 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO DE UN DIVISOR DE HAZ POR POLARIZACIÓN INTEGRADO PARA OPERAR EN LAS BANDAS O Y C DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS

Johana Marcela Ocampo Pérez

Ingeniería en Telecomunicaciones

Director: M.Sc. Erick E. Reyes Vera

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Junio 2018

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Con el objetivo de diseñar y analizar un divisor de haz basado en fibras ópticas microestructuradas doble núcleo que nos permita operar en las bandas O y C, se toma como base inicialmente un diseño construido de dióxido de silicio, compuesto por agujeros de aire distribuidos a lo largo de la longitud de la fibra, simétricamente en el centro de la MOF se construye el doble núcleo con ausencia de dos agujeros de aire. Los agujeros de aire tienen diferentes diámetros $d_1= 0,357 \mu\text{m}$, $d_2= 0,440 \mu\text{m}$, $d_3= 0,550 \mu\text{m}$, $d_4= 1,045 \mu\text{m}$, $d_5= 18,700 \mu\text{m}$, $d_6=20 \mu\text{m}$ y separación entre agujeros Λ de $2.2\mu\text{m}$. Aprovechando las ventajas de la MOF en combinación con los Plasmones de Superficie (SP sigla en inglés) y con la necesidad de construir un divisor que opere en las longitudes de onda $1.310 \mu\text{m}$ y $1.550 \mu\text{m}$ de telecomunicaciones, con menos longitud de propagación para ser implementada en dispositivos más pequeños, al arreglo inicialmente propuesto se adiciona un hilo de oro a la derecha en el agujero con diámetro $0.550 \mu\text{m}$ con lo cual se obtiene clara disminución para la longitud de propagación de 78 % y 97% aproximadamente respecto al divisor que no tiene oro, esto es posible gracias al corrimiento de fase de las polarizaciones causado por la incrustación de oro.

Palabras clave: Fibra óptica, campo evanescente, resonancia de plasmones de superficie, dióxido de silicio.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

A mi familia por apoyarme en cada paso que doy y ser el motor que me impulsa a seguir adelante.

Al Instituto Tecnológico Metropolitano por ser la fuente principal para mi desarrollo profesional.

Al docente Erick Reyes Vera y Juan Esteban Usuga, por guiarme en la realización de este proyecto compartiendo su conocimiento y paciencia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

n_{eff}	Índices de refracción efectivo
MOF	Fibras ópticas microestructuradas
PCF	fibras de cristal fotónico
SPP	polaritones plasmonicos de superficie
TE	Transversal Eléctrico
TM	Transversal Magnético
TEM	Transversal Electromagnético
PML	Condiciones de frontera

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	10
3. METODOLOGÍA.....	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	34
REFERENCIAS	36

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas dos décadas, la fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión de información preferido por todos los operadores. Debido principalmente a que estas presentan numerosas ventajas frente a tecnologías tradicionales como el cableado estructurado y la comunicación inalámbrica. Algunas de estas características hacen referencia a que la fibra óptica presenta inmunidad electromagnética, permite transmisión de mayores anchos de banda, y las distancias que pueden lograr comunicar son realmente altas comparándolas con los otros medios de transmisión (Agrell et al., 2016; Govind P., 2002). Sin embargo, desde aproximadamente inicios del año 2000, el tráfico de datos a través de las redes de comunicación por fibra óptica se ha incrementado sustancialmente, llegando a presentar crecimientos superiores al 50 % año tras año desde entonces (Richardson, Fini, & Nelson, 2013; Tkach, 2010). Quizás unas de las causas principales sea la disponibilidad de dispositivos que requieren de datos hoy en día, los cuales van desde celulares y computadoras hasta llegar incluso a requerir datos para controlar nuestros electrodomésticos en una búsqueda desesperada que ha presentado la humanidad por tener un control remoto de todo lo que tiene a su alrededor. Este problema ha llevado a que sean necesarios diversos saltos tecnológicos que nos permitan ir incrementando las tasas de transmisión, y a su vez poder satisfacer la demanda por parte de los usuarios. Para ello, a lo largo de estos años fue necesario el desarrollo de fibras con bajas pérdidas, amplificadores ópticos, la implementación de diversas técnicas de multiplicación como WDM (wavelength división multiplexing por su sigla en inglés) e incluso avances en sistemas de procesamiento de señales (Betancur-Pérez, Botero-Cadavid, Reyes-Vera, & Gómez-Cardona, 2017; Melián, Laguna, & Moreno-Pérez, 2004; Reyes-Vera, Úsuga, Acevedo-Echeverry, Gómez-Cardona, & Varón, 2017; Richardson et al., 2013; Tkach, 2010; Usuga, Amariles, Correa, Reyes-Vera, & Gomez-Cardona, 2016; Vera, Restrepo, Varon, & Torres, 2018). Sin embargo, todos estos avances deben ser acompañador por el desarrollo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de componentes pasivos que nos permitan mejorar la interconexión de la información entre diferentes puntos, destacándose el desarrollo de dispositivos que permitan realizar filtrado de señales y divisores de haz que nos ayuden a separar una señal en múltiples ramificaciones. Estos últimos son de especial interés en los últimos años pues a través de su implementación se ha permitido la expansión de las redes de comunicación óptica a otros lugares a los cuales antes no había acceso. De ahí que se ha generado el interés de poder desarrollar divisores de haz que permitan no solo operar en las bandas de las comunicaciones ópticas, sino que además estos presenten dimensiones cada vez más pequeñas y ojalá a fibra óptica. Esto último, con el fin de que puedan ser fácilmente integrados a los enlaces actuales y no generen una perturbación por su tamaño (Khaleque & Hattori, 2015; E. Reyes Vera, Gomez, Usuga Restrepo, & Gomez Cardona, 2017; Younis, Heikal, Hameed, & Obayya, 2018).

En el presente trabajo de grado presentamos un diseño novedoso de un divisor de haz por polarización totalmente integrado por fibra óptica con el fin de que este pueda ser fácilmente integrado en los enlaces de comunicación ópticas actuales. Para ello, se propone un análisis totalmente numérico a través de la implementación del método de elementos finitos. Este último, es empleado para diseñar y evaluar el comportamiento de la estructura propuesta, la cual es basada en una fibra óptica microestructurada doble núcleo. A partir de la fase de diseño se logró encontrar un dispositivo fotónico para separar las dos polarizaciones, el cual presenta una longitud bastante pequeña, de aproximadamente 3.02 mm. Este dispositivo además permite operar simultáneamente en las bandas O y C de las telecomunicaciones, las cuales son las de uso predilecto por parte de los operadores que emplean enlaces ópticos alrededor del mundo. En la segunda fase del trabajo se realiza el modelamiento de un dispositivo el cual es modificado a través del llenado de uno de sus agujeros con un nano-hilo de oro, el cual nos ayuda a acelerar la fase de la onda que se propaga por el dispositivo, y, por ende, nos permite hacerlo más compacto, logrando que esta vez el mismo dispositivo mida tan solo 0.09 mm, reduciendo de esta manera en un 78%

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

las dimensiones originales del dispositivo fotónico propuesto. Este a su vez opera en las longitudes de onda de 1.310 μm y 1.550 μm . Por lo anterior, se puede afirmar que se logra diseñar con éxito un divisor de polarización compacto el cual puede ser fácilmente construido e implementado en sistemas de comunicación óptica para incrementar la cobertura de las redes de comunicación actuales sin generar perturbaciones significativas debido a que este está completamente diseñado a fibra óptica.

Para la construcción de dicho divisor por polarización, se partirá de un divisor por polarización construido por Khaleque y compañía, este contaba con la particularidad de poseer un par de nano-hilos de oro insertados en algunos de los agujeros de la microestructura. En base a este, se realiza el diseño utilizado, distribución de agujeros para el arreglo propuesto y materiales usados, posterior a esto se realiza explicación de las ecuaciones más relevantes en el diseño, análisis de resultados con el fin de encontrar las condiciones adecuadas para la operación de nuestro divisor por polarización en las bandas O y C de comunicaciones, se propone variar la longitud del diámetro de oro, dispuesto a la derecha del arreglo y conocer el impacto de dichas variaciones en la respuesta espectral para cada polarización, se extraen datos y se analizan esto con el fin de exponer el diámetro con menor longitud de propagación y se resume el resultado de las demás variaciones realizadas. Finalmente se realiza un breve recuento sobre que otros temas podrían ser tratados a futuro, teniendo en cuenta que dicha fibra expuesta en este proyecto muestra grandes avances en las comunicaciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Objetivo General

Diseñar y analizar un divisor de haz basado en fibras ópticas microestructuradas doble núcleo que nos permita operar en las bandas O y C.

Objetivos Específicos

1. Diseñar un dispositivo fotónico basado en fibras ópticas microestructuradas que permita separar señales según el estado de polarización de la luz.
2. Optimizar la estructura geométrica de una fibra óptica microestructurada doble núcleo, de tal forma que podamos dividir por polarización la luz que viaja a través de esta.
3. Determinar los parámetros óptimos necesarios para que el dispositivo opere en una de las bandas para comunicaciones ópticas.
4. Implementar técnicas de post-procesamiento para miniaturizar las dimensiones del dispositivo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Como se mencionó anteriormente, este trabajo de grado está enfocado en proveer el diseño de un dispositivo integrado que permita mejorar el rendimiento actual de los enlaces ópticos. Adicionalmente, recordando que dichos enlaces emplean la fibra óptica como su medio de transmisión, es por esa razón, que se hace necesario hacer un recuento de como este medio de transmisión funciona, y las herramientas conceptuales y matemáticas que nos permitirán comprender mejor el contenido de este trabajo. Por ello, iniciaremos revisando la forma en cómo se propaga la luz a través de una fibra óptica hasta llegar a comprender como a través del uso de una fibra óptica con dos núcleos es posible obtener un divisor de haz por polarización.

