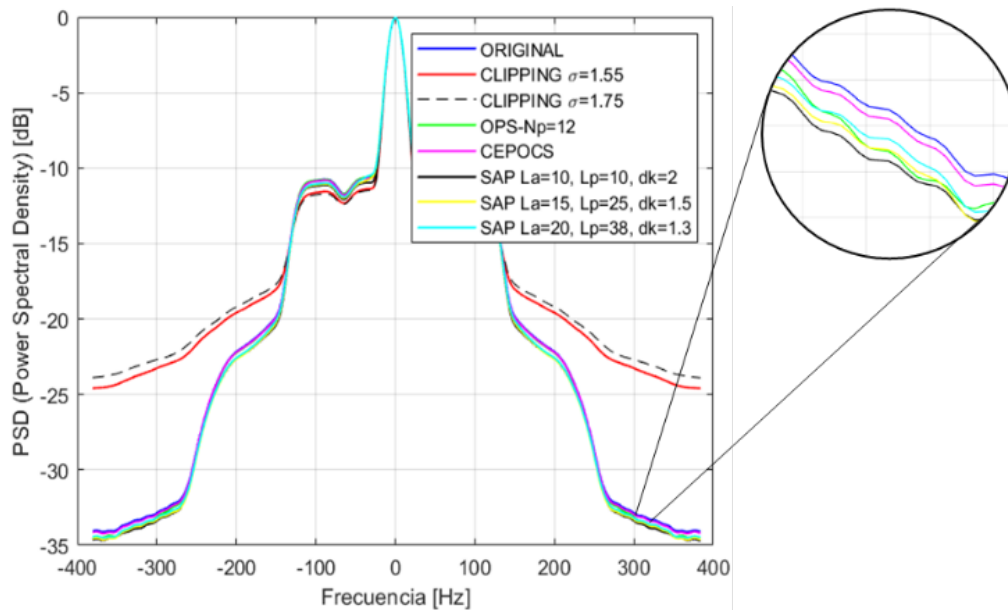


Figura 9. PSD de HACO-OFDM con 12 pilotos, modulación 4-QAM y 4-PAM.

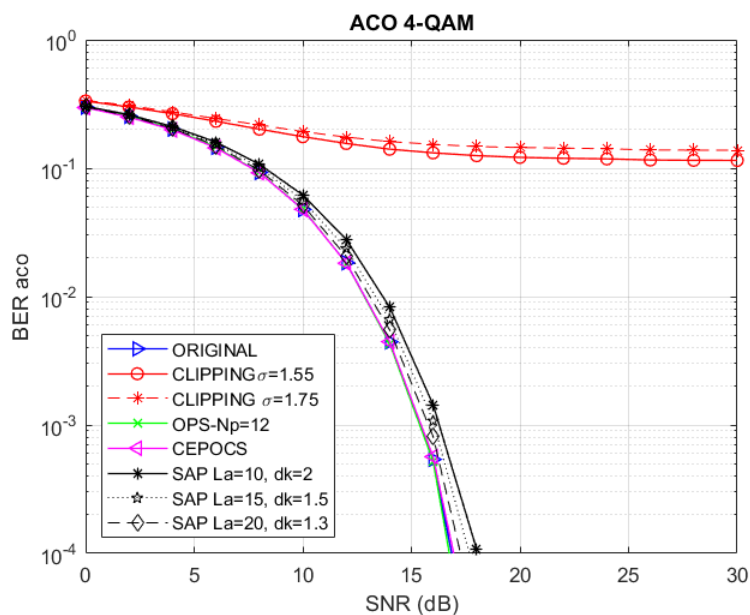
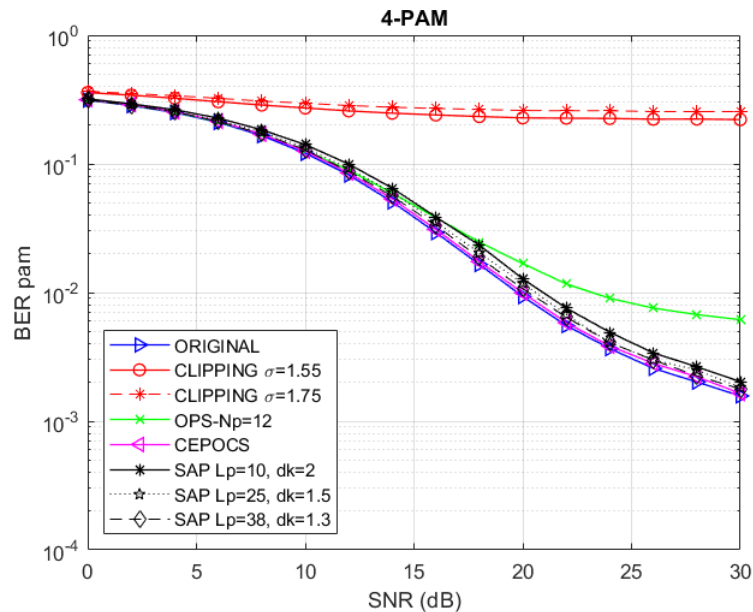


Figura 10. BER de las subportadoras impares con 12 pilotos, modulación 4-QAM y 4-PAM.

