

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

# **DISEÑO DE FIBRA ÓPTICA MICROESTRUCTURADA CON BAJAS PÉRDIDAS PARA APLICACIONES EN TERAHERTZ**

Leidy Johana Zúñiga Bedoya

Ingeniería en Telecomunicaciones

M. Sc. Erick Estefen Reyes Vera

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**2016**

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

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

El acelerado crecimiento de la tecnología y las comunicaciones ha hecho que se investigue en la manera de cómo transmitir y recibir mayor flujo de datos en el menor tiempo posible sin pérdidas totales o parciales de la información. La fibra óptica es el medio de transmisión por el cual este objetivo se puede cumplir. En la actualidad se cuenta con fibras ópticas hechas de elementos vítreos que pueden transportar información en el orden de los gigabit pero en un mundo tan cambiante esto no es suficiente. Es por ello que se ha investigado en las fibras que puedan transportar información por el orden de los terahertz, estas fibras son fibras de cristal fotónico (PCF) o fibras microestructuras que son hechas con polímeros como el polimetacrilato. En este trabajo se muestra una fibra óptica microestructurada usando el material Topas para una frecuencia de 1THz que en su núcleo está compuesta por agujeros de aire en forma de elipse que se van a girar a varios grados (entre 0° y 90°). El análisis que se le hace a esta fibra es sobre la pérdida de confinamiento, el índice de modo efectivo y la birrefringencia. Esto se hace mediante el modelado geométrico y la posterior simulación en el software de método de elementos finitos (COMSOL). Los resultados que se obtienen de ella son pérdida de confinamiento  $1,26 \times 10^{-12}$  dB/cm, índice de modo efectivo 1,48 y birrefringencia  $1 \times 10^{-2}$  aproximadamente. La cual la hace una fibra efectiva para aplicaciones de terahertz por sus bajas pérdidas.

*Palabras clave:* Fibra óptica microestructurada, método de elementos finitos, guía de onda, terahertz.

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

## RECONOCIMIENTOS

---

Agradezco a Dios por su infinito amor y misericordia, por ayudarme y guiarme en cada paso de mi vida.

A mis padres por enseñarme que con esfuerzo y dedicación se pueden alcanzar las metas propuestas en la vida y ser mi ejemplo de vida, a mis hermanos por ser ese apoyo cuando más lo necesitaba y a toda mi familia en general por ayudarme de una u otra manera en el desarrollo y finalización de este, mi pregrado.

Al grupo de investigación de Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales, en especial al profesor Erick Reyes por guiarme en la realización de este proyecto, por sus explicaciones, trabajo y paciencia.

A Juan Esteban Usuga Restrepo compañero de universidad por su gran ayuda en las simulaciones, explicaciones del tema, por la atención demostrada a lo largo del tiempo de desarrollo de este proyecto.

*¡Muchas gracias!*

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

## ACRÓNIMOS

---

*PCF* Fibra de Cristal Fotónico

*THz* Terahertz ( $10^{12}$  Hz)

*PHz* Petahertz ( $10^{15}$  Hz)

*THz gap* Banda de teraherz

*ITM* Instituto Tecnológico Metropolitano

*mm* Milímetros ( $10^{-3}$  metros)

$\mu m$  Micrómetros ( $10^{-6}$  metros)

*nm* Nanómetros ( $10^{-9}$  metros)

## Lista de figuras

---

Figura 1: Espectro Electromagnético en función de la frecuencia (Lee, 2009).....	11
Figura 2: Coeficiente de absorción de los polímeros PMMA, PC, FDPE, PTFE, Zeonex y TOPAS en función de la frecuencia (Argyros, 2013).....	13
Figura 3: Estructura básica de fibras óptica convencional.....	15
Figura 4: Tipos de mPOF (a) Núcleo sólido, (b) Núcleo hueco, (C) Anillos concéntricos (fibra Bragg).....	16
Figura 5: Distribución de campo eléctrico para algunos modos LP.....	17
Figura 6: Descripción geométrica de la fibra.....	22
Figura 7: Orientación de las elipses del núcleo de la fibra con polarizaciones en x e y, porosidad del 60% y Dnúcleo de 400µm para los grados (a)0° (b)20° (c)45° (d)90° .....	24
Figura 8: Pérdida efectiva de material (EML) para diferentes porosidades en función del Dnúcleo .....	25
Figura 9: Índice de modo efectivo para una porosidad de 60% en función del Dnúcleo .....	26
Figura 10: Pérdida de confinamiento (a) Con porosidad al 60% con variación de Dnúcleo (b) Con variación de porosidad y Dnúcleo.....	27-28
Figura 11: Birrefringencia a una porosidad de 60% para las diferentes orientaciones de las elipses.....	29
Figura 12: Birrefringencia en función del Dnúcleo para diferentes porosidades para una orientación de 0°.....	30
Figura 13: Birrefringencia en función de la frecuencia de operación de nuestra guía de onda basada en fibra de cristal fotónico en material TOPAS.....	31

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## Lista de tablas

---

Tabla 1: Características principales de algunos polímeros y copolímeros utilizados para fabricación de mPOF (Argyros, 2013).....	14
--	----

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	9
2. Marco teórico.....	12
2.1 Ondas de terahertz.....	12
2.2 Polímeros ópticos.....	13
2.3 Fibras ópticas de polímero microestructurada (mPOF).....	15
2.3.1 Modos de propagación.....	17
2.3.2 Pérdidas.....	19
2.3.2.1 Pérdidas por absorción de material (EML).....	19
2.3.2.2 Pérdida de confinamiento.....	20
2.3.3 Birrefringencia.....	20
3. Metodología.....	22
4. Resultados, recomendaciones y trabajos futuros.....	33
5. Referencias.....	34

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

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Las ondas de terahertz (THz), que se encuentran en un rango de 0.1 a 10 THz, debido a su buen potencial tiene muchas aplicaciones como la espectroscopia, comunicaciones, imágenes para el diagnóstico médico y seguridad ya que por alta frecuencia se pueden estudiar materiales de manera no invasiva ni ionizante (Argyros, 2013), pero por su longitud de onda son absorbidas fácilmente por varios elementos como el agua, elementos vítreos, etc., lo cual hace que el espacio libre no sea el mejor medio para propagar este tipo de señales. Es por ello que en los últimos años se ha intensificado la investigación de medios físicos que propaguen este tipo de ondas sin mayores pérdidas de energía electromagnética.

Se ha podido comprobar en estudios previos que una de las soluciones planteadas para el transporte de este tipo de ondas son la fibras de cristal fotónico PCF (Photonic Crystal Fiber) por sus siglas en inglés o microestructuradas dando buenos resultados con respecto a las disminuciones de pérdidas efectivas de material y confinamiento. Estas fibras son hechas con materiales poliméricos, tienen arreglos de agujeros o anillos de aire en su revestimiento, es por ello que se le llaman microestructuradas o porosas y su núcleo puede ser hueco, sólido o poroso; como por ejemplo la fibra propuesta por Hasanuzzaman *et al* donde se muestra una fibra que tiene sus agujeros de aire son en forma hexagonal en su revestimiento y en su núcleo son circulares, es fabricada con TOPAS y los investigadores reportan una baja pérdida efectiva de material de  $0.035 \text{ cm}^{-1}$  a 1THz. Otro ejemplo es la fibra Bragg compuesta por anillos de aire concéntricos y núcleo hueco hecha con Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) propuesto por Cruz *et al*. Como se puede ver las fibras pueden cambiar en su geometría y en los materiales de fabricación pero su finalidad siempre será el eficiente transporte de las ondas del orden de los THz.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Es por ello que el propósito de este trabajo es ahondar un poco más en la investigación de las PCF, utilizando el polímero altamente transparente como material para diseñar, modelar y simular una fibra capaz de soportar la propagación de las ondas de terahertz con bajas pérdidas. Para ello se realizara un análisis numérico empleando el método de elementos finitos vectorial, con ayuda del software comercial COMSOL. Donde se explorara una estructura basada en agujeros elípticos en el núcleo que nos permita disminuir las pérdidas por confinamiento y por la absorción del material. Para encontrar los parámetros óptimos, se hará un estudio paramétrico que nos permita determinar las dimensiones físicas que nos ayuden a mejorar el comportamiento óptico de esta guía de onda.