Análisis de la propagación de la luz en las fibras ópticas

Para lograr comprender como se propaga la luz a lo largo de la fibra óptica, podríamos imaginarla como una onda confinada que es propagada por un medio guiado (núcleo). Esta transmisión del haz de luz resulta interesante ya que es la manipulación controlada de la luz que está atravesando un medio guiado a través del núcleo; la luz incidente se desplaza dependiendo del modo que se esté usando (monomodo o multimodo), este desplazamiento a través de la fibra óptica va rebotando por las paredes del núcleo formando el ángulo crítico, en el que se produce la reflexión total interna, de esta manera el haz de luz se propaga refractándose en su interior hasta llegar a su destino. Los principios físicos básicos por los que la transmisión de la luz es posible en el medio guiado es la reflexión y la refracción; cuando un haz de luz incide con cierto ángulo, sobre una superficie que contiene dos medios de diferente material, el rayo incidente se divide generando dos rayos: uno reflejado y otro refractado propagándose por los dos medios. El rayo reflejado seguirá una trayectoria que forma un ángulo con la normal al plano de separación de los

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

medios igual al del incidente, mientras que el refractado cambia de dirección, con velocidad distinta, es decir, lo hará de acuerdo con la ley de Snell, la cual explica cómo un rayo de luz se curva cuando atraviesa una discontinuidad de índice de refracción y viene representada por la siguiente ecuación:

$$n_1(\text{sen}\phi_1) = n_2(\text{sen}\phi_2) \quad (1)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción del material 1 y el material 2 respectivamente. θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y refracción.

Partiendo de la Fig.1, donde $n_1 > n_2$. En el primer medio el haz de luz incide con un ángulo θ_1 , al pasar al segundo medio, observamos que el ángulo refractado es mayor al ángulo incidente, alejándose de la normal. El ángulo crítico es generado cuando el ángulo de refracción es de 90° , ya que el rayo transmitido se propaga a lo largo de la superficie de separación de los dos medios. La ecuación del ángulo crítico se conoce mediante la Ec.1 y es la siguiente:

$$\phi_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

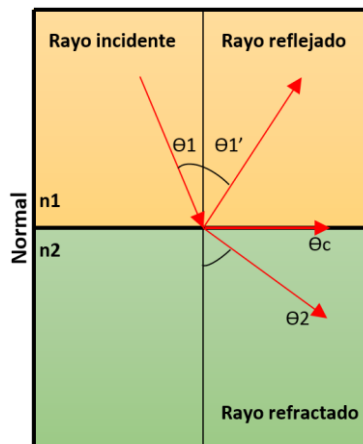


Figura 1. Refracción de la luz en dos materiales diferentes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se mencionó anteriormente, los medios donde se puede propagar la luz están caracterizados por su índice de refracción; es la cantidad de desviación que se da cuando la luz incide en la superficie de separación entre dos materiales. Este valor es adimensional y para medios distintos al vacío, será siempre mayor que la unidad, observando la Ec.3 este no puede ser inferior a uno pues implicaría que la velocidad de propagación dentro del medio es superior a la velocidad de la luz, lo cual es físicamente imposible. El índice de refracción se denota con la letra n .

$$n = \frac{c}{v} \tag{3}$$

Donde c es la velocidad de la luz y v la velocidad de la onda dentro del material que se está propagando, en nuestro caso será sílice.

Estructuralmente la fibra óptica se compone de tres capas concéntricas. El núcleo; parte interna por donde se propaga el haz de luz, está compuesto generalmente por: combinación de dióxido de sílice, dopado con material como germanio, también se encuentran en el mercado fibras compuestas de cuarzo fundido o plástico, el tamaño puede variar dependiendo del tipo de fibra que se esté usando; monomodo o multimodo, el revestimiento; es la capa media que sirve para confinar la luz en el centro, compuesto por materiales similares al núcleo pero con un índice de refracción menor esto con el fin de producir el fenómeno de la reflexión total interna y por último la cubierta o recubrimiento; es la capa exterior que sirve como amortiguador para proteger la fibra, compuesto por plástico o cubierta acrílica y utiliza códigos de colores, es decir; cubierta amarilla fibra óptica monomodo y cubierta naranja fibra óptica multimodo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

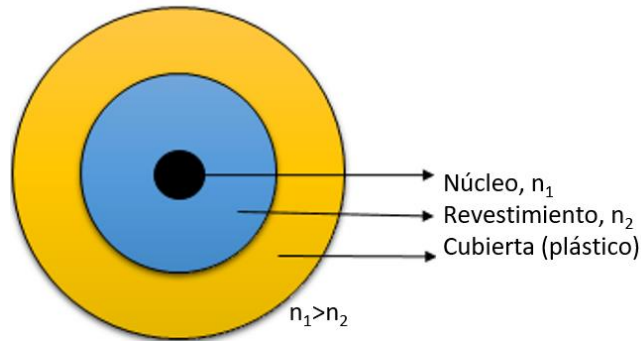


Figura 2. Capas de la fibra óptica, núcleo, revestimiento y cubierta.

TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

Existen dos tipos de fibra óptica comúnmente conocidas, multimodo y monomodo. Las primeras, como su nombre lo dicen, el haz de luz tiene diferentes formas de viajar dentro del núcleo, este es de aproximadamente $50 \mu\text{m}$, más grande comparado con el de las monomodo. En la propagación de la luz, cada modo recorre caminos diferentes, fotones que ingresan en forma simultánea en la entrada de la fibra pueden salir en momentos diferentes, dependientes del camino que hayan seguido, incluso si la luz empieza el recorrido al mismo tiempo, lo cual limita trabajar con este tipo de fibra a ciertas distancias. Esto produce dispersión, limitando el ancho de banda utilizable en la fibra óptica. A medida que el núcleo es más pequeño, menos modos pueden propagarse, apareciendo las fibras monomodo, el haz de luz tiene una sola trayectoria para viajar lo que permite una mayor distancia de propagación ya que las dimensiones del núcleo son aproximadamente 8 a $9 \mu\text{m}$. (Daniel Malacara, 2015)

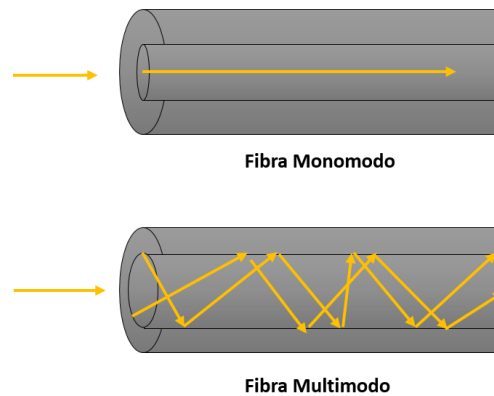


Figura 3. Esquemático de modo de propagación en Fibras monomodo y multimodo, respectivamente.

En aprovechamiento de este medio eficiente de transporte de información surge la necesidad de ser utilizado para diferentes campos de la industria tales como: medicina, construcción, mecánica, químicos, entre otros. Una alternativa más promisorio a estas fibras convencionales son las fibras ópticas microestructuradas (MOF) o fibras de cristal fotónico (PCF) las cuales son caracterizadas por sus arreglos geométricos periódicos con agujeros de aire extendidos a lo largo de su longitud de propagación. Estas se destacan pues presentan una gran cantidad de propiedades únicas diferenciándolas de la fibra óptica convencional mencionadas anteriormente. Entre las propiedades de esta fibra se destaca las bajas pérdidas, control de dispersión cromática, gran área modal, alta birrefringencia, etc (Aristizabal, 2009; Betancur-Pérez et al., 2017; Birks, Knight, & Russell, 1997; Russell, 2003).

Teniendo en cuenta las ventajas antes mencionadas de la MOF en comparación con la fibra convencional, se realiza un análisis de construcciones realizadas con este tipo de fibras y los resultados obtenidos y de esta manera partir con el desarrollo del proyecto de grado inicialmente propuesto. Para la construcción del divisor por polarizador, se toma como base el divisor de banda ultra ancha basado en fibra de cristal fotónico doble núcleo. Este

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

contaba con la particularidad de poseer un par de nanos alambres de oro insertados en algunos de los agujeros de la microestructura. Como lo demuestran Khaleque y compañía, es posible a través de dicha variación, lograr obtener un divisor por polarización altamente compacto (254.6 μm) y con un ancho de banda de 560 nm (Khaleque & Hattori, 2015). En otras investigaciones se realizan aportes usando PCF con diferentes rellenos, por ejemplo: Zi y compañía, realizaron un divisor por polarización con doble núcleo lleno de líquido, donde los resultados en comparación con el primer divisor no fueron mejores; se obtuvo una longitud de la fibra construida de 92 μm , con ancho de banda de aproximadamente 20 nm y 30 nm, operando en las bandas O y C. (Zi, Li, Wang, An, & Fan, 2016). Otro divisor, construido por Wang y compañía fue realizado usando Telurita, en el cual se obtiene un divisor por polarización para una longitud de propagación de 1.079 mm con relación de extinción a 174.92 dB y ancho de banda de aproximadamente 70 nm. (Wang et al., 2017). Estos trabajos demuestran el potencial de los PCF.

