

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

ACOPLADOR DIRECCIONAL BASADO EN FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO DOBLE NÚCLEO PARA LA REGIÓN DE LOS TERAHERTZ

Juan Pablo Montoya Montoya

Ingeniería de Telecomunicaciones

M.Sc. Erick Estefen Reyes Vera

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

22/11/2016

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

RESUMEN

Por medio de este trabajo se busca mostrar el diseño y generar el análisis de un acoplador direccional que opera en la banda de los Tera-Hertz (THz) basado en una fibra de doble núcleo, en los cuales se emplean elementos porosos con geometrías elípticas con el fin de disminuir las pérdidas debidas a la absorción natural del polímero.

La metodología empleada es basada en la implementación del método de elementos finitos vectorial, a través del cual se realiza una caracterización completa de parámetros ópticos como las pérdidas por absorción, longitud de batido entre otros factores. Buscando de esta manera generar una estructura altamente eficiente que permita acoplar radiación electromagnética en diversas direcciones.

Palabras clave: THz, fibra de doble núcleo, acoplador direccional, pérdidas por inserción, geometrías elípticas.

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

RECONOCIMIENTOS

Dedico este trabajo a mis padres, a mi hermano, de quienes jamás faltó el apoyo moral, económico, afectivo para lograr con este proyecto de vida ser todo un orgullo para ellos.

Agradezco a Dios por todas las bendiciones recibidas, cuya luz me iluminó para culminar con éxito este arduo trabajo, por darme fuerzas cuando más las necesité y por la valiosa oportunidad de ser profesional e ingeniero.

Agradezco también al profesor Erick Estefen Reyes Vera por el constante acompañamiento y dirección durante el desarrollo de este proyecto. Al estudiante y compañero del ITM Juan Esteban Úsuga, por sus valiosos aportes a lo largo de esta construcción.

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

ACRÓNIMOS

THz Tera Hertz, equivalente 1THz = 10e12 Hz

SPLITER Dispositivo de conexión empleado para separar la señal en dos vías

N_{eff} Modo de propagación par

N_{off} Modo de propagación impar

PCF Circular photonic crystal

EML Pérdida efectiva del material

PCF Fibra de cristal fotónico.

Rdc Radio utilizado para el radio de las elipses

D_{core} Diámetro del núcleo

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

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Objetivo General.....	9
1.2 Objetivos específicos	9
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Tipos de fibras y cables ópticos	10
2.2 Pérdidas en la fibra óptica	11
2.2.1 Atenuación.	112
2.2.2 Dispersión.....	12
2.2.3 Dispersión cromática.....	12
2.2.4 Dispersión por modo de polarización.	12
2.2.5 Perdidas por absorción	12
2.2.6 Perdidas por confinamiento	13
2.3 Análisis empleando supermodos	133
2.4 Birrefringencia.	14
3. METODOLOGÍA.....	15
3.1 Diseño de fibra de THZ empleando métodos de elementos finitos en la aplicación <i>COMSOL MULTIPHYSICS</i> ®	15
3.2 Inicio de <i>COMSOL MULTIPHYSICS</i> ®	16
3.3 Diseño de la fibra con agujeros de aire y nucleo con elipses	17
3.3.1 Diseño del círculo exterior	17
3.3.2 Diseño de agujeros de aire.....	17
3.3.3 Diseño de elipses en el núcleo	18
3.3.4 Crear los materiales para la fibra	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	28
REFERENCIAS	29

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros obtenidos de la aplicación COMSOL MULTIPHYSIS®	15
Tabla 2. Resultados obtenidos	24

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Propagación fibra monomodo índice escalonado.....	10
Figura 2. Propagación fibra multimodo índice escalonado.....	10
Figura 3. Propagación fibra multimodo índice gradual.....	11
Figura 4. Supermodos a) Par y b) Impar.....	14
Figura 5. Diseño de las distancias obtenidas de la aplicación COMSOL MULTIPHYSIS®	16
Figura 6. Diseño de la fibra.....	222
Figura 7. Longitud de Batido a 1 THz.....	23
Figura 8 Pérdida efectiva por absorción en función del diámetro del núcleo a 1 THz.....	24
Figura 9. Pérdida por confinamiento en función del Dcore con frecuencia=1THz y 60% de porosidad.	25
Figura 10. Longitud de Batido expresada en colores para el diámetro de D_{core}	26
Figura 11. Longitud de Batido variando la frecuencia y el tamaño de las elipses.....	27
Figura 12. Esquema de longitud de batido.....	27

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

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los sistemas que trabajan en las frecuencias que van desde 0.1 THz hasta 10 THz han atraído mucho la atención, puesto que se tienen muchas aplicaciones como lo son la espectroscopia, análisis de imágenes, biosensores, entre otros (Selim G. , y otros, 2015). Sin embargo, las propagaciones de estas ondas se realizan en el espacio libre, lo cual genera altas pérdidas y efectos dispersivos en la señal enviada a través de estos dispositivos. Esto obliga a diseñar y fabricar guías de onda que confinen la radiación en esta región del espectro que a su vez permitan alcanzar mayores distancias y simultáneamente ayuden a mejorar la relación señal ruido del actual sistema de comunicaciones en THz.

Adicionalmente, surge la necesidad, de fabricar elementos pasivos con fibras microestructuradas, las cuales permitan diseñar acopladores direccionales con bajas pérdidas, utilizando en sus núcleos polímeros como lo son PLA y TOPAS con índice de refracción $n=1.53$ (Selim, y otros, 2015). En este caso es necesario que el diseño pueda reducir las pérdidas. Con la utilización de estas fibras con poros de doble núcleo, lo que se quiere lograr es que la refracción interna sea total para obtener su propósito inicial (Zhu, F., y otros, 2013).

Por lo anterior, en este trabajo se presenta el diseño de un acoplador direccional basado en fibras de cristal fotónico doble núcleo, con núcleos porosos modificados con elipses de aire y en su entorno, agujeros cilíndricos para trabajar en el rango de frecuencias comprendidas entre 0.8 THz hasta 2 THz. A partir de los resultados obtenidos se concluye que se presentarán bajas pérdidas, gracias a la mayor concentración de potencia en los núcleos, donde se utilizarán las elipses de aire como guías de onda, en este caso los diseños pueden ser usados como acopladores direccionales, y se analizará por medio del

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

método de elementos finitos vectoriales, para así comprender cómo se efectúa la propagación en el acoplador, pudiendo inferir cuáles son sus pérdidas, cómo se comporta ante variación de frecuencia y el diámetro de sus núcleos; no obstante estos resultados son importantes a la hora de elegir y construir el acoplador.

