

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS USANDO SIMULACIÓN Y PROCESAMIENTO FUERA DE LÍNEA

Sánchez López, Juan de Dios; Nieto Hipólito, Juan Iván; Vázquez Briseño, Mabel.

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Carretera Transpeninsular Ensenada – Tijuana, Número 3917, Colonia Playitas; Ensenada, Baja California

Tel. +52 (646) 175 07 44

Correo-e: jddios@uabc.edu.mx, jnieto@uabc.edu.mx, mabel@uabc.edu.mx.

RESUMEN.

Se presenta una propuesta para la evaluación, de forma práctica y de costos económicos, de sistemas de comunicaciones de espacio libre o inalámbricos, por medio de simulación. Pero, utilizando la información de datos-tanto de la información transmitida por el receptor como de las condiciones del canal atmosférico-capturados previamente por osciloscopio; y, por medio de éste, convertidos a un formato digital para su procesamiento fuera de línea. La idea es utilizar los datos capturados por el osciloscopio y, en base a éstos, probar diferentes algoritmos de detección y codificación-decodificación. Todo esto en un simulador o, simplemente, utilizando cualquier lenguaje de computadora; que puedan utilizarse para fines didácticos o de investigación.

Palabras Clave: comunicaciones ópticas inalámbricas, procesamiento fuera de línea, turbulencia atmosférica

ABSTRACT.

In this work it presents an outline of the practical evaluation of free-space optical communication systems, the above by mean simulation but using information from data captured by an oscilloscope, which have previously been converted to electrical format by mean of the photo-receptor for teaching purposes (off-line processing). The idea is to use the data captured by the oscilloscope and used this data, to perform different test of the subsystems such as detection algorithms and encoding-decoding, all this either using a simulator or just using any computer language.

Keywords: optical wireless communications, off-line processing, atmospheric turbulence

1. INTRODUCCIÓN

En las décadas pasadas, el ancho de banda de un sólo enlace en los dorsales de las redes, ha ido incrementado a casi 1000 veces. Lo anterior, gracias al uso de la multicanalización por división de longitud de onda (WDM) [1]. Los sistemas de fibra óptica actuales, pueden proporcionar capacidades de varios gigabits por segundo al usuario final. Sin embargo, sólo el 10% de los negocios u oficinas poseen acceso directo a la fibra óptica; mismos que se conectan a ésta por tecnologías de transmisión que emplean cables de cobre ó señales de radio; lo

que es conocido como *cuello de botella de la última milla* [2]. Si bien existen sistemas de comunicaciones de banda ancha basados en las tecnologías DSL o en cable módems, el ancho de banda de este tipo de tecnologías es aún limitado [3]. Los sistemas de RF que utilizan frecuencias de portadoras, menores a las de las ondas milimétricas; no pueden entregar datos a velocidades especificadas por IEEE 802.3z Gbit Ethernet. Velocidades de 1Gbps -y mayores-, sólo pueden ser entregadas por haz láser u ondas milimétricas. Sin embargo, la tecnología de ondas milimétricas es mucho menos madura que la tecnología de los láseres [2]. El acceso a las redes de banda ancha basadas en comunicaciones ópticas, puede ser realizado por medio de redes ópticas pasivas (PONS por sus siglas en inglés); las cuales se basan en el uso de la fibra óptica ó por medio de sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas. La industria de las comunicaciones ópticas inalámbricas (COI) ha experimentado un sano crecimiento en la década pasada, a pesar de los altibajos de la economía. Lo anterior, debido a tres principales ventajas sobre otras tecnologías competidoras. En primer lugar, como tecnología de comunicaciones inalámbricas ocupa un nicho de aplicación. El costo de las COI es, en promedio, de alrededor del 10% del costo de un sistema de fibra óptica [2]. Se requiere, además, de sólo unas cuantas horas para su instalación; tiempo similar para establecer un enlace de radioeléctricos (RF). Contrario a la instalación de la fibra óptica, que puede llevar varios meses. En segundo lugar, los sistemas COI tienen mayor alcance que los sistemas basados en ondas milimétricas. Pues, pueden cubrir distancias mayores a un kilómetro; mientras que, los segundos requieren de repetidores para la misma distancia. Además, los sistemas de ondas milimétricas son afectados por la lluvia, cuando los sistemas COI son afectados por la niebla [4]. Sin embargo, experimentos realizados en Londres -ciudad famosa por su niebla-, muestran que la ocurrencia de niebla, con la suficiente densidad, para hacer caer un enlace con norma de seguridad clase I a 155 Mb/s sobre 1km, es menor de 0.1% [4]. Otros estudios, realizados en los Estados Unidos, han demostrado que en la mayoría de las ciudades de este país, es posible lograr enlaces de 1.25 Gb/s con una disponibilidad del 99% en distancias promedio de una milla, con láseres de 1W [5]. En

