

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERA ELECTRÓNICA**

**TEMA:  
ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE POTENCIA DE RF Y SEPARACIÓN DE  
FRECUENCIAS DE LAS SEÑALES OFDM Y LTE EN REDES ÓPTICAS**

**AUTORA:  
STEPHANIE CELINDA CHANALATA ENCALADA**

**TUTORA:  
JOHANNA BERENICE ARGUERO TELLO**

**Quito, diciembre del 2020**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Stephanie Celinda Chanalata Encalada con documento de identificación N°1722337530, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy la autora del Artículo Académico, ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE POTENCIA DE RF Y SEPARACIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS SEÑALES OFDM Y LTE EN REDES ÓPTICAS, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autora me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Stephanie Celinda Chanalata Encalada

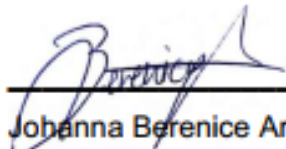
C.I: 1722337530

Quito, diciembre del 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Johanna Berenice Arguero Tello, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE POTENCIA DE RF Y SEPARACIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS SEÑALES OFDM Y LTE EN REDES ÓPTICAS realizado por Stephanie Celinda Chanalata Encalada, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre del 2020



---

Johanna Berenice Arguero Tello

C.I.: 1723989149

## **DEDICATORIA**

Dedico mi trabajo de titulación a Dios y la virgencita por la oportunidad de obtener el presente logro y a mis padres Mariana Encalada y Alberto Chanalata, quienes son mi pilar fundamental, motivación en mi vida profesional y formarme con gran ejemplo; a mi hermano John y a su hijo Amir por ser mi inspiración; a Leonel Cevallos por estar presente con su apoyo incondicional.

Stephanie Celinda Chanalata Encalada

## **AGRADECIMIENTO**

Mi gratitud sincera a mis padres quienes me bendicen y aportan con su esfuerzo y amor incondicional, así también a mi familia quienes con su cariño me han impulsado a conseguir mis objetivos.

A Leonel quién con su gran compañía, cariño y ayuda me ha motivado a culminar la vida universitaria.

A todos mis amigos/as quienes me brindaron su apoyo y ánimos constantes que con su gran carisma me han acompañado a lo largo de mi vida y de la trayectoria académica.

A la Ing. Berenice Arguero quién como tutora me dirigió con su sabiduría y gran profesionalismo al desarrollo del presente artículo. Así mismo, al Ing. Milton Tipan por sus conocimientos brindados.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por cada docente que me guiaron en una formación profesional y espiritual para crecimiento personal.

# ANÁLISIS DE LA RELACIÓN DE POTENCIA DE RF Y SEPARACIÓN DE FRECUENCIAS DE LAS SEÑALES OFDM Y LTE EN REDES ÓPTICAS

Stephanie C. Chanalata<sup>1</sup>, Johanna B. Arguero<sup>2</sup>

**Resumen-** En el presente artículo, se implementó una red de acceso óptico convergente transmitiendo simultáneamente las señales OFDM y LTE con una misma longitud de onda a través de una co-simulación numérica Matlab-OptSim dentro de un enlace de 25 Km de fibra óptica. La señal OFDM se transmitió en banda base mientras que LTE está centrada a 1.5 GHz. Dicha frecuencia fue disminuyendo hasta determinar una adecuada separación de frecuencias entre las señales, en la red de acceso óptico convergente. Para la cual se estableció parámetros óptimos de operación donde fue necesario optimizar la potencia de transmisión RF de LTE para mantener la transmisión simultánea. Como resultado se obtuvo una separación espectral de 900 MHz entre la señal OFDM y LTE. Con una potencia de transmisión RF de -7 dBm logrando una sensibilidad de -23 dBm para un EVM de 28.17 %. Mientras que para OFDM se obtuvo un BER de  $7.94 \times 10^{-4}$  con una sensibilidad de -29 dBm. Por lo tanto, se demuestra que con el diseño propuesto de la red se optimizó el uso del espectro manteniendo así una dispersión continua, para trabajos futuros añadir estas señales dentro de la red de acceso óptico.