MODOS DE PROPAGACION

La configuración y distribución del campo electromagnético en un plano perpendicular a la dirección de propagación del rayo es conocido como modo de propagación. Como se explicó en este capítulo una fibra puede tener varios modos y cada modo tiene una velocidad de fase asociado a un índice de modo efectivo (n_{eff}), el cual se puede calcular de la siguiente manera:

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (4)$$

Donde β es la constante de propagación en dirección Z, k_0 es el número de onda en el espacio en el vacío y conociendo este índice efectivo, es posible determinar la constante de propagación de la onda a través de la ecuación:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} \quad (5)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Donde λ es la longitud de onda y n_{eff} son los índices de modo efectivo, los cuales son obtenidos con Comsol Multiphysics.

Las fibras ópticas presentan los siguientes modos de propagación; Modo TE (Transversal Eléctrico), TM (Transversal Magnético) conocidos como modos meridionales, TEM (Transversal Electromagnético) y los Híbridos (HE_{mn} y EH_{mn}), estos últimos son los que podemos observar al final de la fibra ya que en el camino de propagación se presentan acoples entre los modos próximos lo que conlleva a una sobre posición de los modos dando como resultado una nueva notación de modos llamada modos linealmente polarizados (LP_{lm}) l y m denotan el número máximo de campo eléctrico en las direcciones azimutal y radial de un modo en particular.

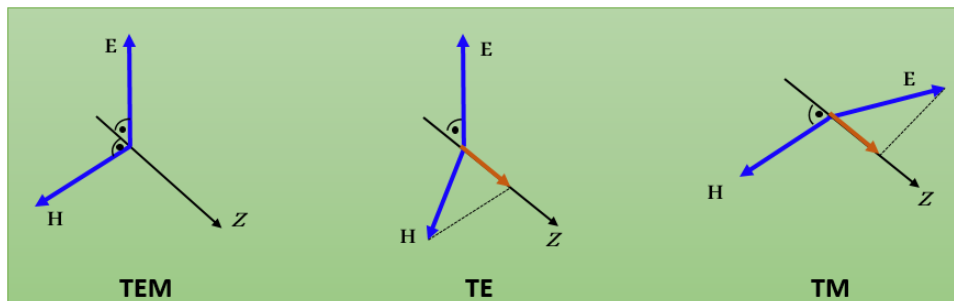


Figura 4. Modos de propagación

TEORÍA DE MODOS ACOPLADOS

Cuando se estudia el comportamiento de una guía se observa que en ella se presenta un fenómeno llamado campo evanescente, el cual es el mecanismo a través del cual la anergia logra salir del núcleo. Teniendo esto presente, y si tenemos otro núcleo paralelo y muy cercana a la anterior, es decir, teniendo dos núcleos. Lo que ocurrirá, será que en determinada longitud de la fibra esta energía logra transferirse periódicamente una a la otra conociéndose esta longitud como longitud de acople (E. E. Reyes Vera, Usuga Restrepo, Gómez Cardona, & Varón, 2016; E. Reyes Vera et al., 2017).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$Lc_i = \frac{\lambda}{2(n_e^i - n_o^i)} \quad (6)$$

Donde λ es la longitud de onda, n_e^i es el índice efectivo del modo par y n_o^i es el índice efectivo del modo impar, donde i define la polarización X y Y en cada modo.

La interpretación de la potencia normalizada depende de los resultados obtenidos en la de la longitud de acople, mediante la Ec.7 podemos observar el comportamiento de cada una de las polarizaciones con picos máximos y mínimos en función de la longitud de onda.

$$P_{Out} = \cos\left(\frac{\pi}{2Lc_i} * z\right)^2 \quad (7)$$

Donde Z es la distancia de transmisión y Lc_i Longitud de acople, previamente hallada usando la EC.6.

La relación de extinción es quizá, el parámetro más importante cuando se analizan divisores por polarización debido a que a través de este parámetro se puede determinar: el ancho de banda disponible en un divisor de polarización, las frecuencias a la cuales puede operar el dispositivo y finalmente el nivel de extinción que existe entre la luz que viaja en la polarización X con respecto a la que viaja en la polarización en Y. Este parámetro es definido como la potencia de un modo de polarización particular en el núcleo de salida, esperado frente a la potencia del otro modo de polarización en el mismo núcleo. Por lo anterior depende de la ecuación de potencia normalizada, como se describe en la siguiente ecuación

$$ER = 10 \log\left(\frac{P_{Out}^y}{P_{Out}^x}\right) \quad (8)$$

Donde P_{Out}^y es la potencia de salida en dirección Y y P_{Out}^x es la potencia de salida en dirección X.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

POLARITONES DE PLASMÓN DE SUPERFICIE

Los polaritones plasmonicos de superficie (SPP) son excitaciones electromagnéticas entre un metal y un material dieléctrico, son oscilaciones de carga polarizada confinadas en la interface entre los dos medios, por lo que sólo ondas con polarización TM (el vector de campo eléctrico es paralelo al plano de incidencia) pueden excitarlo. De igual forma estas nuevas configuraciones deben satisfacer la ecuación de onda electromagnética.

Para poder excitar un SPP se necesita que las cargas superficiales generen oscilaciones la constante dieléctrica del metal ϵ_m , tiene la forma de electrones libres. (Dario & Cardona, 2011).

$$\epsilon_m = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (9)$$

Donde ω_p Frecuencia BULK del metal, la cual está más que todo en la longitud de onda ultravioleta, la frecuencia SPP es menor que la frecuencia plasma.

$$\omega_{spp} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \epsilon_d}} \quad (10)$$

Las ondas excitadas con SPP tienen asociados campos evanescentes que penetran tanto en el dieléctrico como en el metal; las profundidades de penetración en el dieléctrico δ_d y en el metal δ_m están dadas por:

$$\delta_d = \frac{1}{k} \left| \frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{-\epsilon_d^2} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\delta_m = \frac{1}{k} \left| \frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{-\epsilon_m^2} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La dispersión del material en el hilo de oro (Au) es caracterizado mediante el modelo de Drude Lorentz,:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_D^2}{\omega(\omega + j\gamma_D)} - \frac{\Delta\varepsilon \cdot \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) + j\Gamma_L \omega} \quad (13)$$

Donde ε_m es la permisividad del oro, $\Delta\varepsilon$ es el factor de peso que depende del material, ω es la frecuencia angular de la luz guiada, γ_D es la frecuencia de amortiguación, ω_D es la frecuencia de plasma, Ω_L y Γ_L representan la frecuencia y el ancho espectral del oscilador de Lorentz.

ε_∞	$\frac{\omega_D}{2\pi}$	$\frac{\gamma_D}{2\pi}$	$\frac{\Omega_L}{2\pi}$	$\frac{\Gamma_L}{2\pi}$	$\Delta\varepsilon$
5.9673	2113.6	15.92	650.07	104.86	1.09

Tabla 1. Modelo Lorentz para el Oro

Cuando el diámetro del hilo de oro es grueso, las constantes de propagación de las interfaces dieléctrico metal no son iguales produciendo un desacople entre ellas, en cambio, si el diámetro del hilo de oro es de alrededor de 60 nm a 70 nm estas constantes se superpondrán dando así un acople lo que proporciona una máxima transferencia de energía del dieléctrico para el metal, podemos observar este fenómeno mediante los modos simétricos y anti simétricos con distribuciones de campo transversal eléctrico

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

En esta sección se detallada los pasos seguidos durante el trabajo de grado, con el fin de obtener un divisor por polarización que pueda ser implementado de forma simultánea en las bandas O y C de las comunicaciones ópticas. Esto con el fin de demostrar cual fue el procedimiento que se ejecutó. Como se observará en esta sección, se dará inicio con la consecución de un diseño básico basado en una fibra óptica microestructurada doble núcleo, que nos permita dividir la luz según el estado de polarización. Para ello, se demostrará como a partir de ajustes geométricos es posible garantizar que dicho dispositivo fotónico pueda operar dentro de las bandas de las telecomunicaciones más empleadas en la industria, las cuales son la banda O y la banda C. Seguidamente, se propone un método de miniaturización y optimización del dispositivo, el cual consta de la inserción de un nano-hilo de oro en uno de los agujeros de la microestructura. Entonces también se hace un estudio que permite optimizar el diámetro del nano-hilo de oro, con el fin de ajustar las bandas de operación, mientras simultáneamente se hace más compacto el dispositivo.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FIBRA

A continuación se describe los pasos importantes que se llevaron a cabo para realizar la construcción y análisis del divisor:

1. Descripción del modelo:

A continuación describimos el diseño del divisor de haz propuesto con el fin de cumplir los objetivos planteados en este trabajo de grado. Buscando, que ducho divisor pueda operar simultáneamente en las bandas O y C de las telecomunicaciones. Para ello, se propone el diseño ilustrado en la Fig.5, el cual consta de la siguiente construcción; se tiene una distribución de agujeros de aire simétricamente formando un hexágono a lo largo de la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

longitud de la fibra óptica, donde d_3 son los agujeros que rodean la guía de onda, con diámetro de $0.55 \mu\text{m}$, en el centro del MOF dando forma al doble núcleo se tiene una distribución de agujeros de aire d_4 y d_1 con diámetros de $0.35 \mu\text{m}$ y $1.04 \mu\text{m}$ respectivamente, lateralmente en los extremos del núcleo se tienen agujeros d_2 con diámetro de $0.44 \mu\text{m}$, para la guía de onda o núcleo fue necesario eliminar dos agujeros d_3 del centro de la fibra. Entre cada agujero se tiene una separación llamado Pitch (Λ) de $2.2 \mu\text{m}$. Esta construcción es realizada sobre dióxido de silicio, al momento de agregar el hilo de oro, se usó el diámetro d_3 .