1.1 Objetivo General

Diseñar y analizar un acoplador direccional basado en fibra micro estructurado de doble núcleo, que opere en la región de los Tera Hertz (THz).

1.2 Objetivos específicos

- Analizar parámetros ópticos tales como pérdidas por inserción, longitud de acoplamiento, pérdidas por absorción entre otros, con el fin de evaluar el desempeño del acoplador direccional diseñado.
- Determinar la mejor configuración basada en un análisis paramétrico a partir de las pruebas realizadas al acoplador.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Tipos de fibras y cables ópticos

La fibra óptica consiste en una barra cilíndrica delgada y larga rodeada por el revestimiento, la región central es conocida como el núcleo. Existen principalmente tres tipos de fibras ópticas:

- a. Monomodo de índice escalonado (Ver **Figura 1**).

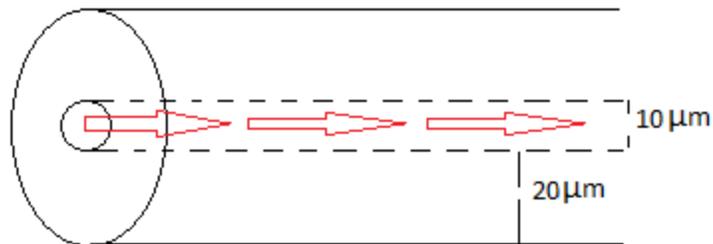


Figura 1. Propagación fibra monomodo índice escalonado

- b. Multimodo de índice escalonado (Ver **Figura 2**).

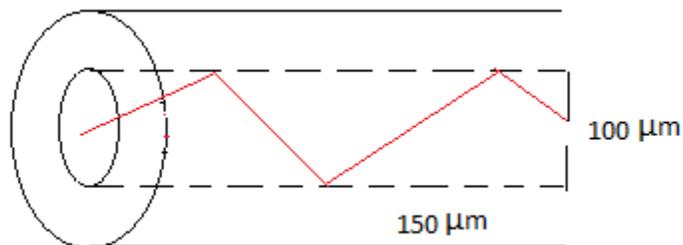


Figura 2. Propagación fibra multimodo índice escalonado.

c. Multimodo de índice gradual (Ver **Figura 3**).

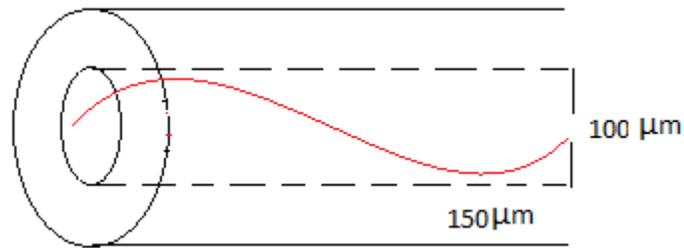


Figura 3. Propagación fibra multimodo índice gradual.

Los anteriores tipos de fibras ópticas, son fundamentales de acuerdo a su función específica y sus diferentes componentes, permitiendo así comparar grosores, índices de refracción del núcleo, revestimientos, trayectorias de los rayos de luz en núcleo monomodo de índice escalonado, multimodo escalonado y multimodo de índice gradual.

Cuando se habla de la fibra monomodo o de índice escalonado, se tiene una fibra con un núcleo muy angosto, donde su índice de refracción es uniforme, lo que permite que la luz en la fibra llegue más rápido a su destino, pero con la limitante de que no se pueden enviar varios haz de luz. La fibra multimodo o de índice escalonado que tiene un núcleo más ancho, con índice de refracción constante, se pueden enviar varios haz de luz, pero es más lenta la transmisión que en la fibra monomodo ya que requiere de muchas más refracciones que las que resultan en la fibra monomodo. La fibra multimodo con índice gradual también con el núcleo ancho, varía gradualmente su índice de refracción hasta el máximo que es en el centro del núcleo (Neri, 1999).

2.2 Pérdidas en la fibra óptica

2.2.1 Atenuación. Es la relación que se tiene entre la cantidad de la luz que entra y a su vez la pérdida que se da por la misma salida, esto se puede inferir debido a que está ligado con la absorción del material y su dispersión o acoplamiento de la luz de la fibra.

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

2.2.2 Dispersión. Éste se ocasiona por el cambio del índice de refracción del material produciendo una alteración en el haz, la luz y su velocidad generando una expansión temporal del pulso, debido a la velocidad en la cual el modo es diferente según su longitud de onda de operación.

2.2.3 Dispersión cromática. Es provocada según el índice de refracción de la sílice con la longitud de onda, además por su particularidad geométrica y la difusión de la luz en su fibra, por lo tanto cada longitud de onda se desplaza a una velocidad diferente.

2.2.4 Dispersión por modo de polarización. Es generado por una mínima desigualdad en el índice de refracción, es una pareja particular del estado de polarización ortogonal, por lo tanto cuando se produce una dispersión en el índice efectivo, es por motivo del viaje tanto en el modo x como en el y.

2.2.5 Perdidas por absorción: También llamada perdida de absorción efectiva, son causadas por las impurezas en el material, está dada por la siguiente formula:

$$\alpha_{eff} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\int_{mat} n_{mat} |E|^2 \alpha_{mat} dA}{\int_{all} S_z dA} \right) \quad (1)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad y μ_0 ambas en el vacío, n_{mat} es el índice de refracción, E es el campo eléctrico, α_{mat} es la pérdida en el material y S_z es la componente en que se propaga. (Islam, y otros, 2015)

2.2.6 Perdida por confinamiento: Estas son las pérdidas que hay en el núcleo ante la imposibilidad de mantener confinada la energía de la onda en el núcleo, está dada por la fórmula:

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

$$\alpha_{CL} = 8.686 K_0 \text{Im}(N_{eff}) \quad (2)$$

Donde la constante $K_0 = 2\pi/\lambda$ y la parte imaginaria $\text{Im}(N_{eff})$ que es la parte imaginaria del índice de refracción.

2.3 Análisis empleando supermodos

En una guía de onda, las constantes con que se acoplan dos núcleos dependen equivalentemente de la distancia entre los núcleos, esto indica que entre más lejanos estén dichos núcleos es cada vez más difícil que haya una transferencia de potencia entre ellos. Sin embargo, existe un efecto que puede hacer posible que se transmita la potencia de un núcleo a otro sin importar la distancia, y este es el Tunelamiento Resonante (Shockley, 1949).

