

Simulación de un enlace óptico WDM (Wavelength Division Multiplexing) utilizando POFs (Polymer Optical Fiber) en el espectro de luz visible

Andrés Ocampo Dávila, María Soledad Jiménez J.

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, Quito, Ecuador.

Autores para correspondencia: sriandres@hotmail.com, maria.jimenez@epn.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre 2014

RESUMEN

En este proyecto se analizaron las características y el modo de operación de las fibras ópticas plásticas en un enlace óptico WDM (Wavelength Division Multiplexing) operando en el espectro visible. Se estudiaron los componentes activos y pasivos necesarios para el enlace, como son las fuentes LED, multiplexores, filtros y acopladores. Se analizaron los efectos no lineales que se pueden presentar en la fibra óptica, y que son importantes de considerar al transmitir señales WDM. Para respaldar el análisis se simuló en MATLAB un enlace óptico en el dominio de la frecuencia utilizando fuentes LED que emiten en el espectro visible, junto con multiplexores WDM, filtros de absorción, acopladores y como medio de transmisión la Fibra Óptica Plástica (POF -Plastic Optical Fiber).

Palabras clave: Comunicaciones ópticas, fibras ópticas plásticas, multiplexación por división de longitud de onda, WDM, POF.

ABSTRACT

In this project, the characteristics and the operation mode for polymer optical fibers were studied to use them over an optical link to transmit information over short distances. The project also analyzed the active and passive components needed to achieve this goal, as active components the LED sources were studied and as passive components the multiplexers, filters and splitters were considered. On the other hand all of the nonlinear effects caused by the transmission of WDM (Wavelength Division Multiplexing) signals were examined. Finally, using MATLAB, a simulation of an optical link in the frequency domain was made using LED sources emitting light in the visible spectrum, together with WDM multiplexers, absorption filters, splitters and POF (Plastic Optical Fiber).

Keywords: Optical communications, polymer optical fiber, wavelength division multiplexing, WDM, POF.

1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones por fibra óptica se han desarrollado de manera apresurada en las últimas décadas debido a la invención de las fuentes tipo LASER, la mejora en el proceso de producción de las fibras ópticas de sílice, nuevas técnicas de multiplexación y principalmente la creciente necesidad de una mayor velocidad de transmisión para los enlaces de larga y corta distancia. Las fibras ópticas en comparación con medios de cobre o inalámbricos presentan varias ventajas, entre las cuales destacan su inmunidad a interferencias electromagnéticas y de radiofrecuencia, baja atenuación y el elevado ancho de banda que ofrecen debido a la naturaleza de la señal que transmiten. En los últimos años se han desarrollado las fibras ópticas compuestas principalmente por polímeros en lugar de sílice, lo cual permite el envío de información a distancias cortas y a tasas de transmisión considerables, con las mismas ventajas que las fibras de sílice.

2. FIBRAS ÓPTICAS PLÁSTICAS

De acuerdo a Ziemann *et al.* (2008) en las fibras ópticas plásticas el núcleo y el manto están compuestos por una combinación de polímeros, siendo los más utilizados el Policarbonato (PC), el Poliestireno $[(C_8H_8)_n, PS]$, el metacrilato de metilo ($C_5H_8O_2$, MMA), el polimetilmetacrilato ($C_5O_2H_8$) conocido como PMMA, algunos polímeros que utilizan Deuterio como sustituto de los átomos de Hidrógeno, y recientemente se está analizado el uso de polímeros fluorados.

2.1. Atenuación en la fibra óptica plástica

La característica de atenuación para las fibras ópticas plásticas es diferente de aquellas de sílice, así para las fibras ópticas plásticas basadas en el polímero PMMA la curva de atenuación presenta tres ventanas de transmisión en la banda visible, correspondientes a los mínimos de atenuación, centradas en las longitudes de onda de 525 nm (luz verde), 575 nm (luz amarilla) y 650 nm (luz roja). Para las fibras que utilizan el polímero PC se tiene una sola ventana ubicada a 800 nm, tal como se puede observar en la Fig. 1.

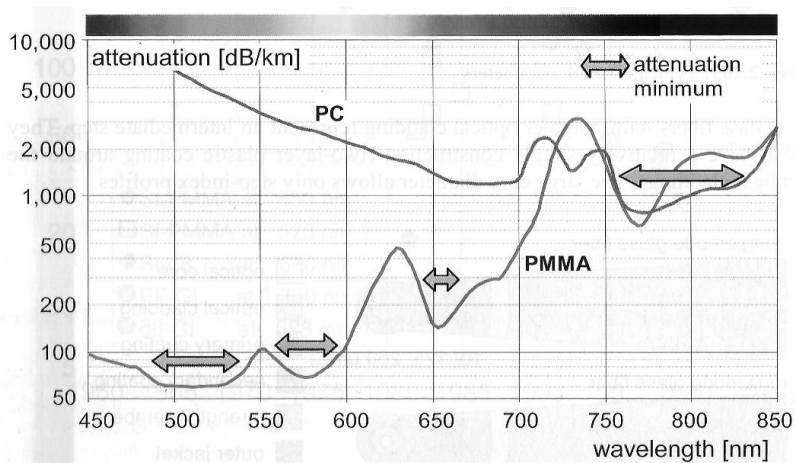


Figura 1. Ventanas de Transmisión para POFs con PMMA y PC (Ziemann *et al.*, 2008).

2.2. Dispersión en la fibra óptica plástica

Según el Nature Publishing Group, una ventaja que tienen las fibras plásticas sobre sus similares de sílice es su baja dispersión de material tal como se observa en la Fig. 2. La dispersión de material de las fibras plásticas se estima al medir la dependencia entre la longitud de onda y el índice de refracción del polímero, este último se encuentra en el orden de -0.4 ns/nm/Km a una longitud de onda de 600 nm para una fibra PMMA.

Así como en el caso de las fibras de sílice, este factor indica cuantitativamente la dependencia del retraso de una señal conforme varía su longitud de onda. En aplicaciones típicas este valor negativo indica que con un aumento de la longitud de onda el retraso se vuelve más pequeño.