Los objetivos que se han trazado para esta tesis son:

- Diseñar mediante la implementación del método de elementos finitos vectorial una fibra óptica microestructurada con agujeros elípticos que opere en la región de Terahertz para aplicaciones en telecomunicaciones.
- Proponer y diseñar una fibra óptica microestructurada con agujeros elípticos que permita transmitir señales electromagnéticas en la región de THz.
- Analizar el comportamiento de fibra cuando los parámetros geométricos de la estructura son variados.
- Analizar las pérdidas por confinamiento de las fibras diseñadas para operar en THz.

Esta tesis está dividida de la siguiente manera:

En el capítulo 2 están los conceptos básicos para poder tener una mejor comprensión de la tecnología de THz, como por ejemplo, los materiales utilizados para la fabricación de PCF, modos de propagación, pérdidas, etc.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el capítulo 3 se muestra la geometría utilizada en el desarrollo de la tesis y el material usado para la realización de la simulación.

En el capítulo 4 se describen los resultados de la simulación, las pérdidas por absorción de material y por confinamiento, la birrefringencia y el índice de modo efectivo. Teniendo como referencia trabajos anteriormente presentados.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

El propósito de este capítulo es explicar los conceptos básicos de las señales de terahertz, por ejemplo sus pérdidas, aplicaciones, una guía de onda como es la fibra óptica microestructurada y materiales para su fabricación. Esto con el fin de ayudarnos a introducirnos en el tema y a la mejor comprensión de los resultados obtenidos.

### 2.1 Ondas de terahertz

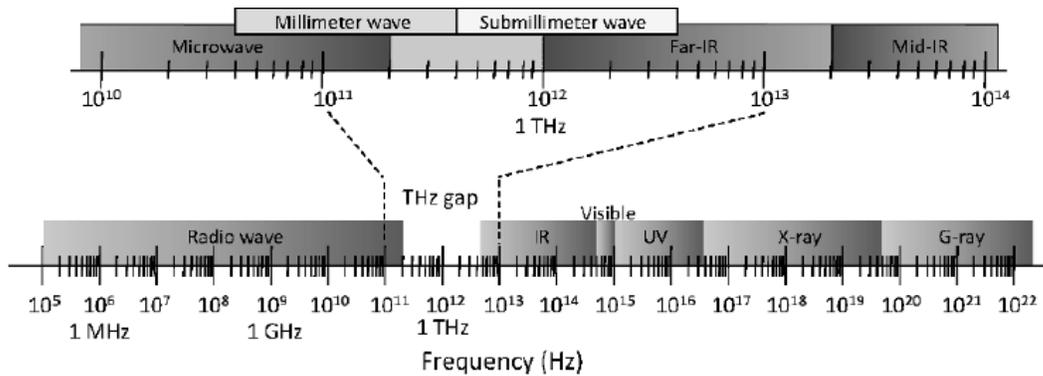
Las ondas de terahertz ( $10^{12}$  Hz) que se encuentran situadas entre las bandas de microondas y el infrarrojo del espectro electromagnético, es un tema que se ha venido investigando con mucha fuerza en los últimos años gracias a las cantidades de aplicaciones que tiene no solo para las telecomunicaciones sino también para la bioingeniería y sistemas de defensa.

Generalmente se llaman así a las ondas que se encuentran en el espectro electromagnético en el rango entre los 0.1 – 30 THz (microondas, infrarrojo y rayos X).

La banda de frecuencia de THz se compone de:

- Ondas milimétricas (MMW): Se encuentran en una frecuencia de onda entre los 0.03 – 0.3 THz y longitud de onda entre los 1 – 10 mm
- Ondas submilimétricas (SMMW): Se encuentran entre los 0.3 – 3 THz con una longitud de onda entre 0.1 – 1 mm.
- Radiación de infrarroja (Far-IR Far infrared radiation): Comprende algunos intervalos de frecuencia entre los 0.86 – 12THz con una longitud de onda 25 - 350  $\mu\text{m}$ .
- Radiación de sub-THz: Con frecuencias entre los 0.1 – 1 THz

En una visión un poco más global de las ondas de THz, se pueden considerar dos tipos de ondas que son las continuas CW (Continuos-Wave) por sus siglas en inglés y las pulsadas.



**Fig. 1** Espectro Electromagnético en función de la frecuencia (Lee, 2009).

## 2.2 Polímeros ópticos

Generalmente cuando se habla de polímeros ópticos, se refiere al polimetilmetacrilato PMMA el cual es un material muy comercial y tiene baja pérdida, típicamente 0.15 dB/m a 650 nm (Argyros, 2013). También existen otros polímeros como el policarbonato (PC), el poliestileno (PS) y el difluoruro de polivinilo (PVDF), los cuales han sido ampliamente empleados debido a su índice de refracción.

El PMMA aunque es ampliamente utilizado para fibras ópticas de polímero microestructurada (mPOF – microstructure Polymer Fiber Optic) presentan opacidad en las ondas de THz, es por ello que para este tipo de ondas se usan otros polímeros que muestran alta transparencia en este rango de frecuencias. Varios ejemplos de ello son el politetrafluoretileno (PTFE/Teflon), el polietileno de alta densidad (HDPE), El Zeonex y TOPAS que demuestran menor pérdida por absorción que el PMMA en dicho rango del espectro electromagnético. Particularmente el Zeonex y TOPAS tienen baja absorción de agua.

La principal ventaja de estos polímeros para las fibras ópticas de polímero microestructurado (mPOF) es fabricar una fibra menos densa que la convencional de sílice y con un material altamente transparente con baja pérdidas.

