



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRONICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SENSOR ÓPTICO**  
**FOTOACÚSTICO A UNA LONGITUD DE ONDA DE 1550 nm.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTORA:**

**ANGIE SELENA CALUÑA TISALEMA**

Riobamba – Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMATICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SENSOR ÓPTICO**  
**FOTOACÚSTICO A UNA LONGITUD DE ONDA DE 1550 nm.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTORA: ANGIE SELENA CALUÑA TISALEMA**

**DIRECTOR: ING. HUGO OSWALDO MORENO AVILÉS**

Riobamba – Ecuador

2024

© 2024, Angie Selena Caluña Tisalema

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autora.

Yo, Angie Selena Caluña Tisalema, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 27 de noviembre de 2024

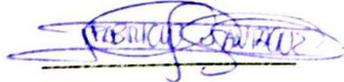


**Angie Selena Caluña Tisalema**

**180539948-0**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**  
**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SENSOR ÓPTICO FOTOACÚSTICO A UNA LONGITUD DE ONDA DE 1550 NM**, realizado por la señorita: **ANGIE SELENA CALUÑA TISALEMA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Oswaldo Giovanni Martínez Guashima <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2024-11-27
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2024-11-27
Ing. Fabricio Javier Santacruz Sulca <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2024-11-27

## **DEDICATORIA**

Agradezco profundamente a todas las personas que han sido parte de este viaje académico. A mi familia, por su apoyo constante, que me ha impulsado a seguir adelante en los momentos desafiantes. A mis amigos, por su comprensión, apoyo y motivación. A mis profesores y mentores cuya guía ha sido fundamental para subir este peldaño.

Angie

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible la realización de este trabajo de titulación. A mis profesores, por su valiosa guía, orientación y por compartir su conocimiento, en especial al Ing. Hugo Moreno por acogerme bajo su tutela y brindarme su invaluable dirección; a mis compañeros que al atravesar todo este camino se han convertido en buenos amigos y parte importante de este viaje, agradezco el apoyo y las conversaciones enriquecedoras que me brindaban el aliento necesario para superar cada etapa. A cada uno de ustedes que han dejado una huella en mí y a su apoyo que ha sido fundamental para culminar este proyecto, les agradezco profundamente.

Angie

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY / ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

<b>1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Planteamiento del problema.....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Antecedentes .....	2
1.1.2 Limitaciones y delimitaciones .....	3
1.1.3 Problema general de investigación .....	3
1.1.4 Problemas específicos de investigación .....	4
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Objetivo General .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>1.3 Justificación .....</b>	<b>4</b>
1.3.1 Justificación teórica .....	4
1.3.2 Justificación práctica .....	5

### CAPÍTULO II

<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Fotoacústica .....</b>	<b>6</b>
2.1.1 <i>Efecto fotoacústico</i> .....	6
2.1.1.1 Ecuación de la onda de presión del efecto fotoacústico.....	8

2.1.2	<b>Imagen fotoacústica</b> .....	9
2.2	<b>Fibra óptica</b> .....	13
2.2.1	<i>Definición</i> .....	13
2.2.2	<i>Funcionamiento</i> .....	13
2.2.3	<i>Ventajas de la fibra óptica</i> .....	14
2.2.4	<i>Principios de funcionamiento</i> .....	14
2.2.4.1	Propagación Luminosa.....	14
2.2.5	<i>Apertura numérica</i> .....	15
2.2.6	<i>Atenuación de señal</i> .....	15
2.2.6.1	Pérdidas intrínsecas.....	16
2.2.6.1.1	Pérdidas por absorción.....	16
2.2.6.1.2	Dispersión por Scattering de Rayleigh.....	17
2.2.6.2	Pérdidas extrínsecas .....	18
2.2.6.2.1	Macro curvaturas.....	18
2.2.6.2.2	Micro curvaturas .....	18
2.2.7	<i>Ventanas de operación</i> .....	19
2.2.8	<i>Clasificación de la fibra óptica</i> .....	20
2.2.8.1	Por el modo de Transmisión .....	20
2.2.8.1.1	Fibra monomodo.....	20
2.2.8.1.2	Fibra multimodo.....	21
2.2.8.2	Por los materiales que conforman el núcleo y revestimiento.....	22
2.2.8.3	Por las dimensiones de núcleo y revestimiento.....	23
2.3	<b>Sensores de fibra óptica</b> .....	<b>24</b>
2.3.1	<i>Clasificación de sensores ópticos</i> .....	25
2.3.1.1	Según la localización del sensor .....	25
2.3.1.2	Según la distribución espacial.....	26
2.3.1.3	Según el principio de funcionamiento.....	27
2.3.1.4	Según las aplicaciones .....	27
2.3.2	<i>Sensores ópticos con aplicación a la fotoacústica</i> .....	28

2.3.2.1	Sensor interferométrico Fabry-Pérot.....	28
2.3.2.2	Sensor interferométrico Mach-Zehnder.....	29
2.3.2.3	El interferómetro de Sagnac.....	29
2.3.2.4	El interferómetro de Michelson.....	30
2.3.3	<b>Herramientas de simulación</b> .....	31
2.3.3.1	Fimmwave.....	31
2.3.3.1.1	Solucionador FMM (Film Mode Matching).....	31
2.3.3.1.2	Solucionadores de modos numéricos.....	32
2.3.3.1.3	Solucionador FDM.....	32
2.3.3.1.4	Solucionador FEM.....	32
2.3.3.1.5	Solucionadores cilíndricos.....	32
2.3.3.1.6	Otros solucionadores.....	32
2.3.3.1.7	FIMMPROP.....	32

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLOGICO</b> .....	34
3.1	<b>Enfoque de investigación</b> .....	34
3.2	<b>Nivel de investigación</b> .....	34
3.3	<b>Diseño de investigación</b> .....	34
3.3.1	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i> .....	34
3.3.2	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i> .....	35
3.4	<b>Tipo de estudio</b> .....	35
3.5	<b>Población y planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra</b> .....	35
3.6	<b>Métodos, técnicas e instrumentos de investigación</b> .....	35
3.7	<b>Escenarios propuestos</b> .....	41
3.7.1	<i>Escenario 1: Diseño principal del sensor</i> .....	41
3.7.2	<i>Escenario 2: Diseño del sensor enfrentado a una sección de aire</i> .....	41
3.7.3	<i>Escenario 3: Diseño del sensor enfrentado a una sección de aire</i> .....	42