De acuerdo a Ziemann *et al.* (2008) en la Fig. 3 se indica la dispersión cromática para fibras de sílice, PMMA y la dispersión teórica de las fibras en base a polímeros PF. Para una fibra monomodo de sílice, el valor del coeficiente de dispersión cromática a una longitud de onda de 1550 nm es de $17 \text{ ps/nm}^2\text{km}$, para el caso de las fibras ópticas de polímeros las POF-PMMA alcanzan valores de dispersión superiores a $300 \text{ ps/nm}^2\text{km}$ para una longitud de onda de 650 nm. De igual manera se puede observar en la Fig. 3 que para las fibras teóricas de PF el valor de dispersión es mucho menor que para las fibras de sílice.

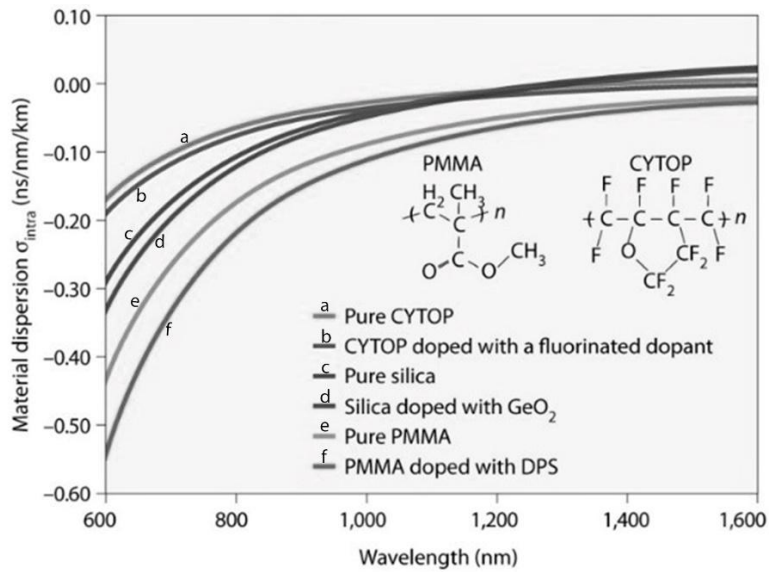


Figura 2. Dispersión de material para fibras ópticas (Fuente: Nature Publishing Gorup s.f.).

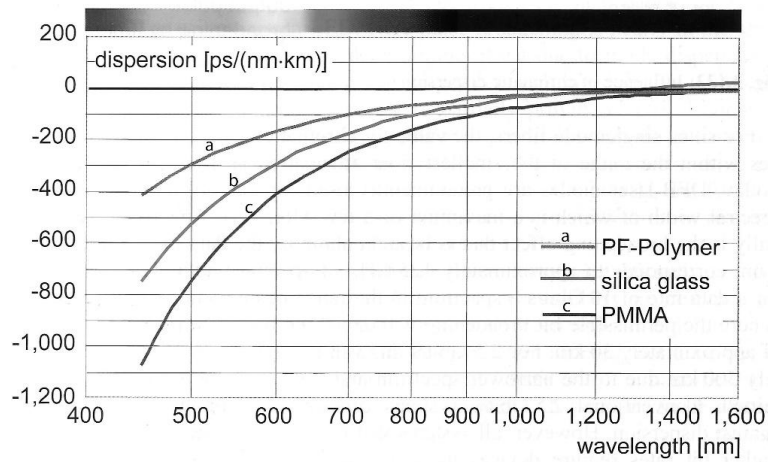


Figura 3. Dispersión cromática de diferentes fibras ópticas (Ziemann *et al.*, 2008).

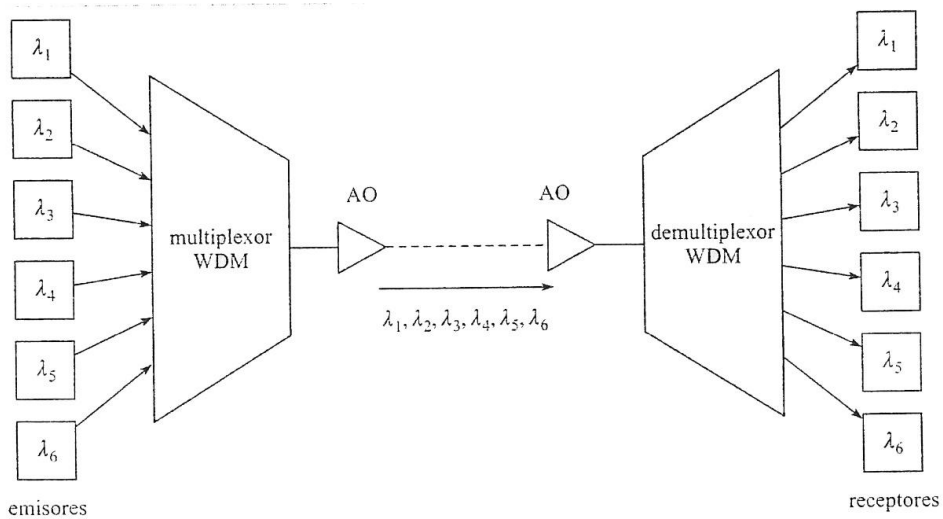


Figura 4. Esquema general de un sistema WDM punto a punto (Martin, 2004).

3. MULTIPLEXACIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA

Conforme a lo expuesto en Gaxiola (2005), la multiplexación por división de longitud de onda, WDM (Wavelength Division Multiplexing), tiene su origen en la posibilidad de acoplar las salidas de varias fuentes emisoras de luz, cada una con diferente longitud de onda, sobre una misma fibra óptica. Después de la transmisión a través de la fibra, las señales de cada longitud de onda diferente, pueden ser separadas entre sí hacia diferentes detectores en su extremo final. Este concepto queda reflejado en la Fig. 4.