**Palabras Clave-** LTE, OFDM, RF, Redes de acceso óptico.

**Abstract-** In this article, a convergent optical access network was implemented simultaneously transmitting OFDM and LTE signals with the same wavelength through a Matlab-OptSim numerical co-simulation within a 25 km fiber link. The OFDM signal was transmitted in baseband while LTE was centered at 1.5 GHz. This frequency was decreasing until determining an adequate frequency separation between the signals, in the converged optical access network. For which optimal operating parameters were established where it was necessary to optimize the LTE RF transmission power to maintain simultaneous transmission. As a result, a spectral separation of 900 MHz was obtained between the OFDM signal and LTE. With an RF transmission power of -7 dBm achieving a sensitivity of -23 dBm for an EVM of 28.17 %. While for OFDM a BER of  $7.94 \times 10^{-4}$  was obtained with a sensitivity of -29 dBm. Therefore, it is shown that with the proposed design of the network, the use of the spectrum was optimized while maintaining continuous spectrum, for future work to add these signals within the optical access network.

**Keywords-** LTE, OFDM, RF, Optical Access Network.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica (Mención en Telecomunicaciones) – Universidad Politécnica Salesiana  
Campus Sur

<sup>2</sup> Docente la Universidad Politécnica Salesiana de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones.

## I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda y la necesidad de comunicarse a altas velocidades, tráfico masivo de datos, fiabilidad y baja latencia [1]. Por parte del usuario ha impulsado a investigadores a desarrollar nuevos métodos para mejorar la capacidad de las redes de acceso óptico tanto para las redes fijas y móviles [2]. Donde la importancia se enfoca en aprovechar los espacios del espectro de radio frecuencia (RF, Radio Frequency) para futuros avances y un gran desarrollo en el mercado [3].

El desarrollo de nuevas técnicas para redes convergentes se ha extendido para generar servicios triples play (datos, voz y video) de alta calidad mejorando el uso de aplicaciones de los usuarios [4] solventando problemas de capacidad, cobertura y calidad. Haciendo uso de su rentabilidad y eficiencia a través de redes inalámbricas que supera el tráfico que circula por las redes cableadas [5] [6].

La tecnología de evolución a largo plazo (LTE, Long Term Evolution) actualmente se mantiene en uso para servicios de comunicación de cuarta generación 4G siendo un gran desafío frente al aumento de ancho de banda, velocidad y gran capacidad buscando un mejor beneficio en rendimiento global dentro de las redes ópticas [7] [8] [9]. Esta señal utiliza la técnica de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) que está basada en enviar los símbolos paralelamente en subportadoras adyacentes [10], consiguiendo un mejor uso del espectro y facilidad en la estimación de canal, razón por la cual la ortogonalidad permite transmitir sobre un canal común múltiples señales de información sin desvanecimiento por multitrayectoria [11].

En [12] se investiga la transmisión simultánea de las señales OFDM y LTE dentro de una red de acceso óptico. Estas señales se transmitieron logrando un BER de  $10^{-3}$  demostrando un mejor rendimiento en el sistema propuesto con una sensibilidad Rx de -29 dBm y -25 dBm respectivamente. La coexistencia de estas señales dentro de un mismo enlace óptico se debe a que OFDM se encuentra en banda base mientras que LTE se encuentra centrada en una frecuencia de 1.5 GHz. Menciona que experimentalmente existe relación de potencia RF entre ambas señales. Sin embargo, existe una brecha del espectro entre las señales sin utilizar y así impedir interferencias co-canales.

El aporte de la presente investigación es determinar una adecuada separación de frecuencia entre las señales OFDM y LTE dentro de una red de acceso óptica a 25 Km determinando parámetros de operación de la potencia de transmisión RF para LTE. Cuyo propósito es aprovechar la distancia entre las señales optimizando el uso del espectro de forma continua dentro de una infraestructura común.