## **CAPITULO IV**

<b>4.</b>	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Prueba en el diseño individual del sensor .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Sensor enfrentado a una sección de aire simulado.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3</b>	<b>Sensor enfrentado a una sección de ultrasonido simulado.....</b>	<b>48</b>

## **CAPITULO V**

<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>5.2</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>51</b>

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b> Pérdidas por Scattering de Rayleigh.....	18
<b>Tabla 2-2:</b> Comparación de modos de transmisión.....	22
<b>Tabla 2-3:</b> Tipos de fibra según los materiales que la componen .....	22
<b>Tabla 2-4:</b> Diámetros de fibras ópticas comunes: Núcleo, revestimiento, recubrimiento y protección.....	23
<b>Tabla 2-5:</b> Comparativa de clases de fibras ópticas .....	23
<b>Tabla 2-6:</b> Clasificación de sensores ópticos .....	25
<b>Tabla 2-7:</b> Clasificación en función de las aplicaciones .....	28
<b>Tabla 3-1:</b> Definición de parámetros del diseño sección de fibra óptica .....	37
<b>Tabla 3-2:</b> Parámetros de punta (cubierta) del sensor.....	40
<b>Tabla 3-3:</b> Parámetros de diseño de la sección de aire.....	41
<b>Tabla 3-4:</b> Parámetros de simulación sección ultrasonido.....	42

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b> Etapas del proceso del efecto fotoacústico .....	6
<b>Ilustración 2-2:</b> Publicación de la época: Esquema del dispositivo con el que Bell descubrió el Efecto fotoacústico.....	7
<b>Ilustración 2-3:</b> Principio general de las imágenes fotoacústicas.....	9
<b>Ilustración 2-4:</b> Imágenes fotoacústicas de diferentes tejidos a diferentes longitudes de onda.	10
<b>Ilustración 2-5:</b> Comparativa imágenes de ultrasonido y fotoacústica.....	11
<b>Ilustración 2-6:</b> Vista de un embrión de ratón mediante tomografía computarizada fotoacústica .....	12
<b>Ilustración 2-7:</b> Tumor en oreja de ratón mediante imágenes fotoacústicas .....	12
<b>Ilustración 2-8:</b> Estructura de una fibra óptica .....	13
<b>Ilustración 2-9:</b> Reflexión interna total y ángulo crítico .....	15
<b>Ilustración 2-10:</b> Apertura numérica de una fibra óptica.....	15
<b>Ilustración 2-11:</b> Pérdidas por absorción.....	17
<b>Ilustración 2-12:</b> Scattering de Rayleigh en fibra óptica .....	17
<b>Ilustración 2-13:</b> Macro curvatura en una fibra óptica .....	18
<b>Ilustración 2-14:</b> Microcurvatura en la fibra óptica.....	19
<b>Ilustración 2-15:</b> Espectro electromagnético .....	19
<b>Ilustración 2-16:</b> Ventanas de trabajo fibra óptica .....	20
<b>Ilustración 2-17:</b> Trayectoria de la luz en fibra monomodo .....	21
<b>Ilustración 2-18:</b> Fibras multimodo, índice escalonado y gradual.....	21
<b>Ilustración 2-19:</b> Sensor de fibra óptica .....	24
<b>Ilustración 2-20:</b> Sensores ópticos por su localización: Intrínsecos y Extrínsecos .....	26
<b>Ilustración 2-21:</b> Tipos de distribución de sensores ópticos según la distribución.....	27
<b>Ilustración 2-22:</b> Sensor Fabry Perot.....	29
<b>Ilustración 2-23:</b> Interferómetro Mach-Zhender .....	29
<b>Ilustración 2-24:</b> Interferómetro Sagnac.....	30
<b>Ilustración 2-25:</b> Interferómetro de Michelson.....	31
<b>Ilustración 3-1:</b> Diagrama esquemático del sensor óptico fotoacústico .....	36
<b>Ilustración 3-2:</b> Vista frontal del sensor, en el que se observa núcleo, revestimiento y recubrimiento .....	37
<b>Ilustración 3-3:</b> Vista lateral sección fibra monomodo .....	38
<b>Ilustración 3-4:</b> Activación segmento para transmisión (cfseg) .....	38
<b>Ilustración 3-5.</b> Solucionador de modo.....	39

<b>Ilustración 3-6.</b> Encontrar el modo de propagación.....	39
<b>Ilustración 3-7:</b> Cubierta del sensor.....	40
<b>Ilustración 3-8:</b> Diseño del sensor .....	41
<b>Ilustración 3-9:</b> Sensor enfrentado con una sección de aire .....	41
<b>Ilustración 3-9:</b> Sensor enfrentado a ultrasonido simulado .....	42
<b>Ilustración 4-1:</b> Escenario 1.....	44
<b>Ilustración 4-2:</b> Potencia emitida hacia el sensor .....	45
<b>Ilustración 4-3:</b> Potencia medida en la punta del sensor .....	46
<b>Ilustración 4-4:</b> Escenario 2.....	47
<b>Ilustración 4-5:</b> Potencia emitida en el sensor enfrentado a una sección con aire.....	47
<b>Ilustración 4-6:</b> Potencia recibida en la punta del sensor enfrentado a una sección con aire ....	48
<b>Ilustración 4-7:</b> Escenario 3.....	49
<b>Ilustración 4-8:</b> Potencia emitida al sensor siendo enfrentado a una sección con longitud de onda de ultrasonido .....	49
<b>Ilustración 4-9:</b> Potencia recibida en la punta del sensor .....	51

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A: DATASHEET FIBRA OPTICA SMF 28**

