

Análisis del desempeño de la transmisión de datos en banda base y RF sobre redes PON de largo alcance

Jhon James Granada Torres

M.Sc(c) Ingeniería de Telecomunicaciones,
Universidad Nacional de Colombia (UNAL)
Investigador Grupo CMUN, UNAL
Bogotá, Colombia
jjgranadato@unal.edu.co

Claudia Milena Serpa Imbett

Estudiante Ph.D Ingeniería,
Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)
Medellín, Colombia
claumiseimbett@gmail.com

Jesús Álvarez Guerrero

Ing. Electrónico,
Universidad Francisco de Paula Santander
Cúcuta, Colombia
Jesus1216@gmail.com

Gloria Margarita Varón Durán

Ph. D Optoelectronique et hyperfréquence,
Université de Toulouse, ISAE, Francia
Docente Tiempo Completo, Investigador Grupo CMUN,
Universidad Nacional de Colombia
Bogotá, Colombia
gmvarond@unal.edu.co

Neil Guerrero González

Ph. D Fotónica,
Universidad Tecnológica de Dinamarca
Docente Tiempo Completo, Investigador Grupo GITA,
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
neguego@gmail.com

Resumen— En este trabajo se analiza el desempeño de una red óptica pasiva de largo alcance en función de la dispersión y la relación señal a ruido óptica. Hoy en día, las redes ópticas pasivas con capacidad de Gbps están estandarizadas a una distancia de transmisión de 20 km y velocidades de transmisión en el canal descendente de 155 Mbps, 1 y 2,5 Gbps. Sin embargo, la tendencia de unir los niveles de metro y acceso sugiere la extensión de las redes ópticas pasivas hasta alcanzar distancias alrededor de los 100 km. En este trabajo se estudia a través de simulaciones en Virtual Photonics®(VPI), el desempeño de una red óptica pasiva de largo alcance, la cual transmite señales ópticas en banda base hasta una distancia de 100 km y de Radiofrecuencia hasta los 70 km. El análisis cualitativo de la transmisión de datos a través de la red PON se realiza basado en la calidad del diagrama de ojo. Asimismo, se calculan las curvas de bits erróneos en función de la relación señal a ruido óptica, para hacer un análisis cuantitativo respecto a las distancias y velocidades de transmisión. Las redes simuladas exhiben un mejor desempeño a distancias inferiores a 40 km para velocidades de 2,5 Gbps con fibras monomodo estándar y hasta los 70 km a 155 Mbps en banda base y radiofrecuencia con portadora de 60 GHz.

Palabras clave— banda base (BB), dispersión cromática (CD), fibra monomodo (SMF), radiofrecuencia (RF), relación señal a ruido óptica (OSNR), tasa de error de bit (BER).

Abstract— In this paper, the performance of long-reach passive optical network is analyzed in function of the dispersion and the optical-to-signal noise ratio. Nowadays, capable gigabits passive optical networks are standar-

dized to a transmission distance of 20 km, and downstream transmission speed of 155 Mbps, 1 and 2,5 Gbps. However, tendency to unite the metro and access levels suggests the extension of the passive optical networks up to distances around 100 km and in radiofrequency up to 70 km. In this work is studied the performance of long-reach passive optical network through simulations in Virtual Photonics®(VPI). This network transmits optical signals in baseband to a distance of 100 km. The qualitative analysis of data transmission through the passive optical network is made based on the quality of the eye diagram. Also, the bit-error rate is calculated according to the optical-to-signal noise ratio to make a quantitative analysis regarding the transmission distance and speed. The simulated networks exhibits a better performance at distances below 40 km at speeds to 2,5 Gbps with standard single-mode fiber and up to 70 km to 155 Mbps in baseband and radiofrequency at 60 GHz.

Keywords— baseband (BB) bit error rate (BER), chromatic dispersion (CD), optical signal to noise ratio (OSNR), single mode fiber (SMF), radiofrequency (RF).

INTRODUCCIÓN

Actualmente las redes troncales de telecomunicaciones (*backbone*) se implementan en fibra óptica, debido a las grandes ventajas de la fibra como canal de transmisión con respecto a los cables de cobre, entre ellas una mayor capacidad de transmisión y la inmunidad al ruido electromagnético [1]. El gran crecimiento en la demanda de an-

cho de banda expone nuevos retos en el desarrollo de sistemas de telecomunicaciones, sin embargo, la demanda de múltiples servicios por parte de los usuarios finales genera actualmente cuellos de botella en el segmento de la red de acceso. Con el fin de dar respuesta a esta demanda, la tecnología de la fibra hasta el hogar (FTTH, *Fiber to the home*) se posiciona como una solución prometedora para proveer de gran ancho de banda a las redes de acceso. FTTH se ha implementado en redes ópticas pasivas (PON, *Passive Optical Network*) en una arquitectura punto-multipunto, desde una oficina central (CO, *Central Office*) hasta los usuarios finales [2], [3], este tipo de redes, gracias a sus ventajas, tienen las características ideales para convertirse en la plataforma de transporte de sistemas de comunicaciones heterogéneas, que consisten en la unión de sistemas cableados e inalámbricos, para la redes de nueva generación, usando tecnologías como la Radio sobre fibra (Radio over Fiber) la cual transmite señales de radio frecuencia (RF) a través de la fibra óptica desde la CO hasta diferentes estaciones base (BS, *base station*). Las redes PON permiten ofrecer servicios de banda ancha a usuarios localizados a distancias de hasta 20 km de la CO [4], con estándares como el ITU-T G.984, conocido como GPON (Gigabit capable PON) con velocidades de transmisión ascendente (upstream) de hasta 1,25 Gbps y descendente (downstream) de hasta 2.5 Gbps.

Un fenómeno que limita la la transmisión en estas redes, es la interferencia intersímbolo (ISI, *intersymbol interference*), causada por la dispersión cromática (CD, *chromatic dispersion*) inherente a la fibra óptica. Así la ISI se convierte en uno de los principales factores de aumento de la razón de error de bit (BER, *Bit error rate*). La CD es debido a la dependencia del índice de refracción del material de la fibra, con las longitudes de onda de la fuente de luz que conlleva la información. Las longitudes de onda viajan a velocidades diferentes en la fibra, observándose un ensanchamiento temporal del pulso en los receptores [5].