Por otro lado, para llevar a cabo el análisis y diseñar dicho divisor, se empleó el software comercial COMSOL Multiphysics, el cual es basado en el método de elementos finitos vectorial (Jin, 2002). Adicionalmente, fue necesario el uso de una Perfectly Matched Layer (PML) con el fin de evitar posibles reflexiones en el borde la fibra y por ende, nos ayuda a crear condiciones de frontera absorbentes donde la onda se atenúa hasta desaparecer por antes de alcanzar la frontera más exterior del modelo, ayudando a evitar las reflexiones exteriores de las ondas que se modelan en el interior de la fibra óptica. Esta PML se caracteriza por tener un diámetro de $20 \mu\text{m}$ y un grosor de $1.3 \mu\text{m}$.

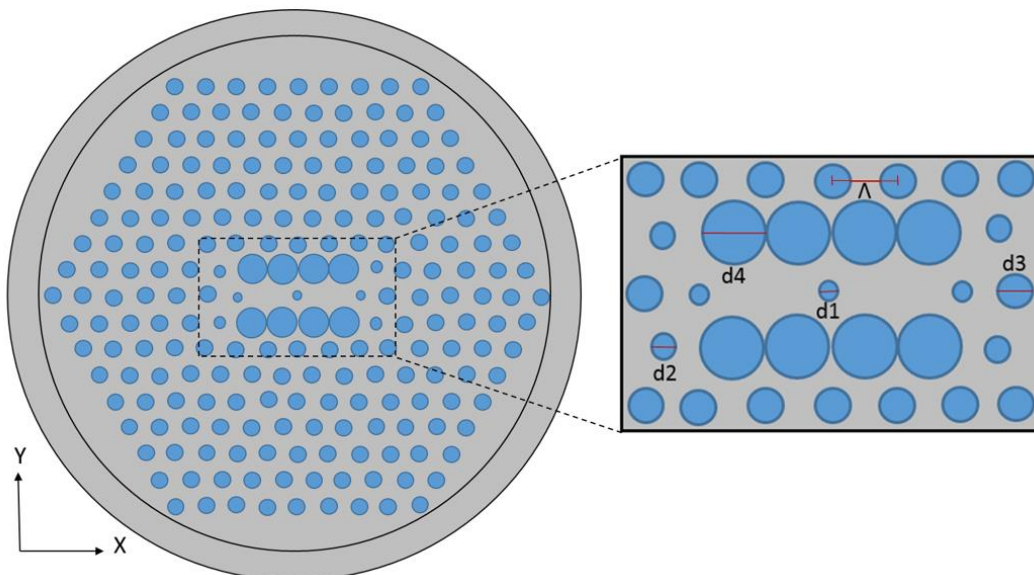


Figura 5. Sección transversal del MOF propuesto

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. Proceso de simulación.

Durante este proceso se termina por definir el diseño, se adicionan materiales con los que vamos a trabajar en cada parte de la fibra óptica; aire, dióxido de silicio (Bansal, 1986) y oro (Etchegoin, Le Ru, & Meyer, 2006). Condiciones de frontera y definición de la malla; la construcción de la geometría contiene detalles geométricos que pueden dificultar en el proceso de enmallado, en particular los detalles pequeños ya que concentran gran número de elementos de malla en regiones donde los cambios en los resultados de la simulación son despreciables y por tanto pueden ser ignorados. Existen varios parámetros predefinidos para la malla que van desde “extremadamente fino” a “extremadamente grueso”. La malla final es el resultado de la construcción de todas las operaciones en la secuencia de mallado y el seleccionar la malla depende del tipo de solución que se elija, en la Fig.5. se visualiza distribución de la malla usada en el centro de la fibra óptica, a la derecha donde tenemos la distribución del hilo de oro en el agujero d3 se realiza una construcción de malla mejor definida.

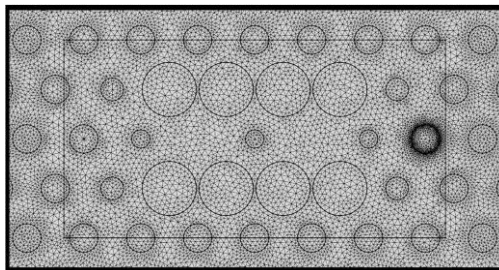


Figura 6. Construcción de la malla para el divisor propuesto.

3. Visualización de los resultados.

En esta etapa final se muestran los resultados de la simulación, existen varias formas de visualizar la solución, la selección de esto depende de la forma en que se facilite más la interpretación de la misma.

En la Fig 7, se muestra la forma como interactúa el haz de luz al ser transmitido a lo largo de la fibra óptica construida para el divisor.

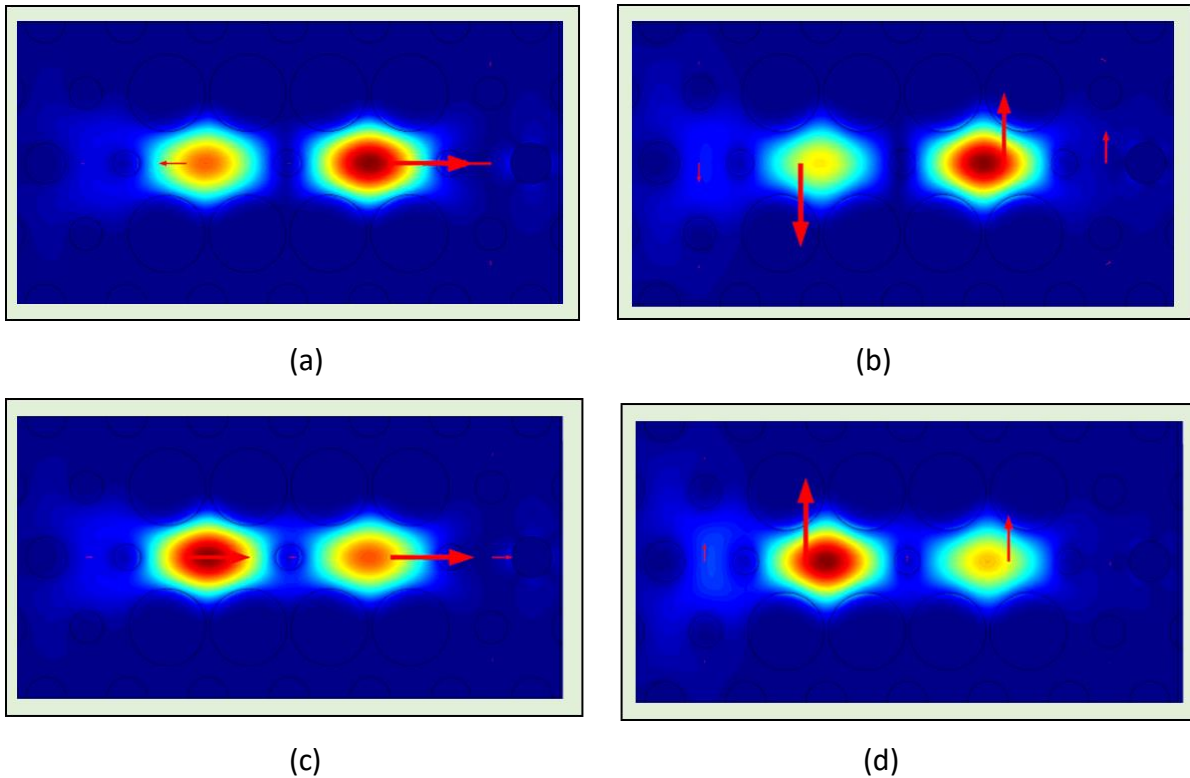


Figura 7. Propagación del haz de luz. (a) X impar, (b) Y Impar, (c) X par (d) Y par.

Como se mencionó antes, Comsol Multiphysics nos permite obtener los valores de índice de refracción de los supermodos, tanto la componente real como imaginaria. La parte real del índice es extraída y usando la Ec.6 es posible determinar la longitud de acople para diferentes longitudes de onda en cada una de las polarizaciones, al obtener este valor y mediante la Ec.7 de potencia normalizada, es posible analizar el comportamiento del dispositivo en las bandas de interés en este caso O y C. El cual nos permite observar como es el comportamiento de la potencia asociada a cada estado de polarización de la luz, así es fácil identificar el punto en el cual estas dos polarizaciones alcanzan un punto en el cual están completamente separadas, es decir, mientras una de ellas presenta un nivel máximo de potencia, la otra presenta potencia igual a cero. Finalmente, se estudió la relación de extinción de polarización, la cual es determinada a través de la Ec. 8. Como es evidente allí básicamente remplazaremos los valores de longitud de acople para cada longitud de onda y la longitud en la cual los dos estados de polarización están completamente separados.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esto con el fin de encontrar la respuesta del dispositivo y evidenciar la banda de las telecomunicaciones en la cual puede operar. Con este parámetro, además, podemos analizar el ancho de banda del divisor.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos, luego de modelar el comportamiento del divisor de haz basado en la fibra microestructurada doble núcleo sin hilos de oro Fig.5, son mostrados en la Fig.8, donde es posible observar el comportamiento de los índices efectivos de los modos pares e impares para las polarizaciones X y Y, el cual decrece con la longitud de onda, lo cual es de esperar, debido a los fenómenos dispersivos que presenta el silicio. Adicionalmente, es evidente que los supermodos con polarización Y, presentan un valor más bajo. Esto se da como consecuencia de que los núcleos en la dirección en X pueden interactuar más fácilmente debido a que se encuentran sobre el mismo eje.