relación de la tecnología disponible, todavía la mayoría de los componentes ópticos y optoelectrónicos para uso de laboratorio son costosos, lo que para las naciones emergentes (entre las que podemos incluir la nuestra), el uso de estos componentes y equipos están fuera del alcance de la mayoría de las instituciones de educación de ingeniería. La propuesta del presente trabajo es utilizar los recursos disponibles para dotar - al estudiante o investigador- de herramientas que le permitan el uso óptimo de sus recursos; al adquirir sólo los componentes y los equipos básicos más convenientes, dejando al uso de la simulación los elementos y equipos que por sus características pueden ser considerados, en las primeras etapas de una investigación, como prescindibles o para aplicaciones de educación de la ingeniería de las telecomunicaciones ópticas.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2, se describe el modelo del canal de COI para modulación de intensidad y detección directa (MI-DD); el cual, es utilizado como sistema prueba para evaluar el comportamiento del sistema COI. En la sección 3, se describe la forma de obtener los datos estadísticos de la turbulencia; así como la forma en que se estructura la plataforma de simulación de los sistemas de COI, para experimentación virtual. En la sección 4, se presentan los datos obtenidos de la simulación utilizada para la "validación" del sistema. Finalmente, en la sección 5, se presentan las conclusiones y recomendaciones para el presente trabajo.

2. SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS DE ESPACIO LIBRE

2.1. Canal óptico atmosférico.

El canal óptico atmosférico es la parte del sistema de comunicaciones ópticas inalámbrico que presenta mayores desafíos. Existen varios fenómenos atmosféricos que afectan a los canales ópticos inalámbricos atmosféricos. Entre éstos, la atenuación, la cintilación, el esparcimiento del haz y las variaciones del ángulo de arribo al receptor [2]. La atenuación atmosférica ocurre, principalmente, debido a los fenómenos de absorción y dispersión [3-14]. La cintilación es definida como las variaciones, temporales y espaciales, causadas por la turbulencia atmosférica. A su vez, la turbulencia atmosférica es generada por la combinación del viento y los gradientes de temperatura; los cuales crean burbujas o paquetes de aire con diferentes densidades, por lo tanto, diferentes índices de refracción. Los efectos dominantes de la cintilación ocurren cuando el tamaño de las escalas, es comparable con el diámetro del haz. Lo anterior desenfoca el haz y produce variaciones de intensidad en el haz recibido. La cintilación se incrementa con la distancia, e impacta la tasa de errores de bit. Al ser la turbulencia atmosférica un fenómeno aleatorio, el desvanecimiento de la señal óptica puede ser modelada por medio de funciones de densidad de probabilidad (f.d.p.). La cintilación es uno de los mayores problemas que afectan a este

tipo de sistemas, ello debido a su presencia permanente y naturaleza no estacionaria [13-18]. Los modelos estadísticos para el desvanecimiento de la señal óptica, presentan una gran similitud con las funciones de densidad de probabilidad; log-normal en el régimen conocido como turbulencia débil [2],[6]. Otras funciones de densidad de probabilidad han sido propuestas para diversas condiciones de turbulencia; entre las que se encuentra el modelo basado en la f.d.p. gamma-gamma. La cual, es aplicable a todos los regímenes de turbulencia [4-12].