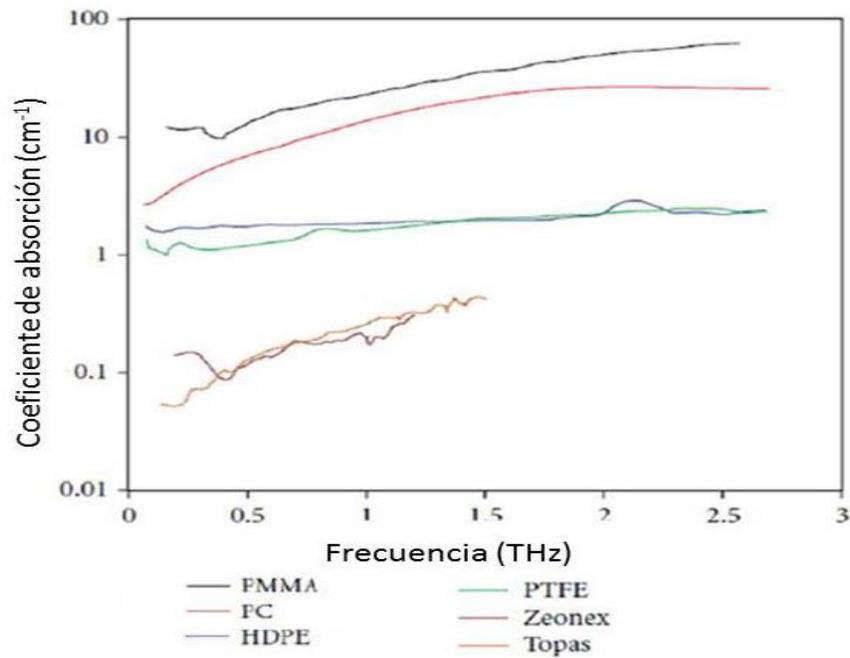
En la Tabla 1 se muestran las características de los materiales anteriormente mencionados a una frecuencia de 1THz.

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

Polímero	Índice de refracción	Pérdida por absorción	Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) °C	Comentarios
<b>Polimetilmetacrilato (PMMA)</b>	1.60	60 dB/cm	115	Polímero óptico más común, alta absorción de agua
<b>Policarbonato (PC)</b>	1.65	50 dB/cm	150	Alta $T_g$ , alto índice de refracción
<b>Poliestileno (PS)</b>	1.59	0.11 dB/m	100	Alto índice de refracción
<b>Difluoruro de polivinilo (PVDF)</b>	1.40	--	-30	Bajo índice de refracción
<b>Polímero de Olefina Cíclica Zeonex</b>	1.52	0.9 dB/cm	138	Altamente transparente para THz, baja absorción de agua
<b>Copolimero de olefina cíclica (TOPAS)</b>	1.52	0.9 dB/cm	80	Altamente transparente para THz, baja absorción de agua
<b>Politetrafluoretileno (PTFE)</b>	1.45	1.3 dB/cm	160-240	Para uso de frecuencias de THz
<b>Polietileno de alta densidad (HDPE)</b>	1.53	1.3 dB/cm	135	Para uso de frecuencias de THz

**Tabla 1.** Características principales de algunos polímeros y copolímeros utilizados para fabricación de mPOF (Argyros, 2013).

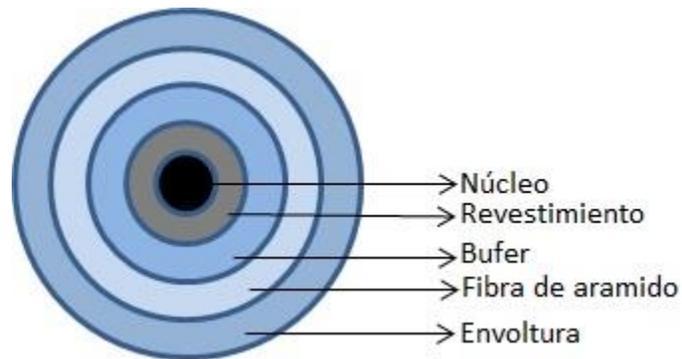
En la Figura 1, se puede observar de una manera más gráfica las pérdidas por absorción que tienen los materiales mostrados en la Tabla 1.



**Fig. 2** Coeficiente de absorción de los polímeros PMMA, PC, FDPE, PTFE, Zeonex y Topas en función de la frecuencia (Argyros, 2013).

### 2.3 Fibras ópticas de polímero microestructurado (mPOF)

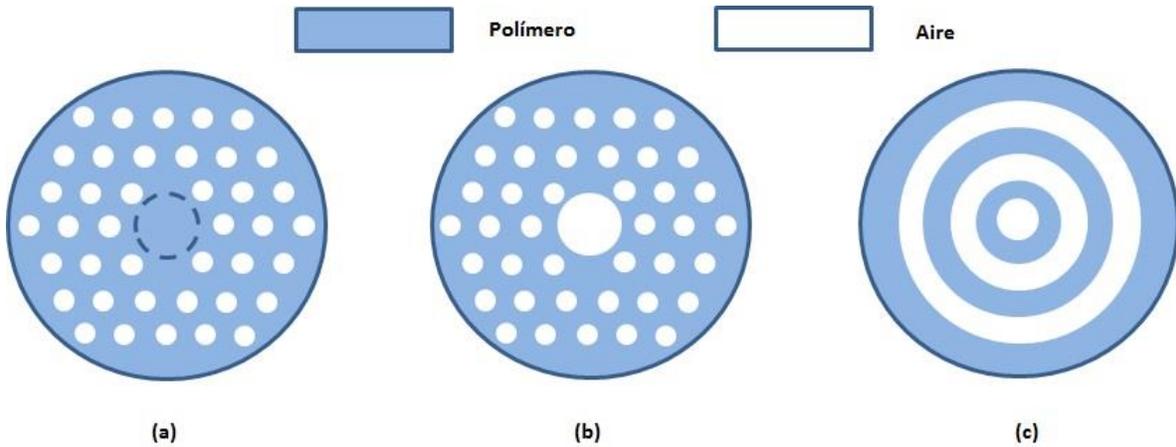
La fibra óptica estándar presenta un excelente rendimiento para el área de las telecomunicaciones, sin embargo, por las propiedades intrínsecas de la sílice y la geometría no es posible el transporte de ondas del orden de THz por medio de ellas.



**Fig. 3** Estructura básica de la fibra óptica convencional.

Desde la aparición de la fibra de cristal fotónico (PCF) en el año de 1996, la cual es una fibra de sílice con un arreglo periódico de agujeros de aire que recorren longitudinalmente toda la fibra alrededor del núcleo, se sigue investigando con el objetivo de poder implementar estas fibra como una guía de onda para altas frecuencias.

Una de esas soluciones son las fibras ópticas de polímero microestructurado (mPOF) fabricada con PMMA y con otros polímeros anteriormente mencionados en la Tabla 1. Donde se han presentado algunos diseños con alteraciones particulares en su estructura geométrica para lograr transportar ondas del orden de los THz. La estructura de los agujeros de aire tanto del revestimiento, como del núcleo puede variar en su forma (circular, elípticos, anillos, etc.) y por ser plásticas son más flexibles en cuando a su diseño y fabricación.



**Fig. 4** Tipos de mPOF (a) Núcleo sólido, (b) Núcleo hueco, (C) Anillos concéntricos (fibra Bragg)

### 2.3.1 Modos de propagación

Un modo es la configuración y distribución del campo electromagnético en un plano perpendicular a la dirección de propagación del rayo. Una fibra puede tener muchos modos y cada modo tiene una velocidad de fase asociado a un índice de modo efectivo ( $n_{eff}$ ), el cual se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$n_{eff} = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  es la *velocidad de fase de la onda que se está propagando a través del medio guiado*. Adicionalmente, conociendo este índice efectivo, es posible determinar la constante de propagación,  $\beta$ , de la onda propagada a través de la ecuación (2).