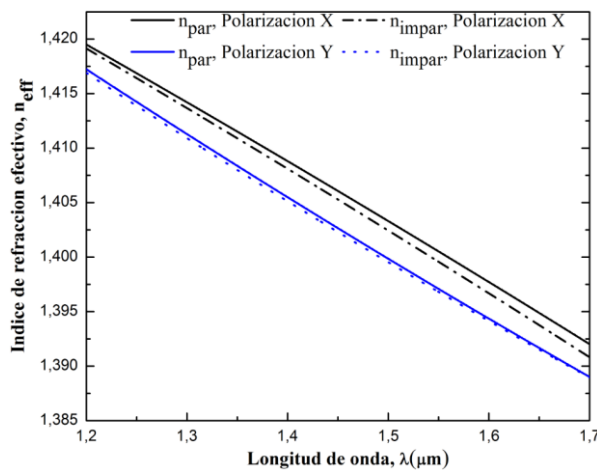


Figura 8. Índices de refracción efectivo (n_{eff}) como función de la longitud de onda para el divisor sin inserción de hilos de oro.

Los índices efectivos que nos arroja esta MOF extraídos manualmente, nos permite calcular las longitudes de acople empleando la teoría de supermodos. Este análisis fue llevado a cabo en un rango de longitud de onda de operación que abarca desde $1.2 \mu\text{m}$ hasta $1.7 \mu\text{m}$, con el fin de evaluar si el dispositivo propuesto puede operar simultáneamente en las bandas O y C de las comunicaciones ópticas. Una vez d, Los índices efectivos (n_{eff}) asociados

a los cuatro supermodos posibles fueron reemplazados en la ecuación 6, para determinar el comportamiento de la longitud de acople para cada polarización. Como se observa en la ecuación 6, cada estado de polarización de la luz, va a presentar un supermodo par y un supermodo impar, lo cual hace que nuestro análisis sea mucho más simple.

Una vez obtenida la longitud de acople para cada polarización, estas fueron reemplazadas en la ecuación 7, para evaluar el comportamiento de la potencia normalizada asociada a cada polarización. El resultado de este análisis cuando la fibra no es alterada con la inserción de un nao-hilo de oro son ilustrados en la Figura 9. Como es evidente, esta configuración presenta un buen desempeño en las dos bandas de interés, pues en las dos bandas se presenta una excelente separación de los niveles de potencia.

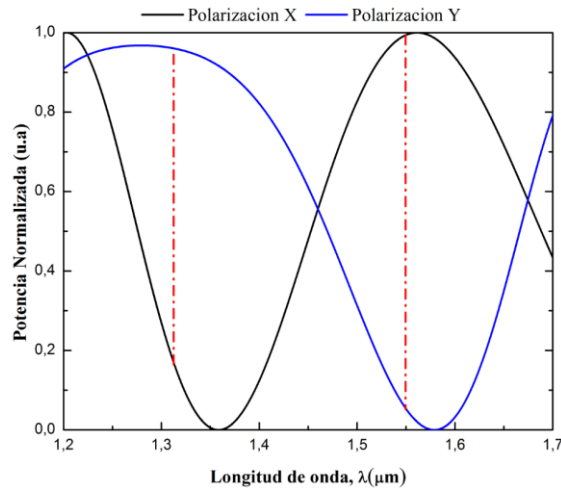


Figura 9. Potencia normalizada como función de la longitud de onda.

Una vez evidenciado que en las bandas O y C, este dispositivo presenta un buen rendimiento, el siguiente paso fue evaluar la longitud del dispositivo, la cual se requiere para poder garantizar una separación total de las dos polarizaciones.

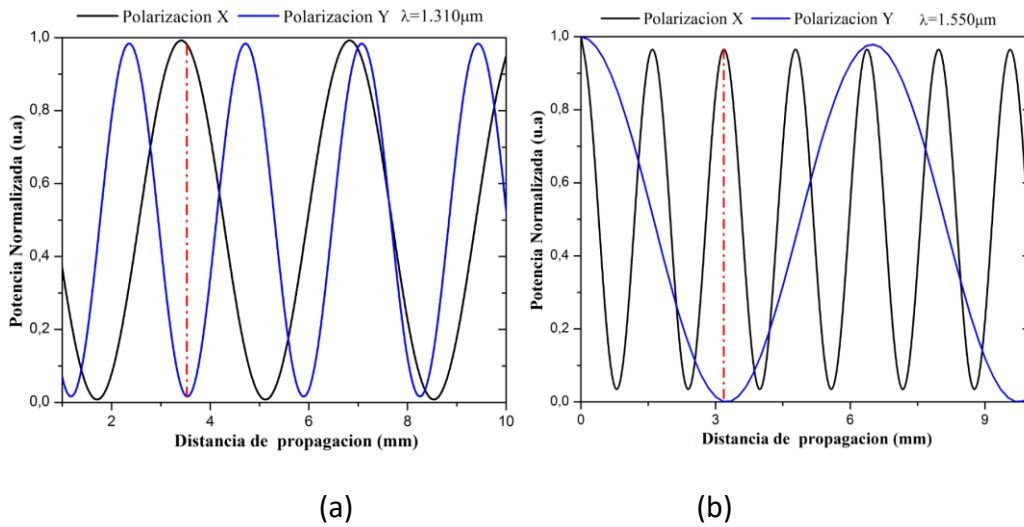


Figura 10. Variación de potencia normalizada como función de la distancia de propagación para las bandas O y C de telecomunicaciones (a)1.310 μm y (b)1.5550 μm

La Fig.10(a). Muestra la variación de potencia normalizada frente a la distancia de propagación para una longitud de onda de 1.310 μm , en el cual conseguimos separar las dos polarizaciones a una longitud de 3.05 mm, resultado del intercambio de potencia entre las polarizaciones X y Y. Por otro lado, la Fig.10(b) muestra que la fase de la polarización X, se desplaza a la izquierda más rápido respecto a la polarización Y, logrando obtener un divisor por polarización con MOF a una distancia de propagación de 3.20 mm para la longitud de onda de 1.550 μm . Estas longitudes de propagación fueron obtenidas para la fibra microestructurada doble núcleo sin hilos de oro. Como es evidente de estos resultados el divisor de haz propuesto es altamente compacto, pues presenta longitudes muy cortas comparado con otros trabajos reportados en la literatura (E. Reyes Vera et al., 2017; Younis et al., 2018).

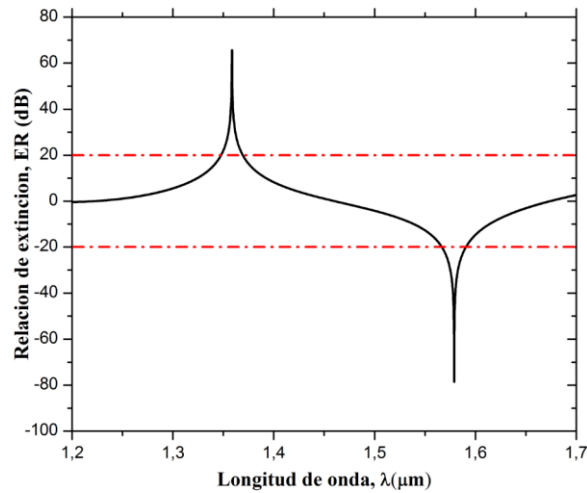


Figura 11. Relación de extinción (ER) como función de longitud de onda para la longitud de propagación 3.05 mm

La relación de extinción (ER) es un parámetro importante para definir el ancho de banda del divisor expuesto como la longitud exacta en la cual se separan los dos estados de polarización. Los dos estados de polarización ortogonal del haz de luz incidente son considerados para ser separados cuando la relación de extinción está por encima de 20 dB o por debajo de -20 dB. La relación de extinción determina el ancho de banda disponible, por lo anterior se observa que se obtiene un ancho de banda estrecho, aproximadamente 22 μm para las bandas O y C, sin embargo, se obtiene una longitud de propagación corta, lo cual sería una ventaja frente al ancho de banda.

Se realiza una variación del diámetro que contiene hilo de oro, para encontrar la distancia de propagación para las longitudes de onda 1.310 μm y 1.550 μm y así poder encontrar el comportamiento más eficiente del dispositivo. Fig.11 Se halla ER con longitud de la fibra 3.05 mm, donde se logra separar las polarizaciones cercanas a 1.310 μm por encima de 20 dB, obteniendo niveles de 65.72dB con un ancho de banda 20nm.

Ahora, con el fin de miniaturizar las dimensiones del dispositivo y/o mejorar el rendimiento de este. Se procedió a llenar uno de los agujeros de la microestructura con un nano-hilo de

oro, tal como se muestra en la Figura 12. Donde a partir, de la modificación de este agujero, hace que se genere la propagación de ondas plasmonicas.