Para poder determinar la longitud de batido en este tipo de fibras, se determina en la simulación aquella longitud que ocurre en los acoplamientos y así obtener las medidas ópticas en esta condición, por lo tanto se encuentran los modos par e impar en el eje x. Se contó con la ayuda de la aplicación *COMSOL Multiphysics*®, el cual permite modelar elementos finitos con el objetivo de verificar y confirmar que no existen para este diseño modos en el eje y, finalmente, se calcularon los valores para la longitud de Batido en el eje x por medio de la **Ecuación (3)**.

$$Lb = \frac{\lambda}{2(N_{eff} - N_{off})} \quad (3)$$

N_{eff} Es el índice efectivo del supermodo par y N_{off} es el índice efectivo del supermodo impar, los cuales se distinguen por que la forma de la distribución de energía en sus núcleos, tal como se ilustra en la **Figura 4**.

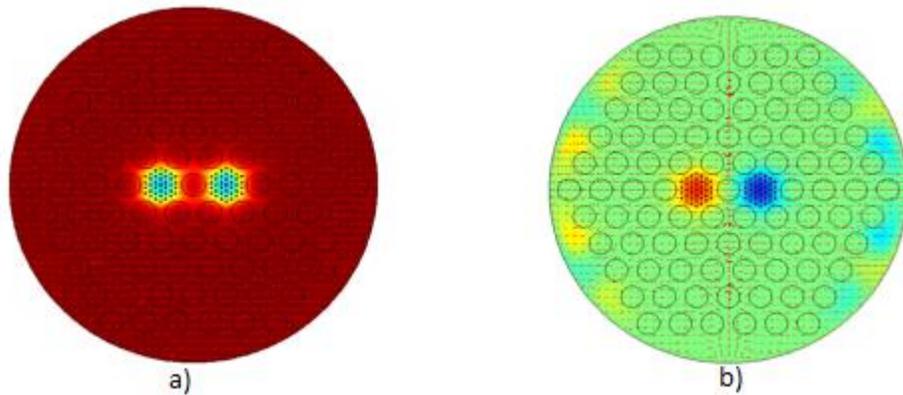


Figura 4. Supermodos a) Par y b) Impar.

2.4 Birrefringencia.

Es una propiedad óptica de ciertos elementos, esta consiste en un fenómeno que ocurre cuando un cristal es iluminado con un rayo incidente y éste se desdobra en dos, cuyas direcciones son paralelas pero con diferentes velocidades. La birrefringencia se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$B = |n_x - n_y| \quad (4)$$

En donde n_x es el índice en el modo efectivo en X y n_y es el índice en el modo efectivo en Y (Islam, y otros, 2015).

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño de fibra de THZ empleando métodos de elementos finitos en la aplicación *COMSOL MULTIPHYSICS*®

Para la construcción del diseño de la fibra, se utilizaron parámetros pensados de forma estratégica para poder realizar diversos análisis. Se inició cambiando la longitud del radio en estudio para obtener mayor variación de forma automática y llevar el análisis a diferentes diámetros del núcleo, donde la variable D_{core} tiene la necesidad de estar redefiniendo toda la estructura, para lo cual se utilizarán los parámetros expuestos en la

Tabla 1.

» Name	Expression	Value
Dcore	600[um]	6E-4 m
Pitch	Dcore/1.25	4.8E-4 m
d	Pitch*0.7	3.36E-4 m
rDcore	Dcore/2	3E-4 m
rd	d/2	1.68E-4 m
cPitch	Dcore/7.07	8.4866E-5 m
dc	(Dcore*sqrt(por))/sqrt(37)	7.6406E-5 m
rdc	dc/2	3.8203E-5 m
por	0.6	0.6
c1	5.6*Pitch	0.002688 m
a	(rdc/2)*f	1.9101E-5 m
b	(rdc/3)*f	1.2734E-5 m
f	1	1

Tabla 1. Parámetros obtenidos de la aplicación *COMSOL MULTIPHYSICS*®

Para el diseño de las elipses, se usará una porosidad del 60% o dicho de otra forma por = 0.6, esto por medio de la **Ecuación (2)**, buscando toda la fibra que se encuentra

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

parametrizada, además todos los valores dependen de la longitud del diámetro de D_{core} que se elija, haciendo más sencillo el cambio de diámetro para así desarrollar el análisis a diferentes tamaños del núcleo (Ver **Figura 4**).

$$dc = \frac{D_{core} \times \sqrt{por}}{\sqrt{37}} \quad (4)$$

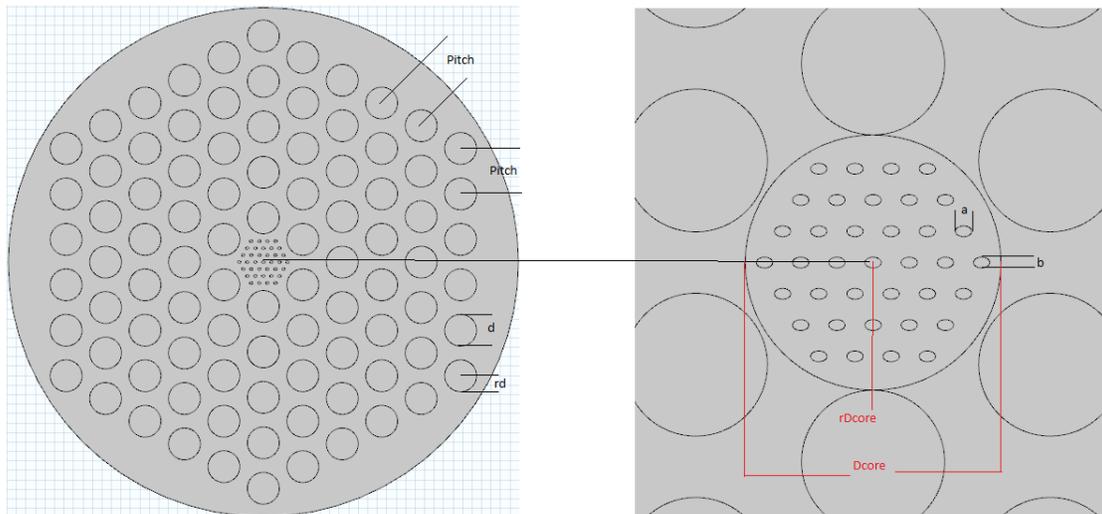


Figura 5. Diseño de las distancias obtenidas de la aplicación **COMSOL MULTIPHYSIS**®

3.2 Inicio de COMSOL MULTIPHYSIS®

1. Abrir el aplicativo
2. Dar click en la ventana **Model Wizard** y seleccionar **2D**.
3. Buscar la opción **Radio Frecuency**, abrir la pestaña y escoger **Electromagnetic Waves, Frecuency Domain (emw)**.
4. Dar **Add** y click en **Study**.
5. En el cuadro **Select Study**, en la pestaña **Preset Studies**, escoger **Mode Analysis**.
6. Click en **Done**

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

3.3 Diseño de la fibra con agujeros de aire y nucleo con elipses

3.3.1 Diseño del círculo exterior

1. En **Geometry** dar click y en **length unit** escor μm que es la escala.
2. En **Geometry** dar click derecho y le dar click a **Circle**.
3. En **Settings**, buscar **Radius** y aplicar el valor de c1 y seleccionar **Build Selected** para construir el primer círculo.