Investigaciones en [16,17] muestran el alcance de transmisiones superiores a los 50 km en redes PON usando técnicas de acceso múltiple por división óptica (OCDMA-PON) sin compensación de dispersión. Se han realizado experimentos e implementaciones de redes híbridas basadas en PON con diferentes topologías y arquitecturas. En [20]

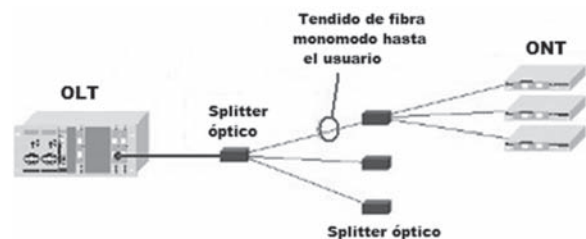
se expone el estado del arte más reciente con arquitecturas con multiplexación por división de tiempo (TDMA-PON) y multiplexación por división de longitud de onda (WDM-PON), lográndose recientemente en esta última transmisiones de hasta 90 km sobre fibra monomodo estandar usando OFDMA [19]. Se reportan estudios en redes DWDM-PON logrando transmisiones de hasta 72 km con fibras compensadoras de dispersión y redes de Bragg en fibra óptica (FBG) [18].

En este trabajo, se mostrará la simulación de una red PON en banda base (BB, *baseband*) usando fibras de dispersión estándar y dispersión desplazada. Se obtendrán los diagramas de ojo y las curvas de BER contra la relación señal a ruido óptica (OSNR, *optical signal to noise ratio*) para velocidades hasta los 2,5 Gbps. Mediante las curvas de BER y se evaluara la transmisión en de la red PON para distancias superiores al estándar GPON y se evaluará la viabilidad de transmisiones de señales de radiofrecuencia sobre las redes PON a frecuencias de 60 y 100 GHz.

Modelo del sistema de transmisión BB pon

Una red PON es un sistema de comunicaciones por fibra óptica en el que se establece una comunicación punto-multipunto entre un enrutador central denominado terminal óptico de línea (OLT, *optical line terminal*) y las unidades ópticas de usuario (ONT, *optical network terminal*). Para realizar la tarea de envío de datos, esta red utiliza unos elementos ópticos pasivos denominados divisores (*splitters*) como se muestra en la Fig. 1 [6]. El OLT transmite la información por la fibra en el formato de modulación elegido. En la simulación elaborada en VPI se obtendrán resultados para la transmisión de una señal en BB desde la OLT hasta un ONT usando fibras monomodo estándar (SMF, *Single-mode fiber*) con dispersión de 16 y 17,5 ps/nm.km o fibras estándar de dispersión (NZDSF, *Non Zero Dispersion Fiber*) con dispersión de 8 ps/nm.km.

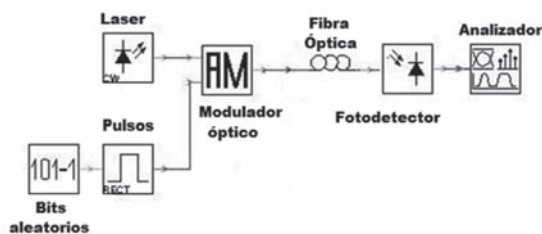
Fig. 1. ESQUEMA GENERAL DE UNA RED PON



La transmisión de una señal en BB usa la misma banda de frecuencias de los datos suministrados por la fuente de información en cualquier sistema de comunicaciones. En transmisiones ópticas, los pulsos generados de forma eléctrica, varían la potencia óptica del laser de forma ON-OFF, preniendo o apagando el laser cuando se transmita un '1' lógico y un '0' lógico respectivamente. Este tipo de modulación se conoce como modulación directa de intensidad. Esta modulación genera un efecto conocido como *chirp*, que es una fluctuación en las componentes espectrales y/o en la amplitud de la potencia a la salida del dispositivo laser distorsionando la señal transmitida siendo mayor el efecto a altas tasas de transmisión, por lo cual, se hace necesario hacer la modulación con un dispositivo adecuada para las modulaciones a altas frecuencias e independiente del laser [7]. Este tipo de modulación se llama modulación externa, la cual consiste en transmitir la luz del laser por un modulador externo que es una guía de onda óptico, el cual al inducirle un campo eléctrico varía sus propiedades refractivas y se altera la fase de la luz, este efecto permite obtener una modulación en intensidad a la salida del dispositivo. Entre los más utilizados están el modulador de electro-absorción y el modulador Mach-Zender.

El sistema BB PON implementado en el software VPI se muestra en la Fig. 2. Se generaron pulsos cuadrados aleatorios que se enviaron a través de la fibra utilizando un modular de externo ideal que modula la intensidad del laser según los pulsos eléctricos recibidos, haciendo la conversión electro-óptica. El laser usado transmite a una potencia de 1 mW, con longitud de onda de 1550 nm y un ancho de espectral de hasta 10 MHz. Se usaron fibras SMF con dispersiones de 8, 16 y 17.5 ps/nm.km. En el receptor se implementó la detección directa, que consiste en un fotorreceptor el cual hace la conversión del dominio óptico al dominio eléctrico.