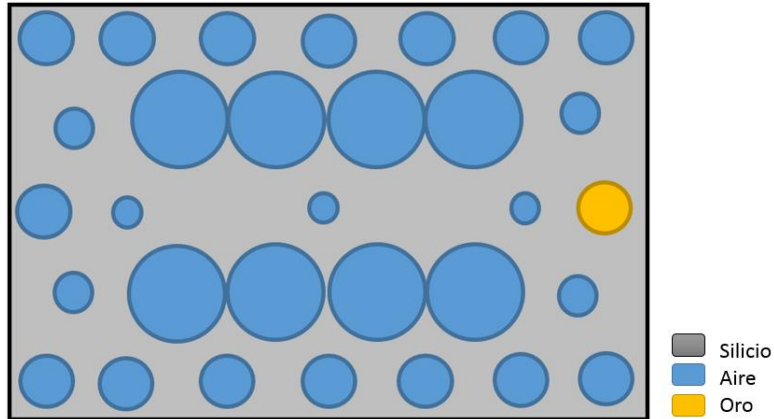


Figura 12. Sección transversal de la estructura de la fibra.

El estudio realizado incluye variaciones en el diámetro del hilo de oro, buscando las condiciones que permitieran obtener un divisor por polarización con una distancia de propagación más pequeña al obtenido en el diseño inicialmente propuesto Fig.5.

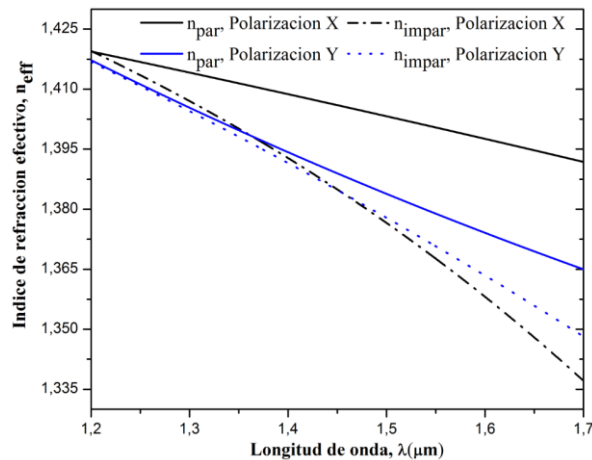


Figura 13. Índices de refracción efectivo (n_{eff}) como función de la longitud de onda.

Sabemos que los índices efectivos en una fibra óptica microestructurada (MOF) son inversamente proporcionales a la longitud de onda, por lo anterior el comportamiento normal de la gráfica es que conforme aumenta la longitud de onda los índices de refracción

disminuyen, teniendo en cuenta que se continúa usando dióxido de silicio y se agrega un hilo de Oro. El índice de polarización par en X, se mantiene mayor respecto a los demás índices de refracción, los demás índices se cruzan entre si cuando aumenta la longitud de onda tomando distancia y quedando en una posición diferente a la inicialmente tomada. Partiendo de esta información se obtiene la potencia normalizada, teniendo en cuenta la descrita en la Ec.7, previamente se debe hallar la longitud de acople con la Ec.6. En la Fig.14 se evidencia que la presencia del hilo de oro genera corrimiento en la respuesta espectral, donde la polarización en Y se desplaza a la izquierda más rápido que la polarización en X, esto es generado por el hilo de oro incrustado en el arreglo.

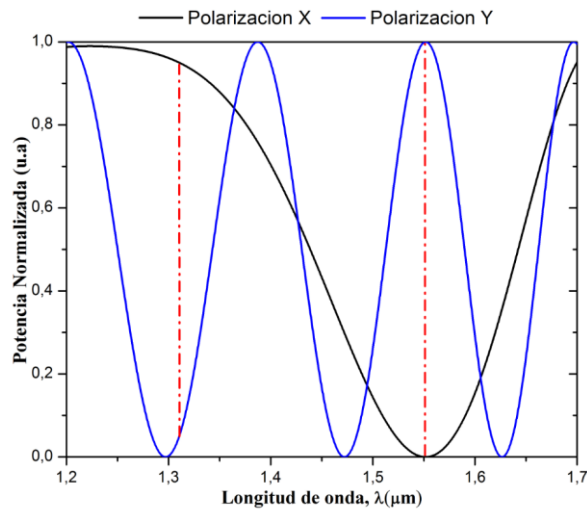


Figura 14. Potencia normalizada como función de la longitud de onda.

Se obtiene la Fig.14 para las bandas de O y C de Telecomunicaciones, se observa una clara mejoría comparada con la Fig.9 de la potencia normalizada sin el hilo de oro. La polarización en Y realiza variación de fase más rápido, comportamiento generado por el hilo de oro que se agregó, obteniendo el divisor a 1.310 μm y 1.550 μm. Se observa que para la longitud de onda de 1.550 μm se tiene perfectamente un punto máximo en polarización Y y un punto mínimo en polarización X, obteniendo un divisor.

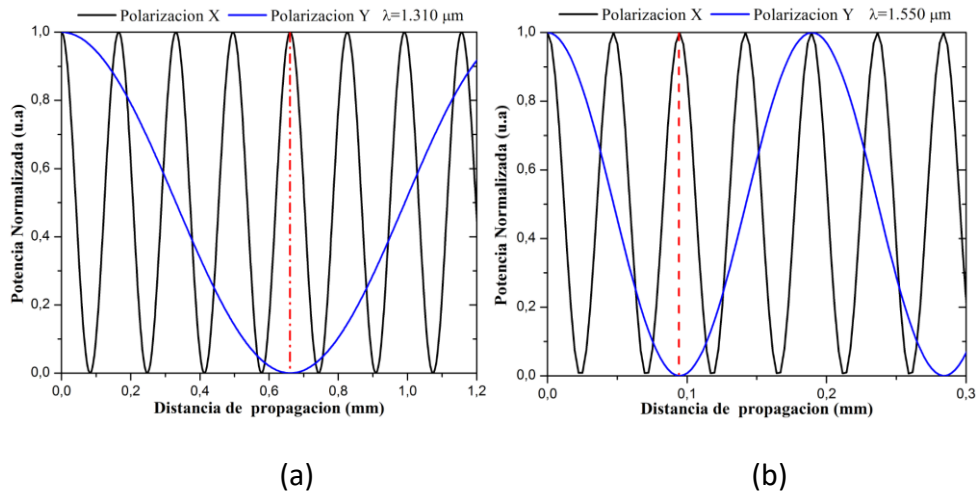


Figura 15. Variación de potencia normalizada como función de la distancia de propagación para las bandas O y C de telecomunicaciones (a)1.310 μm y (b)1.5550 μm

Partiendo de la Ec.6 se halla la distancia de propagación de la fibra óptica. Para la Fig.15(a) con longitud de onda de 1.310 μm , se obtiene un divisor por polarización con fibra microestructurada a una distancia de propagación de 0.66 mm, se logra una clara disminución en la longitud de la fibra cuando se usa el hilo de oro a la derecha para la banda O. Comparada con la Fig.10(a), la longitud de la fibra se logra disminuir en un 78%. Fig.15(b) con longitud de onda de 1.550 μm , se obtiene un divisor por polarización con fibra microestructurada a una distancia de propagación de 0.09 mm, se logra una clara disminución en la longitud de la fibra cuando se usa el hilo de oro a la derecha para la banda C. Comparada con la Fig.10(b), la longitud de la fibra se logra disminuir en un 98% respecto a esta. Estos resultados demuestran una clara disminución respecto al arreglo inicial donde no se usó el hilo de oro.

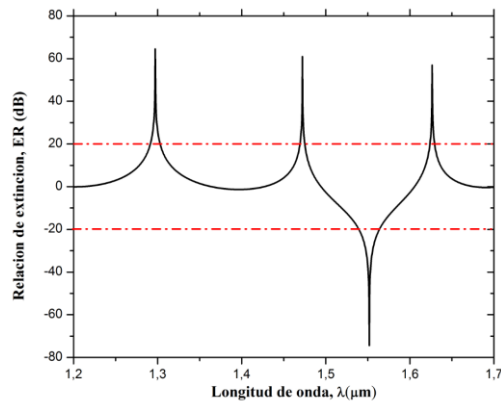
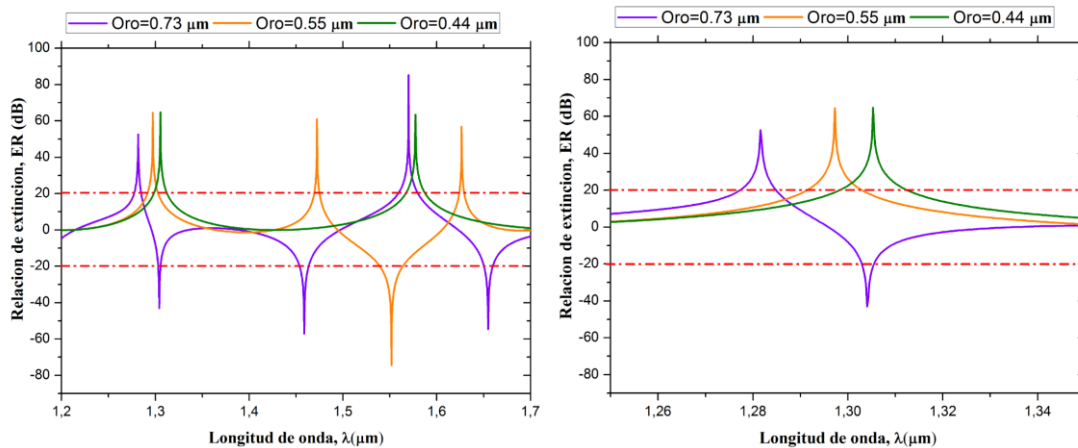


Figura 16. Relación de extinción (ER) para la longitud de propagación 0.09 mm

Como se mencionó anteriormente con el hilo de oro se logra obtener variación de fase mucho más rápido. Por lo tanto, en la Fig.15 con longitud de la fibra de a 0.09 mm solo nos enfocamos a los valores de las bandas O y C de Telecomunicaciones, con niveles de 64.49 dB y ancho de banda de 10nm y -74.37 dB y ancho de banda de 20 nm.