3.3.2 Diseño de agujeros de aire

1. En **Geometry** dar click derecho y dar click a **Circle**.
2. En **Radius** seleccionar el valor de rd y en **position** en x: 0, y: $rD_{core} + rd$.
3. Crear otro círculo
4. En **Radius** seleccionar el valor de rd y en **position** en x: $(\sqrt{3}) * Pitch / 2$, y: $Pitch / 2$
5. Se crea otro **Circle**.
6. En **Radius** seleccionar el valor de rd y en **position** en x: $(\sqrt{3}) * Pitch / 2$, y: $Pitch / 2$
7. Ahora se crea un arreglo, para esto dar click derecho en **Geometry** buscar **Transforms** y luego click en **Array**.
8. Seleccionar el **Circle 2** en size (x size: 1, y size: 5) y en **Displacement** x: 0, y: $Pitch$, y click en **Build All** para construir lo que se lleva del proceso.
9. Crear otro **Array**, ver paso (7).
10. Escoger el **Circle 4**, en size (x size: 2, y size: 1) y en **Displacement** x: $(\sqrt{3}) * Pitch$, y: 0, y **Build All**.
11. Crear otro **Array**.
12. Seleccionar el **Circle 3** en size (x size: 1, y size: 5) y en **Displacement** x: 0, y: $Pitch$, y click en **Build All**.
13. Crear otro **Array**.
14. Seleccionar el **Circle 4** en size (x size: 1, y size: 5) y en **Displacement** x: 0, y: $Pitch$, y click en **Build All**.

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

15. Crear otro **Array**.
16. Seleccionar el círculo que salió del segundo arreglo **Arr2 (2,1)** en size (x size: 1, y size: 4) y en **Displacement** x: 0, y: Pitch, y click en **Build All**.
17. Crear otro **Array**.
18. Escoger el **Circle 3**, en size (x size: 3, y size: 1) y en **Displacement** x: (sqrt (3)) *Pitch, y: 0, y **Build All**.
19. Crear otro **Array**.
20. Seleccionar el círculo que salió del segundo arreglo **Arr6 (2,1)** en size (x size: 1, y size: 4) y en **Displacement** x: 0, y: Pitch, y click en **Build All**.
21. Crear otro **Array**.
22. Seleccionar el círculo que salió del segundo arreglo **Arr6 (3,1)** en size (x size: 1, y size: 3) y en **Displacement** x: 0, y: Pitch, y click en **Build All**.
23. Crear un espejo, dar click derecho en **Geometry** buscar **Transforms** y luego click en **Mirror**.
24. Escoger los círculos que se van a replicar al otro lado, es importante seleccionar el cuadro de **Keep input objects en inputs** para que los primeros círculos queden al reflejarlos. Y en **Normal Vector to Line of Reflection** en x: -1, y: 0. **Build All**.
25. Escoger los círculos que se van a replicar al otro lado, es importante seleccionar el cuadro de **Keep input objects en inputs** para que los primeros círculos queden al reflejarlos. Y en **Normal Vector to Line of Reflection** en x: 0, y: -1. **Build All**.

3.3.3 Diseño de elipses en el núcleo

1. Crear una elipse y dar click derecho en **Geometry** buscamos **Ellipse**.
2. En **size and Shape** a-semiaxis: a, en b-semiaxis: b. En **Position** x: 0, y: 0.
3. Crear otra elipse.
4. En **size and Shape** a-semiaxis: a, en b-semiaxis: b. En **Position** x: 0, y: sqrt (3) *cPitch.
5. Se crea otra elipse.
6. En **size and Shape** a-semiaxis: a, en b-semiaxis: b. En **Position** x: cPitch, y: 0.

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

7. Crear otra elipse
8. En **size and Shape** a-semiaxis: a, en b-semiaxis: b. En **Position** x: cPitch/2, y: (sqrt (3) *cPitch)/2, y click en **Build All**.
9. Ahora se crea un arreglo, dar click derecho en **Geometry** buscar **Transforms** y luego click en **Array**.
10. Seleccionar la elipse 3 en size (x size: 3, y size: 1) y en **Displacement** x: cPitch, y: 0, y click en **Build All**
11. Crear otro **Array**
12. Seleccionar la elipse 4 en size (x size: 3, y size: 1) y en **Displacement** x: cPitch, y: 0, y click en **Build All**
13. Crear otro **Array**
14. Seleccionar la elipse 2 en size (x size: 3, y size: 1) y en **Displacement** x: cPitch, y: 0, y click en **Build All**
15. Crear otro **Array**
16. Seleccionar la elipse 4 o arr10(1.1) en size (x size: 1, y size: 2) y en **Displacement** x:0 cPitch, y: sqrt (3) *cPitch, y click en **Build All**
17. Crear otro **Array**
18. Seleccionar la elipse 4 o arr10(2.1) en size (x size: 1, y size: 2) y en **Displacement** x:0 cPitch, y: sqrt (3) *cPitch, y click en **Build All**
19. Crear un espejo, dar click derecho en **Geometry** buscar **Transforms** y luego click en **Mirror**.
20. Escoger los Elipses que se van a replicar al otro lado, es importante seleccionar el cuadro de **Keep input objects en inputs** para que los primeros círculos queden al reflejarlos. Y en **Normal Vector to Line of Reflection** en x: -1, y: 0. **Build All**.
21. Escoger los círculos que se van a replicar al otro lado, es importante seleccionar el cuadro de **Keep input objects en inputs** para que los primeros círculos queden al reflejarlos. Y en **Normal Vector to Line of Reflection** en x: 0, y: -1. **Build All**.
22. Rotar 90° todo, click derecho en **Geometry**, buscar **Transforms** y dar click en **Rotate**.