4. ELEMENTOS A UTILIZARSE EN EL ENLACE ÓPTICO

4.1. Emisores

Para este proyecto se pretende utilizar como fuentes LEDs los fabricados por las empresas Nichia, Sander Electronics, y Avago Technologies, debido a que estos presentan una alta velocidad, la cual permite transportar información por la fibra óptica a velocidades de transmisión superiores a los 100 Mbps. Estas empresas ofrecen diodos LED de conmutación rápida que trabajan cerca de las longitudes de onda de 525 nm (verde azulado), 575 nm (amarillo) y 650 nm (rojo). Los parámetros ópticos de las fuentes deben cumplir con las siguientes características: a) ángulo de emisión de 15°, b) anchura espectral menor a 30 nm, c) intensidad de corriente que el LED utiliza para emitir luz en la longitud de onda central mayor a 20 mA sin entrar en zona de saturación y d) potencia óptica de salida 1 mW.

4.2. Acopladores y multiplexores

De acuerdo con Integrated Publishing, un splitter o acoplador óptico 1x2 tiene una estructura como la presentada en la Fig. 5a, este dispositivo convierte una señal de entrada en dos señales de salida; puede utilizarse también como combinador óptico, en cuyo caso realiza las funciones inversas al splitter; es decir une dos señales ópticas independientes en una sola señal de salida. La estructura del combinador 1x2 se puede apreciar en la Fig. 5b, este combinador se va a utilizar como multiplexor WDM para el enlace óptico a simular.

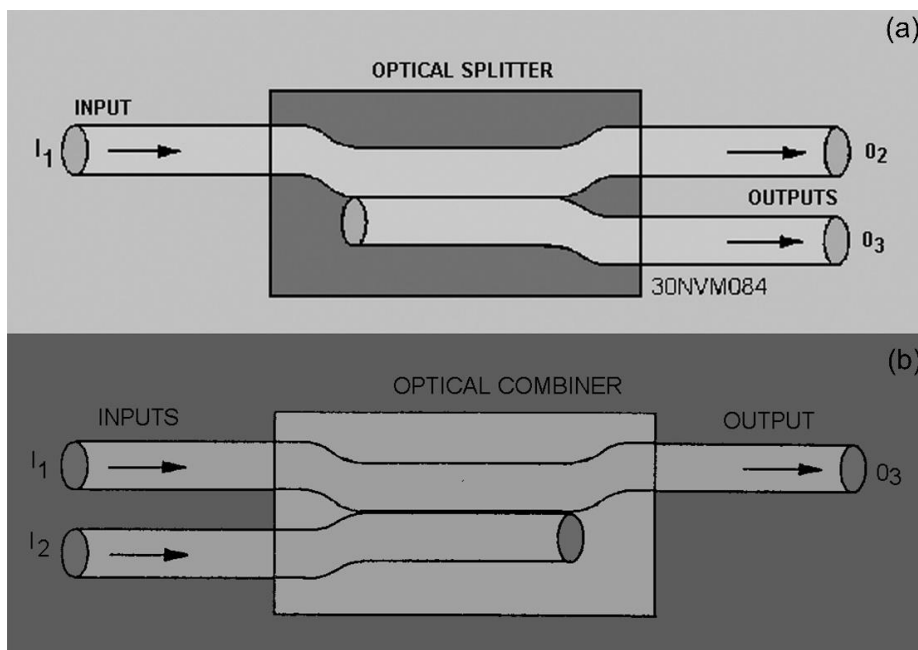


Figura 5. (a) Estructura de un Splitter 1x2; (b) Combiner 1x2 (Fuente: Integrated Publishing Inc.).

4.3. Filtros y demultiplexores

Según Attia *et al.* (1996), para el caso de fibras ópticas plásticas se tienen varios problemas con la elección de dispositivos que sirvan para filtrar señales, esto se debe a la gran apertura numérica y el diámetro que presentan estas fibras. Por estas razones se descartaría el uso de filtros de interferencia basados en capas transparentes, rejillas de reflexión o interferómetros para demultiplexar WDM sobre fibras ópticas plásticas. Sin embargo, se disponen de 3 soluciones diferentes para solventar este inconveniente: a) utilizar filtros de absorción, los cuales prácticamente no presentan dependencia del ángulo de incidencia del haz de luz; b) Aplicar filtros de interferencia anchos, capaces de soportar las variaciones espectrales; y c) expansión del haz de luz de la POF mediante lentes, con lo que se logra reducir la apertura numérica de la POF para utilizar los elementos en sus dimensiones normales.

De estas soluciones se va a implementar la que incluye filtros de absorción en combinación con acopladores 1x2 y 1x3, debido a la facilidad de encontrar estos filtros en el mercado en comparación con elementos receptores de mayores dimensiones o de lentes especiales.

4.4. Detectores

Conforme a Haupt & Fisher (2008) los dispositivos detectores que se pueden utilizar son los fotodiodos tipo PIN de mayor diámetro que los fotodiodos PIN convencionales, este mayor tamaño se requiere debido a la gran apertura numérica que presentan las fibras ópticas plásticas en comparación con sus similares de sílice. Este proyecto se enfoca en analizar el comportamiento de una señal WDM sobre fibras ópticas plásticas en el dominio de la frecuencia, con excepción de ciertos algoritmos en donde se presenta la respuesta de la señal en el dominio del tiempo.

5. EFECTOS NO LINEALES EN LAS POFs

Según Carrera (2003), los efectos no lineales dependen principalmente de varios factores, de los cuáles los principales son la longitud efectiva de la fibra, el área efectiva de la fibra y el radio de campo modal. La longitud efectiva, considerando que para el caso de fibras ópticas plásticas, se dispone de valores de atenuación superiores a los 50 dB/Km, se calcula aplicando la Ec. (1), en donde α representa la atenuación de la fibra en dB/Km y L es la longitud del enlace. Al considerar el valor de atenuación elevado de las POF, la ecuación 1 puede simplificarse a la Ec. (2) en la cual se demuestra que la longitud efectiva de una POF es de 0,02 m.

$$L_{eff} = \frac{(1 - e^{-\alpha L})}{\alpha} \quad (1)$$

$$L_{eff} \approx \frac{1}{\alpha} \approx \frac{1}{50} \rightarrow L_{eff} \approx 0.02 \text{ m} \quad (2)$$

Dado que la longitud del enlace a simular (pocas centenas de metros) supera ampliamente la longitud efectiva de la fibra óptica de plástico, la cual es del orden de centésimas de metro; resulta despreciable la atenuación causada por efectos no lineales, entonces no se la tomará en cuenta para la simulación. Luego de realizar los cálculos correspondientes se pudo verificar que el desfase causado por SPM (Self Phase Modulation) es cercano a cero y por tanto no va a afectar a la señal WDM luego de transmitirse por una POF. De igual forma que en la SPM, el corrimiento de fase que produce la XPM (Cross Phase Modulation) depende linealmente de la longitud efectiva de la fibra, siendo por tanto sumamente pequeño, de tal manera que para el caso de POFs el efecto de la XPM también se puede despreciar.