Las siguientes figuras muestran la variación de la Relación de extinción, cuando se varia el diámetro del hilo de oro situado a la derecha del arreglo, inicialmente se trabajó con d3 con diámetro de 0.55 μm y se realizaron 2 cambios adicionales a este diámetro por encima y por debajo del valor propuesto inicialmente a 0.44 μm y 0.73 μm .



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

(a)

(b)

Figura 17(a) Relación de extinción (ER) variación de diámetro con hilo de oro (b) respecto a 1.310 μm (c) respecto a 1.550 μm

En la Fig.17(a) Se tiene en toda la longitud de onda de la fibra usada los ER de cada variación realizada al diámetro. A la hora de realizar estas variaciones del diámetro del hilo con oro se observa un comportamiento con corrimiento a las longitudes de ondas menores. A longitudes de 1.330 μm se logra observar picos para el divisor y en longitudes de onda 1.550 μm se observa divisor por polarización para los diámetros señalados en la gráfica en verde y violeta, sin embargo, no se observa una secuencia para las graficas. Es decir, la mejor condición obtenida con el hilo de oro para la relación de extinción fue con el diámetro con medidas 0.55 μm , con una mejora notable para la longitud de onda de 1.550 μm .

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Se realizó en COMSOL Multiphysics el diseño y simulación del divisor polarizador, es necesario tener en cuenta al asignar el tipo de material a la estructura que se va a simular, realizarlo correctamente en cada una de sus partes, de tal manera que se asemeje lo mejor posible a lo que sucedería en la realidad, así como tener en cuenta el malla para el diseño construido, especialmente en los detalles pequeños ya que concentran gran número de elementos de malla en regiones donde los cambios en los resultados de la simulación son despreciables y por tanto pueden ser ignorados, adicional se debe encerrar todo el diseño con una capa de PML (condición de frontera) para que las ondas se atenúen al llegar allí y no reboten generando distorsión en los resultados.

El divisor polarizador fue diseñado para operar en las bandas O y C de telecomunicaciones. Se propuso dos diseños, inicialmente usando aire y dióxido de silicio, posterior al primer diseño se adiciona un hilo de oro, con el fin de observar el comportamiento usando plasmones. En comparación de ambos diseños, para longitud de onda $1.310 \mu\text{m}$ y $1.550 \mu\text{m}$ se observa una clara disminución respecto a la longitud de la fibra óptica del 78% y 98% respectivamente, comportamiento positivo, sin embargo se observa disminución también en el ancho de banda.

Las MOF han de mostrar avance en comparación con las fibras ópticas convencionales y a futuro para la industria podría ser más usadas, por lo anterior a futuro se puede investigar sobre los resultados que se pueden obtener si en vez de reemplazar un agujero de aire se

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

reemplazan más agujeros por oro, cambio de materiales usados, como se habló al inicio del proyecto, para las MOF se pueden usar otros materiales diferentes a los usados en este proyecto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Agrell, E., Karlsson, M., Chraplyvy, A. R., Richardson, D. J., Krummrich, P. M., Winzer, P., ... Gisin, N. (2016). Roadmap of optical communications. *Journal of Optics (United Kingdom)*, 18(6), 1–40. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/6/063002>
- Aristizabal, V. H. (2009). Micro-structured fiber for chromatic dispersion compensation in optic communication systems . *Dyna*, 76(160), 63–69. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77957985144&partnerID=40&md5=331769266ef1952754d518f7963fc541>
- Bansal, N. P. (1986). *Handbook of Glass Properties* (First Edit). Orlando, Florida: Academic Press.
- Betancur-Pérez, A. F., Botero-Cadavid, J. F., Reyes-Vera, E., & Gómez-Cardona, N. (2017). Hexagonal Photonic Crystal Fiber Behaviour as a Chromatic Dispersion Compensator of a 40 Gbps Link. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 63(1), 93–98. <https://doi.org/10.1515/eletel-2017-0013>
- Birks, T. A., Knight, J. C., & Russell, P. S. J. (1997). Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Optics Letters*, 22(13), 961. <https://doi.org/10.1364/OL.22.000961>
- Dario N. Cardona, G. (2011). Nelson Dario Gomez Cardona, Modeling and experimental realization of field sensors evanescent based on resonance of surface plasmons in optical fibers, Medellin: Universidad Nacional de Colombia.
- Etchegoin, P. G., Le Ru, E. C., & Meyer, M. (2006). An analytic model for the optical properties of gold. *The Journal of Chemical Physics*, 125(16), 164705. <https://doi.org/10.1063/1.2360270>
- Govind P., A. (2002). *Fiber-Optic Communications Systems, Third Edition*. (Third Edit, Vol. 6). John Wiley & Sons.
- Jin, J. (2002). *The Finite Element Method in Electromagnetics*. (J. W. & Sons, Ed.) (Second).
- Khaleque, A., & Hattori, H. T. (2015). Ultra-broadband and compact polarization splitter based on gold filled dual-core photonic crystal fiber. *Journal of Applied Physics*, 118(14), 143101. <https://doi.org/10.1063/1.4932659>
- Melián, B., Laguna, M., & Moreno-Pérez, J. A. (2004). Capacity expansion of fiber optic networks with WDM systems: problem formulation and comparative analysis. *Computers & Operations Research*, 31(3), 461–472. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(03\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00011-X)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Reyes-Vera, E., Úsuga, J., Acevedo-Echeverry, J., Gómez-Cardona, N., & Varón, M. (2017). Performance analysis of a modal converter based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber. *Optica Pura y Aplicada*, 50(3), 251–257. <https://doi.org/10.7149/OPA.50.3.49023>
- Reyes Vera, E. E., Usuga Restrepo, J. E., Gómez Cardona, N. E., & Varón, M. (2016). Mode selective coupler based in a dual-core photonic crystal fiber with non-identical cores for spatial mode conversion. In *Latin America Optics and Photonics Conference* (p. LTu3C.1). Washington, D.C.: OSA. <https://doi.org/10.1364/LAOP.2016.LTu3C.1>
- Reyes Vera, E., Gomez, F., Usuga Restrepo, J., & Gomez Cardona, N. (2017). Novel multiband polarization beam splitter based on a dual-core transversally chirped microstructured optical fiber. In M. F. P. Martins Costa (Ed.), *Third International Conference on Applications of Optics and Photonics* (p. 229). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2276381>
- Richardson, D. J., Fini, J. M., & Nelson, L. E. (2013). Space-division multiplexing in optical fibres. *Nature Photonics*, 7(April), 354–362. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.94>
- Russell, P. (2003). Photonic crystal fibers. *Science (New York, N.Y.)*, 299(5605), 358–62. <https://doi.org/10.1126/science.1079280>
- Tkach, R. W. (2010). Scaling optical communications for the next decade and beyond. *Bell Labs Technical Journal*, 14(4), 3–9. <https://doi.org/10.1002/bltj.20400>
- Usuga, J., Amariles, D., Correa, N., Reyes-Vera, E., & Gomez-Cardona, N. (2016). Analysis of chromatic dispersion compensator using a PCF with elliptical holes. *Revista Colombiana de Fisica*, 33(1E), 38–41.
- Vera, E. R., Restrepo, J. Ú., Varon, M., & Torres, P. (2018). Dual-Core Transversally Chirped Microstructured Optical Fiber for Mode-Converter Device and Sensing Application. In F. Xu & C. Mou (Eds.), *Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications*. Rijeka: InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70989>
- Wang, X., Li, S., Liu, Q., Fan, Z., Wang, G., & Zhao, Y. (2017). High-extinction ratio and short-length polarization splitter based on microstructured optical fiber with tellurite glass. *Optical Materials*, 66, 542–546. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.02.024>
- Younis, B. M., Heikal, A. M., Hameed, M. F. O., & Obayya, S. S. A. (2018). Highly wavelength-selective asymmetric dual-core liquid photonic crystal fiber polarization splitter. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 35(5), 1020–1029. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.35.001020>
- Zi, J., Li, S., Wang, G., An, G., & Fan, Z. (2016). Design of ultra-short polarization beam splitter based on liquid-filled photonic crystal fiber. *Optical and Quantum Electronics*,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

48(4), 233. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0504-3>

FIRMA ESTUDIANTES _____

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES_____

ACTA NO. _____


FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	MODALIDAD TRABAJO DE GRADO PRODUCTO OBTENIDO EN TALLERES O LABORATORIOS DEL ITM	Código	FDE 146
	Registro de actividades y cumplimiento de horas / Talleres o Laboratorios de DOCENCIA	Versión	02
		Fecha	2015-09-30