## II. CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

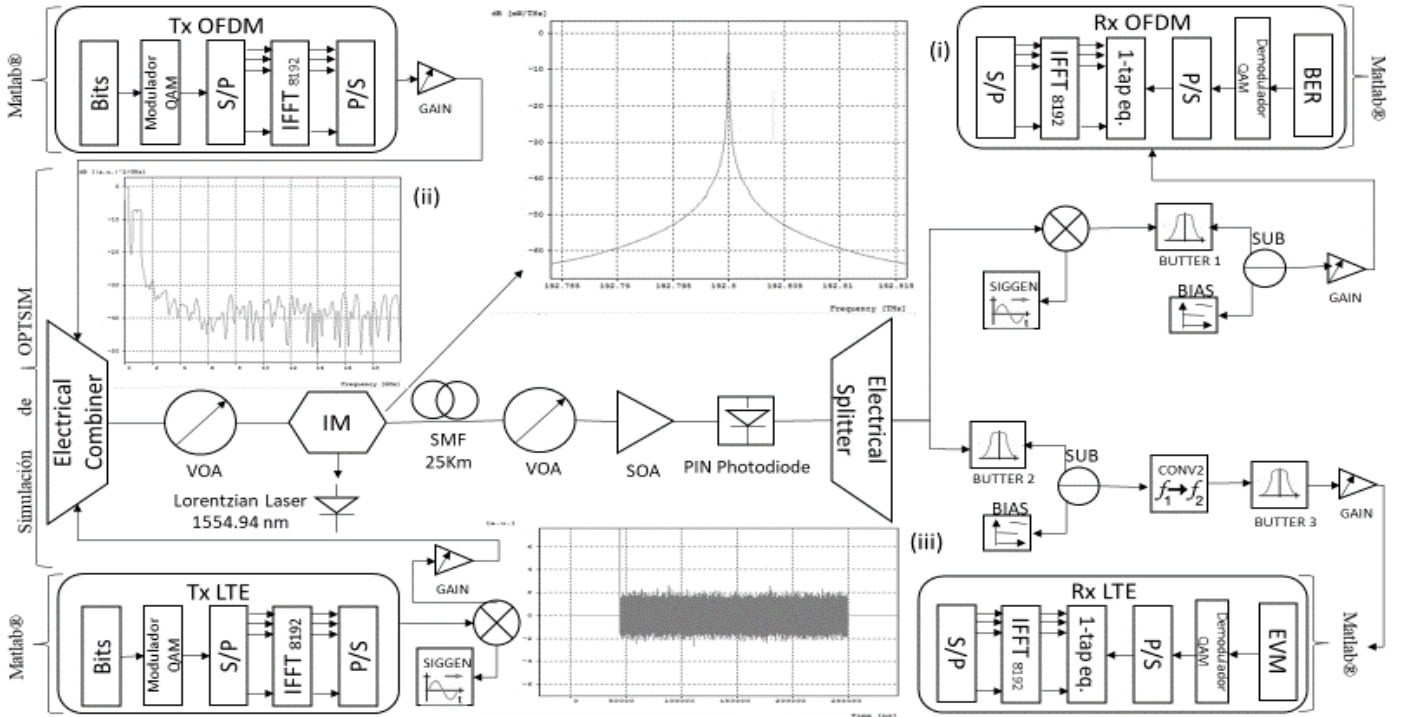
En la Fig.1, se presenta el esquema propuesto de la configuración de la red convergente para las señales OFDM y LTE mediante co-simulación entre el software Matlab®2019 y OptSim. Donde se modelan las señales numéricamente en Matlab®2019 y son enviados por un enlace óptico. Se visualiza el espectro eléctrico y el espectro óptico de las señales OFDM y LTE transmitidas simultáneamente, transportadas a una misma longitud de onda de 1554.94 nm.

### A. Transmisor

La señal OFDM, es generada y modelada numéricamente en Matlab®2019, enviando un total de 126000 bits aleatorios mapeado en modulación de amplitud en cuadratura (QAM, Quadrature Amplitude Modulation). Los símbolos en serie se convirtieron en paralelo y se modularon mediante la transformada rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) de dimensión  $2^{13}$ . Donde las entradas fueron dispuestas en simetría hermítica para obtener una señal con un valor real y las salidas se transformaron en serie. Obteniendo un ancho de banda (BW, Bandwidth) en banda base de 300 MHz con una potencia RF de 0 dBm.

