

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

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

**TEMA:  
IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PROTOTIPO  
DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN COHERENTE EN REDES  
ÓPTICAS PASIVAS**

**AUTORES:  
LAURA EVELYN LAGOS JÁCOME  
CRISTHIAN ALEXIS SALCEDO SOTELO**

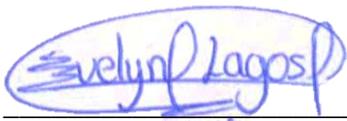
**TUTOR:  
GERMÁN VICENTE ARÉVALO BERMEO**

**Quito, julio del 2018**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotros, Laura Evelyn Lagos Jácome y Cristhian Alexis Salcedo Sotelo con documentos de identificación N° 1721843611 y N° 1717850141 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación, intitulado: “IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN COHERENTE EN REDES ÓPTICAS PASIVAS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Electrónica e Ingeniero Electrónico, 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 nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Laura Evelyn Lagos Jácome  
CI: 1721843611



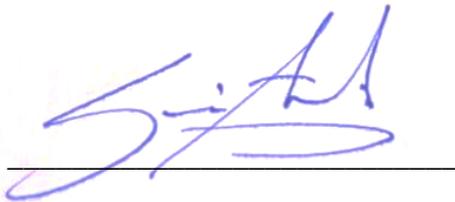
Cristhian Alexis Salcedo Sotelo  
CI: 1717850141

Quito, julio de 2018.

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

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN COHERENTE EN REDES ÓPTICAS PASIVAS” realizado por Laura Evelyn Lagos Jácome y Cristhian Alexis Salcedo Sotelo, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2018.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'G. Arévalo', written over a horizontal line.

Germán Vicente Arévalo Bermeo

CI: 010315250-0

# IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN COHERENTE EN REDES ÓPTICAS PASIVAS

## IMPLEMENTATION AND CHARACTERIZATION OF A COHERENT TRANSMISSION PROTOTYPE SYSTEM IN PASSIVE OPTICAL NETWORKS

Laura Lagos Jácome<sup>1</sup>, Cristhian Salcedo Sotelo<sup>1</sup>

### Resumen

El siguiente artículo presenta el desarrollo de un prototipo de sistema coherente, cuyo propósito fue caracterizar y medir el desempeño del mismo a través del envío de datos con modulación DPSK. Esto se llevó a cabo sobre una red óptica pasiva (passive optical network - PON) en tiempo real, utilizando el software Matlab™ para la realización del procesamiento digital de la señal (DSP) y la obtención de parámetros como la tasa de bits errados (Bit Error Rate - BER) y el vector de error de magnitud (Error Vector Magnitude - EVM). Los datos transmitidos a 10 Gb/s en los escenarios de Back to Back (BtoB) y sobre un enlace óptico a 20, 45 y 70 km de fibra monomodo G652D, fueron recibidos utilizando un sistema de detección coherente homodino y heterodino. La sensibilidad del receptor fue alrededor de -20.9 dBm para homodino y -20.3 dBm para heterodino con un BER de  $10^{-3}$  que correspondió a un EVM del 47%.

**Palabras Clave:** PON, DPSK, Red Óptica.

### Abstract

The following article presents the development of a coherent transmission system prototype, whose purpose was to characterize and measure the system's performance by sending data with DPSK modulation. This took place over a passive optical network (passive optical network - PON) in real-time, using Matlab™ for the digital signal processing (DSP). We obtained performance parameters as the Bit Error Rate (BER) and the Error Vector Magnitude (EVM). Data transmitted at 10 Gb/s, Back to Back (BtoB) and with an optical link of 20, 45 and 70 km of G652D single-mode fiber, were received using a homodyne and heterodyne coherent detection system. The sensitivity of the receiver was around -20.9 dBm for homodyne and -20.3 dBm for heterodyne, for a goal BER of  $10^{-3}$ , which corresponds to a 47% EVM.