## RESUMEN

La fibra óptica ha sido un eje fundamental en la evolución de las comunicaciones a larga distancia en los últimos años, por lo que se han estudiado sus características para aprovecharlas en diferentes ámbitos, como lo es la medicina, donde se ha visto una amplia aceptación del material para el mejoramiento de técnicas de diagnóstico, siendo una de las más novedosas la imagen fotoacústica la que permite realizar diagnósticos de los tejidos del cuerpo humano aprovechando las características del sonido y la luz. Por tanto, el objetivo de este trabajo de investigación fue realizar el diseño y simulación de un sensor óptico fotoacústico a una longitud de onda de 1550 nm. La metodología implementada tuvo un enfoque descriptivo y cuantitativo, ya que se analizó el funcionamiento del sensor en base a parámetros determinados del diseño del modelo, siendo la variable dependiente el parámetro de potencia ya que el fin de la investigación era estimar el porcentaje de esta al transitar dentro del diseño del sensor óptico fotoacústico. Debido a la naturaleza de la investigación no se hizo uso de datos referentes a población o muestra, al haber sido enfocada en un tipo específico de diseño. Mediante esta metodología se logró comprender el funcionamiento de la fibra óptica como sensor óptico fotoacústico y su posible aplicación en la imagen fotoacústica, las condiciones que debe cumplir para hacerlo y las características que se deben tener en cuenta para diseñarlo y poder simularlo en la herramienta usada en el presente trabajo, Fimmwave. En este contexto se concluye que las características prestadas por la fibra óptica resultan ser de carácter influyente para la obtención de imágenes fotoacústicas, sin embargo, los niveles de potencia que son usados necesitan de complementos externos para mostrar mejores resultados.

**Palabras clave:** <FOTOACÚSTICA>, <SENSOR ÓPTICO>, <FIBRA ÓPTICA>, <POTENCIA OPTICA>, < LONGITUD DE ONDA>



**1532-DBRAI-UPT-2024**

## SUMMARY / ABSTRACT

Optical fiber has been a fundamental axis in the evolution of long-distance communications in recent years, so its characteristics have been studied to take advantage of them in different fields, such as medicine, where there has been a wide acceptance of the material for the improvement of diagnostic techniques, one of the most innovative being the photoacoustic image that allows the diagnosis of human body tissues taking advantage of the characteristics of sound and light. Therefore, this research work aimed to design and simulate a photoacoustic optical sensor at a wavelength of 1550 nm. The methodology implemented had a descriptive and quantitative approach since the performance of the sensor was analyzed based on certain parameters of the model design, being the dependent variable the power parameter since the purpose of the research was to estimate the percentage of this when transiting within the design of the photoacoustic optical sensor. Due to the nature of the research, no population or sample data were used since it was focused on a specific type of design. Using this methodology, it was possible to understand the functioning of the optical fiber as a photoacoustic optical sensor and its possible application in photoacoustic imaging, the conditions it must meet to do so, and the characteristics that must be considered to design and simulate it in the tool used in this work, Fimmwave. In this context, it is concluded that the characteristics provided by the optical fiber are influential in obtaining photoacoustic images. However, the power levels that are used need external complements to show better results.

**Keywords:** <PHOTOACUSTICS>, <OPTICAL SENSOR>, <OPTICAL FIBER>, <OPTICAL POWER>, < WAVELENGTH>



---

Daniel Hernán Millan Ramos

0603568585

## INTRODUCCIÓN

A lo largo del avance de la tecnología de comunicaciones ópticas se han explorado sus características en diferentes campos además del principal que es el de las comunicaciones a larga distancia donde ha demostrado ser una opción rentable y que supera a tecnologías más comunes como el cable de cobre, gracias a las ventajas que ofrece entre las que se encuentran su gran ancho de banda, resistencia a interferencias, bajo precio, entre otros.

Dentro de los campos en los que se ha realizado investigaciones de su desempeño se encuentra uno de los más recientes; la tecnología de sensores de fibra óptica que han demostrado tener buenas prestaciones al medir diferentes particularidades en el medio dependiendo del área en el que se desempeñe, por ejemplo, se han usado para medir factores físicos del ambiente como temperatura o presión, además de haber sido ampliamente estudiada para ser usado en el área de la construcción. Otro de las áreas en las que sus cualidades ha sido recientemente explorada y que ha supuesto un auge para su desarrollo es la medicina en el que se ha apuntado por usar esta tecnología en diferentes especialidades, entre las que se destaca la imagenología fotoacústica que hace uso de la luz y sonido para la recolección de imágenes de tejido vivo, lo que se convertirá en un método de diagnóstico por imágenes menos invasivo para el paciente y de mejor resolución para el personal de salud, lo que deriva en mejores diagnósticos ante estudios que involucren el análisis de imágenes.

Esta investigación se adentra en el estudio de la tecnología de sensores de fibra óptica, y su aplicación en una rama emergente de la medicina como lo es la imagenología fotoacústica, mostrando el diseño de un sensor óptico fotoacústico a una longitud de onda de 1550 nm, en el que se describe su funcionamiento a partir de simulaciones en un software específico para fibra óptica.

## CAPÍTULO I

### 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1 Planteamiento del problema

##### *1.1.1 Antecedentes*

La fibra óptica ha sido usada en varios avances en la tecnología siendo los campos en los que más se ha adentrado; las comunicaciones, que hoy en día es donde más se ha aprovechado sus particulares características que permiten mejorar la calidad de transmisión siendo la principal la estabilidad de señal que esta brinda frente a tecnologías similares como el cable de cobre. Sin embargo, este no es el único campo que ha visto en este material una fuente de nuevos desarrollos, sino que se ha visto su auge en campos como la arqueología, mecánica y en especial la medicina. La forma en que más ha sido usada es en el desarrollo de sensores de diferentes tipos que ayudan a recopilar datos de diferentes magnitudes para ser procesados o analizados para diferentes fines, como la medición de condiciones ambientales o medición de fuerza aplicada a construcciones. El auge de esta tecnología en los últimos años se ha visto plasmada en la medicina que ha visto en sus características un método muy factible para mejorar los medios de diagnóstico tradicionales, es así como se ha incursionado en una de las áreas que más relegada se ha encontrado; el diagnóstico mediante imágenes ya que el mejoramiento de los medios tradicionales se ha encontrado con varias vallas que limitan su desarrollo, es así como el amplio estudio de las características de la fibra óptica han permitido proponer diferentes formas de usar las propiedades de la misma para la recopilación de información gráfica del cuerpo humano, de esta forma conjuntamente con la imagenología fotoacústica se describe el comportamiento de un modelo de sensor fotoacústico simulado en base a los parámetros permitidos en el software de simulación.