Del mismo modo la señal LTE fue generada en Matlab®2019 transmitiendo 126000 bit aleatorios en banda base con un BW de 600 MHz y con modulación 4-QAM. Dentro del entorno de OptSim se subió en frecuencia mediante un generador de señal de onda sinusoidal (SIGGEN, Sinusoidal wave signal generator) a 1.5 GHz. Con una potencia RF de -8dBm [12] y después de la optimización de potencia RF se estableció una potencia RF de -6 dBm.

Estas dos señales son combinadas empleando un combinador eléctrico para ser moduladas en intensidad (IM, Intensity Modulation) con una misma longitud de onda de 1554.94 nm (C28). Empleando una fuente de láser de longitud continua (CW, Continuous Wave) con



**Fig.1** Esquema de configuración de simulación. Las inserciones muestran los espectros (i) en la fibra óptica con datos de LTE y OFDM, (ii) espectros Tx eléctricos conjuntamente, (iii) señal en la recepción.

una frecuencia central nominal de 182.80 THz según la UIT-T G.692 [13], con un ancho de pulso 10MHz a 10 Gbit/s.

A la salida del modulador óptico se colocó un atenuador óptico variable (VOA, Variable Optical Atenuador) para limitar una potencia óptica a 0 dBm y cumplir con las especificaciones de la ITU-T G.948.2 para redes GPON [14].

### B. Enlace Óptico

Las señales moduladas son propagadas a través de un sistema de comunicación óptico convergente caracterizado por fibra óptica monomodo (SMF, Single Mode Fiber) ITU-T G.652 con una atenuación de 0.2 dB/Km [15], incluyendo los efectos no-lineales de la fibra cuya longitud de 25 km. Se incluye un VOA que varía la potencia óptica de recepción comportándose como un indicador que incremento de número de usuarios dentro de la red con un rango de atenuación de 16 dB a 29 dB.

Por otro lado, se incorpora un amplificador de potencia óptica semiconductor (SOA, Semiconductor Optical Amplifier) con una potencia saturable de salida a 20 dBm y ganancia 49 dBm para las señales OFDM y LTE para mejorar la calidad de señal antes de ingresar al fotodiodo.

### C. Receptor

Finalmente, para recuperar las señales ópticas a eléctricas se utiliza un fotodiodo PIN (Positive Intrinsic Negativ) con una responsividad de 0.87 A/W, 0.7 de eficiencia. Las señales eléctricas ingresan a un divisor eléctrico 1:2 para recuperar independientemente OFDM y LTE. Antes de ingresar el módulo de Matlab@2019, se reguló la potencia RF debido a las componentes de DC que se encuentra presente en las señales se implementó un voltaje de BIAS para recuperar exitosamente las señales. Por otro lado, se emplea un convertidor de frecuencia (CONV2, Frequency Converter) usado para variar la frecuencia de portadora de 0.0015 THz a 0.0003 THz representadas para el rango de las frecuencias de 1.5 GHz a 300 MHz que son las frecuencias de operación de salida para LTE.

Para obtener las señales de salida independientemente se empleó un filtro Butterworth [16], para LTE configurado para un ancho de banda de 0.6 GHz y para OFDM con un ancho de banda de 0.3 GHz. Una vez filtradas las señales pasan al bloque de Matlab@2019 para realizar un procesamiento digital. Los datos recibidos ingresan a la etapa de sincronización, demodulación, equalización para mejorar la calidad de la señal y eliminar la distorsión lineal [17].

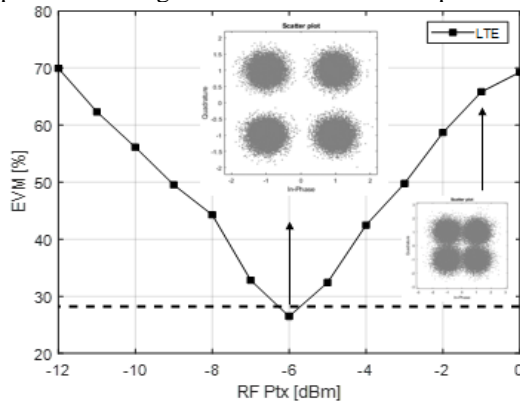


Finalmente se calcula los parámetros cuantitativos de la red como la tasa de errores (BER, Bit Error Rate), el error de la magnitud vectorial (EVM, Error Vector Magnitude) mediante la siguiente ecuación (1). [18]