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

23. Escogemos todos los agujeros dentro de la fibra y en **Rotate angle** en Rotate: 90.
24. Vamos a eliminar e entidades, para eso click derecho en **Geometry**, y dar click en **Delete Entities** y click en **Build All**.
25. Seleccionar los dos círculos a los lados derecho e izquierdo del núcleo y click en **Build All**.
26. Mover el núcleo damos click derecho en **Geometry** buscar **Transforms** y luego click en **Move**.
27. Seleccionar todas las elipses del núcleo y en **Displacement** x: -Pitch y: 0, click en **Build all**.
28. Crear un espejo damos click derecho en **Geometry** buscamos **Transforms** y luego click en **Mirror**.
29. Escoger los Elipses que se van a replicar al otro lado, es importante seleccionar el cuadro de **Keep input objects en inputs** para que los primeros círculos queden al reflejarlos. Y en **Normal Vector to Line of Reflection** en x: 1, y: 0. **Build All**.
30. Dar click derecho en **Geometry** y crear un **Circle**.
31. En **Radius** seleccionar el valor de *rd* y en **position** en x: 0, y0.

3.3.4 Crear los materiales para la fibra

1. Buscar debajo de **Geometry**, encontrar **Materials** dar click derecho en él, y le dar click en **Add Material**.
2. En el cuadro de **Add Material** buscar **air** y dar click y se agrega a los materiales que se van a usar.
3. Luego seleccionar **Air** y seleccionar todos los círculos pequeños y elipses dentro de la fibra, para indicar que estos espacios están llenos de aire.
4. Buscar debajo de **Geometry**, encontrar **Materials** damos click derecho en él, y dar click en **Blank Materia**.
5. En el cuadro de **Setting** en **Material Properties** buscar **Electromagnetic Models** y dar click en **Refractive Index**, luego dar click en el más para agregarlo al material y luego

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

asignarle un valor de $n=1.53$, por último seleccionar el círculo más grande de la fibra para indicarle que va a ser de este material llamado Topas.

6. Luego se le cambia el nombre, dar click derecho en material 2 y le dar click en **Rename** y se le asigna el nombre de Topas y click en Ok.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para encontrar la longitud de batido en la fibra de cristal fotónico en cada D_{core} , se utilizó la **Ecuación (3)**, el método de elementos finito vectorial y los datos adquiridos en **COMSOL MULTIPHYSICS®**, donde se aplicaron unas condiciones de frontera a el diseño perfectamente adaptadas para calcular las pérdidas de confinamiento (Ver **Figura 6**).

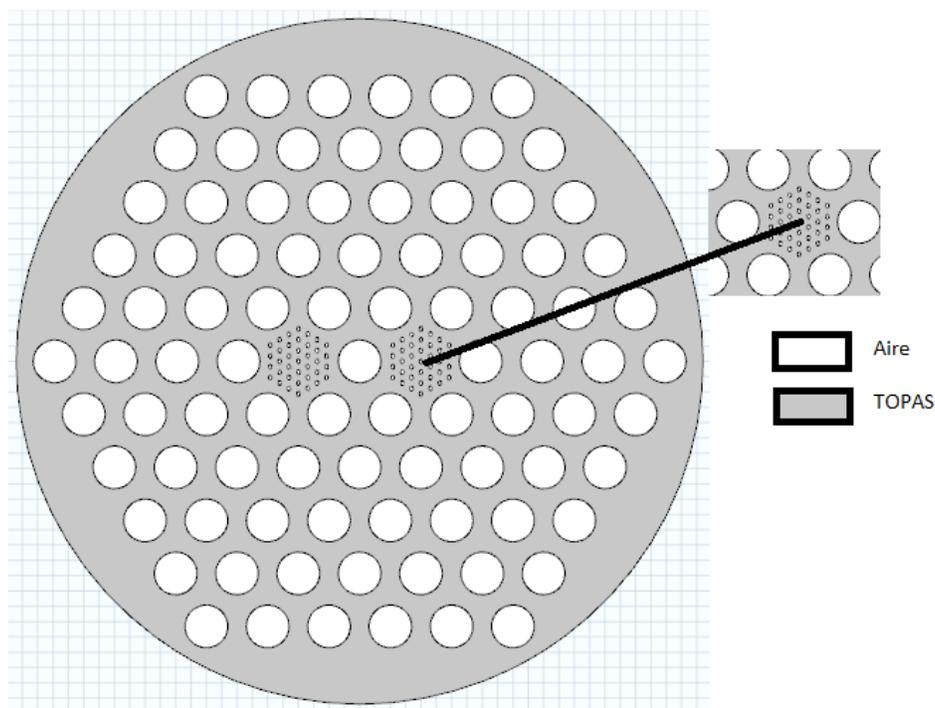


Figura 6. Diseño de la fibra

Inicialmente se evaluó cómo se afecta la longitud de batido cuando el núcleo de la fibra (D_{core}) fue variado entre 300 y 600 μm a una frecuencia constante de 1THz. En una fibra de cristal fotónico, (de sus siglas en ingles PCF) la longitud de batido es proporcional al diámetro del núcleo y también depende de las propiedades de la luz, la forma de las elipses (sus semiejes a y b) y los agujeros de aire que circundan los núcleos. (ver **Figura 7**).

Esto ocurre porque entre más se aumenta el núcleo sin variar la frecuencia, va a tener que recorrer mayor longitud para realizar la transferencia de potencia entre los núcleos.