**Keywords:** PON, DPSK, Optical Network.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica (mención Telecomunicaciones) - Universidad Politécnica Salesiana, UPS - sede Quito.

## **1. Introducción**

En los últimos años las comunicaciones a nivel mundial ha crecido de manera significativa, y ha llevado a que empresas prestadoras de servicio (Voz, Datos, Video) y Organizaciones mundiales como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (International Telecommunications Union - ITU), trabajen con nuevos diseños de red para suplir las grandes demandas de velocidad y escalabilidad de los suscriptores. Por lo cual la fibra óptica es una solución que permite a los usuarios brindar un mayor ancho de banda y mejores servicios al contar con accesos por medio de fibra óptica como son las redes PON [1].

Conjuntamente estas redes permiten reemplazar los elementos activos en una red por elementos pasivos, lo que permite que los costos de la red se reduzcan en un gran porcentaje. Sin embargo en la actualidad debido a la revolución del internet y la gran demanda de tráfico en las redes ópticas, se ha realizado investigaciones sobre técnicas que se apliquen en una detección coherente con el fin de solventar esta necesidad. En [2] se menciona que los sistemas ópticos coherentes tienen varias características superiores en comparación con el sistema de detección directa por modulación por pulso-código "Intensidad-Modulación" (Pulse-Code Modulation-"Intensity-Modulation, PCM-IM) convencional, quien indica que el sistema coherente tiene un nivel de recepción de señal limitado solo por el ruido de la señal de disparo, siempre que el oscilador local tenga suficiente potencia óptica en el receptor. Los sistemas ópticos coherentes en el lugar del sistema de detección directa PCM-IM mejoran notablemente los niveles de señal recibidos para lograr un índice de error prescrito [2]. Por lo que la detección coherente denominada así por combinar la señal con un Oscilador Local (Local Oscillator, LO) antes de ingresar al receptor, promete optimizar la eficiencia y la

potencia de la señal, al mismo tiempo Michael G. Taylor [3] señala que el método de detección más avanzado es la detección coherente ya que ofrece una capacidad de filtrado óptico inherente ultra estrecho, útil para la multiplexación por división de longitud de onda, dependiendo de la frecuencia de LO existen técnicas de detección coherente como la homodina, heterodina. Diversas investigaciones dan una visión de estas técnicas de detección, es así que [4] señala que en la técnica de detección homodina la frecuencia del oscilador local debe coincidir con la frecuencia de portadora de la señal, mientras que en la detección heterodina la frecuencia del oscilador local debe ser diferente a la frecuencia portadora. Comparando el receptor heterodino del homodino, este es mucho más sencillo de implementar no obstante este presenta más desafíos en la eliminación del ruido en la señal, pese a ello [5] señala que el receptor heterodino tiene un mayor consumo de energía debido a requiere más etapas, pese a ello es la principal elección de los diseñadores de red, por otra parte Kimura, T. [6] expresa que en 1962 se demostró que la detección óptica heterodina u homodina permiten mejorar la relación señal/ruido (S/N) por encima de la detección directa.

Este artículo tiene como finalidad analizar el comportamiento de la detección coherente (homodina, heterodina), a través del envío de datos desde el generador de señales arbitrarias pasando sobre un enlace back to back, 20, 45 y 70 Km de fibra óptica monomodo (Simple Mode Fiber - SMF) G652D, para luego realizar el Procesamiento Digital de la señal (DSP) en el software Matlab.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: la sección dos describe la estructura y el funcionamiento del sistema implementado, la sección tres presenta y analiza los resultados obtenidos en la experimentación. Finalmente, en la sección cuatro se concluye el artículo.