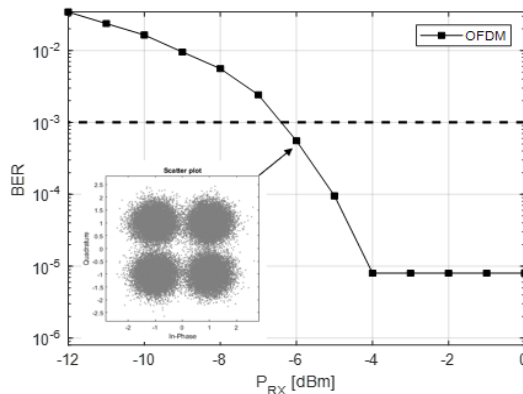
$$EVM_m = \sqrt{\frac{\frac{1}{(\operatorname{erfcin}\left[\frac{\operatorname{BER} * \operatorname{Log}_2 L}{(1-L^{-1})}\right])^2 * (L^2 - 1) * \operatorname{Log}_2 M}{\sqrt{2} * 3 \operatorname{Log}_2 L}}{k}}$$

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig.2 (a), se observa la curva de optimización de potencia de transmisión de la señal LTE, la línea punteada corresponde a un EVM de 28.2 % que equivale a un valor de BER de  $10^{-3}$ . El valor óptimo de LTE se encuentra debajo de la línea punteada, el punto más bajo de la curva con un valor de -6 dBm que corresponde a un EVM de 26.48 %. Con este valor se trabajará la presente simulación. En la gráfica de la Fig.2 (b), se observa la señal OFDM con un BER de  $5.54 \times 10^{-4}$  determinando que ambas señales pueden converger en una red de acceso óptico.

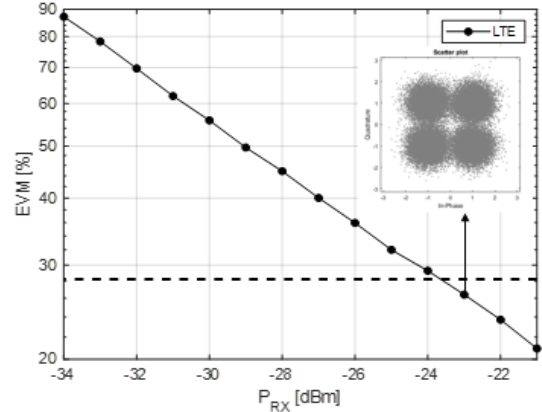


**Fig.2 (a)** EVM vs Potencia RF (Ptx) para una señal LTE a -6 dBm con 25 Km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM y con una FFT de  $2^{13}$ . El diagrama de constelación de la mitad corresponde a un EVM=26.48 % es decir un BER=  $10^{-3}$  y a la derecha un BER= $10^{-1}$

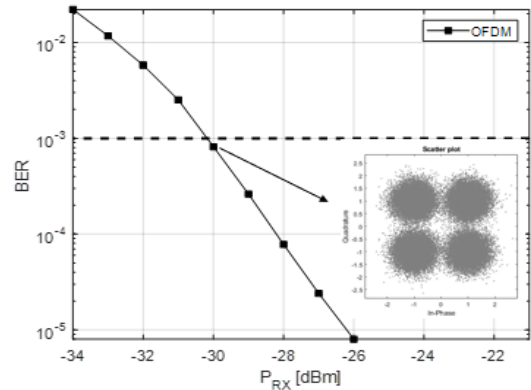


**Fig.2 (b)** BER vs Potencia óptica (Prx) para una señal OFDM a 0 dBm con 25 Km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM y con una FFT de  $2^{13}$ . El diagrama de constelación corresponde a un BER=  $10^{-3}$

Las señales se transmitieron simultáneamente con una separación de frecuencia de 1.5 GHz y una potencia RF de -6 dBm. En la Fig.3 (a), se observa la gráfica del EVM versus la potencia de recepción de la señal LTE. Logrando una sensibilidad de -23 dBm para un EVM de 26.41 % mientras que en la Fig.3 (b), se observa la curva del BER versus la potencia de recepción de la señal OFDM con una sensibilidad Rx de -30 dBm correspondiente a un BER de  $8.17 \times 10^{-4}$ .