Fig. 2. RED PON BB



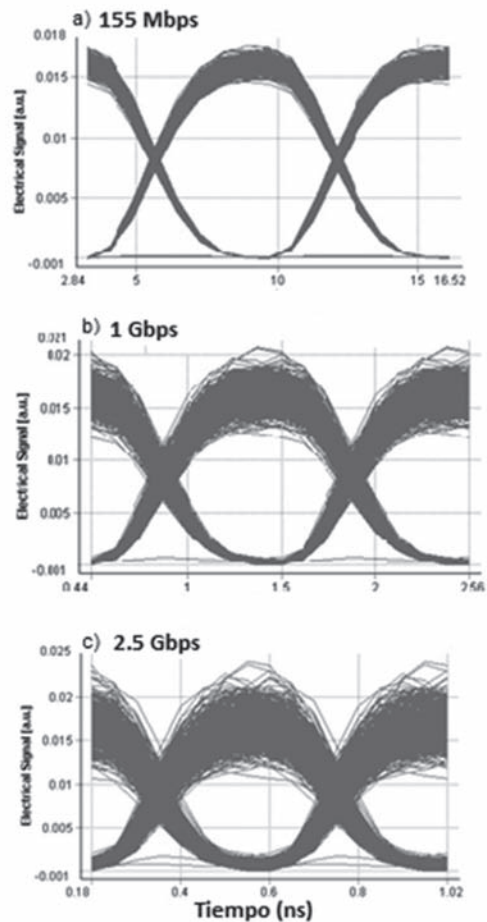
Análisis de la transmisión bb para una SMF con dispersión de 16 ps/nm.km

Para el sistema de la Fig. 2 se usó fibra SMF con valores estándar de dispersión y atenuación, 16 ps/nm.km y 0,2 dB/km respectivamente, en la ventana de los 1550 nm usando un modulador óptico con parámetros ideales. Se obtuvieron los diagramas de ojo para distancias de 40, 55 y 70 km, y las curvas BER vs. OSNR

A. Diagrama de ojo para distancias de 40, 55 y 70 km

Para esta distancia se varía la velocidad de transmisión y se obtienen los siguientes diagramas de ojo:

Fig. 3 DIAGRAMA DE OJO PARA UNA TRANSMISIÓN DE: A) 155 MBPS, B) 1 GBPS Y C) 2,5 GBPS, CON UNA LONGITUD DE LA FIBRA DE 40 KM



La Fig. 3 representa los diagramas de ojo para una distancia de 40 km y diferentes velocidades. Se observa que la degradación del ojo con relación al aumento de la velocidad.

En la Fig. 4 se observa cómo la degradación del diagrama de ojo es mayor a mayores velocidades en la distancia de transmisión de 55 km. Además, se observa una similitud con respecto a las gráficas obtenidas para la distancia de 40 km, la cual es proporcional a la distancia.

En la Fig. 5 se presentan los resultados para una distancia de 70 km, la cual exhibe un ojo más cerrado, observándose que el efecto de la dispersión en la fibra es mayoritario a distancias y velocidades de transmisión altas. Las Fig. 3.b, 4.b y 5.b presentan el resultado de diagramas de ojo a 1 Gbps a diferentes distancias. Se observa una variación muy similar a los casos presentados para diferentes distancias.

Fig. 4 DIAGRAMA DE OJO TRANSMISIÓN DE: A) 155 MBPS, B) 1 GBPS Y C) 2,5 GBPS A UNA DISTANCIA DE 55 KM

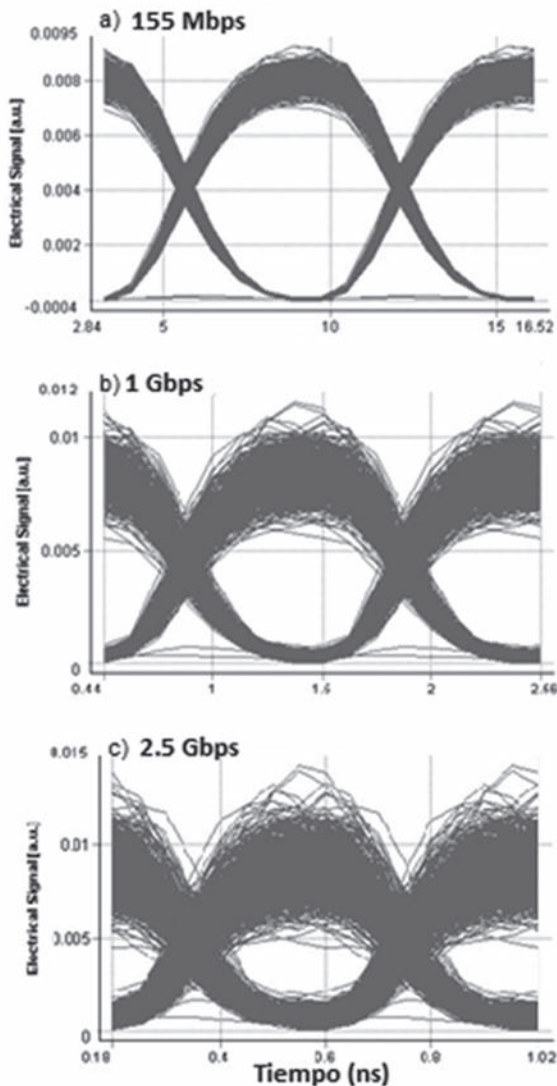
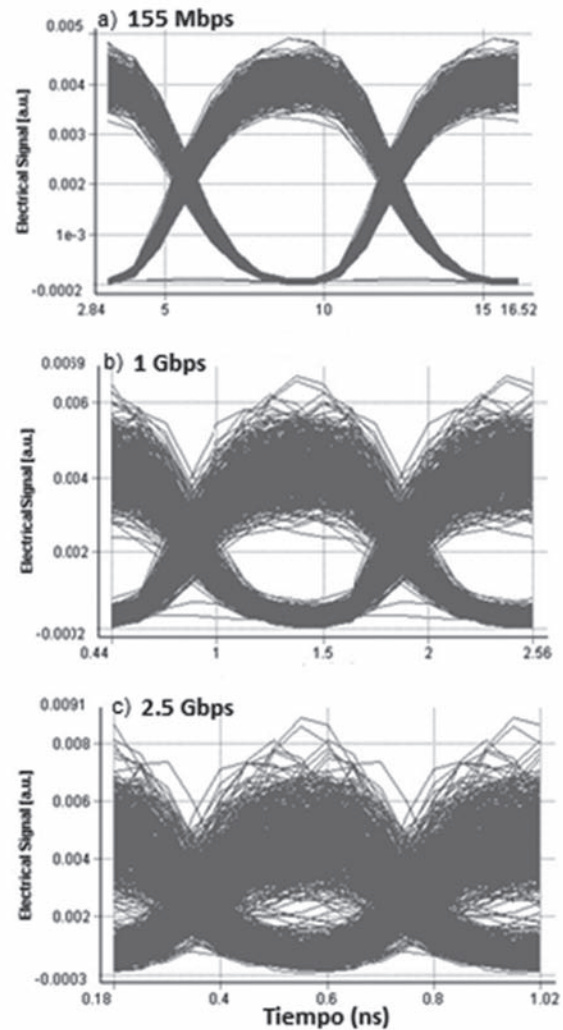