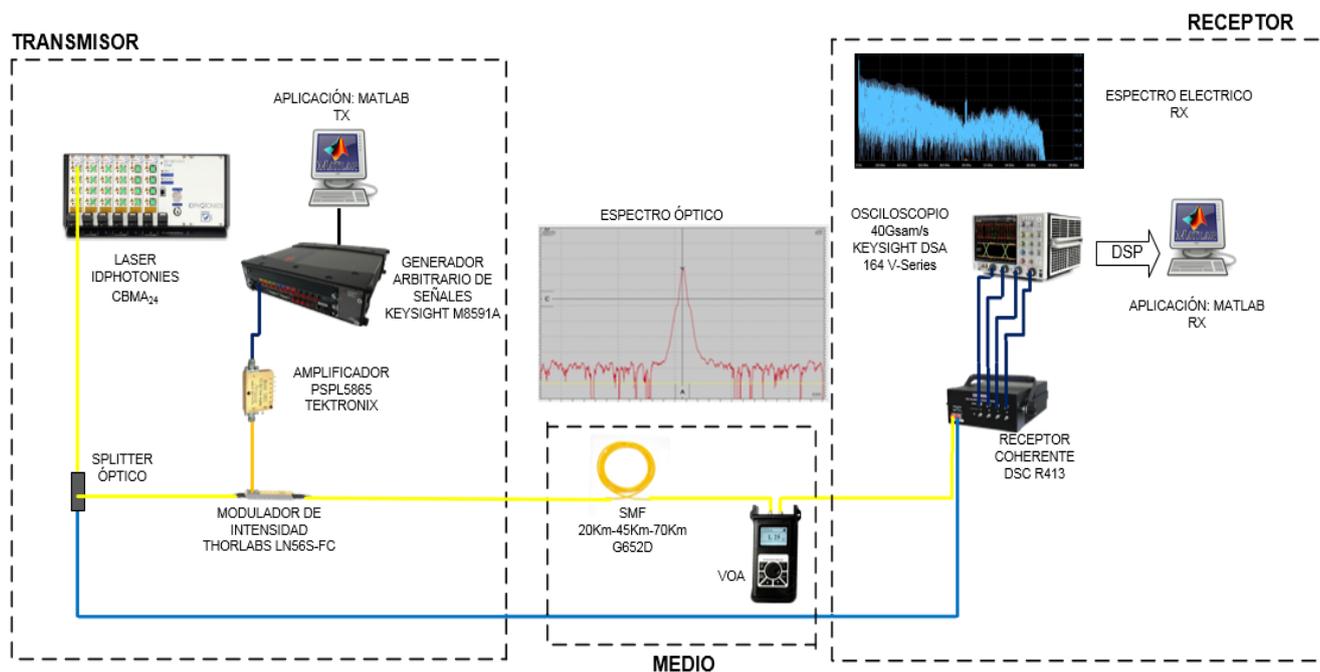


Fig. 1 Diseño de la red PON

## 2. Experimentación

### 2.1 Parámetros y Características de la Red Óptica

La Fig. 1 hace referencia a la configuración del prototipo implementado para la recepción coherente de datos.

La red óptica estuvo compuesta en la parte del transmisor por una láser continuamente ajustable (Continuously Tunable Laser - H01) con una potencia de transmisión de 10 dBm con estabilidad de potencia 0.03 dB durante 24 horas, el cual se conectó a un splitter óptico (2:1) que permitió inyectar el haz de luz por una de sus salidas a LO del receptor coherente, la otra de sus salidas se conectó al modulador de intensidad (MI) LN56S-FC [7], mismo que se conectó a un amplificador PSPL5865 de 12,5 Gb/s con rendimiento clave de 7.5 voltios de amplitud de salida, sus pines 1,3 y 7 se alimentaron a (+8V), (-5V) y (GND) respectivamente [8], el cual se conectó al generador arbitrario de señales (Arbitrary Waveform Generator - AWG) M8195A de 65 GSa/s con velocidad de muestreo de hasta 65 GSa / s (en hasta 4 canales) [9], con la ayuda de Matlab permitieron generar los datos y enviarlos por la fibra óptica a una velocidad de 10Gb/s.