6. SIMULACIÓN EN MATLAB, PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1. Pruebas y resultados con dos fuentes binarias

Se puede utilizar cualquier secuencia de datos de hasta 10 bits con el fin de evitar la sobrecarga de procesamiento al computador al simular la señal en el dominio del tiempo. Inicialmente, se establece que las cadenas de bits a transmitirse son por ejemplo 10101 (fuente 1) y 111111 (fuente 2), con velocidades de transmisión de 10 Mbps y de 90 Mbps respectivamente. En las Figs. 6a y 6b se aprecian las cadenas de bits de la señales que emiten las fuentes 1 y 2 que se van a simular.

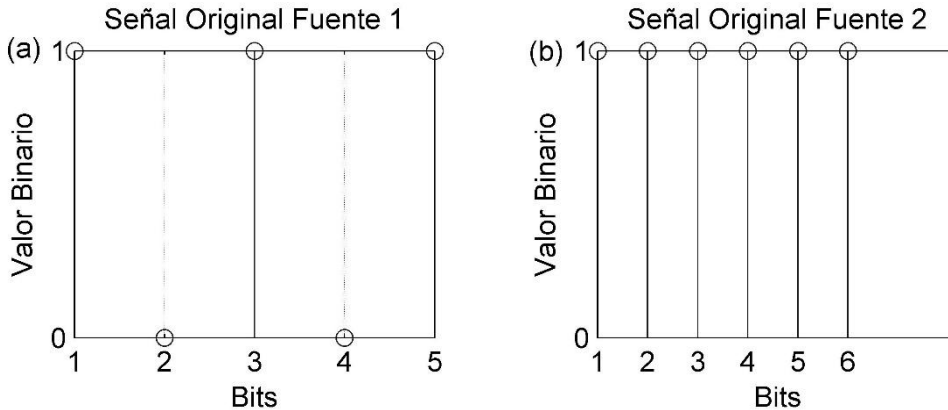


Figura 6. Resultados parciales del ingreso de secuencia de bits y velocidades de transmisión de 2 fuentes binarias: (a) fuente 1; (b) fuente 2.

A continuación el programa solicita al usuario los datos de longitud de onda central y la anchura espectral del LED, además de la intensidad de corriente en la que cada LED emite la longitud de onda central sin llegar a la región de saturación. En base a estos datos el algoritmo calcula la potencia óptica que emite cada LED y sus correspondientes espectros de emisión reales (Figs. 7a y 7b); conjuntamente con los espectros de emisión normalizados (Figs. 7c y 7d).

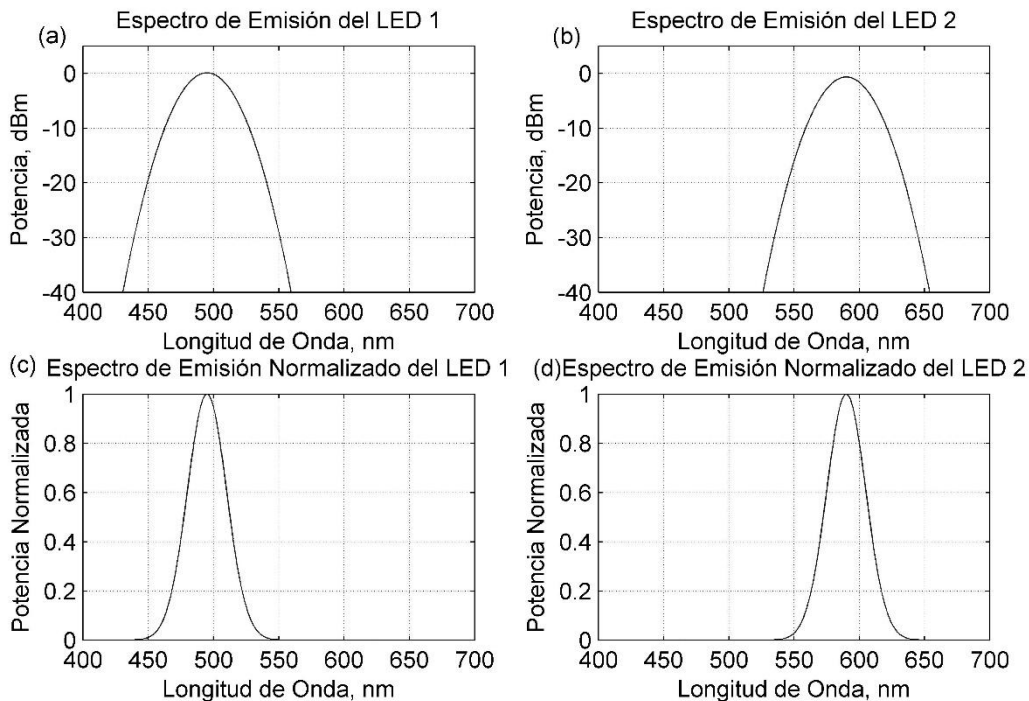


Figura 7. (a) Espectro de emisión real del emisor 1; (b) Espectro de emisión real del emisor 2; (c) Espectro de emisión normalizado del LED 1; (d) Espectro de emisión normalizado del LED 2.

A partir de este resultado, el algoritmo multiplexa las señales originales utilizando la técnica de división por longitud de onda, el resultado de esta operación se refleja en la Fig. 8a, en la cual se expone la potencia real, y en la Fig. 8b la potencia normalizada de la señal multiplexada.