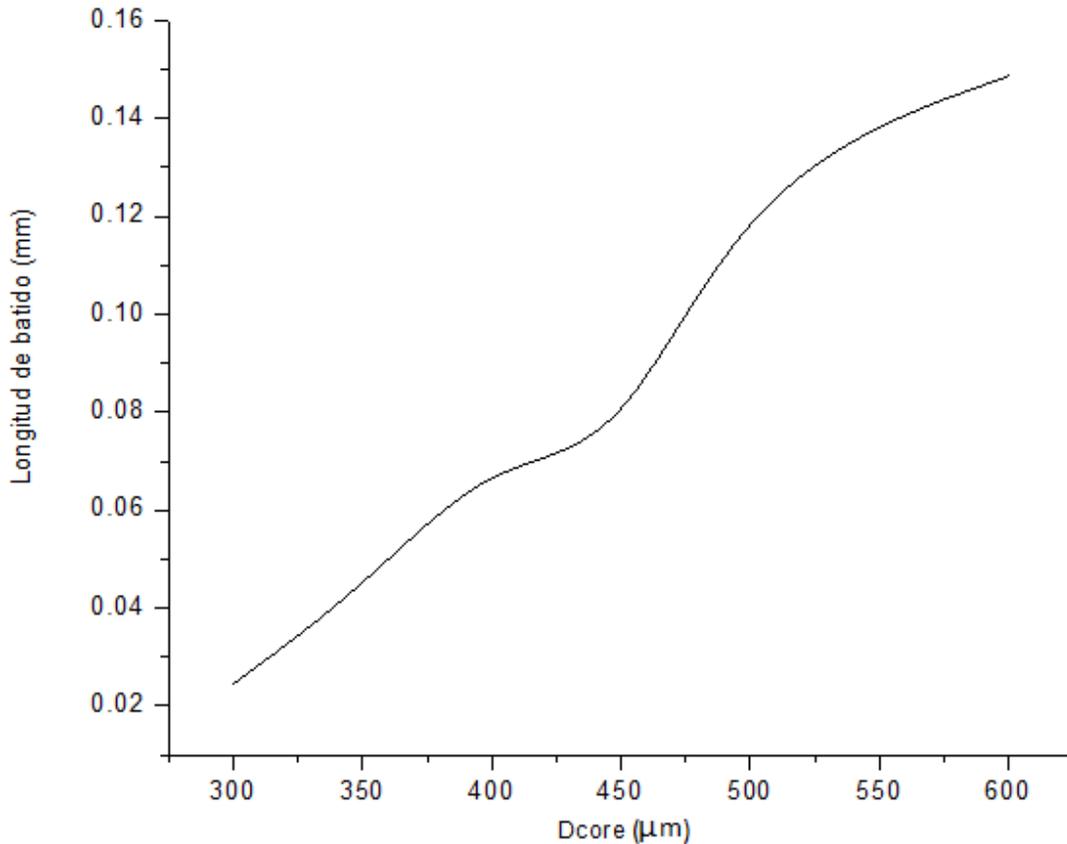


Figura 7. Longitud de Batido a 1 THz

Usando la **Ecuación (3)** se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 2**, donde se haya una relación entre los índices de refracción par o impar, el D_{core} y la longitud de Batido. Se realizaron pruebas en este diseño donde se encontró que entre más aumenta el diámetro del núcleo, la diferencia entre los modos par (N_{eff}) e impar (N_{off}) es cada vez menor y, como se muestra en las simulaciones, el confinamiento disminuye muy poco y la longitud para que pase la luz de un núcleo a otro crece.

Dcore	Par	Impar	$N_{eff} - N_{off}$	Longitud Batido
300 μm	1,373085271	1,366964578	0,006120693	0,024507029
350 μm	1,390303773	1,386895485	0,003408288	0,044010364
400 μm	1,403558733	1,401445844	0,002112889	0,070992861
450 μm	1,413854006	1,412380211	0,001473795	0,101778069
500 μm	1,422024285	1,420866804	0,001157481	0,129591763

Tabla 2. Resultados obtenidos

Las pérdidas por absorción, son otro parámetro a analizar en este tipo de fibras, esto es importante porque necesitamos disminuir las pérdidas por absorción del material.

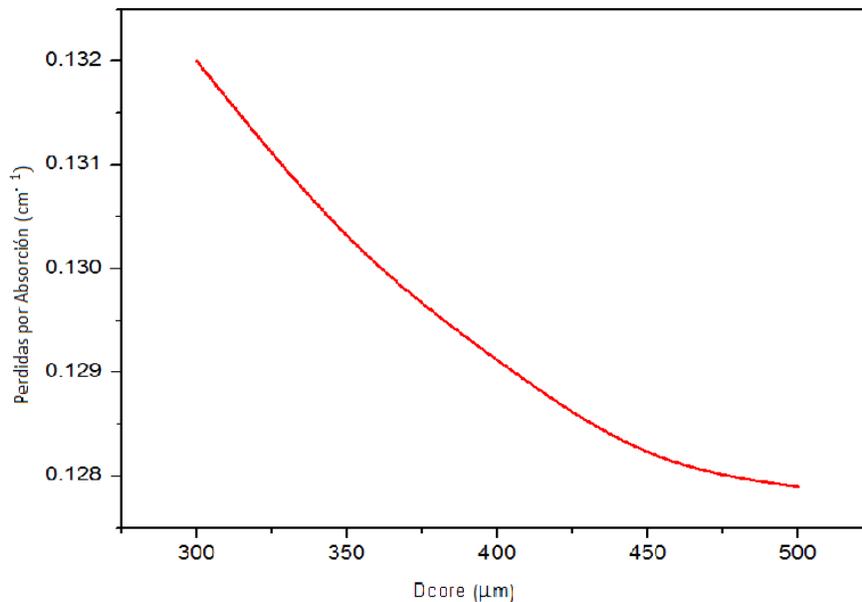


Figura 8 Pérdida efectiva por absorción en función del diámetro del núcleo a 1 THz

Las simulaciones realizadas en función del diámetro de D_{core} se presentan en la **Figura 8**, Donde se puede ver que la pérdida efectiva por absorción tiene una disminución considerable mediante se aumenta el diámetro de D_{core} . Esto se debe a que entre más pequeño el D_{core} menos material, por tanto la mayor parte de la energía se mantiene en el núcleo.

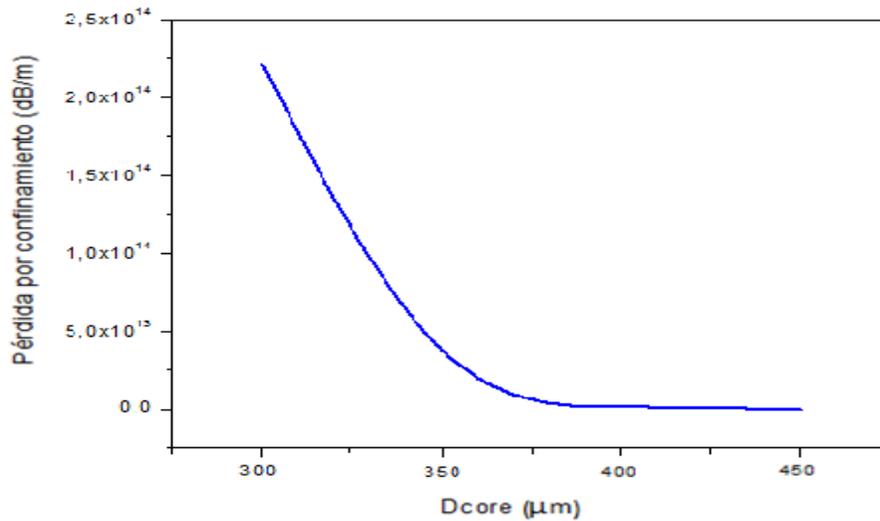


Figura 9. Pérdida por confinamiento en función del D_{core} con frecuencia=1THz y 60% de porosidad.