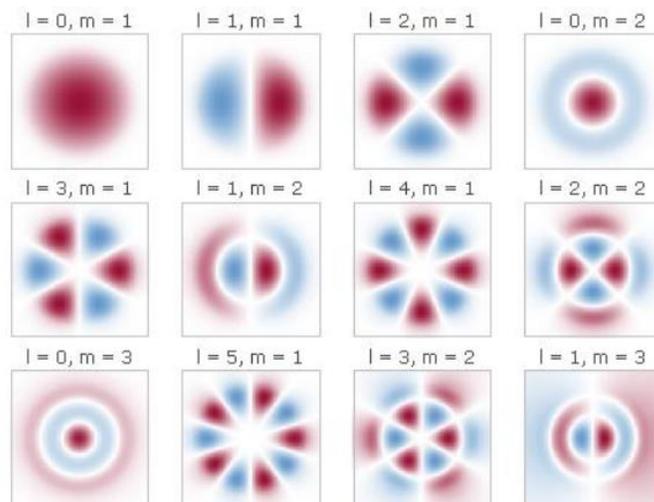
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} = k n_{eff} = \frac{\omega}{c} n_{eff} \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $k$  es el número de onda y  $\omega$  es la frecuencia angular. Aquí es importante recordar, que el índice de modo efectivo es un número complejo en la

mayoría de casos, por lo tanto, tiene una parte real y una imaginaria. La parte real nos indica sobre la propagación de la onda y con la parte imaginaria es posible determinar las pérdidas de amplitud en función de la distancia propagada como se verá más adelante.

En las fibras ópticas se pueden encontrar fibras monomodo en las cuales solo se propaga el modo fundamental ( $LP_{01}$ ), pero también tenemos fibras multimodo en las cuales podemos encontrar un número aún indeterminado de modos excitados y propagados en la guía de onda. Para este último caso es posible tener cientos de modos transversales que se clasifican de la siguiente manera: Modo TE (Transversal Eléctrico), TM (Transversal Magnético), TEM (Transversal Electromagnético) y los Híbridos ( $HE_{mn}$  y  $EH_{mn}$ ). Para las fibras de telecomunicaciones los modos híbridos son degenerados, solo se tiene en cuenta los modos TE y TM lo que conlleva a que se pueda hacer una “fusión” de estos modos y solo quede la notación modo LP (Linealmente Polarizado).

El modo LP tiene dos índices que son  $l$  y  $m$  ( $LP_{lm}$ ) los cuales denotan el número máximo de campo eléctrico en las direcciones azimutal y radial de un modo en particular. En la Figura 4 se ilustra la distribución de energía de dichos modos en las fibras ópticas convencionales que se replican incluso en fibras microestructuradas.



**Fig. 5** Distribución de campo eléctrico para algunos modos LP.

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

Para disminuir complejidad del trabajo y con el propósito de entender primero cómo es el comportamiento de una guía de onda en THz, en este trabajo solo se realizará el análisis de fibras en las cuales se excite el modo fundamental con un diámetro del núcleo ( $D_{\text{núcleo}}$ ) que varía de 100  $\mu\text{m}$  a 600  $\mu\text{m}$  a una frecuencia constante de 1THz.

### 2.3.2 Pérdidas

Las pérdidas son la disminución de potencia de la señal óptica que llega al receptor, en el caso de las fibras ópticas existen varias clases de pérdidas tanto para fibras monomodo o multimodo, algunas de ellas son:

- Pérdida por absorción.
- Pérdida por dispersión.
- Perdidas por confinamiento.
- Pérdidas por acoplamiento, entre otras.

Para el desarrollo de este trabajo, nos centraremos en las pérdidas por absorción y la pérdida de confinamiento

#### 2.3.2.1 Pérdida de absorción del material (EML)

La pérdida por absorción es debida a algunas impurezas que pueda tener el material y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha_{eff} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left( \frac{\int_{Topas} n_{mat} |E|^2 \alpha_{mat} dA}{2 |\int_{Toda} S_z dA|} \right) \quad (3)$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad en el vacío que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por el medio de propagación,  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío la cual se refiere a la capacidad que tiene un material para ser atravesado por un flujo magnético sin alterar su estructura interna.

La integral del denominador efectúa la operación solo para el material sólido utilizado, que en este caso es Topas, en la integral se encuentra  $n_{mat}$  que es el índice de refracción

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

del material usado el cual depende de la frecuencia,  $E$  es campo eléctrico y  $\alpha_{mat}$  es la pérdida de absorción del material. La integral del denominador afecta a toda la fibra como tal, es decir, al material sólido y a los agujeros de aire; Donde  $S_z$  es el componente z del vector de Poynting  $(S_z = \frac{1}{2}(\vec{E} \times \vec{H}) \cdot z)$  con el cual se calcula el flujo de energía en watts por metro cuadrado en la dirección del flujo (Kaijage et al).

### 2.3.2.2 Pérdida de confinamiento

Cuando hablamos de confinamiento, hacemos referencia principalmente a la capacidad que tiene una guía de onda para retener la energía de la onda que viaja a través de la luz confinada en su núcleo, para así lograr mayores distancias de propagación. En las fibras microestructuradas, esta pérdida se relaciona directamente con la geometría del revestimiento y ocurre cuando los agujeros de aire son pequeños en relación a la separación entre ellos mismos (periodicidad finita). Este parámetro nos indica que tan efectiva es una fibra para transportar energía a lo largo del núcleo, esta pérdida se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$L_c = 8.686k_0Im(n_{eff}) \quad (4)$$

Donde  $k_0$  es el número de onda e  $Im(n_{eff})$  es la parte imaginaria del índice efectivo (Islam et al, 2015).

### 2.3.3 Birrefringencia

La birrefringencia solo se da en materiales o medios anisótropos los cuales presentan dos índices de refracción distintos. Esta se define como la diferencia entre los índices modales de las constantes de propagación para las dos polarizaciones posibles del modo fundamental ( $\beta_{01x} \neq \beta_{01y}$ ), o también, como la diferencia entre los índices efectivos. La birrefringencia se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

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

$$B = |n_x - n_y| \quad (5)$$

Donde  $n_x$  es el índice de modo efectivo en la polarización en X y  $n_y$  es el índice de modo efectivo de la polarización en Y (Islam, *et al*, 2015).

Como los índices modales son diferentes, una polarización se retarda con respecto a la otra a lo largo de la propagación de la señal a través de la fibra óptica, por lo tanto se distingue un eje rápido y un eje lento de la propagación de la luz.

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

### 3. METODOLOGÍA

---

Este trabajo se llevó a cabo gracias al grupo de investigación de Automática, Electrónica y Ciencias Computacionales del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) el cual aportó tanto el recurso humano como el computacional para el desarrollo de este.