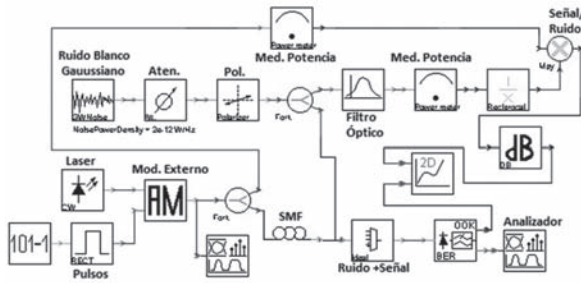
Fig. 5 DIAGRAMA DE OJO TRANSMISIÓN A: A) 155 MBPS, B) 1 GBPS Y C) 2,5 GBPS A UNA DISTANCIA DE 70 KM



B. Análisis mediante de la tasa de error de bit

Se analizará el efecto de la dispersión cromática mediante las curvas de BER vs. OSNR. Se adicionaron funciones al sistema de transmisión BB PON como se muestra en la figura 6 para la obtención de las curvas. Se tiene un generador de ruido blanco gaussiano conectado a un atenuador variable, con este dispositivo se varía la potencia del ruido que entra al canal de transmisión. Se tienen 2 dispositivos de medida de potencia, uno para el ruido y otro para la señal, con esto se obtiene la relación señal a ruido óptica y se muestra en decibeles, calculando el BER para cada una de las variaciones del ruido.

Fig. 6 SISTEMA DE TRANSMISIÓN BANDA BASE CON ADICIÓN DE RUIDO BLANCO GAUSSIANO Y MEDIDA DE POTENCIA



En la a Fig. 6 se obtuvieron tres gráficas para velocidades de transmisión diferentes, cada una con sus respectivas curvas BER vs. OSNR para distancias de 40, 55 y 70 km.

En las Fig. 7, 8 y 9 se observa un aumento que del BER lo que muestra una menor tolerancia al ruido.

Fig. 7 CURVAS BER VS. OSNR, VELOCIDAD DE TX: 155MBPS

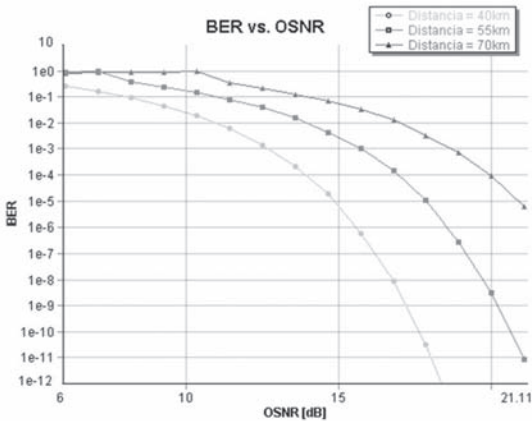


Fig. 8 CURVAS BER VS. OSNR, VELOCIDAD DE TX: 1 GBPS

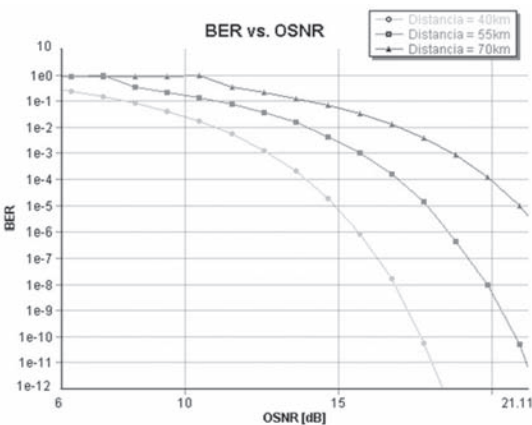
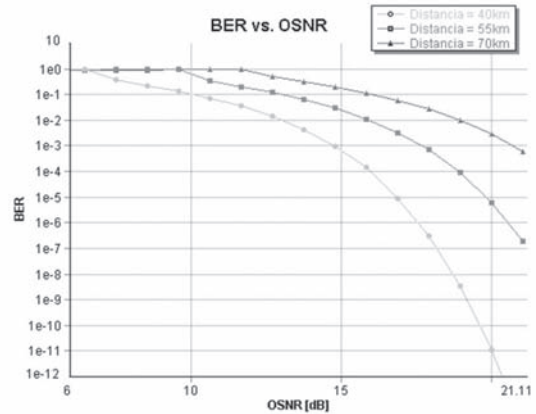


Fig. 9 CURVAS BER VS. OSNR, VELOCIDAD DE TX: 2,5GBPS



Las Fig. 7 y 8 son muy similares, sin embargo se observa un leve aumento en el BER a 1 Gbps con respecto a 155 Mbps. Este aumento es más significativo en la Fig. 9 a una velocidad de transmisión de 2,5 Gbps. Se alcanzó una BER de $1e^{-9}$ para una OSNR de 17dB a 155Mbps y de 19 dB a 2,5 Gbps en 40 km.

Análisis de la transmisión bb con fibra smf con dispersión de 17,5 ps/nm.km

En la Fig. 10 se observan los diagramas de ojos de una señal transmitida a 2.5 Gbps con el efecto únicamente de la dispersión a distancias de 1, 20, 60 y 100 km sobre una fibra SMF con dispersión de 17.5 ps/nm.km. En la Fig. 10 se observa la degradación del ojo a medida a distancias mayores.