El efecto fotoacústico fue descubierto por Graham Bell en 1880 al utilizar su espectrófono para escuchar el sonido producido por la absorción óptica de las distintas longitudes de onda de la luz solar por los diferentes materiales. Los resultados de sus experimentos llegaron a la conclusión de que una luz intermitente podía calentar materiales ópticamente absorbentes, haciendo que el material se expandiera y produjera ondas vibratorias audibles. (Huseyin y Baki, 2023 págs. 1-3).

La aplicación más novedosa de la fotoacústica puede que sea el procesamiento de imágenes, que son de suma importancia para el diagnóstico y la investigación médica. Tecnologías actuales

como la tomografía axial computarizada (TAC) presenta la desventaja de usar radiación ionizante, y además implica fuertes sumas de dinero, tanto para su instalación como para su mantenimiento. (Lomelí et al., 2012, pág. 90)

En comparación con otras técnicas de imagen existentes, la imagen fotoacústica proporciona alta resolución, gran profundidad de penetración y excelente contraste óptico simultáneamente. (Yang, Xu, et al., 2022 pág. 3)

El uso de sensores de ultrasonido ha sido de gran utilidad en la obtención de este tipo de imágenes. Dichos sensores se basan principalmente en el efecto piezoeléctrico que muestra deficiencias como el tamaño que deriva directamente de los elementos piezoeléctricos usados, por otro lado, los sensores ultrasónicos piezoeléctricos suelen tener un ancho de banda de respuesta estrecho y por lo tanto impiden una representación fiel de la onda acústica. Además, los sensores piezoeléctricos son sensibles a las interferencias electromagnéticas (EMI), por lo que no funcionan en entornos extremos con fuertes interferencias electromagnéticas. Con el afán de superar estas limitaciones se ha incrementado el desarrollo de sensores ópticos, que permitan trabajar en un gran ancho de banda y de bajo costo. que constituyen una alternativa competitiva debido a las ventajas que ofrece de tamaño reducido, alta sensibilidad y excelente inmunidad a las interferencias. (Yang, Li, et al., 2022 págs. 2-4)

### ***1.1.2 Limitaciones y delimitaciones***

- Las limitaciones inician con el uso de la computadora, ya que al ser un bien del laboratorio de la facultad es utilizada para diferentes propósitos en especial para diferentes investigaciones que hacen uso del mismo software de simulación.
- La escasez de información referente a sensores de fibra óptica en especial en la aplicación propuesta como es la fotoacústica.
- El manejo del software de simulación, ya que no se encuentra información práctica del mismo más que en el manual en el que se encuentra información genérica de sus aplicaciones y atributos.

### ***1.1.3 Problema general de investigación***

¿Cómo se realiza el diseño de un sensor óptico fotoacústico a una longitud de onda de 1550 nm?

### ***1.1.4 Problemas específicos de investigación***

¿Cuál es el estado actual de las investigaciones de sensores ópticos fotoacústicos?

¿Cuáles son los parámetros requeridos para configurar el diseño de un sensor óptico foto acústico a una longitud de onda de 1550 nm utilizando el software Fimmwave?

¿Cómo diseñar el sensor óptico fotoacústico en base a los datos previos?

¿Cómo simular y recopilar datos de los resultados que describen el comportamiento del sensor diseñado?

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo General***

Diseñar y simular un sensor óptico fotoacústico a una longitud de onda de 1550nm.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Investigar el estado del arte de los sensores ópticos y su aplicación en la fotoacústica.
- Delimitar los parámetros necesarios para el diseño del sensor óptico fotoacústico a una longitud de onda de 1550 nm en el software Fimmwave.
- Diseñar el sensor óptico fotoacústico en base a los datos previos.
- Simular y recopilar resultados del comportamiento del sensor óptico fotoacústico.

## **1.3 Justificación**

### ***1.3.1 Justificación teórica***

La tecnología fotoacústica no es nueva, aunque muchas de sus aplicaciones sí lo son. El inventor del teléfono, Alexander Graham Bell (1847-1922), tenía problemas auditivos, y en su afán por descubrir nuevas formas de transmitir el sonido, hace más de 100 años se dio cuenta de que al iluminar una muestra con radiación modulada en una cámara cerrada (celda fotoacústica). era posible captar sonidos con intensidad directamente proporcional a la longitud de onda absorbida por la muestra.(Lomelí et al., 2012 pág. 90).

Probablemente, la aplicación más interesante de la fotoacústica para la medicina sea el procesamiento de imágenes (Lomelí et al., 2012 pág. 91), estas imágenes son vitales en el diagnóstico y exploración médico, cuando se busca un método de mínima molestia que evite daños colaterales a pacientes.

En comparación con otras técnicas de imagen existentes, la imagen fotoacústica proporciona alta resolución, gran profundidad de penetración y excelente contraste óptico simultáneamente. (Yang, Xu, et al., 2022, pág. 2)

El uso de sensores de ultrasonido ha sido de gran utilidad en la obtención de este tipo de imágenes. Dichos sensores se basan principalmente en el efecto piezoeléctrico que muestra deficiencias como el tamaño que deriva directamente de los elementos piezoeléctricos usados, por otro lado, los sensores ultrasónicos piezoeléctricos suelen tener un ancho de banda de respuesta estrecho y por lo tanto impiden una representación fiel de la onda acústica. (Yang, Li, et al., 2022 págs. 1-3 ) Además, los sensores piezoeléctricos son sensibles a las interferencias electromagnéticas (EMI), por lo que no funcionan en entornos extremos con fuertes interferencias electromagnéticas. (Yang, Li, et al. 2022)

Con el afán de superar estas limitaciones se ha incrementado el desarrollo de sensores ópticos, que permitan trabajar en un gran ancho de banda y de bajo costo. que constituyen una alternativa competitiva debido a las ventajas que ofrece de tamaño reducido, alta sensibilidad y excelente inmunidad a las interferencias. (Yang, Li, et al. 2022)

### ***1.3.2 Justificación practica***

Un sensor óptico es un dispositivo capaz de transformar la variación de uno o varios parámetros de interés en la modificación de una o más propiedades de la luz que se propaga por la fibra, La luz es detectada y procesada con el objeto de obtener el valor del parámetro deseado. (Mesa, 2018 pág. 23).