Documento de identidad:	1037612971		
Nombre completo del estudiante:	Johana Marcela Ocampo Perez		
Programa académico ITM:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
Nombre completo del Docente Asesor:	Erick Estefen Reyes Vera		
Fecha de iniciación del producto (aaaa/mm/dd):	3/1/2018	Fecha de terminación del producto (aaaa/mm/dd):	7/31/2018
Nombre Taller o Laboratorio:	Laboratorio fibra optica		
Ubicación:	Bloque M212		
Campus:	Fraternidad		

Fecha			Actividad desempeñada por el estudiante	Hora ingreso	Hora salida	Total horas	Firma Laboratorista	Firma Estudiante
A	M	D						
18	3	1	Induccion sobre Fibra Optica	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	5	Induccion sobre Fibra Optica	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	6	Investigacion sobre Fibra optica: construccion de estado de arte	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	7	Investigacion sobre Fibra optica: construccion de estado de arte	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	8	Investigacion sobre Fibra optica: construccion de estado de arte	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	9	Investigacion sobre Fibra optica: construccion de estado de arte	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	13	Estudio de teoria de fibra opticas microestructuradas	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	14	Estudio de teoria de fibra opticas microestructuradas	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	15	Tutorial Comsol	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo
18	3	20	Tutorial Comsol	15:00	17:00	2	Erick Reyes	Marcela Ocampo


18	3	21	Tutorial Consol	10:00	11:00	1	Erick Reyes	Marcela Campo
18	3	22	Tutorial Consol	10:00	11:00	1	Erick Reyes	Marcela Campo
18	4	3	Diseño de estructura inicial	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	4	4	Diseño de estructura inicial	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	4	5	Diseño de estructura inicial	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	4	10	Simulacion de divisor por polarizacion inicial	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	4	11	Simulacion de divisor por polarizacion inicial	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	5	12	Analisis de datos	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	5	2	Simulacion de divisor por polarizacion con anillos de oro	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	5	3	Simulacion de divisor por polarizacion con anillos de oro	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	5	11	Analisis de datos	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	6	1	Redaccion de trabajo de grado	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
18	7	12	Redaccion de trabajo de grado	9:00	11:00	2	Erick Reyes	Marcela Campo
TOTAL HORAS								44.

Marcela Campo
Firma Estudiante

Erick Reyes
Nombre y firma Laboratorista

Erick Reyes
Nombre y firma Profesional Universitario - Centro de Laboratorios

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	EVALUACIÓN DE MODALIDAD TRABAJO DE GRADO Y PRÁCTICAS PROFESIONALES	Código	FDE 090
		Versión	04
		Fecha	2015-10-05

INFORMACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

1. Título:

Diseño de un divisor de haz por polarización integrado para operar en las bandas O y C de las comunicaciones ópticas.

Programa Académico:	Tecnología	Ingeniería	X
---------------------	------------	------------	---

2. Modalidad Trabajo de Grado:

Proyecto de Grado	X	Práctica Profesional	Emprendimiento
Producto de Investigación		Producto obtenido en Talleres o Laboratorios ITM	Pasantías
Certificación		Reconocimiento Laboral	Cursos de Posgrado
Ingeniería para la Gente			
Grupo de investigación: Automática, electrónica y ciencias computacionales (AEyCC)		Código proyecto	P17217
Tipo de Informe	Propuesta de Proyecto de Grado	Informe Final de Proyecto de Grado	X

3. Información estudiante(s):

Nombre	Cédula	Correo electrónico
Marcela Ocampo Perez	1037612971	j.marcelaocampo@gmail.com


4. Información asesor:

Nombre	Institución	Correo electrónico
Erick Estefen Reyes Vera	ITM	erickreyes@itm.edu.co

CONCEPTO DEL JURADO EVALUADOR

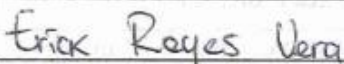
Concepto inicial sobre el trabajo de grado			
Aprobado sin modificaciones	X	Se requieren modificaciones	Mención honorífica
Observaciones			
Se puede anexar hojas adicionales para una descripción más amplia de las observaciones. Justificar en esta parte porqué otorgar mención honorífica.			
<p>El trabajo de grado presenta la solución a uno de los principales problemas que aquejan las comunicaciones ópticas en la actualidad. Debido a que los divisores de haz por polarización permiten incrementar las tasas de transmisión ópticas al doble de la capacidad instalada. Para ello, la estudiante propuso un divisor por polarización basado en fibras ópticas de cristal fotónico doble núcleo. Adicionalmente, el trabajo explora la posibilidad de miniaturizar el tamaño del dispositivo a través de técnicas de post-procesamiento, la cual consiste en la inserción de un nanohilo de oro. Por lo anterior, el trabajo es bastante novedoso, está muy bien estructurado y el contenido supera lo esperado al inicio del trabajo. Pues los resultados presentados se convierten en una base para la fabricación de dispositivos fotonicos de nueva generación, que permitan</p>			

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	EVALUACIÓN DE MODALIDAD TRABAJO DE GRADO Y PRÁCTICAS PROFESIONALES	Código	FDE 090
		Versión	04
		Fecha	2015-10-05

satisfacer las necesidades del mercado de las comunicaciones ópticas en materia de rendimiento, tamaño, estabilidad y duración.

Por lo anterior considero que este trabajo cumple con lo establecido, ya que la estudiante muestra poseer las competencias requeridas por un Ingeniero en Telecomunicaciones.

Nombre jurados evaluadores	Erick Reyes Vera
Firma	 FECHA: 03 de Agosto/2018

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	CARTA DE AUTORIZACIÓN DE DIVULGACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	Código	FGB 019
		Versión	02
		Fecha	2014-08-13

Carta de Autorización de Reproducción y Publicación de Trabajos de Grado

El (los) abajo firmante(s), autores del trabajo de grado **DISEÑO DE UN DIVISOR DE HAZ POR POLARIZACIÓN INTEGRADO PARA OPERAR EN LAS BANDAS O Y C DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS**, autorizo (mos) al INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO –Institución Universitaria, para que almacene, reproduzca, comunique públicamente, publique, permita la reproducción y descarga de la obra, la divulgue o dé a conocer, por cualquier medio conocido o por conocer, sin restricción de tiempo, modo, lugar, número de ejemplares y medio, incluyendo pero no limitándose a su reproducción, comunicación y divulgación, en el Repositorio Institucional o en cualquier otra plataforma gestora de contenidos conocida o por conocerse y adoptada por la Institución, facilitando así que la totalidad de la obra sea conocida y permitiéndole al público en general su consulta, descarga e impresión gratuita, con fines académicos pero aclarando que pese a lo anterior -y en cualquier caso- se respetarán sus derechos morales de autor y nadie podrá usar la obra o explotarla para fines diferentes a la consulta o investigación sin fines de lucro, ni alterarla o transformarla generando una obra derivada, sin la autorización expresa y previa de sus autores.

El(los) abajo firmante(s) declara(n) que la obra es original y fue realizada por él/ella/ellos/ellas de forma individual, sin violar o usurpar derechos de propiedad intelectual o derechos legales o contractuales de terceros. En caso de presentarse cualquier tipo de reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de Propiedad Intelectual que recaigan sobre la obra, el/los firmante(s) asumirá(n) toda la responsabilidad legal y patrimonial y saldrá(n) en defensa del ITM. Por lo tanto, para todos los efectos legales, disciplinarios, administrativos y patrimoniales, el ITM actúa como tercero de buena fe.

Facultad: **Ingeniería**

Programa: **Ingeniería en Telecomunicaciones**

Nivel: Pregrado Especialización _____ Maestría _____ Doctorado _____

Modalidad de trabajo de grado: **Producto de laboratorio**

Título del trabajo de grado **DISEÑO DE UN DIVISOR DE HAZ POR POLARIZACIÓN INTEGRADO PARA OPERAR EN LAS BANDAS O Y C DE LAS COMUNICACIONES ÓPTICAS**

Restricciones a la publicación de la Obra:

- Derechos de propiedad intelectual pertenecientes a terceros. Sí _____ No
- Acuerdos, contratos o cláusulas de confidencialidad suscritas con el ITM y/o con terceros. Sí _____ No Con quiénes? _____

Fecha _____

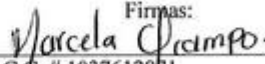
¿Lugar donde reposa el acuerdo, contrato o cláusula

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

 Institución Universitaria	CARTA DE AUTORIZACIÓN DE DIVULGACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	Código	FGB 019
		Versión	02
		Fecha	2014-08-13

- c. Licencias exclusivas concedidas a terceros. Sí No
- d. Cesiones totales o parciales realizadas con terceros. Sí No
- e. Contratos de edición o producción celebrados con terceros. Sí No
- f. ¿Ha publicado la obra o sometido la obra para aprobación en publicaciones científicas o académicas? Sí No Nombre de la(s) publicación (es) _____
- Fecha en la que se sometió la obra para su publicación _____
- Si ya fue publicada fecha en la que fue publicada _____
- ¿Los términos de referencia de la publicación exigen la cesión de los derechos patrimoniales de autor o la licencia exclusiva? Sí No
- g. ¿La obra ha sido o está siendo evaluada actualmente por la Oficina o encargados de Transferencia Tecnológica del ITM? Sí No
- h. La obra ha sido o está siendo evaluada por la Oficina o encargados de Emprendimiento del ITM? Sí No

Nombre(s) y Apellidos:
 Johana Marcela Ocampo Pérez

Firmas:

 C.C. # 1037612971

 C.C. #

 C.C. #

 C.C. #

 C.C. #