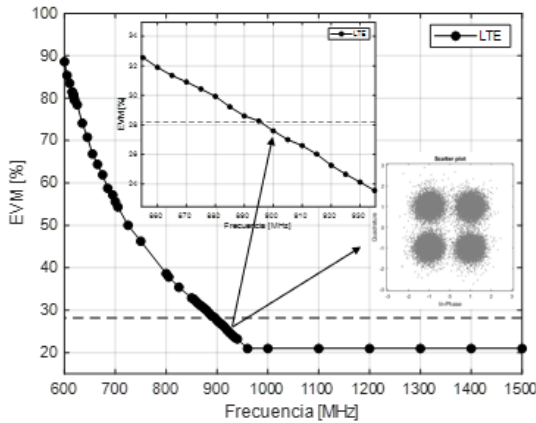


**Fig.3 (a)** EVM vs Potencia óptica (Prx) para una señal LTE a -6 dBm con 25 Km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM y con una FFT de  $2^{13}$ . El diagrama de constelación corresponde a un EVM=26.41 % es decir un BER=  $10^{-3}$



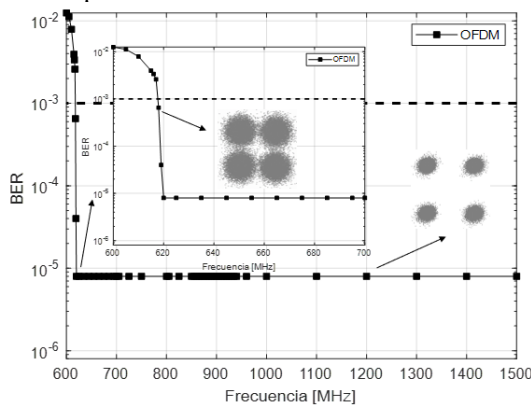
**Fig.3 (b)** BER vs Potencia óptica (Prx) para una señal OFDM a 0 dBm con 25 Km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM y con una FFT de  $2^{13}$ . El diagrama de constelación corresponde a un BER=  $10^{-3}$

En la Fig.4 (a), se observa el comportamiento de la señal LTE al desplazar la frecuencia central de forma descendente desde 1.5 GHz a 600 MHz. el valor del EVM se encuentra debajo de la línea punteada que representa un EVM del 28.2 % correspondiente a un BER de  $10^{-3}$ . Este valor de 27.59 % se mantiene hasta la frecuencia límite de 900 MHz.



**Fig.4 (a)** EVM vs Frecuencia para la señal LTE con -6 dBm transmitida con 25 Km de fibra óptica monomodo. El diagrama de constelación corresponde a un EVM=27.59 % es decir un BER=  $10^{-3}$  y un zoom del espectro para 900MHz.

Por otro lado, en la Fig.4 (b), se presenta la gráfica del BER de la señal OFDM versus el desplazamiento de frecuencia. Se observa que en el rango de 1.5 GHz hasta 900 MHz el valor del BER se mantiene constante en  $10^{-5}$  y por debajo de la línea punteada que corresponde a un BER de  $10^{-3}$ . A partir de la frecuencia de 900 MHz a 600 MHz el valor del BER se dispara a un BER de  $10^{-2}$  que ya no es un valor idóneo para que ambas señales puedan coexistir en un mismo medio.