El proceso de desarrollo del proyecto de Integración curricular se realizará como sigue: Primero, se realizará la recolección de datos, así como el análisis de la documentación relacionada a los sensores ópticos de páginas confiables como artículos científicos o tesis, así como el software Fimmwave, centrándose en el diseño de sensores.

En el segundo lugar tenemos la delimitación de parámetros necesarios para el diseño del sensor óptico fotoacústico es decir la sección monomodo, y la cubierta de un extremo de la sección (fibra óptica), en las que se ingresaran valores del ancho de Core, índice de refracción, longitud de onda, y más. Luego se colocará una sección de acople entre ambas secciones que permitirá la transición de la propagación de la luz; además de corregir factores como el acoplamiento de ser el caso.

El tercer paso consiste en la experimentación o simulación en la que mediante el software de propagación de la luz a través del core para identificar el comportamiento de la potencia que atraviesa el sensor.

Finalmente, se realizará la recopilación de los resultados de las simulaciones para determinar el comportamiento del sensor y su funcionamiento en la ventana de los 1550 nm.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Fotoacústica

##### 2.1.1 Efecto fotoacústico

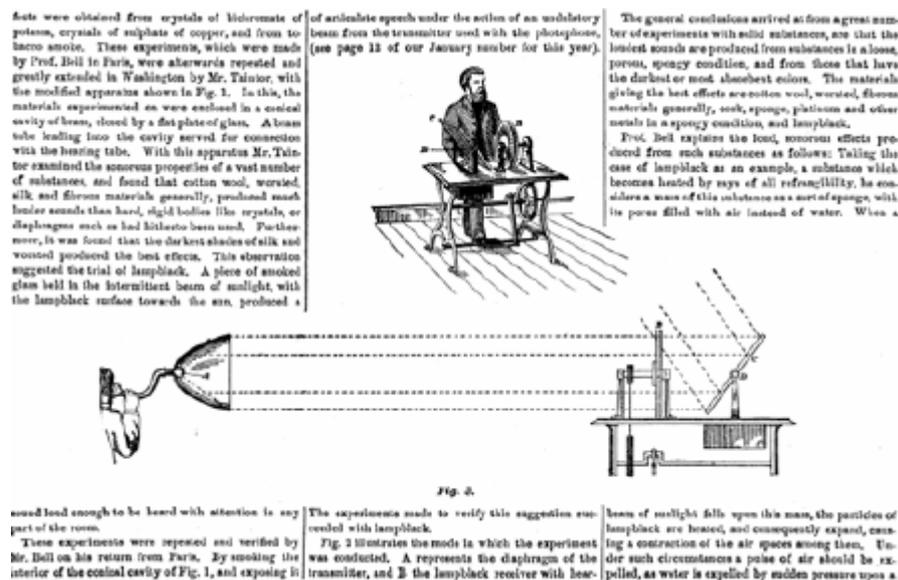
El efecto fotoacústico también conocido como optoacústico se refiere a la generación de ondas acústicas causadas por la absorción de ondas electromagnéticas moduladas por algún tipo de material. Es una técnica que combina aspectos de la acústica y la óptica. Se le conoce como una extensión del efecto fototérmico, en el que se altera el estado térmico de una muestra cuando la luz incide sobre ella. Siendo más específico, el efecto fotoacústico explica la conversión de la luz en calor para luego convertirlo en sonido como producto de la absorción de luz. (Huseyin y Baki, 2023 págs. 2-4). En la Ilustración 2-1 se muestra un diagrama simple del proceso del efecto fotoacústico.



**Ilustración 2-1:** Etapas del proceso del efecto fotoacústico

Fuente: (Huyesin y Baki, 2023)

En 1880 Alexander Graham Bell inventor del teléfono, descubrió el efecto fotoacústico usando su espectrófono para escuchar el sonido que se produce debido a la absorción óptica de la luz solar en diferentes materiales a diferentes longitudes de onda. Luego del éxito del uso de este efecto en muestras gaseosas, en 1976, Rosencwaig y Gersho modelaron la aplicación del efecto fotoacústico en sólidos por primera vez usando un sistema de micrófono de gas. Simplificaron la señal a una dimensión y fue interpretada mediante el acoplamiento entre la conducción de calor y la generación de ondas de presión dentro de una célula fotoacústica herméticamente sellada (Musdal y Kurt, 2021 págs. 1-2).



## Ilustración 2-2: Publicación de la época: Esquema del dispositivo con el que Bell descubrió el Efecto fotoacústico

Fuente: (Marín, 2008)

Alexander Graham Bell a través de sus experimentos descubrió que una luz brillante intermitente podría calentar materiales capaces de absorber luz óptica encontrando que dicho calentamiento provocaba una expansión en el material generando a su vez ondas vibratorias que eran audibles. La aplicación más actual de este efecto es la generación de imágenes médicas de cromóforos biológicos que se encuentran en los tejidos orgánicos, los cuales absorben energía luminosa lo que resulta en la producción de transitorios fotoacústicos. Esta aplicación es conocida como imagen fotoacústica la que, en otras palabras, es una forma de imagen biomédica que está en constante desarrollo gracias a la cual se pueden obtener imágenes de los absorbentes ópticos del tejido a través de detectores acústicos es decir; se tiene una entrada de luz y una salida de sonido (Bayer et al. 2012 págs. 15-23) .

Aunque el efecto fotoacústico fue descrito por Graham Bell hace un siglo como la conversión de energía óptica en ondas presión audibles, su investigación avanzó muy poco, no fue sino hasta la

invención del láser que se mejoró la producción de señales de manera muy notoria. Con el tiempo, la fotoacústica ganó popularidad, inicialmente en la espectroscopia de gases y luego en aplicaciones biomédicas.(Steinberg et al., 2019 págs. 77-98).