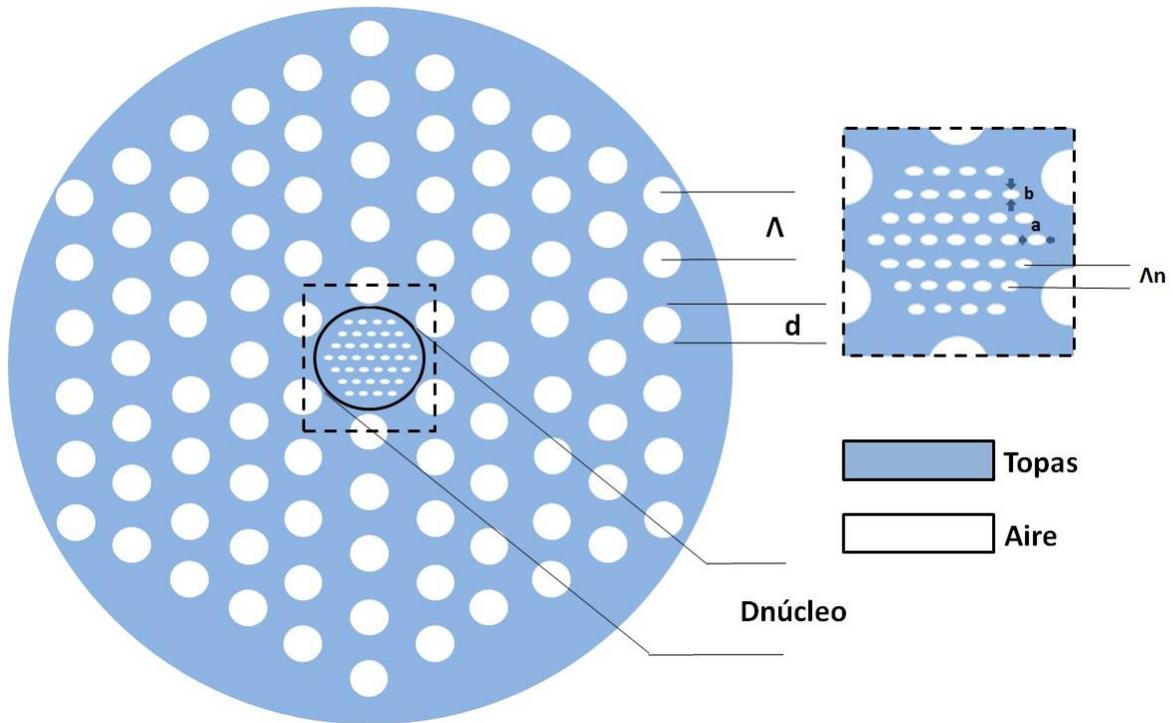
- En el recurso humano se contó con la asesoría del profesor Erick Estefen Reyes Vera y de Juan Esteban Usuga Restrepo estudiante y colaborador de este grupo de investigación el cual fue de gran ayuda para el desarrollo de esta tesis.
- El recurso computacional fue facilitado por el grupo de investigación en el campus fraternidad del ITM, el software utilizado para el desarrollo de este trabajo fue el de elementos finitos COMSOL.

Para la realización de este trabajo se investigó sobre las fibras de cristal fotónico, sus características principales y la forma en que viaja la luz por medio de ella ya que precisamente estas fibras pueden soportar ondas por el orden de los THz con bajas pérdidas. Se tuvo como base el artículo “Low-loss rotated porous core hexagonal single-mode fiber in THz regime” (Islam, Hasanuzzaman, Habib, Rana, & Khan, 2015) al cual se le realizó una modificación en su núcleo, proponiendo en este caso una matriz de agujeros elípticos en el núcleo, y así incrementar la birrefringencia, mientras simultáneamente las pérdidas se hacían bajas en determinadas regiones del espectro electromagnético.

El diseño inicial de esta fibra tiene un arreglo de agujeros de aire en forma hexagonal en el recubrimiento distribuidos de la siguiente manera: El diámetro total de esta fibra es de  $3200\mu\text{m}$ , el diámetro  $d$  de los agujeros de aire es de  $271.42\mu\text{m}$  y la separación entre los agujeros de aire es  $\Lambda$  igual a  $285.71\mu\text{m}$ . El diámetro del núcleo  $D_{\text{núcleo}}$  es de  $300\mu\text{m}$ , los agujeros de aire dentro del núcleo como antes se mencionó son en forma elíptica los

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cuales tienen dos semiejes  $a$  y  $b$  que tienen una medida de  $19.10\mu\text{m}$  y  $12.73\mu\text{m}$  respectivamente y la separación entre ellos es  $\Lambda_n$  que tiene una medida de  $42.43\mu\text{m}$ .



**Fig. 6** Descripción geométrica de la fibra

El material usado para la elaboración de esta fibra es el TOPAS, el cual es un metamaterial de la familia de co-polimeros de olefina cíclica (COC) que por sus características físicas es ideal para el transporte de esta longitud de onda a través de ella, ya que presenta baja absorción en esta región electromagnética.

El material TOPAS es altamente transparente por lo cual es utilizado para la fabricación de lentes, monitores, frascos y dispositivos médicos. Este material tiene un índice de refracción de 1.53, puede transportar longitudes de onda cercanas a  $300\text{nm}$  ( $1\text{PHz}$ ) y una baja absorción de agua  $<0.01\%$  comparado con el PMMA (polimetacrilato de metilo) que registra.  $0.3\%$  (Jena, Chen, Yue, & Lam, 2010).

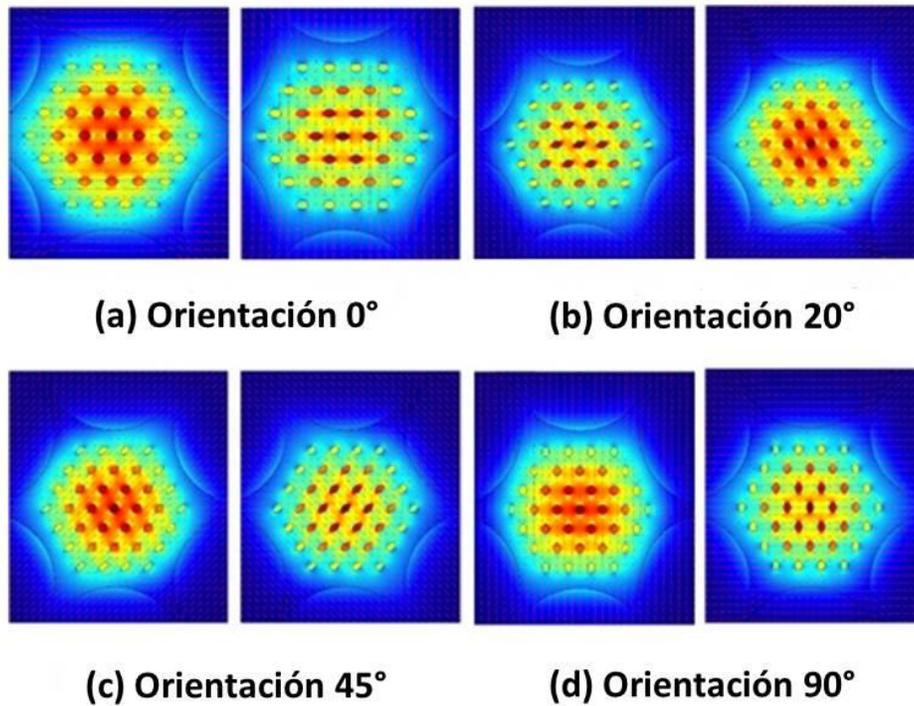
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