En la Fig. 11 se observan los diagramas de ojo de la misma señal recibida pero agregando ruido externo.

Fig. 10 DIAGRAMA DE DE OJO DE LA SEÑAL RECIBIDA A 2.5 GBPS Y DISTANCIA DE: A. 1 KM. B. 20 KM. C. 60 KM. D. 100 KM.

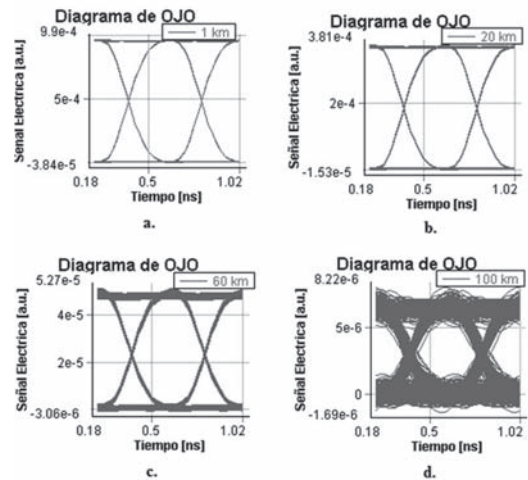
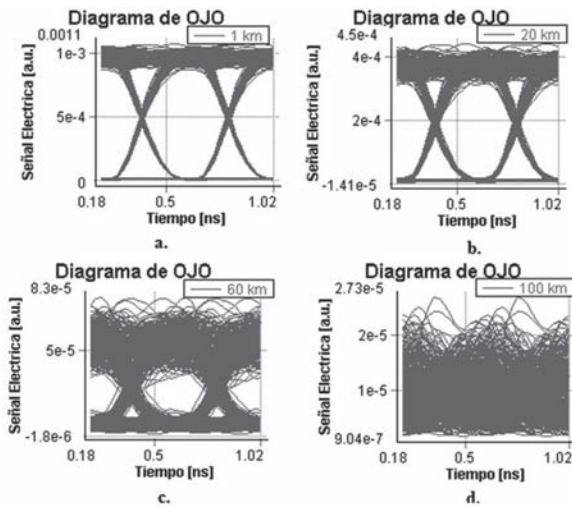
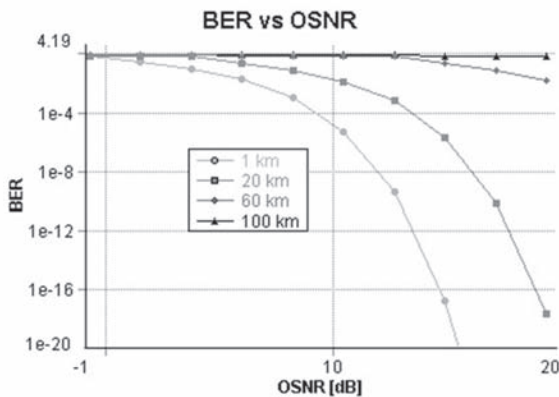


Fig. 11 DIAGRAMA DE DE OJO DE LA SEÑAL RECIBIDA A 2.5 GBPS Y DISTANCIA DE: A. 1 KM. B. 20 KM. C. 60 KM. D. 100 KM.



Las curvas de la BER Vs. OSNR generada para los datos transmitidos a 2.5 Gbps sobre fibra SMF con dispersión de 17,5 ps/nm.km se muestra en la Fig. 12.

Fig. 12. CURVAS BER VS OSNR DE UN SISTEMA BB CON SMF DE DISPERSIÓN 17.5 PS/NM.KM A 2.5 GBPS Y DISTANCIAS DE 1, 20, 60 Y 100 KM.



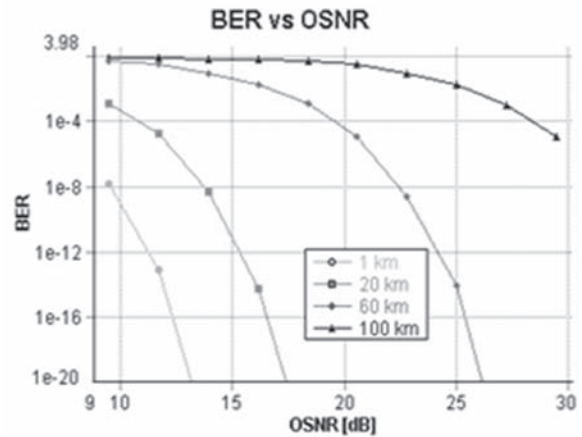
En la Fig. 12 se evidencia como para un mismo valor de OSNR se presenta valores de BER mayor a mayores distancias.

Otro factor que se puede evidenciar en los resultados obtenidos es la limitación en la velocidad de transmisión. Este efecto se puede observar comparando las curvas de BER vs OSNR de la Fig. 12 con la Fig. 13.

En las Fig. 12 y 13 se pueden identificar dos aspectos importantes, en primera instancia se puede observar que la OSNR no empieza en el

mismo valor a pesar de que la potencia del ruido es la misma en ambos casos. Esto se debe a que los pulsos a menor velocidad tienen un ancho de pulso mayor que los pulsos a altas velocidades lo que está relacionado directamente con la potencia de la señal. Por este motivo en las curvas a 155 Mbps la OSNR empieza casi en 10 dB mientras que las curvas a 2.5 Gbps empiezan casi en 0 dB. El otro aspecto que se evidencia en la Fig. 13 es que la tasa de errores de bit es mayor a medida que se aumenta la velocidad de transmisión. Por ejemplo a 100 km y velocidad de 155 Mbps se alcanza un BER hasta de 1e-5, mientras que a 2.5 Gbps no se alcanza un BER de 0.1. Además, con esta fibra óptica de dispersión de 17,5 ps/nm.km se alcanzó un BER de 1e-9 para una OSNR de 18dB a una distancia de 20 km.