A lo largo de los años se han utilizado diversos métodos de detección para captar las ondas fotoacústicas: entre los que se encuentran, diapasones de cuarzo, micrófono de membrana en célula resonante, sensores acústicos en voladizo y en puente para detectores miniaturizados. Además, se han realizado propuestas de diferentes diseños especiales de sensores que permitan optimizar el rendimiento, entre los que se encuentra el uso de cavidades resonantes ópticas para refinar la interacción entre luz y gas.(Huseyin y Baki, 2023 págs. 3-7)

Las aplicaciones principales del efecto fotoacústico son dos. La primera es la espectroscopia fotoacústica la segunda es la imagen fotoacústica. La espectroscopia fotoacústica estudia las ondas de presión resultante de la absorción de la luz en una muestra de gas mientras la imagen acústica es una forma de imagen de tejido fotografiado que muestra el contraste de la imagen en base al coeficiente de absorción óptica del mismo. (Huseyin y Baki, 2023 págs. 5-8)

#### 2.1.1.1 Ecuación de la onda de presión del efecto fotoacústico

El proceso de generación de una onda fotoacústica se detalla de la siguiente manera, Pulsos de luz son enviado al tejido biológico este absorbe la luz convirtiendo la energía en calor lo que provoca un aumento inicial de la presión a causa de la presión termoelástica. Esa presión inicial es detectada como una señal fotoacústica por un transductor. La ecuación que detalla el proceso se expresa a continuación:

$$\left[ \nabla^2 - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] p(\vec{r}, t) = - \frac{\beta}{C_p} \frac{\partial H(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (1)$$

En la que según (Huseyin y Baki, 2023 pág. 8),  $C_s$  es la velocidad del sonido,  $\beta$  es el coeficiente de expansión terma,  $C_p$  corresponde al calor específico,  $H$  es la energía por unidad de volumen y tiempo depositado por el haz de radiación óptica, y  $p(\vec{r}, t)$  es la presión de onda acústica en función del espacio y tiempo.

Teniendo como base la ecuación (1), el calentamiento invariante en el tiempo no llega a producir ondas de presión fotoacústicas. Al cumplirse limitaciones térmicas y de tensión, dicha expansión térmica resulta en un aumento de presión ( $p_0$ ) que se puede expresar con la ecuación (2):

$$p_0 = \Gamma \cdot \mu_a \cdot F \quad (2)$$

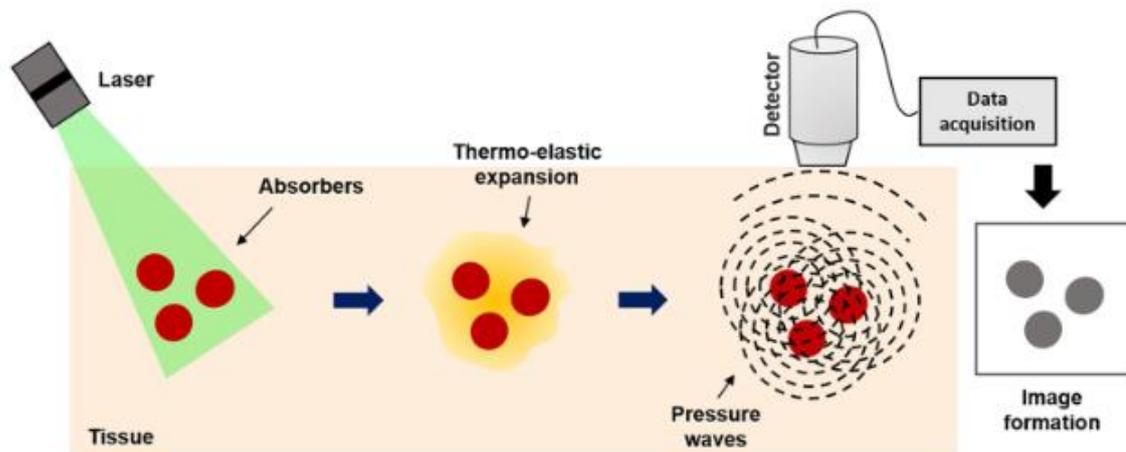
Donde  $p_0$  es el incremento inicial de presión,  $\mu_a$  el coeficiente de absorción ( $cm^{-1}$ ),  $\Gamma = \beta v s^2 / C_p$  corresponde al coeficiente de Grüneisen que representa las propiedades térmicas y mecánicas del tejido y  $F$  representa el flujo de energía irradiada ( $J/(cm^2)$ ). (Hosseinaee et al., 2020 págs. 2-3)

### 2.1.2 Imagen fotoacústica

Según (Jiang et al., 2023 pág. 2) la imagen fotoacústica es una técnica que aprovecha los beneficios duales del alto contraste óptico y la alta resolución espacial en tejidos con dispersión profunda, superando de esa forma el límite de difusión óptica al convertir la luz en sonido. Estas imágenes también se conocen como imágenes optoacústicas o termoacústicas. Se denominan termoacústicas cuando se la radiación electromagnética en la gama de radiofrecuencia y microondas es utilizada. (Tan, 2018 págs. 29-37).

De forma general, al irradiar fotones de luz sobre tejidos biológicos, en función de la longitud de onda de la luz, los fotones son capaces de penetrar hasta cierta profundidad. Una vez dentro del tejido los fotones se dispersan y son absorbidos por moléculas que absorben la luz, a las que se conocen como cromóforos. La expansión termoelástica genera presión que es causada debido al aumento transitorio de la temperatura local inducida por la energía óptica absorbida. (Hosseinaee et al., 2020 págs. 2-3).

En la Ilustración 2-3 se muestra un esquema simple de la generación de imágenes fotoacústicas.