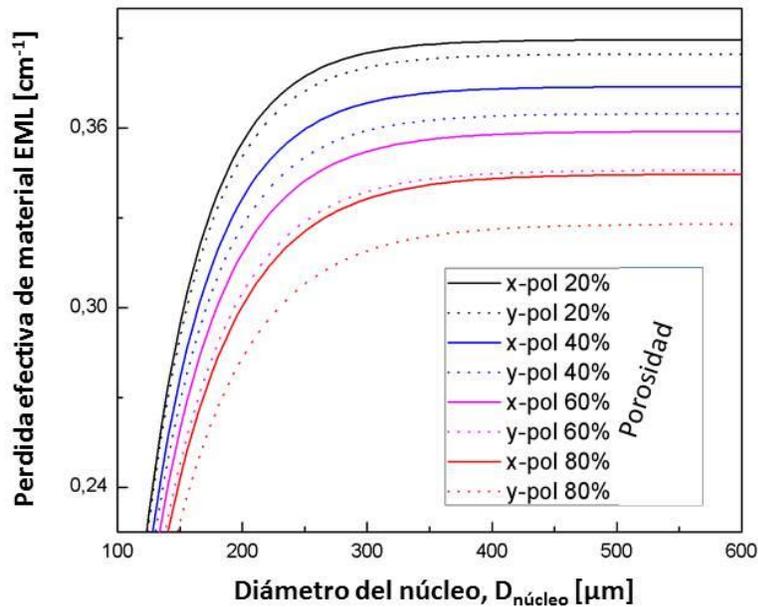
La simulación de esta fibra se hizo a una frecuencia constante de 1THz, para hacer el análisis del comportamiento de la fibra (índice de modo efectivo, birrefringencia, pérdida efectiva de material) se hizo la variación de algunos parámetros como fue el Dnúcleo entre 100 $\mu\text{m}$  – 600 $\mu\text{m}$ , la porosidad que es la cantidad de material sólido en el núcleo entre el 20% - 80% y la orientación de los agujeros elípticos del núcleo entre 0° y 90°.

En la Figura 7, muestra la distribución de campo eléctrico de la fibra de cristal fotónico propuesta en este trabajo cuando el ángulo de los orificios elípticos es variado. Este análisis fue llevado a cabo para un Dnúcleo =400 $\mu\text{m}$  y una frecuencia igual a 1 THz. De este resultado es evidente que la dirección del campo tiende a orientarse con los semi-ejes de las elipses, es decir, a medida que las elipses son rotadas la polarización del campo eléctrico también lo hace. Este resultado sin duda es importante, ya que a través de la manipulación del ángulo de los agujeros elípticos se podrían fabricar guías de onda con polarización definida y por la alta birrefringencia intrínseca de la estructura geométrica esta polarización se mantendría durante toda la propagación. Adicionalmente es evidente de esta figura que el campo a esta frecuencia específica tiene una excelente confinación en el núcleo, generando que la luz viaje mayores distancias entre el punto del transmisor y el receptor.



**Fig. 7** Orientación de las elipses del núcleo de la fibra con polarizaciones en x e y, porosidad del 60% y  $D_{\text{núcleo}}$  de  $400\mu\text{m}$  para los grados (a)0° (b)20° (c)45° (d)90°.

Otro parámetro importante de analizar en este tipo de fibras, son las pérdidas por absorción, este se hace importante debido a que en general se busca disminuir las pérdidas por absorción del material ELM .

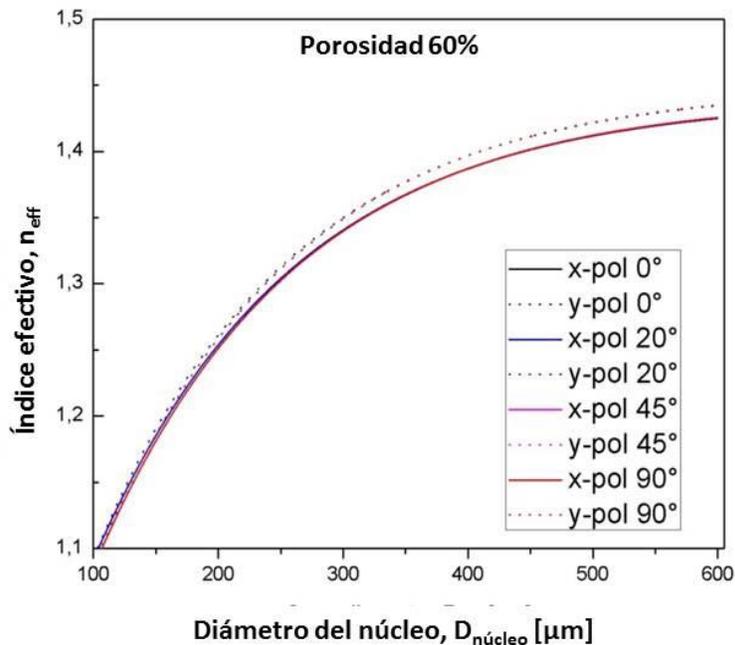


**Fig. 8** Pérdida efectiva de material (EML) para diferentes porosidades en función del  $D_{\text{núcleo}}$ .

Como se puede ver de la Figura 8 a mayor porosidad menor es la pérdida efectiva del material, además de ello se puede observar que en el  $D_{\text{núcleo}} = 500 \mu\text{m}$  esta pérdida es en promedio  $0.35 \text{ cm}^{-1}$  para una porosidad de 60% y si se compara con trabajos realizados anteriormente donde se reporta la EML para esta misma medida que es en promedio  $0.50 \text{ cm}^{-1}$  (Kaijage, Zhengbiao, & Xin, 2013), lo cual evidencia una disminución significativa de este tipo de pérdidas como consecuencia de la implementación de nuestro diseño. Por otro lado, es evidente que a mayor porosidad, menor son las pérdidas debido al material, es decir, que a través de la inserción de huecos es posible disminuir la absorción de radiación por parte de este tipo de materiales poliméricos y por ende incrementar las distancias de transmisión.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

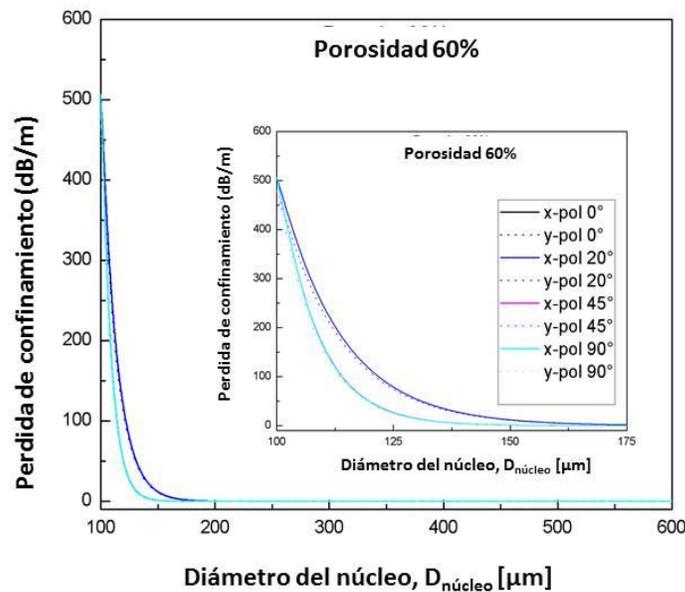
A continuación se presenta un análisis del comportamiento del índice efectivo en función del diámetro del núcleo de nuestra fibra de cristal fotónico, cuando se varía la orientación de los agujeros elípticos de nuestro núcleo. Claramente, se puede observar de la Figura 9 que al tener los agujeros elípticos a 0°, 20, 45 y 90 no genera un cambio significativo en las curvas de índice efectivo, incluso cuando se evaluaron las diferentes polarizaciones.