Fig. 13. CURVAS BER VS OSNR CON DISPERSIÓN DE 17.5 PS/NM.KM Y VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN DE 155 MBPS

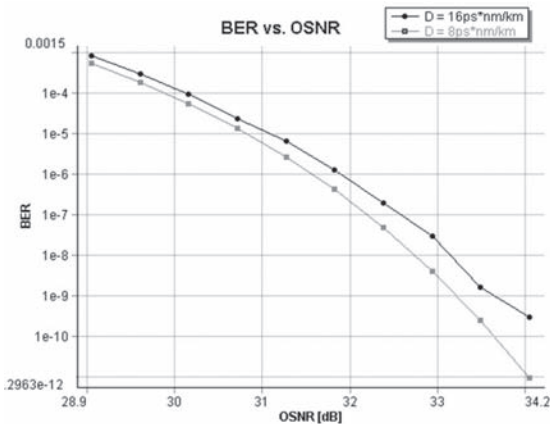


Adicional a esto, se graficó una curva BER vs OSNR (Fig. 14) para el caso puntual de una distancia de 100 km y velocidad de transmisión de 2,5 Gbps para observar el comportamiento en la tasa de error de bit para 2 fibras monomodo diferentes, una con factor de dispersión de 8 ps/nm.km y otra de 16 ps/nm.km, valores correspondientes a fibras estandarizadas, donde el valor de 16 ps/nm.km es el de una fibra estándar y 8 ps/nm.km corresponde al de una fibra de dispersión desplazada NZDF comparación de las fibras smf con dispersión de 8 y 16 ps/nm.km

Se graficó una curva BER vs OSNR (Fig. 14) para el caso puntual de una distancia de 100 km y velocidad de transmisión de 2,5 Gbps para observar el comportamiento en la tasa de error de bit para 2 fibras monomodo diferentes, una

con factor de dispersión de 8 ps/nm.km y otra de 16 ps/nm/km, valores correspondientes a fibras estandarizadas, donde el valor de 16 ps/nm/km es el de una fibra estándar y 8 ps/nm.km corresponde al de una fibra de dispersión desplazada NZDF.

Fig. 14 COMPARACIÓN DEL FACTOR DE DISPERSIÓN POR MEDIO DE LAS CURVAS BER VS. OSNR, VELOCIDAD DE TX: 2,5 GBPS, DISTANCIA 100 KM

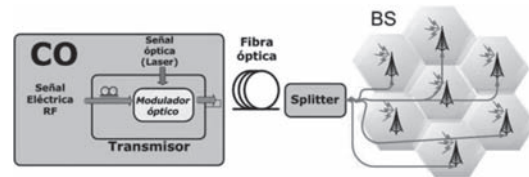


VI. TRANSMISIÓN DE RF SOBRE REDES PON

En la actualidad los usuarios finales demandan una conexión inalámbrica permanente desde sus dispositivos móviles a una alta velocidad de transmisión de datos, sin necesidad de dirigirse a puntos de acceso cableados. Sin embargo, los servicios inalámbricos no poseen suficiente ancho de banda para proveer altas capacidades de transmisión, debido a la alta atenuación del medio inalámbrico y los altos costos de los equipos usados para transmisión a altas frecuencias [8]. Es por tal razón, que se propone a la fibra óptica como medio para transmitir señales RF, gracias a las ventajas como su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la gran capacidad de transmisión, pérdidas en la propagación entre los 0,2-0,5 dB/km dependiendo del tipo de fibra utilizada y la longitud de onda de operación, siendo estos valores muy bajos con respecto al cobre y el aire [9].

En un sistema RoF basado en PON, se transmiten señales de radio a través de la fibra óptica directamente hasta la estación base (BS, base station). Cuando existen varias estaciones base, un dispositivo pasivo conocido como divisor (splitter), divide la señal a las BS como se observa en la figura 1.

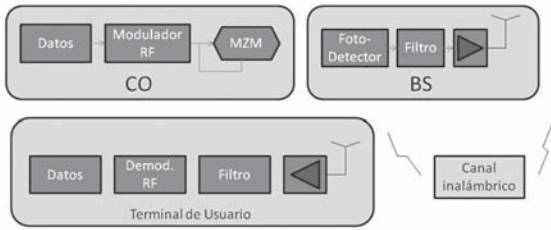
Fig. 15 SISTEMA DE RADIO SOBRE FIBRA BASADO EN PON [8]



La ventaja principal de RoF es la habilidad de concentrar la instrumentación costosa en la CO, el resto de dispositivos y equipos que son más simples y de bajo consumo de potencia son instalados en los lugares de acceso generalmente a distancias largas desde la CO. Una de las ventajas más significativas es la flexibilidad de la red y la potencialidad en la distribución y re-uso de las señales entre los usuarios. [10]. Cuando la señal RF está en el rango de las ondas milimétricas (30 GHz a 300 GHz), la fibra proporciona un ancho de banda de varios GHz [11], pero se requieren de células pequeñas debido a la corta distancia de propagación [12]. Las BS sólo son utilizadas para realizar la conversión opto-eléctrica, por lo que su configuración es simple e independiente del protocolo y del formato de modulación [13], ya que se evita la generación de una portadora de radio de alta frecuencia en las BS, debido a que esta genera en la CO. De esta manera, los enlaces de radio de onda milimétrica están siendo considerados para el diseño de sistemas micro o pico celulares de banda ancha, redes de acceso y redes inalámbricas internas. La convergencia de las comunicaciones inalámbricas y los sistemas de fibra óptica se han convertido en una técnica prometedora para proveer servicios de acceso inalámbrico de banda ancha, en un rango de aplicaciones que incluyen soluciones en redes de acceso, y la extensión de la cobertura y de la capacidad en las redes de radio [14].

La Fig. 16 muestra los módulos de un sistema RoF particular, donde se muestra en la CO como los datos son modulados por una portadora RF para luego ingresar a un modulador óptico que permite la conversión electro-óptica previa al envío de la señal a través de la fibra. En la BS se recibe la señal por medio de un fotodetector usando detección directa para luego enviarla al medio inalámbrico. Actualmente se estudian los receptores ópticos coherentes con módulos de procesamiento digital de señales para la recepción de señales RF transmitidas con diferentes formatos de modulación y la posible mitigación de efectos lineales y no lineales de la fibra óptica [15].