**Ilustración 2-3:** Principio general de las imágenes fotoacústicas.

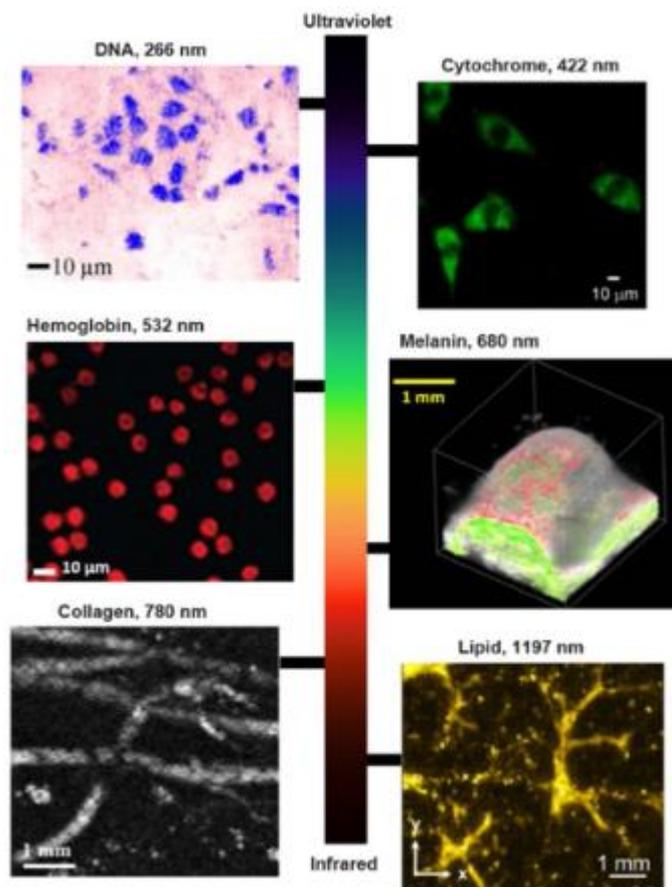
Fuente: (Hosseinaee et al., 2020)

Las ondas de presión generadas por este efecto se pueden captar mediante el uso de transductores ultrasónicos ubicados en la superficie del tejido lo que hace de la imagen fotoacústica una modalidad de imagen no ionizante y no invasiva con una resolución de profundidad del tejido considerable, que puede ser comparable a la obtenida por ultrasonidos. La obtención de imágenes fotoacústicas es un método derivado del contraste de imagen del coeficiente de la absorción óptica

del tejido, debido a que parámetros fisiológicos como la melanina, hemoglobina, agua pueden ser revelados por la absorción óptica.

Existen varias aplicaciones de esta técnica entre los que encontramos; obtención de imágenes de melanomas, obtención de imágenes in vivo de tumores y angiogénesis, obtención de imágenes cerebrales, concentración total de hemoglobina y saturación de oxígeno de la misma, obtención de imágenes del cerebro cáncer de mama, lesiones cutáneas, psoriasis, entre otros.

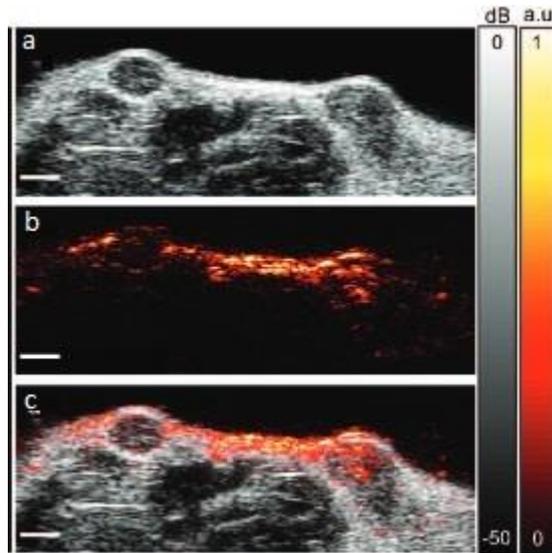
A continuación, en las Ilustraciones 2-4 a 2-7 se muestran algunos ejemplos de las aplicaciones de las imágenes fotoacústicas.



**Ilustración 2-4:** Imágenes fotoacústicas de diferentes tejidos a diferentes longitudes de onda  
**Fuente:** (Hosseinaee et al., 2020)

La Ilustración 2-4 refleja diferentes tejidos obtenidos mediante la imagen fotoacústica, como se ha descrito anteriormente los principales actores de la imagen fotoacústica sobre el que se puede trabajar en cuerpos biológicos son los cromóforos, en el caso de animales o personas los más conocidos son la hemoglobina, melanina, agua, colágeno, entre otros. Se observa las diferentes longitudes de onda (de arriba hacia abajo) células del intestino delgado de ratón con contraste de ADN a 266nm, citoplasma de fibroblastos con contraste de citocromo a 422 nm, frotis de sangre de ratón con contraste de hemoglobina a 532nm, tumor expresando tirosinasa con contraste de

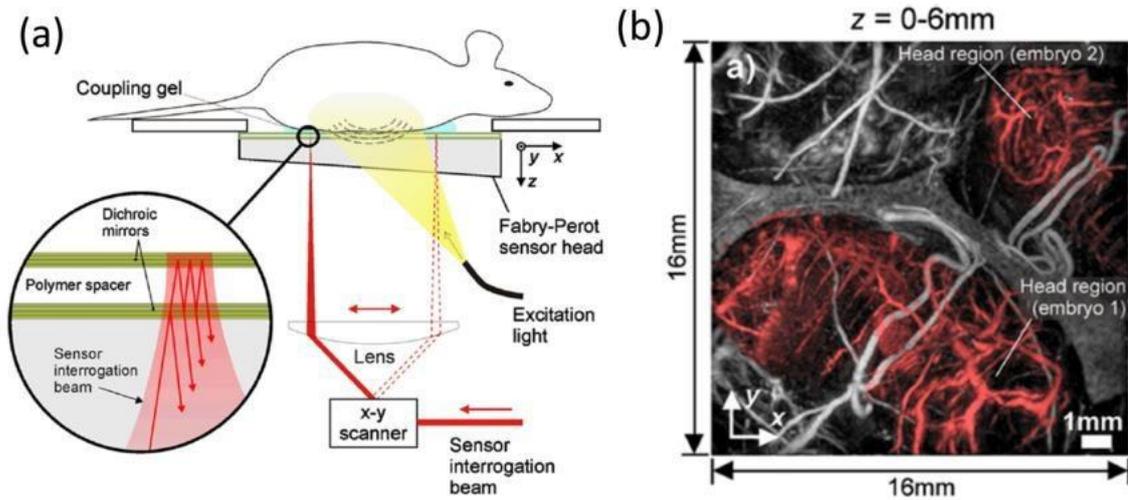
melanina a 680 nm, pata de un ratón con la piel removida y contraste de colágeno a 780nm, grasa intramuscular con contraste de lípidos a 1197 nm. Es evidente como la calidad de la imagen mejora conforme la longitud de onda incrementa.