La pérdida por confinamiento del diseño propuesto es estudiada con la Ecuación (2). La pérdida por confinamiento en el material es equivalente al orden de los THz, pero es significativa cuando hay un pequeño diámetro de D_{core} . **Figura 9** presenta la pérdida por confinamiento como una función de D_{core} . Se evidencia que la pérdida por confinamiento se puede disminuir incrementando el D_{core} .

Gracias a que se tiene el diseño parametrizado, se facilita realizar simulaciones a diferentes diámetros de núcleos, solo variando el tamaño de D_{core} . Se analizó también el comportamiento de nuestra fibra de cristal fotónico a diferentes frecuencias, desde 0.8 hasta 2 THz. Se tiene que entre menor frecuencia la longitud de onda es más grande, a 0.8 THz se tiene una longitud de onda de $375 \mu\text{m}$ lo que permite el paso de potencia de un núcleo a otro, más rápido que en donde la frecuencia es más alta y su longitud de onda se ha hecho más pequeña. Se puede observar en la **Figura 10** que para las simulaciones evaluadas de $350 \mu\text{m}$ a $500 \mu\text{m}$, no se puede encontrar la longitud de batido en unas frecuencias ya que se encontró que no siempre hay acoplamiento entre los dos núcleos. Pues recordemos que para que exista acoplamiento se deben dar las condiciones

necesarias para que la luz pueda viajar a través de la micro-estructura, para ello se deben tener en cuenta el tamaño de núcleos, frecuencia y separación.

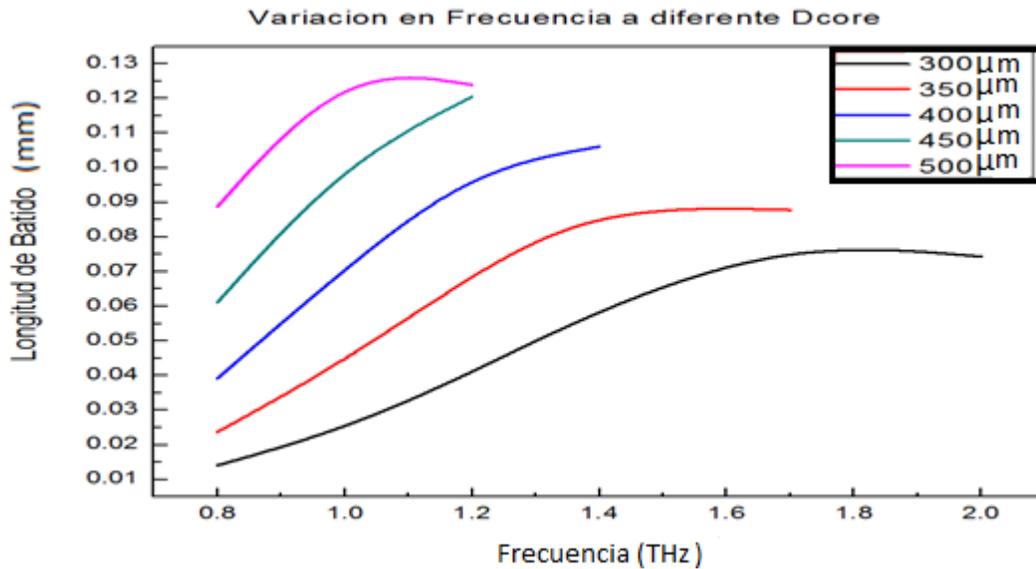


Figura 10. Longitud de Batido expresada en colores para el diámetro de D_{core} .

Los resultados obtenidos en la variación de la porosidad en el D_{core} se muestran en la **Figura 11**, donde se encuentra que la máxima longitud de batido fue para la simulación efectuada con los elipses más pequeños (a, b) con r_{dc} (utilizado para los encontrar los dos radios de las elipses) multiplicado por 0,7, lo que se hizo con esto fue disminuir la porosidad. Se obtuvo que el comportamiento de la luz en estas fibras requieren más longitud para poder hacer una transferencia de potencia entre los núcleos, y se nota un gran aumento en la longitud de batido con respecto a las otras variaciones.

Como resultado a la disminución del diámetro de las elipses y el aumento de la frecuencia, obtuvimos que la longitud de batido crece a medida que se varían, haciendo que el cambio de potencia de un núcleo a otro sea más lento ya que se está variando la cantidad de material en el núcleo y la longitud de onda.

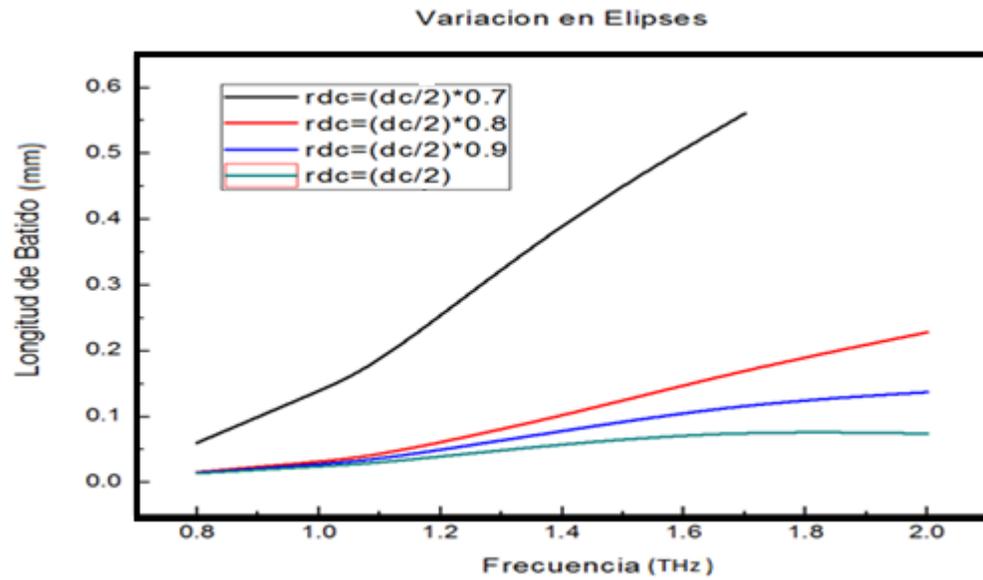


Figura 11. Longitud de Batido variando la frecuencia y el tamaño de las elipses

En la **Figura 12** se ilustra un esquema de la transmisión de una fibra al transmitir su señal en un acoplador direccional donde se puede evidenciar la longitud de batido transfiriendo completamente la potencia de un núcleo a otro.