El enlace óptico se compuso por una fibra monomodo (SMF) G652D de 20 km con dispersión de 17 ps/nm/Km, atenuación de 0.2 dB/km. Además, se incluyó un atenuador óptico variable (Variable Optic Attenuator - VOA), con un rango de atenuación variado entre 14 a 33 dB, permitiendo emular diferentes potencias de recepción, con el propósito de determinar el BER en función de la potencia recibida en el receptor.

Por otro lado, el receptor óptico coherente (Coherent Optical Receiver) DSC R413 contó con cuatro fotorreceptores equilibrados lineales PIN / TIA y un híbrido óptico de 90° grados y doble polarización [10], el cual se conectó al osciloscopio en tiempo real DSAV164A de 16GHz y 4 canales analógicos con una frecuencia de muestreo máxima de 80 GSa/s (2 canales) y 40 GSa/s (4 canales) que permitió la adquisición de las señales I/Q [11].

## 2.2 Generación de datos

El software utilizado para la generación de la información fue Matlab, se creó una secuencia binaria pseudo-aleatoria (pseudorandom binary sequence -PRBS) repetida 394 veces con el fin de obtener un total de 50038 bits, mismos que se ligaron a una pre-secuencia de entrenamiento de treinta ceros y unos a la mitad de la amplitud de la PRBS, usados como bits de sincronización que cumplieron la función de indicadores (de inicio y de fin de la señal).

Los datos fueron modulados por desplazamiento de fase diferencial a través del modulador de intensidad (IM). El mismo que se caracterizó encontrando el voltaje de bias ( $V_{bias}$ ) mínimo, posterior a esto la señal es amplificada para obtener el  $V_{\pi}$  correspondiente con el fin de que los bits con valor de 0 se ubique a  $0^{\circ}$  y los 1 a  $180^{\circ}$  como se ilustra en la Fig. 2.

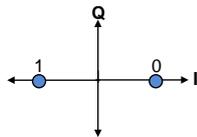


Fig 2. Diagrama de constelación de la señal DPSK

## 2.3 Adquisición y procesamiento digital de la señal

Las señales entregadas por el receptor coherente fueron adquiridas mediante los 4 canales del osciloscopio en tiempo real, para un procesamiento off-line en Matlab.

### 2.3.1 Detección DPSK

Como se muestra en la Fig 3 para la detección de la señal DPSK [12], en Matlab a cada una de las señales obtenidas del osciloscopio se aplicó un filtro pasa bajos con método de diseño FIR Equiripple de tercer orden con un ancho de banda de 13 GHz para eliminar el ruido. Cada una de las señales, se retrasaron 1 bit lo cual permitió transformar los cambios de fase en cambios de intensidad para finalmente ser multiplicadas por las señales filtradas obteniendo la señal DPSK original [13].

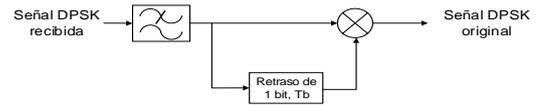


Fig. 3 Detección DPSK

Mediante la ecuación 1, se calculó el número de muestras por bit para obtener la mejor muestra, conociendo que la velocidad de transmisión es 10Gb/s y la velocidad de muestreo es 40 GSa/s en el osciloscopio.

$$S_{pb} = \frac{V_m}{V_{Tx}} \quad (1)$$

Dónde,  $S_{pb}$  son las muestras por Bit (Samples per bit),  $V_m$  es la velocidad de muestreo y  $V_{Tx}$  es la velocidad de transmisión.

### 2.3.2 Vector de magnitud de error (Error vector magnitude - EVM)

La ITU detalla a la magnitud del vector error como la diferencia vectorial entre la señal de referencia ideal y la señal medida en un momento dado [14]. El EVM se dedujo en base al BER y el SNR, donde según [15] el BER fue definido como el número de bits recibidos de manera errónea respecto a la cantidad total de bits transmitidos en un intervalo de tiempo, mientras que la relación señal/ruido (signal to noise ratio-SNR) se definió como la relación, entre la intensidad de la señal y la intensidad del ruido que acompaña a dicha señal [16]. Esta relación se mide en decibeles (dB). Según Qinfang Sun [17] la fórmula que relaciona el BER y el SNR está representada por la ecuación 2