La función de densidad de probabilidad log-normal, para las fluctuaciones de intensidad es [5]:

$$f_I(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_\chi I} \exp \left\{ -\frac{\left(\ln \frac{I}{I_0} - 2\bar{\chi} \right)^2}{8\sigma_\chi^2} \right\} \quad (1)$$

Donde I es la intensidad de la señal, χ es la log-amplitud con media $\bar{\chi}$ y varianza σ_χ^2 . Un parámetro para medir la fuerza de la cintilación ó variación aleatoria de la intensidad luminosa, debido a la turbulencia atmosférica, es el índice de cintilación σ_I^2 definida como [1],[10]:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (2)$$

La intensidad o irradiancia, I se relaciona con la amplitud, A , por medio de $I = A^2$. Para condiciones de turbulencia moderada a fuerte ($\sigma_I^2 > 1$), los datos experimentales son más acordes con modelos basados en la función densidad de probabilidad gamma ó exponencial [10]. La relación de la varianza de la log-amplitud σ_χ^2 , y del índice de cintilación es [2], [6]:

$$\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_\chi^2) - 1 \quad (3)$$

Para un sistema de conmutación de encendido apagado (On-Off Keying: OOK), los pulsos transmitidos pueden ser escritos como:

$$i_{Tx} = \sum_i \alpha_i g(t - iT_b) \quad (4)$$

En donde α_i es valor de los dígitos binarios (0, 1) y $g(t)=1$ para el intervalo $0 \leq t < T_b$.

La intensidad de la señal foto-detectada $r(t)$, considerando el ruido de foto-detección como ruido aditivo $n(t)$ puede ser expresada como:

$$r(t) = i_R(t) + n(t) \quad (5)$$

Donde $i_R(t)$ es la corriente foto-detectada y es función de:

$$i_R(t) = \frac{\zeta(t)\mathcal{R}P(t)}{A_r} \quad (6)$$

Donde ζ es el coeficiente que contabiliza la turbulencia atmosférica, \mathcal{R} es la constante de conversión del fotodetector de potencia óptica a corriente eléctrica, P la potencia óptica promedio y A_r el área del fotoreceptor.

A continuación, en la figura 1, se presenta un sistema básico de comunicaciones ópticas de espacio libre.

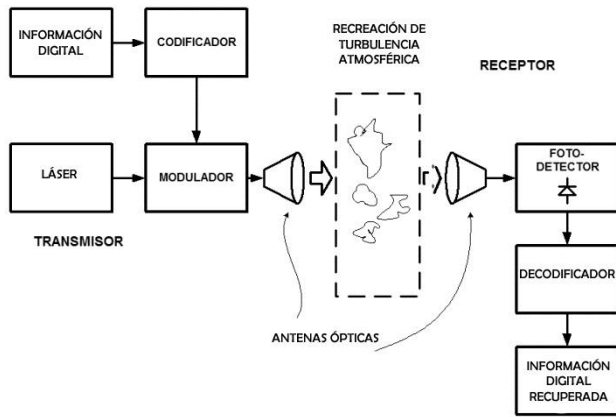


Figura 1. Sistema de comunicaciones de espacio libre.

Para modulación OOK, la probabilidad de error de bit, considerando sólo el ruido $n(t)$, es dado por [6]:

$$P_B = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{SNR}{2\sqrt{2}} \right) \quad (7)$$

Para un sistema OOK inalámbrico, la expresión anterior se promedia con la p.d.f. de la irradiancia afectada por la turbulencia:

$$P_B = \frac{1}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc} \left(\frac{SNR(\xi)}{2\sqrt{2}} \right) f_I(\xi) d\xi \quad (8)$$

2.2 Desarrollo de la emulación del experimento.

Para implementar de forma virtual el sistema mostrado en la figura 1 primero se obtuvo, experimentalmente, diversas realizaciones de la turbulencia atmosférica por medio de una cámara de recreación de turbulencia atmosférica. El experimento se desarrolló usando un haz láser verde correspondiente a una longitud de onda 532 nm, y una potencia máxima no mayor a 5mW. Este haz se somete a la turbulencia

recreada, artificialmente, en el laboratorio y la señal óptica es convertida a su análoga eléctrica por analizador de forma de onda óptica 3M Photodyne™ 1500 (foto-receptor) y capturada por un osciloscopio; los datos en formato digital son enviados a una computadora para ser almacenados para su posterior procesamiento. Las variaciones de intensidad son capturadas en formato digital y, pueden ser utilizadas para evaluar diferentes tipos de modulación, codificación de línea, codificación de canal o diversos métodos de mitigación de los efectos de la turbulencia atmosférica.