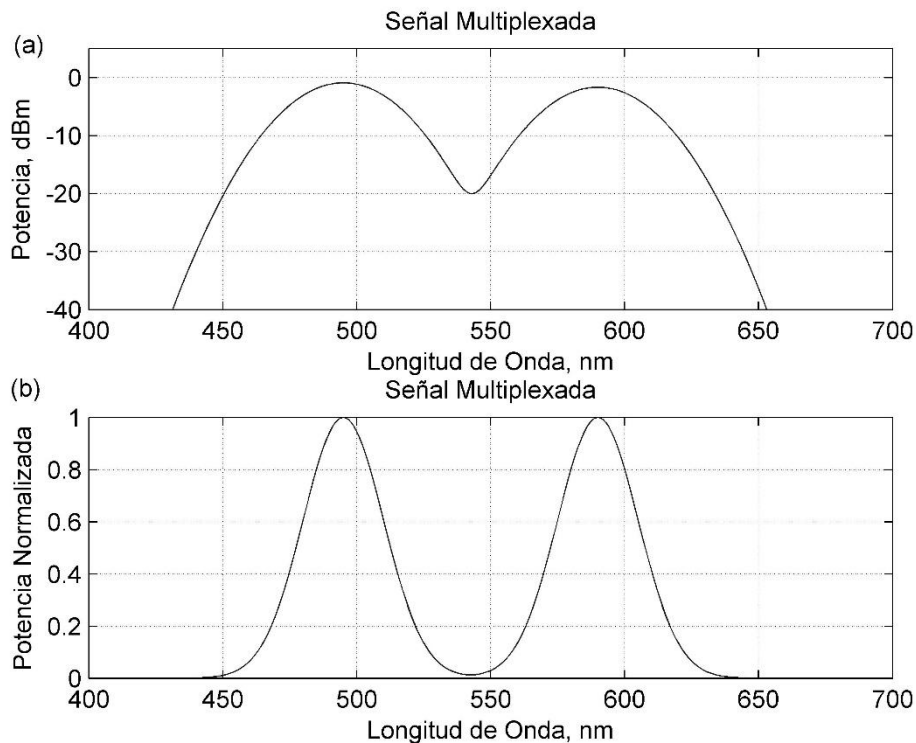


Figura 8. Resultado parcial, señal WDM resultante de 2 canales: (a) Espectro de potencia óptica de la señal multiplexada; (b) Espectro normalizado de la señal multiplexada.

Considerando un enlace óptico de 200 metros de longitud y al ingresar este dato a la simulación, y utilizando como medio de transmisión una fibra óptica plástica del tipo PMMA, se obtiene el modelo de atenuación de la fibra POF-PMMA en la Fig. 9a y, se presenta una comparación de los espectros de potencia de las señales WDM antes y después de la transmisión por la POF-PMMA en la Fig. 9b.

En la Fig. 10b se muestran las dos señales demultiplexadas, las cuales tienen un aislamiento entre canales superior a 40 dB, este resultado se obtuvo gracias al uso de filtros de absorción de alta calidad como demultiplexores, la respuesta de frecuencia de estos filtros se muestra en la Fig. 10a. De estos resultados se concluye que a una distancia de 200 metros la señal WDM aún se puede detectar sin problemas.

Luego de varias pruebas similares se estableció que la distancia máxima a la cual se podría enviar una señal WDM con estos transmisores y con una fibra POF-PMMA es de 210 m. Esta distancia se determinó realizando varias simulaciones a diferentes alcances de transmisión, identificándose que la potencia de la señal óptica llegó a estar por debajo del umbral de recepción de los fotodiodos PIN, a una longitud de 210 m; por tanto la transmisión a una distancia superior se torna imposible.

6.2. Pruebas y resultados con tres fuentes binarias

Para realizar la simulación del enlace utilizando 3 fuentes se procede a generar las 3 secuencias de bits y sus correspondientes velocidades de transmisión de modo aleatorio, en este caso es necesario utilizar las 3 ventanas (canales) de transmisión de la POF-PMMA.

Los espectros de emisión de potencia real y los espectros de emisión normalizados para las tres fuentes presentan características similares a las obtenidas en las Figs. 7a y 7c. A continuación se

procede a multiplexar en WDM las 3 señales, el resultado de este proceso se presenta en la Fig. 11a, en la cual se aprecia el espectro de potencia real y en la Fig. 11b se presenta el espectro normalizado de la señal WDM.