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( 10^{\frac{SNR}{20}} \right) \quad (2)$$

Donde,  $\operatorname{erfc}$  es la función error complementaria, utilizada para buscar soluciones a problemas de ecuaciones en el campo de la probabilidad, estadística y funciones diferenciales no homogéneas ( $f(x) \neq 0$ ). Al despejar y obtener el SNR de la ecuación 2 se la aplicó en la ecuación 3 dada por [18].

$$EVM = \left[ \frac{1}{SNR} - \frac{2}{\sqrt{\pi SNR}} e^{-SNR} + 2 \operatorname{erfc}(\sqrt{SNR}) \right] \quad (3)$$

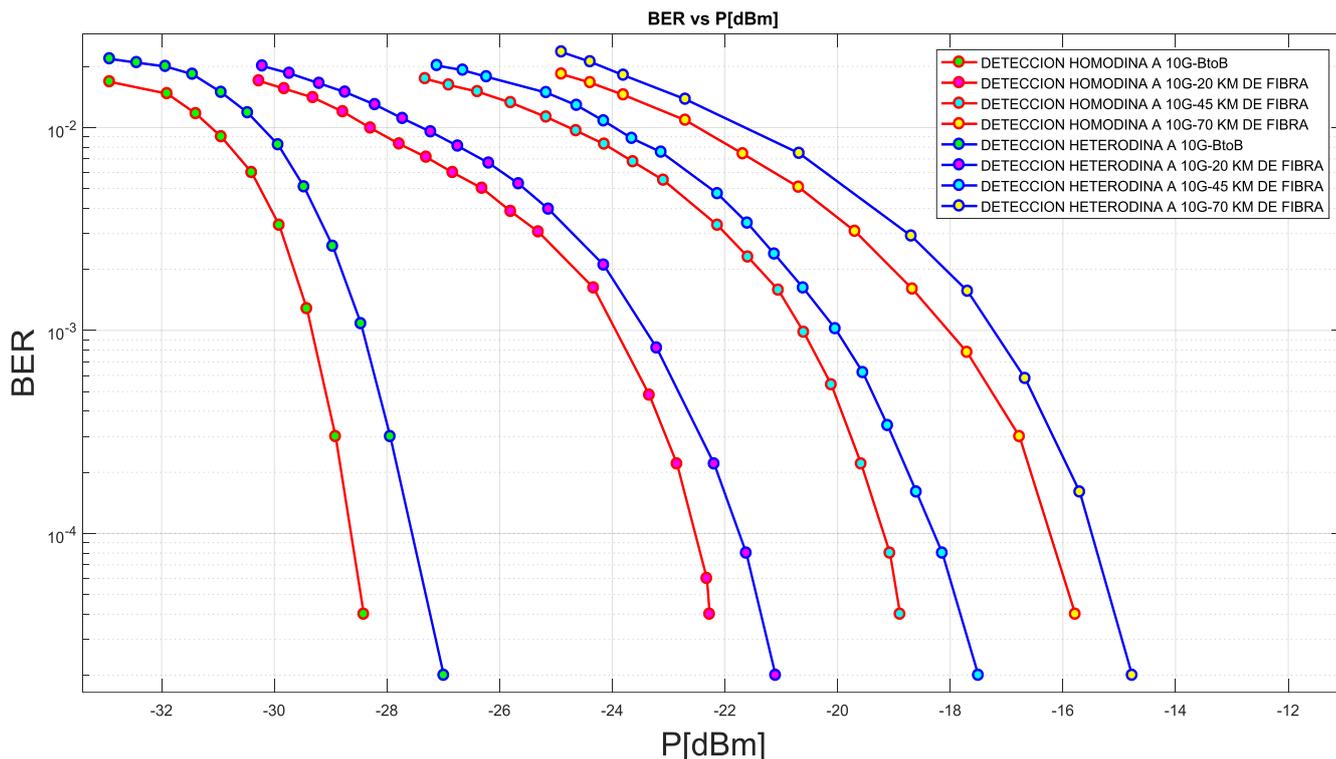


Fig. 4 Gráfica BER vs Potencia de recepción.