De la señal óptica no modulada es posible obtener los parámetros estadísticos relacionados con la turbulencia, como lo son la media y la varianza. De la señal óptica modulada en intensidad, es posible obtener la probabilidad de error de bit (PEB) de la señal sin codificar; y para obtener esta figura de mérito para los datos codificados, se requiere del conteo directo de bits. La idea de realizar la evaluación de sistemas de COI se debe a que, para realizar la evaluación dentro de laboratorios por medio del generador de turbulencia, se requiere que el recinto donde éste se encuentre, tenga una temperatura y humedad controlada y sea relativamente baja (10 grados Celsius). Ello con el fin de tener un amplio rango de variación de cintilación que permita la recreación de los efectos de la turbulencia, sobre un haz de luz coherente sobre distancias de 500 a 10000 metros.

Los resultados obtenidos por la captura y almacenamiento de las variaciones de haz, producida por el montaje experimental, se utilizan en esta plataforma de experimentación virtual y se combinan por los datos transmitidos; lo cual, puede ser información real o generada por un generador de datos pseudoaleatorios. Estos datos pueden ser modulados por cualquiera de los formatos de modulación existente, proporcionando flexibilidad en la selección del tipo de sistema; así como la evaluación de subsistemas u otras funciones de los sistemas COI, tales como: codificación de línea, codificación de canal, ecualización, etcétera.

Por ejemplo, si se quiere evaluar la transmisión de señales ópticas por medios atmosféricos, se puede implementar esto por software; es decir, el codificador se realiza en el ambiente virtual pero la variación de la intensidad de la señal óptica transmitida, proviene de la estadística obtenida de la recepción del haz sometido a la turbulencia en el sistema de recreación de turbulencia. De forma similar se realiza la decodificación. Se realiza de esta manera, ya que para la obtención de la tasa de error de bit de los datos codificados, se requiere de un conteo directo del error de bit; al realizar el decodificador y la medición de la tasa de error de bit, como un programa de software de simulación como Matlab® u Octave; e inclusive, Turbo C. Así es posible cambiar de tipo de codificación o de alguna otra característica de la señal de forma relativamente fácil, que nos permita enfocarnos a los puntos de interés. Lo anterior, permitir

tener flexibilidad y disponibilidad sin requerir de gastos que estén fuera del alcance de muchos centros educativos.

En la figura 2 se presenta el diagrama de la simulación propuesta para la evaluación de los sistemas de comunicaciones ópticas de espacio libre, en los que se incorpora el conocimiento del comportamiento del canal, y la naturaleza de la información “enviada” por la etapa transmisora. Para esto, se recolectó el comportamiento de varias realizaciones del canal óptico afectado por la turbulencia atmosférica, recreada en laboratorio por medio de un caja de recreación de turbulencia [19], así como la señal de los datos enviados por la etapa transmisora (sin y con codificación), combinados y usados en las simulaciones con el escalamiento y dimensionamiento adecuado, lo que hace flexible el trabajo para la evaluación de diversos tipos de codificación de canal u otro procesamiento de la señal de información.

3. RESULTADOS

En esta sección, se compara el desempeño del sistema COI simulado por el procedimiento propuesto antes explicado; y se muestra el desempeño del sistema evaluado en términos de la tasa de error de bit, para diferentes valores de turbulencia óptica. En la figura 1, se muestra una realización de la señal óptica no modulada afectada por turbulencia y su correspondiente histograma para $\sigma_I^2 = 0.039$. Se puede observar, además, que la escala de tiempo es del orden de milisegundos, lo que concuerda con medidas experimentales de la correlación de las variaciones de intensidad de la cintilación, la cual es del orden de los milisegundos.

En la tabla I, se presentan los diferentes valores de σ_I^2 obtenidos de los parámetros estadísticos, para diversas condiciones de turbulencia.

Tabla 1. Valores de turbulencia obtenidos.

Ajuste	σ_I^2
1	0.03
2	0.09
3	0.14
4	0.26
5	0.35

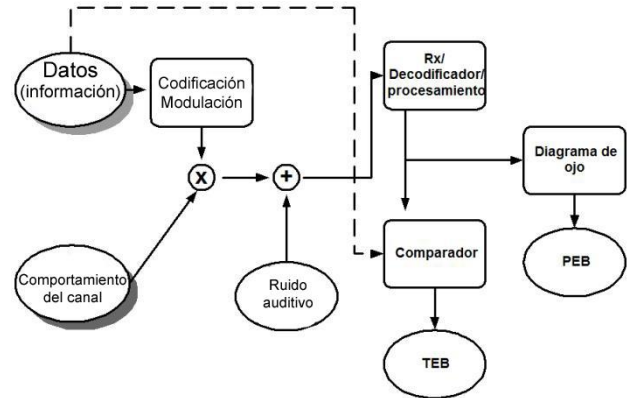


Figura 2. Diagrama de la simulación realizada.