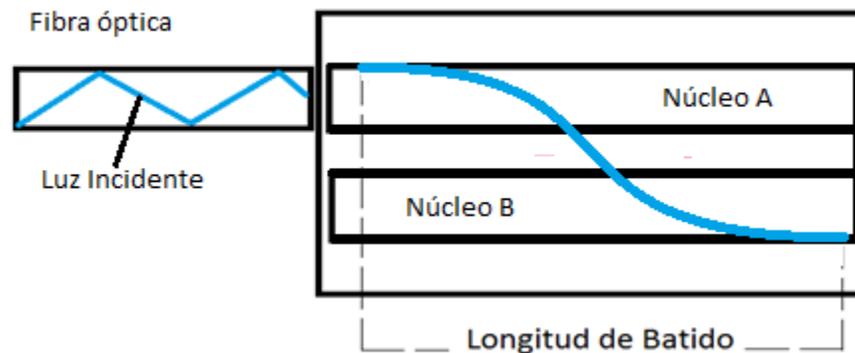


Figura 2. Esquema de longitud de batido

De las gráficas anteriores se puede determinar el tamaño ideal del acoplador direccional.

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

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Con el diseño de fibra con doble núcleo con elipses empleando método de elementos finitos implementado en la aplicación **COMSOL MULTYPHISICS®**, se encontró una metodología para hallar longitud de batido, útil para el diseño de un acoplador direccional con una frecuencia variable entre 0.8 THz a 2 THz y longitudes de onda comprendidas entre 375 y 15 μm .

También fueron hallados unos limitantes con la fibra de doble núcleo con elipses que a ciertos D_{core} y frecuencias no se pudieron encontrar los modos par e impar, o solo existe un modo de los dos lo cual nos hace imposible encontrar la longitud de onda, esto se pudo evidenciar en la **Figura 7**.

Se recomienda como trabajo futuro hacer una variación de las geometrías de las fibras con el fin de encontrar una configuración más eficiente en cuanto a pérdidas y frecuencias.

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

REFERENCIAS

-
- Islam, R., Habib, S., Hasanuzzaman, G., Ahmad, R., Rana, S., & Kaijage, S. (2015). Extremely High-Birefringent Asymmetric Slotted-Core Photonic Crystal Fiber in THz Regime. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4.
- Kaijage, S., Ouyang, Z., & Jin, X. (2013). Porous-Core Photonic Crystal Fiber for Low Loss. *IEEE PHOTONICS*, 4.
- Neri, R. (1999). *Líneas de Transmisión*. México DF, México.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES S.A.
- Selim, G., Uzzaman, H., Amhad, R., Rana, S., Kaijage, S., & Islam, R. (2015). Extremely High-Birefringent Asymmetric. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY*, 4.
- Selim, G., Uzzaman, H., IEEE, S., Razzak, A., Hossain, A., & Namihira, Y. (2015). Low Loss Single Mode Porous-Core Kagome. *Journal of Lightwave Technology*, 6.
- Shockley, W. (1949). *The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors*. Bell System Technical Journal.
- Zhu, F., Chen, M., Wang, H., Yao, H., Zhang, Y., & Yhanh, J. (2013). Design and Analysis of a Low-Loss Suspended. *IEEE Photonics Journal*, 11.

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

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

FIRMA ESTUDIANTES Juan Pablo M.

FIRMA ASESOR Erica Reyes Vera

FECHA ENTREGA: 22/Nov/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: _____


MODALIDAD TRABAJO DE GRADO
PRODUCTO OBTENIDO EN TALLERES O LABORATORIOS DEL ITM
 Registro de actividades y cumplimiento de horas / Talleres o Laboratorios de DOCENCIA

Código	FDE 146
Versión	02
Fecha	2015-09-30

Documento de identidad: 1035412312
 Nombre completo del estudiante: Juan Pablo Montero Montero
 Programa académico ITM: Ingeniería de Telecomunicaciones
 Nombre completo del Docente Asesor:
 Fecha de iniciación del producto (aaaa/mm/dd): 30 de Agosto 2014 Fecha de terminación del producto (aaaa/mm/dd):
 Nombre Taller o Laboratorio:
 Ubicación:
 Campus: Fraternidad

Fecha	Actividad desempeñada por el estudiante	Hora ingreso	Hora salida	Total horas	Firma Laboratorista	Firma Estudiante	
A	M	D					
16	9	5	Investigación Fibra	14:00 18:00	4	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	9	12	Investigación Fibra	14:00 18:00	4	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	9	19	Investigación Fibra	14:00 18:00	4	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	9	26	Funcionamiento Consol	14:00 18:00	4	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	10	4	Funcionamiento Consol	14:00 18:00	4	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	10	6	Diseño Fibra PCF	16:00 18:00	2	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	10	11	Diseño Fibra PCF	14:00 18:00	4	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	10	13	Diseño Fibra PCF	16:00 18:00	2	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	10	18	Simulación y recado Informacion	14:00 18:00	4	Erick Rojas	Juan Pablo H.
16	10	20	Simulación y secado Informacion	16:00 18:00	2	Erick Rojas	Juan Pablo H.

161025	Diseño Graficas	14:00	18:00	4	Erick Reyes	Juan Pablo H.
161027	Analisis de graficas	16:00	19:00	2	Erick Reyes	Juan Pablo H.
16111	Redaccion trabajo Grado	14:00	18:00	4	Erick Reyes	Juan Pablo H.
16113	Redaccion trabajo Grado	14:00	18:00	4	Erick Reyes	Juan Pablo H.
16118	Analisis Graficas	14:00	18:00	4	Erick Reyes	Juan Pablo H.
161110	Analisis Graficas	14:00	19:00	4	Erick Reyes	Juan Pablo H.
161115	Redaccion trabajo Grado	14:00	18:00	4	Erick Reyes	Juan Pablo H.
161117	Redaccion trabajo Grado.	14:00	18:00	4	Erick Reyes	Juan Pablo H.
TOTAL HORAS						

Firma Estudiante
Erick Reyes Vera.
 Nombre y firma Laboratorio

Nombre y firma Profesional Universitario - Centro de Laboratorios