En la Figura 10 se presentan las curvas del BER de las subportadoras impares con 12 pilotos y una modulación 4-QAM con 4-PAM. Las curvas de color rojo que corresponden a la técnica *Clipping* son las que degradan la BER en gran medida. Las técnicas CE-POCS y OPS siguen la curva de la señal original y su degradación del BER es casi nula. Para la técnica SAP se observa que las curvas se distancian un poco de la señal original aproximadamente en 1dB para un  $BER = 10^{-2}$ .

En la Figura 11 se presentan las curvas de BER vs SNR para las subportadoras pares con modulación 4-QAM y 4-PAM. Para este orden de modulación, se observa que la técnica *Clipping* es la que degrada mayormente la tasa de bits errados. En la gráfica se observa que la técnica OPS aumenta el BER de las subportadoras pares cuando se han insertado 12 pilotos, este fenómeno se puede explicar desde el punto de vista del ruido de recorte ya que, al tener muchas secuencias ortogonales se escoge la que genere la menor PAPR y en el receptor para encontrar las subportadoras pares se debe restar el ruido de recorte generado en el bloque ACO lo que produce una alteración en su estimación.



**Figura 11.** BER de las subportadoras pares con 12 pilotos, modulación 4-QAM y 4-PAM.

La Tabla 2 presenta una comparación general de las técnicas de reducción de la PAPR implementadas para HACO-OFDM.

**Tabla 2.** Comparación de las técnicas de reducción de la PAPR para HACO-OFDM.

Técnica	Reducción de la PAPR	Degradación del BER		Reducción de radiación fuera de banda
		ACO-OFDM	PAM-DMT	
Clipping	Alta	Alta	Alta	Nula
CE-POCS	Baja	Baja	Baja	Baja
OPS 4 Pilotos	Media-baja	Baja	Baja	Baja
OPS 12 Pilotos	Media-Alta	Baja	Media-Alta	Media
SAP	Media-Alta	Baja	Baja	Media

## 5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un estudio y simulación de las técnicas *Clipping*, CE-POCS, OPS y SAP para la reducción de la PAPR en un sistema HACO-OFDM que se utiliza en comunicaciones de luz visible. Se estudiaron estas técnicas de reducción de la PAPR que son usadas para RF y su adaptación para que puedan ser usadas en un sistema HACO-OFDM. Además, se presentaron los resultados de una simulación en Matlab para analizar el rendimiento de las técnicas estudiadas.

Se pudo observar que la técnica *Clipping* reduce la PAPR en gran medida dependiendo del valor de sigma que se utilice, mientras mayor sea sigma mayor será el nivel de reducción de la PAPR para *Clipping*. Esta técnica se caracteriza por introducir distorsión dentro y fuera de banda, por ello, al analizar la PSD se observa que existen altos niveles de radiación fuera de banda lo que destruye la ortogonalidad de las subportadoras. En consecuencia, el BER se degrada drásticamente por lo que esta técnica no es eficiente para implementar en un sistema HACO-OFDM.

Cuando se aplicó la técnica CE-POCS se obtuvo una reducción de la PAPR baja. Esto se debe a que HACO-OFDM es una técnica híbrida que utiliza ACO-OFDM para modular las subportadoras impares y PAM-DMT para modular las subportadoras. La técnica CE-POCS aplicada a HACO-OFDM se ve limitada por el bloque PAM ya que, el rango de extensión de PAM es reducido debido a que solo se extienden los puntos más externos de la

constelación solo en forma vertical. El uso de esta técnica no es eficiente para HACO-OFDM, pero se podría aplicar para un sistema que utilice solamente la modulación M-QAM.

La técnica OPS con 4 pilotos presenta niveles bajos de reducción de PAPR para HACO-OFDM. Por otro lado, la técnica OPS con 12 pilotos reduce mayormente la PAPR pero se produce degradación del BER en las subportadoras pares.

La técnica SAP es la que mejores resultados presenta en cuanto a reducción de la PAPR ya que, si se predistorcionan los puntos de las constelaciones de la modulación PAM, lo que permite que la técnica no se vea limitada por el bloque PAM-DMT. Los mejores resultados en cuanto a la reducción de la PAPR se obtuvieron con los parámetros  $L_a = 10$ ,  $L_p = 10$  y  $dk = 2$ , con estos valores el BER no se degrada significativamente. De lo descrito anteriormente se concluye que, de las 4 técnicas analizadas, SAP es la que ofrece las mejores características para aplicarse a un sistema HACO-OFDM.