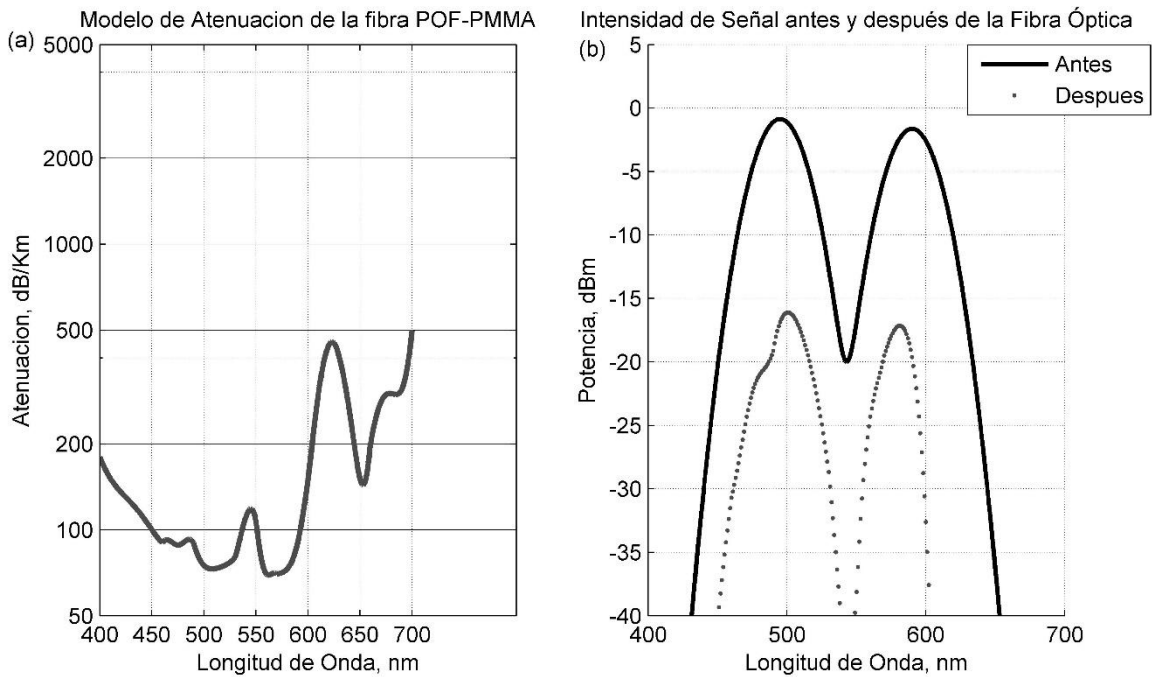


Figura 9. (a) Modelo de atenuación de la POF-PMMA; (b) Señales WDM de dos canales antes y después de pasar 200 m de una POF-PMMA.

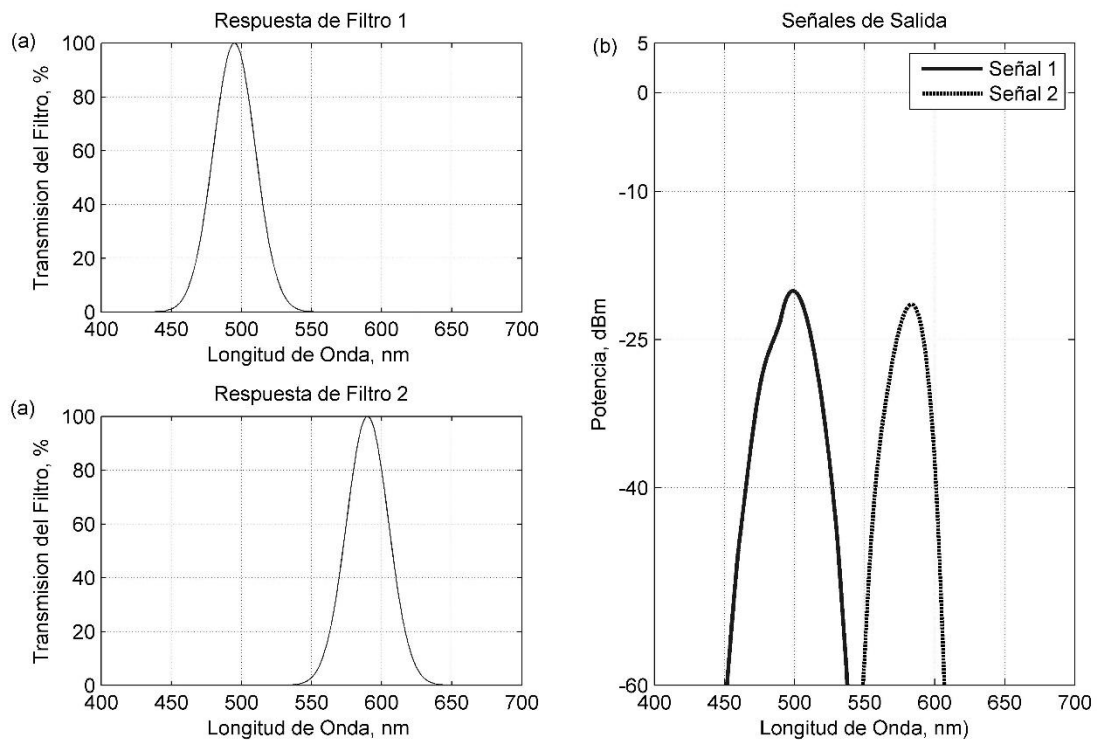


Figura 10. Resultado final: (a) Porcentaje de transmisión de los filtros de absorción en el dominio de la frecuencia; (b) Señales demultiplexadas luego de 200 m.

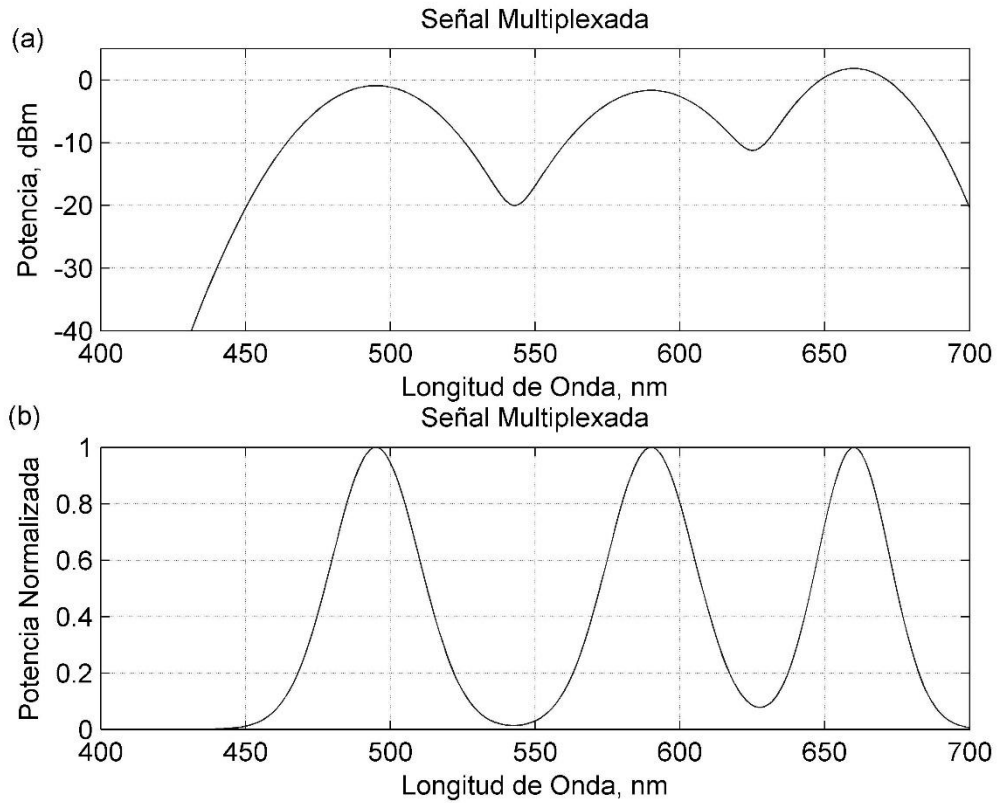


Figura 11. Resultado parcial: (a) Espectro de emisión de potencia óptica de la señal WDM resultante de 3 canales; (b) Espectro de emisión normalizado de la señal WDM.