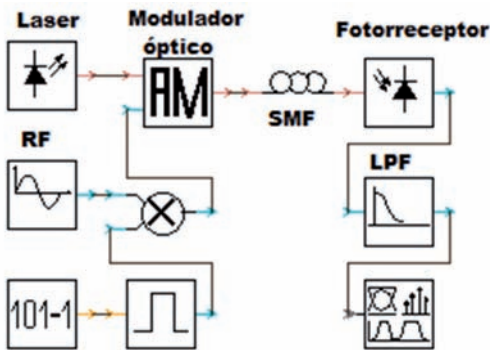
Fig. 16 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA ROF [8]



A. Transmisión RF sobre PON a 60 y 100 GHz

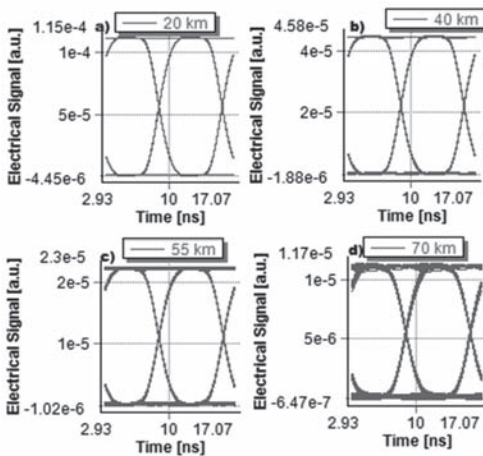
Se hará un análisis cualitativo mediante los diagramas de ojo para una transmisión RoF basado en PON con el sistema de la Fig. 17, donde se modula la intensidad óptica del laser por medio de la señal RF que llega modulada previamente en el dominio eléctrico con frecuencias a 60 y 100 GHz. Se usó fibra SMF estándar.

Fig. 17 SISTEMA ROF CON MODULACIÓN DE INTENSIDAD



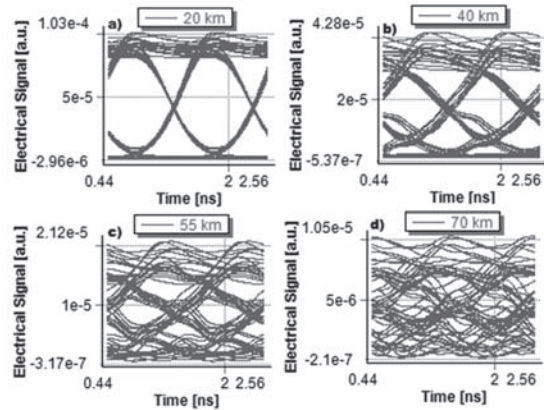
En la Fig. 18 se muestran los diagramas de ojo para una transmisión a 155 Mbps a 60 GHz para diferentes distancias. Se nota un ojo abierto para la transmisión hasta los 70 km.

Fig. 18 DIAGRAMA DE DE OJO DE LA SEÑAL RECIBIDA A 155 MBPS CON PORTADORA DE 60 GHZ Y DISTANCIA DE: A. 20 KM. B. 40 KM. C. 55 KM. D. 70 KM.



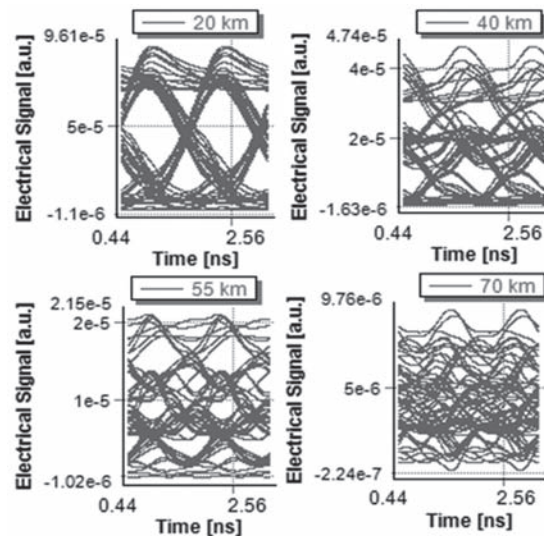
En la Fig. 19 se muestra una transmisión con la misma frecuencia de portadora de 60 GHz que en el caso anterior pero con una velocidad de transmisión de 1 Gbps, y es notable el efecto que tiene en la transmisión en los diagramas de ojos superiores a los 40 km, teniendo una transmisión aceptable hasta los 20 km.

Fig. 19 DIAGRAMA DE DE OJO DE LA SEÑAL RECIBIDA A 1 GBPS CON PORTADORA DE 60 GHZ Y DISTANCIA DE: A. 20 KM. B. 40 KM. C. 55 KM. D. 70 KM.



Se transmitió con una frecuencia de portadora de 100 GHz a 1 Gbps y se evidencia el incremento en la distorsión de los diagramas de ojo de la Fig. 20 mostrando un ojo distorsionado a los 20 km.

Fig. 20 DIAGRAMA DE DE OJO DE LA SEÑAL RECIBIDA A 1 GBPS CON PORTADORA DE 100 GHZ Y DISTANCIA DE: A. 20 KM. B. 40 KM. C. 55 KM. D. 70 KM.



VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo se simuló un sistema en BB sobre una red PON de largo alcance. Con la fibra

SMF de dispersión de 16 ps/nm.km se obtuvo un diagrama de ojo poco degradado hasta los 70 km transmitiendo a 155 Mbps, y hasta los 40 km a 2,5 Gbps logrando un BER de $1e-9$ con una OSNR a 19 dB. Con la fibra SMF de dispersión de 17,5 ps/nm.km transmitiendo a 2,5 Gbps se alcanzó un BER de $1e-9$ para un OSNR de 18dB a una distancia de 20 km, mostrando un comportamiento menos aceptable comparado con la fibra SMF de dispersión de 16 ps/nm.km. Además se mostraron transmisiones aceptables en un sistema RoF a 155 Mbps hasta los 70 km a 60 GHz y hasta los 20 km a 1 Gbps evidenciándose una mejor transmisión a 60 GHz que a 100 GHz, lo que muestra una influencia en la frecuencia de la portadora en la afección de la señal. Adicional a esto, las simulaciones mostraron que una red PON BB con OSNR ideal (sistema con ruido igual a cero) exenta de ruido alcanza una distancia de transmisión de 60 km a 2,5 Gbps. Lo que demuestra que si se desea lograr transmisiones a altas velocidades en largas distancias, se debe tener en cuenta los valores de OSNR relacionados con el sistema de recepción, además de incluir compensadores de la dispersión cromática de tipo óptico o basado en el procesamiento digital de la señal.