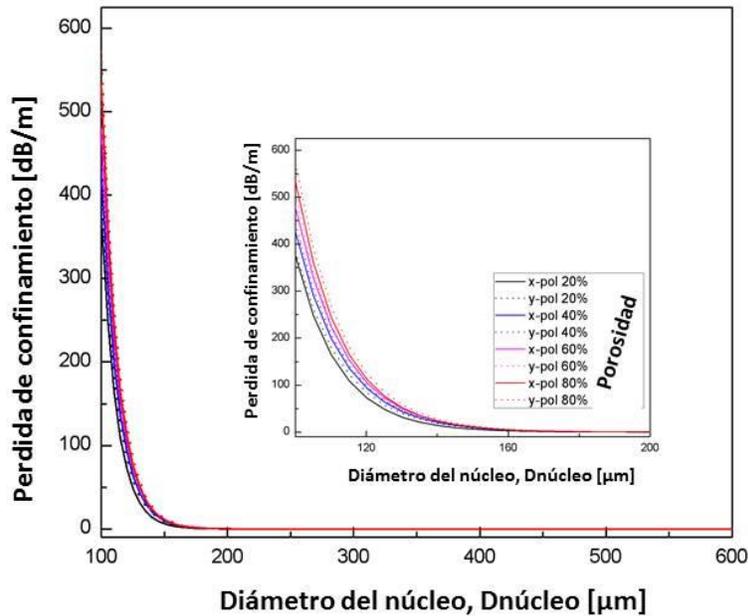
**Fig. 9** Índice de modo efectivo para una porosidad de 60% en función del  $D_{\text{núcleo}}$ .

Por otro lado, las figuras 10 (a) y (b) muestran la pérdida de confinamiento que se puede obtener mediante la ecuación 4 a porosidad constante y variable respectivamente, donde en la figura 10 (b) se puede apreciar que a valores de  $D_{\text{núcleo}}$  mayores se reduce significativamente las pérdidas. Esto se debe al hecho de que al incrementar el  $D_{\text{núcleo}}$  se incrementa la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento,

dando como resultado un confinamiento de la luz en el interior del núcleo lo que reduce dichas pérdidas. Acá podemos ver que se evaluó el comportamiento de las pérdidas por confinamiento al generar cambios en orientaciones los agujeros elípticos y porosidad. Dando como resultado que las pérdidas por confinamiento son insignificantes en general cuando tenemos diámetros de núcleo superiores a 250  $\mu\text{m}$ .



(a)

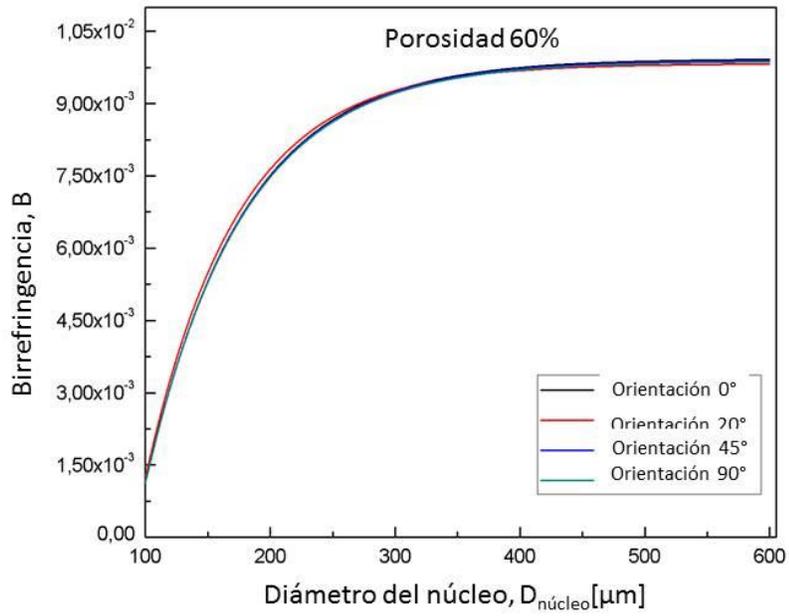


(b)

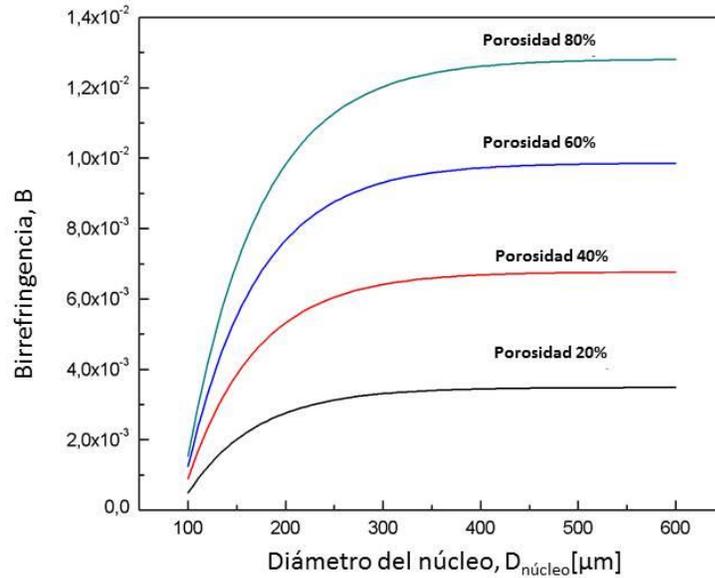
**Fig. 10** Pérdida de confinamiento (a) Con porosidad al 60% con variación de Dnúcleo (b) Con variación de porosidad y Dnúcleo

Por último se hizo un análisis de la birrefringencia y cómo esta puede ser afectada por los diferentes parámetros geométricos de la estructura.

En la Figura 11 se puede apreciar la birrefringencia para una porosidad de 60%, variando tanto el Dnúcleo como la orientación de las elipses. Se puede ver que la mayor birrefringencia la podemos encontrar con la orientación de las elipses a 0°. Sin embargo, tal como se ha encontrado en resultados anteriores, se puede concluir que en este caso específico la orientación de los agujeros elípticos que conforman el núcleo de la fibra no tiene un alto impacto sobre la respuesta óptica. Esta orientación solo afecta en gran medida la orientación del campo eléctrico.