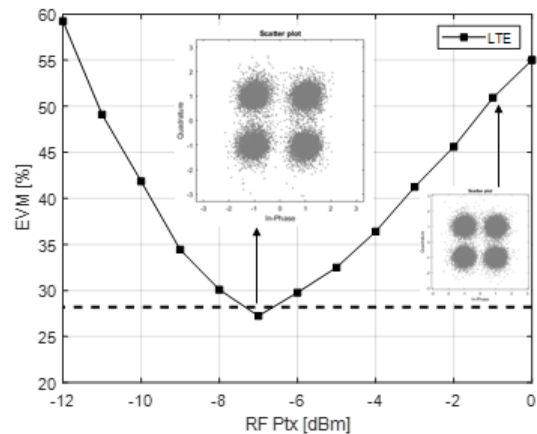


**Fig.4 (b)** BER vs frecuencia para una señal OFDM a 0dBm con 25 Km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM a 900 MHz. El diagrama de constelación de la izquierda corresponde a un BER=  $10^{-3}$  en un zoom del cambio de frecuencia y a la derecha una constelación de un BER=  $10^{-5}$

Por lo tanto, asignando a LTE una frecuencia de 900 MHz se obtiene un EVM de 27,59 % y para OFDM un BER de  $10^{-5}$  las dos señales se transmiten conjuntamente sin interferencias y se encuentran dentro del límite para aplicar técnicas de corrección de errores (FEC, Forward Error Correction).

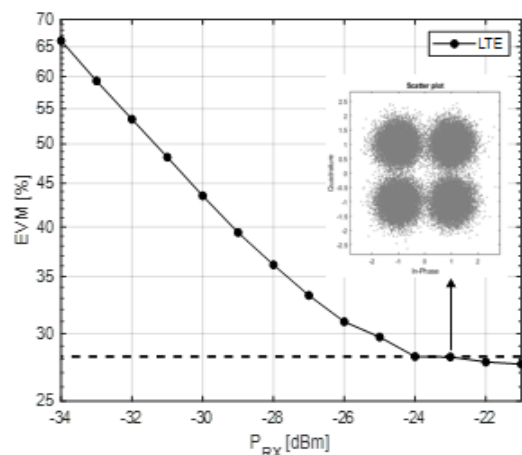
Considerando el espectro de 900 MHz y los parámetros de configuración con una potencia RF de -6 dBm de la señal LTE y con una potencia RF de 0 dBm de la señal OFDM se optimiza la potencia RF de LTE transmitiendo simultáneamente. En la Fig.5, se presenta la señal

LTE optimizada se obtiene una potencia RF de LTE de -7 dBm con un EVM de 27.24% que fue el valor más bajo de la curva.



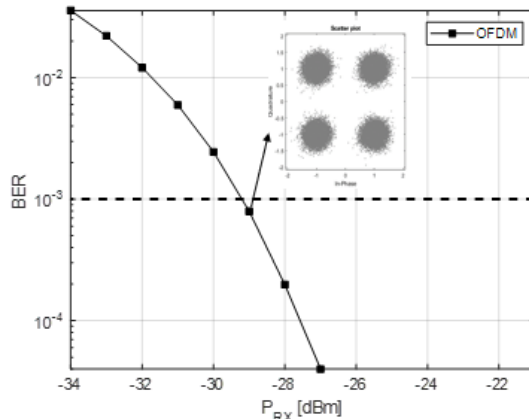
**Fig.5** EVM vs Potencia RF (Ptx) para la señal LTE optimizada con -7 dBm transmitida en conjunto con la señal OFDM a una frecuencia de 900 MHz a 25 Km de fibra óptica monomodo. El diagrama de constelación corresponde a un EVM=27.24 % es decir BER=  $10^{-3}$  y a la derecha un BER=  $10^{-1}$

Una vez establecido la nueva frecuencia de operación de LTE a 900 MHz. Se realiza el análisis del comportamiento de las señales que se transmiten simultáneamente dentro de un enlace óptico y moduladas con una misma longitud de onda 1554.94 nm. En la Fig.6 (a), la gráfica del EVM versus la potencia de recepción RF a -7 dBm para un EVM de 28.17 % corresponde una sensibilidad Rx de -23 dBm.



**Fig.6 (a)** EVM vs Potencia óptica (Prx) optimizada para una señal LTE con -7 dBm a 25 Km de fibra óptica monomodo. El diagrama de constelación corresponde a un EVM=28.17 % es decir BER=  $10^{-3}$

La Fig.6 (b), corresponde a la gráfica del BER versus potencia de recepción de la señal OFDM de  $7.94 \times 10^{-4}$  con una sensibilidad Rx de -29 dBm.