### 3. Análisis de Resultados

Experimentalmente se comprobó una red PON y la detección coherente, al ser introducido un rango de atenuación variable entre 14 a 33 dB, esto se lo realizó mediante cuatro pruebas: BtoB, 20, 45 y 70 Km de fibra óptica SMF G652D a 10 Gb/s, tanto en detección homodina y heterodina.

La Fig 4 muestra la curva BER vs. Potencia de recepción para diferentes escenarios. En el caso de la detección homodina BtoB la sensibilidad para un BER de  $10^{-3}$ , corresponde a un valor cercano de -29,42 dBm, en 20 Km de fibra fue de -24,33 dBm en 45 Km de fibra -21,05 dBm y -18,67 dBm sobre 70 Km de fibra. Además, en la detección heterodina BtoB la sensibilidad para un BER de  $10^{-3}$ , corresponde a -28,46 dBm, sobre 20 Km de fibra fue de -24,15 dBm en 45 Km de fibra -20,61 dBm y -17,69 dBm sobre 70 Km de fibra.

En la Fig. 4 se observa que la curva de la detección homodina se desplaza hacia la izquierda con respecto a la curva de la detección heterodina donde se obtuvo una penalidad alrededor de 1 dB, esto conllevó a

indicar que la detección homodina tuvo un mejor rendimiento.

Al mismo tiempo se obtuvo mediante la ecuación 3 los valores del EVM para los diferentes escenarios. En las tablas 1, 2, 3 y 4 se indica los valores de EVM correspondientes a BtoB y 70 Km de fibra tanto con detección homodina y heterodina. Se pudo distinguir un EVM aproximado de 47%, que corresponde a un BER de  $10^{-3}$ .

Tabla 1. Valores de EVM y BER para el tráfico modulado con DPSK con detección homodina BtoB.

Potencia de Recepción dBm	BER	EVM%
-28,41	3,9970E-05	35,85
-28,91	2,9977E-04	41,19
-29,42	1,2790E-03	46,83
-29,91	3,2975E-03	51,91
-30,4	5,9954E-03	56,01
-30,94	8,9932E-03	59,34
-31,39	1,1691E-02	61,80
-31,9	1,4669E-02	64,16
-32,92	1,6787E-02	65,68

# Lagos-Salcedo/ IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN COHERENTE EN REDES ÓPTICAS PASIVAS

**Tabla 2.** Valores de EVM y BER para el tráfico modulado con DPSK con detección heterodina BtoB.

Potencia de Recepción dBm	BER	EVM%
-26,99	2,00E-05	34,42
-27,94	3,00E-04	41,20
-28,46	1,08E-03	46,06
-28,96	2,60E-03	50,49
-29,47	5,10E-03	54,82
-29,93	8,21E-03	58,55
-30,47	1,18E-02	61,89
-30,94	1,49E-02	64,33
-31,45	1,83E-02	66,71
-31,93	2,00E-02	67,81
-32,44	2,09E-02	68,37

**Tabla 3.** Valores de EVM y BER para el tráfico modulado con DPSK con detección homodina sobre 70 Km de fibra.

Potencia de Recepción dBm	BER	EVM%
-15,78	4,00E-05	35,85
-16,77	3,00E-04	41,20
-17,7	7,79E-04	44,67
-18,67	1,60E-03	47,90
-19,69	3,08E-03	51,49
-20,69	5,08E-03	54,79
-21,68	7,41E-03	57,69
-22,7	1,09E-02	61,12
-23,8	1,45E-02	64,04
-24,39	1,66E-02	65,55
-24,9	1,83E-02	66,71