**Fig. 11** Birrefringencia a una porosidad de 60% para las diferentes orientaciones de las elipses.

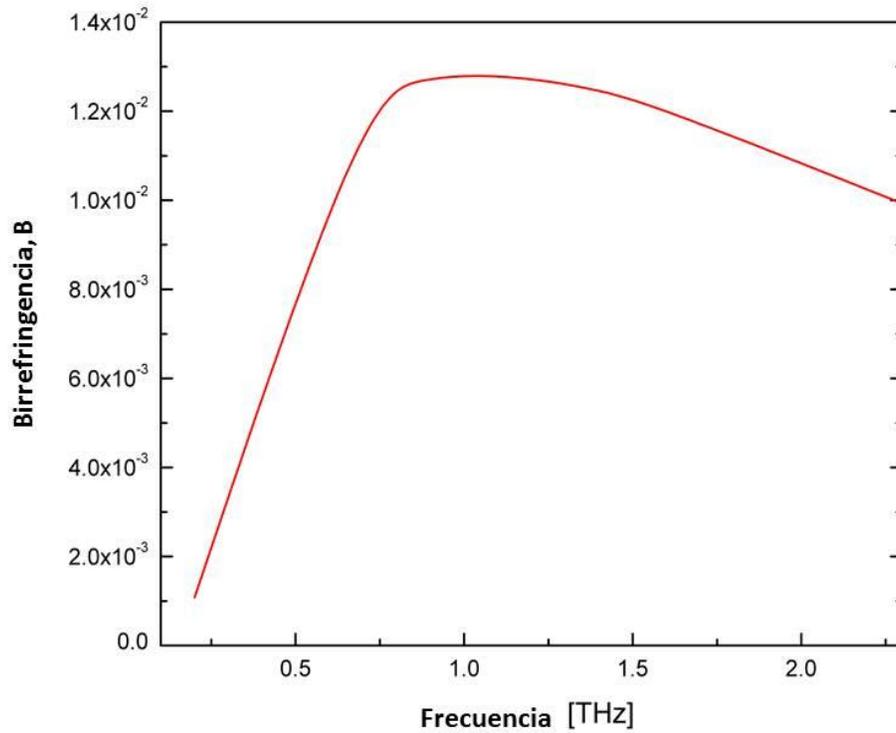


**Fig. 12** Birrefringencia en función del  $D_{\text{núcleo}}$  para diferentes porosidades para una orientación de  $0^\circ$ .

La Figura 12, por su parte nos muestra los resultados de analizar cómo la porosidad puede afectar la birrefringencia intrínseca de nuestra fibra. Como es posible ver de ella, tenemos que al incrementar la porosidad de nuestra estructura la birrefringencia se incrementa. Sin embargo, para el caso de valores de diámetro del núcleo superiores a  $250 \mu\text{m}$  podemos ver que los cambios en este parámetro son muy pequeños. Este resultado es coherente debido a que a mayor porosidad mayor será la anisotropía geométrica de la estructura del núcleo y por ende, mayor será la diferencia entre los dos caminos ópticos. Esto sin duda se traduce en mayores birrefringencias, como se pudo evidenciar del cálculo.

En miras de conocer el comportamiento de nuestra fibra en un rango de frecuencias, se realizó el análisis de birrefringencia para un rango de frecuencias que va desde  $0.2 \text{ THz}$  hasta  $2.6 \text{ THz}$ . Este resultado es importante pues hemos obtenido una fibra con alta

birrefringencia, cuyo comportamiento es plano en determinada región (0.75 THz hasta 1.3 THz aproximadamente).



**Fig. 13.** Birrefringencia en función de la frecuencia de operación de nuestra guía de onda basada en fibra de cristal fotónico en material TOPAS.

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

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

Las guías de onda para ondas en la región de los terahertz siguen avanzando en investigación y desarrollo en el transcurrir del tiempo. Investigadores como Marcos Franco, Raonaqul Islam, Alice Cruz, Selim Habib, entre otros, que trabajan en el área de la fotónica y especialmente las PCF, han demostrado que estas fibras son aptas para transporte de estas altas frecuencias.

Para el desarrollo de esta tesis se diseñó una fibra que en su núcleo tiene agujeros de aire en forma elíptica, a una frecuencia constante de 1THz y teniendo como material para la simulación el copolimero de olefina cíclica TOPAS el cual es un buen material debido a su índice de refracción 1.52 y baja absorción de agua.

Al realizar la simulación se cambian los parámetros de la fibra como la rotación de la elipses, la porosidad, el tamaño del núcleo para encontrar la mejor configuración de la fibra, es decir, la forma en que esta es más efectiva y se pudo establecer que: En cuanto a la pérdida efectiva de material, a una porosidad de 80% y con polarización del campo magnético en  $y$  se puede obtener una pérdida de  $\sim 0.32 \text{ cm}^{-1}$ . La pérdida por confinamiento se evaluó a una porosidad de 60% dando como resultado baja pérdida de  $\sim 4,16 \times 10^{-13} \text{ dB/m}$ .

Esta fibra cuenta con una alta birrefringencia de 1.28 aproximadamente, haciendo de ella un medio guiado efectivo, con bajas pérdidas para el transporte de onda de THz.

Para el desarrollo de esta tecnología y de trabajos posteriores es bueno contar con generadores y detectores de ondas de terahertz, así también del medio para hacer una impresión de estas fibras para que al realizar estos tipos de trabajos se pueda pasar de teóricos a teórico-prácticos.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

---

- Argyros, A. (2013). Microstructures in polimer fibres for optical fibres, THz waveguides, and fibre-based metamaterial. *Hindawi*.
- Bao, H., Nielsen, K., Rasmussen, H. K., & Jepsen, P. U. (31 de December de 2012). Fabrication and characterization of porous-core honeycomb bandgap THz fibers. *Optics Express*, 20(28).
- Cruz, A. L., Argyros, A., Tang, X., Cordeiro, C. M., & Franco, M. A. (2015). 3D-Printed terahertz Bragg fiber. *40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. Hong Kong.
- Cruz, A. L., Serrao, V. A., Barbosa, C. L., & Franco, M. A. (July de 2015). 3D printed hollow core fiber with negative curvature for terahertz applications. *Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 14.
- Habib, M. S., Bang, O., & Bache, M. (April de 2016). Low-loss single-mode hollow-core fiber with anisotropic anti-resonant elements. *Optics Express*, 24(8).
- Hasanuzzaman, G., Habib, M. S., Razzak, S. A., Hossain, M. A., & Namihira, Y. (2015). Low loss single mode porous-core kagome photonic crystal fiber for THz wave guidance. *Lightwave Technology*.
- Hassani, A., Dupuis, A., & Skorobogatiy, M. (28 de April de 2008). Porous polymer fibers for low-loss Terahertz guiding. *Optics Express*, 16(9).
- Islam, R., Habib, M. S., Hasanuzzaman, G. K., Ahmad, R., Rana, S., & Kaijage, S. F. (2015). Extremely High-Birefringent Asymmetric Slotted-Core Photonic Crystal Fiber in THz Regime. *IEEE Photonics Technology Letters*.
- Islam, R., Hasanuzzaman, G. K., Habib, M. S., Rana, S., & Khan, M. A. (May de 2015). Low-loss rotated porous core hexagonal single-mode fiber in THz regime. *Optical Fiber Technology*, 24.
- Jena, R., Chen, X., Yue, C., & Lam, Y. (2010). Viscosity of COC polymer (TOPAS) near the glass transition temperature: Experimental and modeling. *Polymer Testing*, 29, 933 - 938.
- Kaijage, S. F., Zhengbiao, O., & Xin, J. (August de 2013). Porous-Core Photonic Crystal Fiber for Low Loss Terahertz Wave Guiding. *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(15).
- Lee, Y.-S. (2009). *Principles of terahertz science and technology*. New York: Springer.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Nielsen, K., Rasmussen, H. K., Adam, A. J., Planken, P. C., & Jepsen, P. U. (11 de May de 2009). Bendable, low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range. *Optics Express*, 17(10).

Stefani, A., Nielsen, K., Rasmussen, H. K., & Bang, O. (2012). Cleaving of TOPAS and PMMA microstructured polymer optical fibers: Core-shift and statistical quality optimization. *Optics Communications*, 1825-1833.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES           Johana Zúñiga B          

FIRMA ASESOR           Erick Rojas Vera          

FECHA ENTREGA: 13/10/2016

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: \_\_\_\_\_