**Fig.6 (b)** BER vs Potencia óptica ( $P_{rx}$ ) para la señal OFDM a 0 dBm optimizada con -7 dBm a 25 Km de fibra óptica monomodo. El diagrama de constelación corresponde a un BER=  $10^{-3}$

#### IV. CONCLUSIONES

Mediante una co-simulación numérica se determinó los parámetros de configuración para una red de acceso óptico convergente de las señales OFDM y LTE dentro de un enlace óptico de 25 Km con una potencia RF de -7 dBm modulados con una misma longitud de onda de 1994.94 nm correspondiente a una banda C (C28) logrando una sensibilidad Rx de -29 dBm y -23 dBm respectivamente a un BER=  $10^{-3}$  y EVM= 28.17 %, con los valores obtenidos se comprueba que la señal OFDM por su alta componente espectral transfiere energía a la señal LTE por las bajas componentes que esta señal posee, logrando una transmisión libre de errores.

Se obtuvo una reducción de 600MHz en la separación de frecuencia optimizando el espectro, estableciendo una frecuencia de LTE en la banda de 900 MHz correspondiente a un EVM = 27.59 %, está frecuencia actualmente se está empleando como una banda estándar de telefonía móvil GSM y UTMS que abrieron camino para la incorporación a 4G logrando una reducción de costos enfocados en las redes inalámbricas y dando una valoración de espectro para futuros avances tecnológicos.

#### REFERENCIAS

[1] J. Espinosa de los Monteros, Ó. López Gómez y S. García, «Técnico en Telecomunicaciones,» vol. Tomo I, p. 67, 2002.

[2] J. A. Navarro Giovanetti, «Evolución de 3G y su convergencia a 4G en

comunicaciones móviles,» p. 11, 2008.

- [3] N. A. López Muñoz, «Efecto de las redes de cuarta generación (LTE) en los servicios móviles en Chile,» p. 59, 2011.
- [4] G. J. Flores Pulupa y M. F. Villavicencio Tenelema, «Diseño e implementación de una red óptica pasiva (PON) a 10 Gbaud/s empleando PAM4 con pre-compensación,» p. 2, 2019.
- [5] R. G. Morales Álvarez, «Estudio técnico y análisis del desempeño de small cells para solventar problemas de capacidad, cobertura y calidad dentro de una red de telefonía móvil 4G LTE.,» pp. 2-3, 2015.
- [6] GSMA, «Los beneficios de la neutralidad tecnológica en las licencias de espectro,» *Coleagoconsulting*, p. 5, 2019.
- [7] E. M. Yáñez Mora, «Modulación OFDM y sistemas Ópticos,» p. 9, 2016.
- [8] L. A. Scricca Yanes, «Planificación de redes LTE,» p. 11, 2013.
- [9] E. M. Yáñez Mora, «Modulación OFDM y Sistemas Ópticos,» pp. 10-11, 2016.
- [10] W. Shieh y I. Djordjevic, «OFDM for Optical Communications,» p. 20, 2010.
- [11] F. J. Vásquez Bonilla, «Análisis del comportamiento de la señal OFDM al pasar por un canal óptico con receptor no coherente en redes PON,» p. 7, 2020.
- [12] I. N. Cano, M. N. Tipán y G. V. Arévalo, «OFDM an LTE Data Convergence Test in Optical Access Networks,» 2015.
- [13] G.692, «Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos,» *Sistemas y Medios de transmisión, Sistemas y Redes Digitales*, p. 7, 1999.
- [14] G.984.2, «Transmission systems and media, digital system and networks,» p. 18, 2019.
- [15] R. O. Muñoz Ortiz, M. A. Cely Mancipe, G. A. Puerto Leguizamón y C. A. Suárez Fajardo, «Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica,» p. 586, 2015.

- [16] N. E. Amagua Masabanda y N. A. Mogro Mármol, «Análisis y simulacion de un enlace de radio sobre fibra óptica (ROF) a 60 GHz,» p. 59, 2013.
- [17] A. Technologies, «8 Hints for Making and Interpreting,» p. 55, 2005.
- [18] B. N. M. W. A. J. D. H. S. K. Rene Schmogrow, «Error Vector Magnitude as a Performance Measure,» p. 3, 2012.