## 6. Referencias

- [1] Afgani, M. Z., Haas, H., Elgala, H., Knipp, D. (2006). Visible Light Communication Using OFDM. Trabajo presentado en *International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, Barcelona, España. doi: <https://doi.org/10.1109/TRIDNT.2006.1649137>
- [2] Hossain Mondal, M. R., Binte Faruque, R. (2017). Hybrid diversity combined OFDM for LiFi. Trabajo presentado en *IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP)*, Dhaka, Bangladesh. doi: <https://doi.org/10.1109/ICTP.2017.8285945>
- [3] Dimitrov, S., Sinanovic, S., Haas, H. (2012). Signal Shaping and Modulation for Optical Wireless Communication. *Journal of Lightwave Technology*, 30 (9), 1319-1328. doi: <https://doi.org/10.1109/JLT.2012.2188376>
- [4] Wang, J., Xu, Y., Ling, X., Zhang, R., Ding, Z., Zhao, C. (2016). PAPR analysis for OFDM visible light communication. *Optics Express*, 24 (24), 27457-27474. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.24.027457>
- [5] Binita, A., Hema, P. (2019). Reduction of PAPR in HACO OFDM Signals using PTS Schemes. Trabajo presentado en *2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, Kannur, Kerala, India. doi: <https://doi.org/10.1109/ICICICT46008.2019.8993379>
- [6] Li, B., Xu, W., Zhang, H., Zhao, C., Hanzo, L. (2017). PAPR Reduction for Hybrid ACO-OFDM Aided IM/DD Optical Wireless Vehicular Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (10), 9561-9566. doi: <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2698265>
- [7] Perarasi, T., Vidhya, S., Hemavikasini, S., Vakula, V., Varsha, H. (2020). LI-FI based Peak to Average Power Ratio Reduction in HACO-OFDM System. Trabajo presentado en *Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India. doi: <https://doi.org/10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-00090>
- [8] Ranjha, B., Kavehrad, M. (2016). Hybrid asymmetrically clipped OFDM-based IM/DD optical wireless system. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 6 (4), 387-396. doi: <https://doi.org/10.1364/JOCN.6.000387>
- [9] Islim, M. S., Haas, H. (2016). Modulation techniques for Li-Fi. *ZTE Communications*, 14 (2), 29-40.
- [10] Paredes Paredes, M. C., Fernández-Getino García, M. J. (2015). *The problem of PAPR in OFDM systems*. Department of Signal Theory and Communications. Universidad Carlos III de Madrid. Spain. Recuperado de: <https://arxiv.org/pdf/1503.08271.pdf>
- [11] Cho, Y. S., Kim, J., Young Yang, W., Kang, C. G. (2010). PAPR Reduction. En Y. S. Choo, J. Kim, W. Young Yang, C. G. Kang (Eds.) *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®* (pp. 209-250). India: John Wiley & Sons.
- [12] Ann, P. P., Jose, R. (2016). Comparison of PAPR reduction techniques in OFDM systems. Trabajo presentado en *International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore. doi: <https://doi.org/10.1109/CESYS.2016.7889995>
- [13] Li, X., Cimini, L. J. (1998). Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM. *IEEE Communications Letters*, 2 (5), 131-133.
- [14] Krongold, B. S., Jones, D. L. (2003). PAR reduction in OFDM via active constellation extension. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 49 (3), 258-268.

- [15] Jones, D. L. (1999). Peak power reduction in OFDM and DMT via active channel modification. Trabajo presentado en *Conference Record of the Thirty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (Cat. No. CH37020)*, Pacific Grove, CA, USA. doi: <https://doi.org/10.1109/ACSSC.1999.831875>
- [16] Fernandez-Getino Garcia, M. J., Edfors, O., Paez-Borralló, J. M. (2006). Peak power reduction for OFDM systems with orthogonal pilot sequences. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5 (1), 47-51.
- [17] MathWorks. (2020). *Soporte*. Recuperado de: [https://la.mathworks.com/support.html?s\\_tid=gn\\_supp](https://la.mathworks.com/support.html?s_tid=gn_supp)
- [18] Sezginer, S., Sari, H. (2006). OFDM peak power reduction with simple amplitude predistortion. *IEEE Communications Letters*, 10 (2), 65-67.
- [19] Sezginer, S., Sari, H. (2007). Metric-Based Symbol Predistortion Techniques for Peak Power Reduction in OFDM Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6 (7), 2622-2629.
- [20] León Carrillo, D. J. (2018). Estudio y simulación de las técnicas DCO-OFDM, ACO-OFDM y HACO-OFDM para la tecnología Li-Fi en ambientes indoor (Tesis de Grado), Escuela Politécnica Nacional, Quito. Recuperado de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19647>
- [21] Quilumba Toapanta, L. A. (2017). *Simulación de la técnica Constellation Extension de reducción de la PAPR de los sistemas OFDM* (Tesis de Grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17071>
- [22] Peñaherrera Murillo, M. M. (2019). *Simulación de la técnica OPS para la reducción de la PAPR en un sistema OFDM con canal Nakagami* (Tesis de Grado). Escuela Politécnica Nacional, Quito. Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20282>