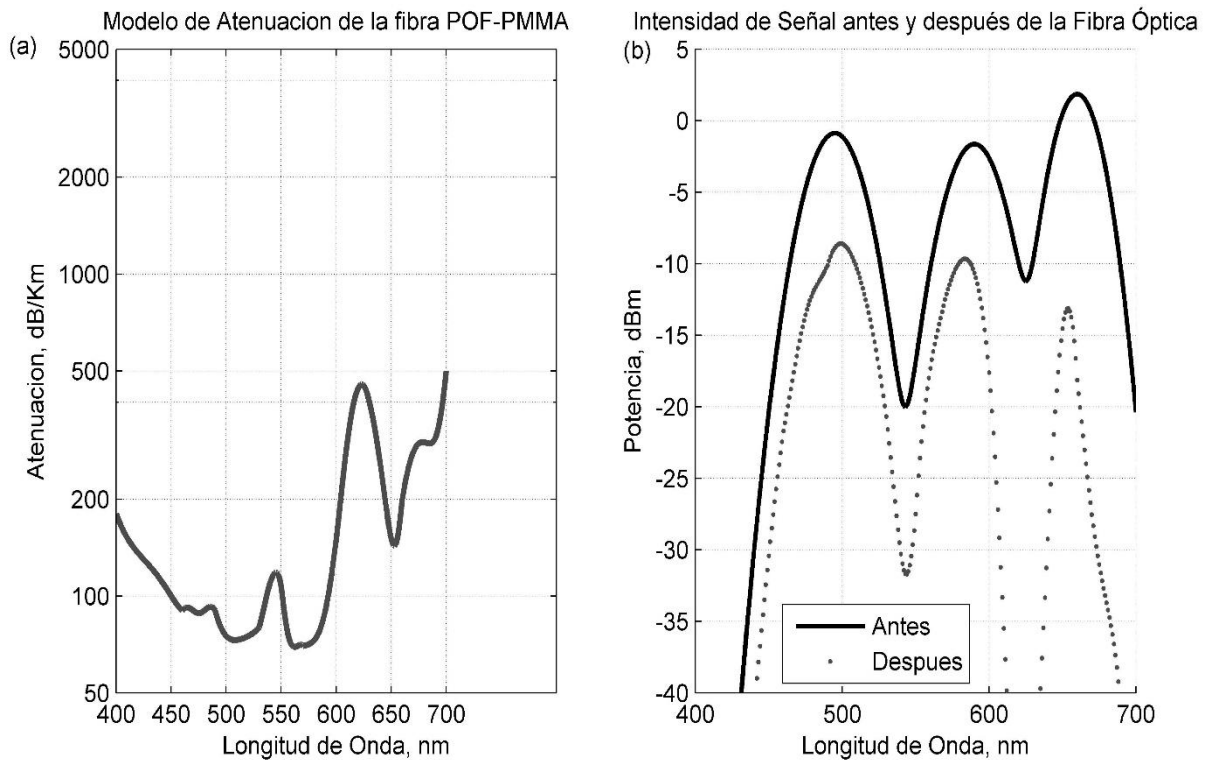


Figura 12. (a) Modelo de atenuación de la POF-PMMA; (b) Señales WDM de 3 canales antes y después de pasar 100 m de una POF-PMMA.

Para el caso de un enlace de 100 m, en la Fig. 12a, se presenta el modelo de atenuación de la fibra POF-PMMA y en la Fig. 12b se muestra una comparación de la señal WDM antes y después de la transmisión, en esta gráfica se puede observar que el tercer canal presenta mayor atenuación que los demás, esta atenuación corresponde a aproximadamente 12dB. Al momento de ingresar la señal WDM transmitida al demultiplexor se obtienen los resultados presentados en la Fig. 13, a partir de ésta se concluye que la señal WDM de 3 canales si se puede transmitir a una distancia de 100 m, sin embargo los puntos de media potencia del tercer canal están muy cerca del umbral de detección del receptor.

En la Fig. 13 se muestran las tres señales demultiplexadas, las cuales poseen un aislamiento entre canal superior a 40 dB, este resultado se obtuvo debido al uso de filtros de absorción de alta calidad como demultiplexores. Luego de realizar pruebas similares se logró determinar la distancia máxima a la cual se puede transmitir una señal WDM de 3 canales para que en base a la potencia óptica de recepción de cada señal aún puedan ser detectadas por los fotodiodos PIN. La distancia máxima que se logró identificar para el caso de 3 señales y con los transmisores, fibra óptica plástica y receptores utilizados es de 105 m.