REFERENCIAS

- [1] Mezhoudi, M.; Ying Hu; , "Optical backbone network evolution: Design, optimization and evaluation of NG-OTN," *Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*, 2010 19th Annual , vol., no., pp.1-6, 14-15 May 2010
- [2] Kazovsky, L.G.; Wei-Tao Shaw; Gutierrez, D.; Ning Cheng; Shing-Wa Wong; , "Next-Generation Optical Access Networks," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.25, no.11, pp.3428-3442, Nov. 2007.
- [3] Zhang Chunlei; Geng Ling; Zhang Pengtu; , "An overview of integration of RoF with PON," *Computer Application and System Modeling (ICASM)*, 2010 International Conference on , vol.15, pp.V15-40-V15-43, 22-24 Oct. 2010
- [4] Lee, C.-H.; Sorin, W. V.; Kim, B. Y.; , "Fiber to the Home Using a PON Infrastructure," *Lightwave Technology, Journal of* , vol.24, no.12, pp.4568-4583, Dec. 2006.
- [5] Granada Torres Jhon J., Zuluaga González Carlos E., Guerrero González Neil, Diaz Betancurt Oscar M. , "Compensación de la dispersión cromática usando ecualización LMS", en *Memorias XV Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial*, pp. 224-229, ISBN 978-958-8060-96-5, Bogotá, Colombia, septiembre de 2010.
- [6] Seung-Hee Lee; Jae Gwan Kim; Min-Ho Kang; , "Performance enhancement in future PON and mobile convergence networks," *Advanced Communication Technology*, 2009. *ICACT 2009. 11th International Conference on* , vol. 01, no., pp.233-236, 15-18 Feb. 2009
- [7] José Luis Jiménez Peñaloza, "Caracterización del modulador electro-óptico APEtm microwave analog intensity con aplicación de transmisión de video compuesto" tesis Msc. Ing electrónica UDLAP, 2005.
- [8] Jhon J. Granada Torres, Claudia M. Serpa I., Margarita Varón D., Neil Guerrero G, "Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas", *Revista de ingeniería y desarrollo*, Vol 29, No. 2, pp. 242-265, Dic. 2011.
- [9] G. Smith, D. Novak and C. Lim, "A millimeter-wave full-duplex WDM/SCM fiber-radio access network ," *Optical Fiber Communication Conf.*, San José, CA, 1998. pp.18-19, 22-27.
- [10] German E. Campos H., Guiovanna P. Sabogal A., "Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radiofrecuencia sobre fibra óptica," *UMBral Científico*, No. 9, pp 76-84, 2006
- [11] Smith, G.H.; Novak, D.; Lim, C.; , "A millimeter-wave full-duplex WDM/SCM fiber-radio access network ," *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 1998. *OFC '98.*, Technical Digest , pp.18-19, 22-27 Feb 1998.
- [12] Mitchell, J.E.; , "Radio over fibre networks: Advances and challenges," *Optical Communication*, 2009. *ECOC '09. 35th European Conference on* , vol., no., pp.1-4, 20-24 Sept. 2009 .
- [13] T. Taniguchi, N. Sakurai, H. Kimura, and K. Kumozaki "Technical Trends in Millimeter-wave Band Radio-On-Fiber Access System", *PIERS Proceedings*, pp. 24-27, Beijing, China, Mar. 2009.
- [14] Jhon J. Granada Torres, Claudia M. Serpa I., Margarita Varón D., Neil Guerrero G., "Efectos de la dispersión cromática en sistemas de comunicaciones ópticas de radio sobre fibra con porta-

- doras a 60 GHz y 100 GHz”, en Memorias XVI Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial, pp. 174-179, ISBN 978-958-8347-55-4, Cali, Colombia, septiembre de 2011.
- [15] N. Guerrero, “Digital Photonic Receivers for Wireless and Wireline Optical Fiber Transmission Links,” PhD. Dissertation, Dept. Fotonik, Denmark Tech. Univ, Copenhagen, 2011.
- [16] Kataoka, N.; Cincotti, G.; Wada, N.; Kitayama, K.; , “100km transmission of dispersion-compensation-free, extended-reach OCDMA-PON system with passive remote node,” *Optoelectronics and Communications Conference (OECC)*, 2010 15th , vol., no., pp.726-727, 5-9 July 2010
- [17] Kataoka, Nobuyuki; Wada, Naoya; Cincotti, Gabriella; Kitayama, Ken-ichi; , “Dispersion-compensation-free, long-reach OCDMA-PON system with passive remote node at arbitrary position using single multi-port encoder/decoder,” *Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS)*, 2010 Conference on, vol., no., pp.1-2, 16-21 May 2010
- [18] Spolitis, S.; Ivanovs, G.; , “Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation,” *Communication Technologies Workshop (Swe-CTW)*, 2011 IEEE Swedish, vol., no., pp.29-33, 19-21 Oct. 2011.
- [19] N. Cvijetic, M. Cvijetic, M. Huang, E. Ip, Y. Huang, and T. Wang, B Terabioptical access networks based on WDM-OFDMA-PON, [*J. Lightw. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 4931–503, Feb. 15, 2012.
- [20] L. Kazovzky, S. Wong, T. Ayhan, k. Melih, M, A. Shastri, “Hybrid Optical-Wireless Acces Networks” *Proc. IEEE*, Vol. 100 No. 5 May 2012, pp. 1197-1225.