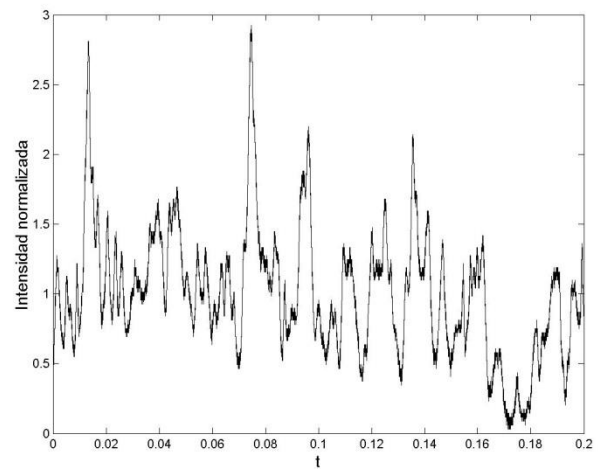


Figura 3. Variaciones de la intensidad o irradiancia afectada por la turbulencia atmosférica, reproducida por el generador de turbulencia ($\sigma_I^2 = 0.35$).

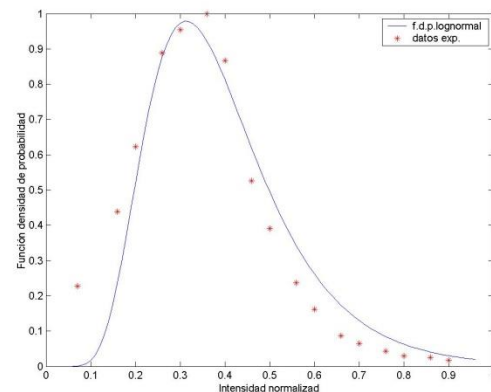


Figura 4. Histograma de la realización de la intensidad luminosa, afectada por la turbulencia ($\sigma_I^2 = 0.35$).

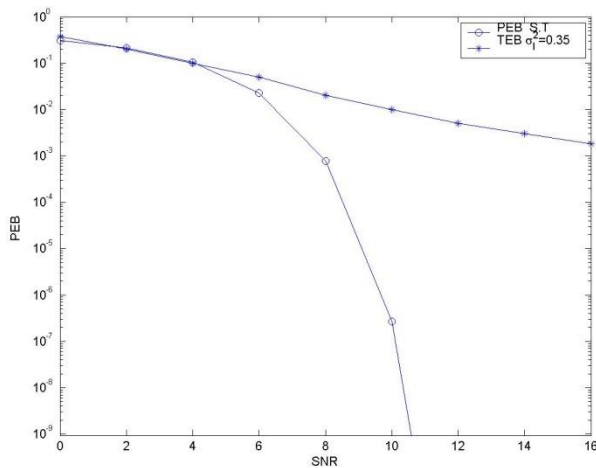


Figura 5. Probabilidad de error de bit para señal libre de turbulencia y para señal afectada con índice $\sigma_I^2 = 0.35$.

Para ilustrar el funcionamiento del esquema, se realiza una simulación para un sistema OOK con los siguientes valores: $\lambda = 1550$ nm, tasa de transmisión de 2 Gbps y $\sigma_I^2 = 0.35$. En la figura 3, se muestra la tasa de error de bit (TEB), (probabilidad de error de bit en el caso teórico), vs. E_b/N_0 obtenido. Así mismo, se puede observar que los datos presentan la misma tendencia pero con diferencias existentes entre el TEB y la PEB, que pueden ser explicadas por las aproximaciones hechas en el modelo teórico. Los datos obtenidos, experimentalmente, dependen de diferentes consideraciones realizadas pero nos permiten dar una idea muy aproximada del desempeño del sistema COI a evaluar. Si bien es posible determinar el TEB, por medio del diagrama de ojo; en el caso de las comunicaciones ópticas, la intensidad promedio; y por lo tanto, la potencia y el E_b/N_0 varían sus valores medios y sus varianzas con el tiempo al ser un proceso no estacionario por lo que la información obtenida, es válida para el tiempo de correlación de las variaciones de intensidad; así la implementación realiza esta medición por medio de conteo directo de error de bit.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presentó una plataforma de emulación-simulación (experimentación virtual) que permite realizar experimentación y evaluación de sistemas COI, con recursos y equipo que puede estar disponible en la mayoría de las universidades o centros educativos; y que pudiera ser una solución o ayuda en las primeras fases de experimentación de este tipo de sistemas, sin que ello signifique el uso de paquetes de software especializado y de implementación física. Si bien el trabajo se centró al

funcionamiento, la utilización de interfaces gráficas facilitaría el uso y la comprensión por parte del usuario.