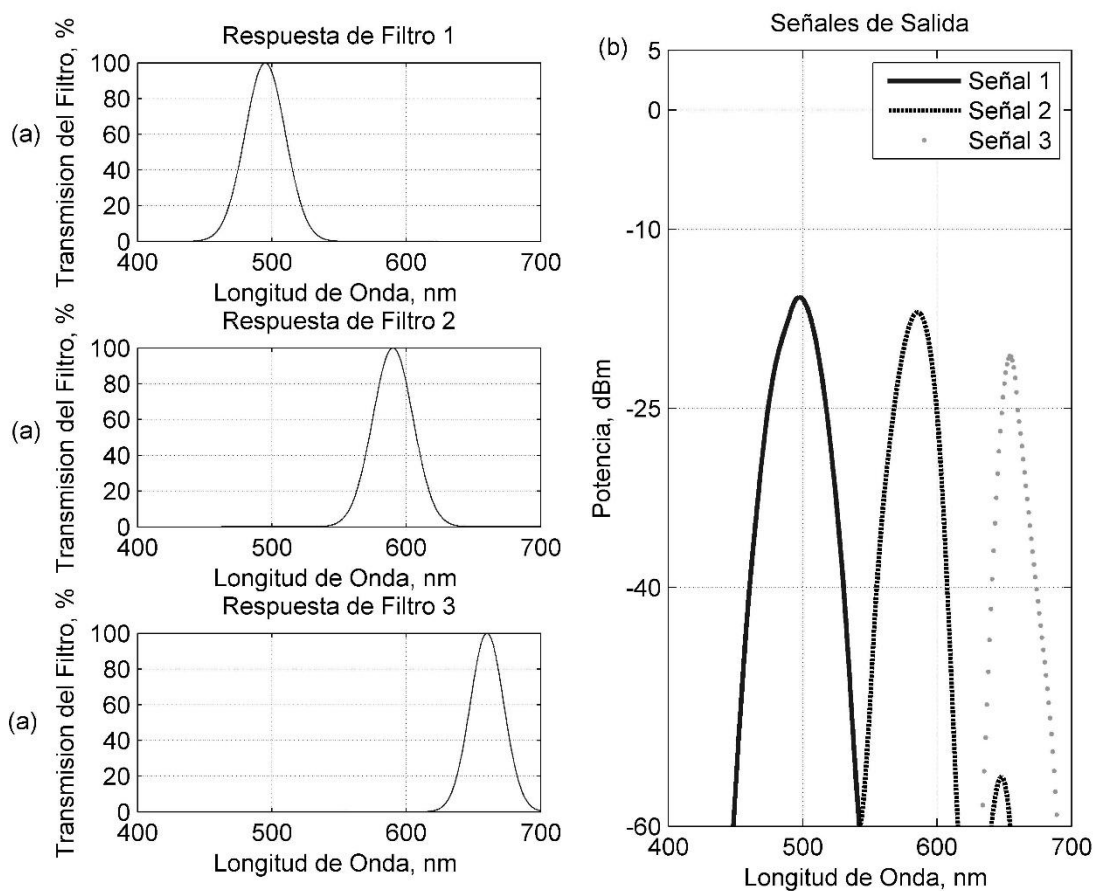


Figura 13. (a) Porcentaje de transmisión de los filtros de absorción en el dominio de la frecuencia; (b) Espectros de las señales demultiplexadas resultantes luego de 100 m.

7. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha demostrado que las fibras ópticas plásticas si pueden ser utilizadas en aplicaciones de transmisión de datos a cortas distancias, del orden de pocas centenas de metros, con tasas de transferencia alrededor de los 100Mbps en sistemas multiplexados WDM con hasta tres lambdas. Al utilizar WDM, sobre el mismo hilo de fibra se puede enviar información independiente de

dos o tres transmisores, evitando así el sobredimensionamiento del número de hilos necesarios para un enlace óptico.

Para aplicar WDM sobre POFs, se necesita escoger adecuadamente los LEDs transmisores, especialmente la longitud de onda central que emiten y su anchura espectral, con el fin de utilizar óptimamente el espectro de luz visible y las ventanas de transmisión que tienen las fibras ópticas plásticas. Para el caso de las fibras POF-PMMA, las ventanas de transmisión están localizadas en las longitudes de onda de los 525 nm, 575 nm y 650 nm, con suficiente espaciamiento como para soportar una multiplexación en longitud de onda de 3 señales, cada canal operando en una de las ventanas de transmisión, sin interferencias.

Dada la elevada atenuación que presentan las fibras POF-PMMA, se puede despreciar la atenuación causada por efectos no lineales, especialmente SPM y XPM. El efecto no lineal FWM (Four Wave Mixing) se ve anulado debido a la alta dispersión cromática que presentan las POF-PMMA. Las simulaciones realizadas de los emisores en el dominio de la frecuencia difieren de los valores de potencia normalizada presentados por los fabricantes, sin embargo esta variación no es muy significativa en el desarrollo de este proyecto, debido a que estas variaciones se dan cuando la potencia de emisión del LED está por debajo de la potencia media y no influye sobre los demás canales.

En la simulación se trabajó con valores de atenuación de los componentes pasivos y niveles de potencia de los emisores tomados de dispositivos reales, con el fin de lograr resultados fiables, que se pueden usar como referencia para establecer enlaces de comunicaciones con fibras ópticas plásticas en una implementación física. Los resultados obtenidos en la demultiplexación de las señales dependen en muy alto grado de la calidad de los filtros de absorción utilizados para filtrar los canales WDM. Si estos filtros no son los suficientemente selectivos, los canales demultiplexados van a interferirse entre ellos, conduciendo a una mala recepción.

REFERENCIAS|

- Attia, R., E. Benyahia, M. Zghal, 1996. *Wavelength multiplexing and demultiplexing for plastic optical fibers using diffraction gratting*. Paris, Francia.
- Carrera, C., 2013. *Estudio del efecto no lineal automodulación de fase*. Proyecto de Titulación Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Haupt, M., U. Fischer, 2008. *Multi-colored WDM over POF System for Triple-Play*. In: Thienpont, H., P. Van Daele, J. Mohr, M.R. Taghizadeh (Eds.), *Micro-Optics 2008*. Proc. of SPIE, Vol. 6992, 699213, 10 pp.
- Gaxiola, I. *Simulador de un sistema de Comunicación Óptico empleando multicanalización por división de longitudes de onda (WDM)*. Tijuana, Baja California, México: Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2005.
- Integrated Publishing Inc. *Fiber Optic Couplers*. s.f. Disponible en <http://www.tpub.com/neets/tm/108-11.htm>.
- Martin, J., 2004. *Sistemas y redes ópticas de comunicaciones*. Prentice Hall, Madrid, España.
- Nature Publishing Group. *Asia Materials*. s.f. Disponible en http://www.nature.com/am/journal/v1/n1/fig_tab/am200924f5.html.
- Ziemann, O., J. Krauser, P. Zamzow, W. Daum, 2008. *POF Handbook, Optical Short Range Transmission System*. Springer Verlág, Nürnberg, Alemania.