**Tabla 4.** Valores de EVM y BER para el tráfico modulado con DPSK con detección heterodina sobre 70 Km de fibra.

Potencia de Recepción dBm	BER	EVM%
-14,77	2,00E-05	34,42
-15,7	1,60E-04	39,29
-16,67	5,80E-04	43,51
-17,69	1,56E-03	47,78
-18,69	2,92E-03	51,17
-20,68	7,45E-03	57,73
-22,7	1,38E-02	63,50
-23,8	1,81E-02	66,58
-24,39	2,11E-02	68,50
-24,9	2,35E-02	69,94

## 4. Conclusiones

En el actual trabajo se ha demostrado que el sistema de transmisión de información con modulación DPSK logra un mejor desempeño empleando la detección coherente homodina y

heterodina, se logra obtener un BER de  $10^{-3}$  con una potencia de recepción aproximada de -18.67 dBm en detección homodina, mientras que con una potencia de recepción aproximada de -17,69 dBm en la detección heterodina, dicho valor de BER correspondería a un valor aproximado de EVM del 47%, después de 70 km de fibra a 10 Gb/s.

Por lo tanto el sistema homodino es más eficiente puesto que necesita aproximadamente 1dBm menos de potencia de recepción para conseguir un BER objetivo para la FEC a comparación del sistema heterodino.

## 5. Referencias

- [1] J. S. Guevara Henao, "Tecnologías de redes Pon", *Consult. Tecnol. redes PON*, pp. 1–3, 2011.
- [2] Y. Y. (IEEE) y T. K. (IEEE), "Coherent Optical Fiber Transmission Systems", *Quantum Electron.*, vol. QE-17, núm. 6, p. 17, 1981.
- [3] M. G. Taylor, "Coherent Detection Method Using DSP for Demodulation of Signal and Subsequent Equalization of Propagation Impairments", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 16, núm. 2, pp. 674–676, 2004.
- [4] G. P. Agrawal, *FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEMS*, Fourth. Rochester, New York, 2010.
- [5] S. Hossain y M. S. Hussain, "A Comparative Analysis between Homodyne and Heterodyne Receiver Architecture", vol. 2, núm. December, pp. 152–157, 2011.
- [6] T. Kimura, "Coherent optical fiber transmission", *J. Light. Technol.*, vol. 5, núm. 4, pp. 414–428, 1987.
- [7] Z. Linbo y Z. Linbo, "LN56S-FC - March 16, 2015", 2015.
- [8] D. Amplifier y P. Datasheet, "12.5 Gb/s Driver Amplifier", pp. 1–8.
- [9] K. Technologies, "Keysight Technologies Website", pp. 1–21, 2014.
- [10] D. Sheet, "DP-QPSK 40 / 100 Gbps Coherent Receiver Lab Buddy

Description : Salient Features : Block

Diagram : Applications :

Specifications : Absolute Maximum

Ratings ”:; núm. March, pp. 1–11, 2013.

- [11] D. Sheet, “Keysight Technologies Infiniium V-Series Oscilloscopes”.
- [12] L. W. Couch, *Sistemas de comunicaciones digitales y analogicos*, Séptima., vol. 1. 2008.
- [13] C. C. Rodríguez, A. M. C. Soto, y A. G. Molina, “DPSK for optical access networks”, *2012 IEEE Colomb. Commun. Conf. COLCOM 2012 - Conf. Proc.*, núm. 70, 2012.
- [14] R. I. Sm y S. M. S. Spectrum, “Recommendation ITU-R SM.1600-1”, 2012.
- [15] R. U. D. E. L. A. S. G, “G.826”, 2003.
- [16] L. A. Proteína *et al.*, “Universidad nacional de tucumán”, 2008, pp. 1–2.
- [17] P. P. Qinfang Sun, “RATE ADAPTATION USING ERROR VECTOR MAGNITUDE”, 2010.
- [18] H. A. Mahmoud y H. Arslan, “Error vector magnitude to SNR conversion for nondata-aided receivers”, *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, núm. 5, pp. 2694–2704, 2009.