5. REFERENCIAS

- [1] Franz, J. H. y Jain, V.K. . 2000. *Optical communications, components and systems*. CRC Press. 717 pp.
- [2] Wheelon, A. D. 2001. *Electromagnetic scintillation Vol. 1. Geometrical optics*. Cambridge University Press. Cambridge. 455 pp.
- [3] Arnorn, S., Rotman, S.R. y Kopeika, N.S. 1998. Performance limitations of free-space communications satellite network owing to vibrations: heterodyne detection. *Applied Optics*. 37(27): 6366-6374 p.
- [4] Qingchong L., Chunming Q., Mitchell G., y Stanton S. 2005. *Optical wireless communications networks for first- and last-mile broadband access*. *Journal of Optical Networking*. 4(12): 807-828 p.
- [5] Liu, Q. Qiao, C., Mitchell, G. y Stanton, S. 2005. *Optical wireless communications networks for first- and last-mile broadband access*. *Journal of Optical Networking*. 4(12): 807-828 p.
- [6] L.C. Andrews y R.L. Phillips, *Laser beam propagation through random Media*, Washington. SPIE Press. Bellingham, 2005, pp. 782.
- [7] J.M. Kahn y K. Ho, Spectral efficiency limits and modulation/detection techniques for DWDM systems, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, pp. 259-272.
- [8] H. Willebrand, Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks, Indianapolis, Sams, 2002, pp. 259.
- [9] X. Zhu y J.M. Kahn, Free space optical communication through atmospheric turbulence channels, *IEEE Transactions on Communications*, 2002, pp. 1293-1300.
- [10] X. Zhu y J.M. Kahn, Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels, *IEEE Transactions on Communications*, 2003, pp. 509-516.
- [11] X. Zhu, J.M. Kahn y J. Wang, Mitigation of turbulence - induced scintillation noise in free space optical links using temporal domain detection techniques, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, pp. 623-624.
- [12] Z. Wang, W.D. Zhong y C. Yu, Dynamic decision threshold and adaptive coherent detection in FSO communications system, Singapore, IEEE, 2011.
- [13] Z. Wang, W.D. Zhong y C. Yu, Performance improvement of OOK free space optical communication systems by coherent detection and dynamic decision threshold in atmospheric turbulence conditions, Singapore, *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, pp. 2035-2037.
- [14] A.B. Mohammad, Optimization of FSO system in tropical weather using multiple beams, Malaysia, *IEEE 5th International Conference on Photonics*, 2014, pp. 109-112.
- [15] H.S. Khalaf, A.E. Morra, H.M.H. Shalaby y Z. Kawasaki, Performance analysis of free-space optics systems adopting multi-pulse PPM techniques in gamma-gamma channels for thermal noise limited systems, Osaka, IEEE, 2013, pp. 1-4.
- [16] X. Wu, P. Liu, M. Matsumoto, A study on atmospheric turbulence effects in full-optical free-space communications systems, Beijing-Tokyo, IEEE, 2010.
- [17] W. Ni, Y. Miyamoto, K. Wakamori, K. Kazaura, M. Matsumoto, T. Higashino, K. Tsukamoto y S. Komaki, Experimental study of atmospheric turbulence effects on RoFSO communications systems, Osaka, Piers Online, 2009, pp. 65-70.
- [18] Z. Ghassemlooy y W.O. Popoola, Terrestrial free-space optical communications, mobile and wireless communications network layer and circuit level design, Newcastle, InTech Open, 2010, pp. 357-391.
- [19] Abtahi, M. y Rush, L., Mitigating of Scintillation Noise in FSO Communications Links using Saturated Optical Amplifiers, *Military Communications Conference*, 2006. MILCOM 2006. IEEE