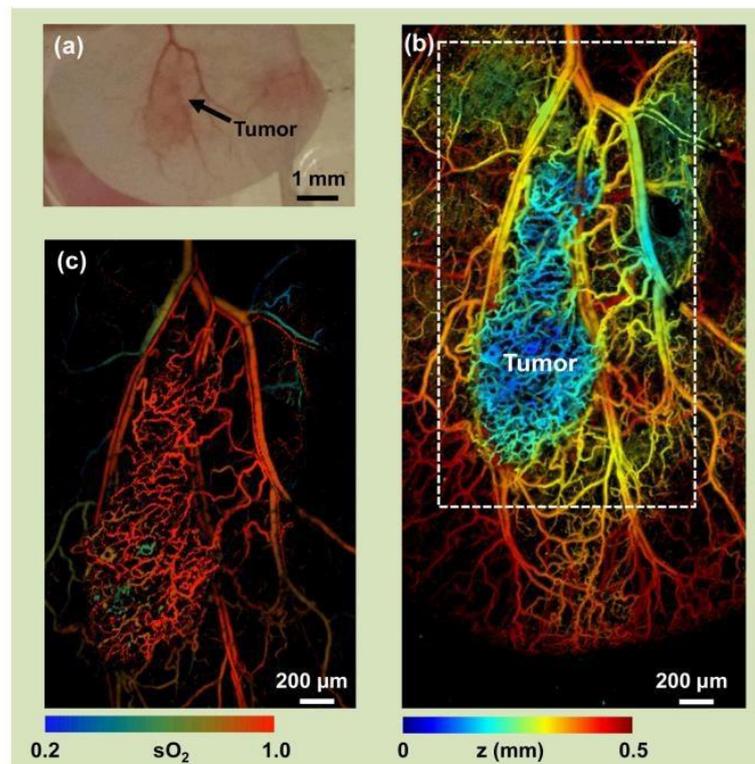
**Ilustración 2-5:** Comparativa imágenes de ultrasonido y fotoacústica  
**Fuente:** (Bayer, et al., 2012)

En la Ilustración 2-5 se observa una comparativa entre la calidad de imagen obtenida entre un ultrasonido y una fotoacústica, en el ítem a) se puede ver una imagen de ultrasonido que muestra dos tumores hipocóicos en el que se observa la baja calidad de esta haciendo difícil la diferenciación entre el tejido normal y el tejido tumoral, en la imagen b) se ve una imagen fotoacústica a una longitud de onda láser de 850 nm. en la que se observa de forma más clara el tejido normal debido a la reacción que tiene con la luz incidente, finalmente en el ítem c) muestra la superposición entre la imagen fotoacústica y de ultrasonido en la que se hace evidente la diferenciación de los tejidos correspondientes al tejido normal y el tejido tumoral expuesto a las diferentes técnicas de imagen para diagnóstico médico.

La Ilustración 2-6 muestra la imagen de un embrión de ratón obtenida mediante tomografía computarizada fotoacústica, en el ítem a) se observa como la técnica es mínimamente invasiva para el cuerpo del animal además de mostrar un esquema simple de cómo funciona esta técnica señalando las partes principales del sistema de obtención de imágenes. En el ítem b) se observa los embriones de ratón con una diferenciación bastante notoria respecto al tejido de la madre, además el detalle de cada embrión resulta tener bastante detalle a pesar de la baja escala que muestra.



**Ilustración 2-6:** Vista de un embrión de ratón mediante tomografía computarizada fotoacústica  
Fuente: (Huseyin y Baki, 2023)



**Ilustración 2-7:** Tumor en oreja de ratón mediante imágenes fotoacústicas  
Fuente: (Huseyin y Baki, 2023)

En la Ilustración 2-7 se puede observar como la imagen fotoacústica es capaz de mostrar y diferenciar los diferentes tejidos del ser vivo haciendo más fácil la identificación de tejido extraño al cuerpo como en este caso es el tejido tumeroso.

La técnica de imagen resulta ser capaz de distinguir entre los tejidos sanos y enfermos con una resolución mejor respecto a otras modalidades de imagen. (Huseyin y Baki, 2023 págs. 10-14)

## 2.2 Fibra óptica

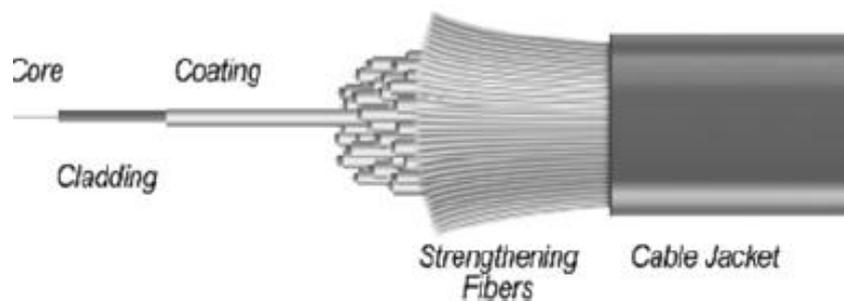
### 2.2.1 Definición

Según (Popoca, 2018), la fibra óptica es una guía de onda circular constituida por una fina hebra transparente que puede ser hecha de plástico o silicio fundido, guía a la luz de un extremo del cable hasta el otro en forma de pulsos a lo largo de distancias cortas como un metro hasta alcanzar varios kilómetros por lo que es ampliamente utilizado en aplicaciones de telecomunicaciones pues permiten enviar grandes cantidades de datos a través de una larga distancia, otra de las razones por las que se prefiere este medio por sus características que incluyen la baja interacción con el medio y alta resistencia. El material usado para su construcción debe ser lo más puro posible para evitar la degradación de la señal debido a impurezas intrínsecas del material.

### 2.2.2 Funcionamiento

El funcionamiento de la fibra óptica se basa en el principio de la refracción interna lo que hace que el haz de luz se mantenga dentro de la fibra por lo que su diseño debe cumplir con los parámetros necesarios para esto, además de cumplir con el propósito de proteger al filamento de la fibra del ambiente externo.

La fibra está constituida principalmente de tres partes: el núcleo, revestimiento y recubrimiento, como se muestra en la Ilustración 2-8.



**Ilustración 2-8:** Estructura de una fibra óptica

Fuente: (Hisham, 2018)

- El núcleo que es la parte más central y pequeña transporta la luz.
- El revestimiento está constituido por un material dieléctrico que tenga un índice de refracción menor al del material del núcleo, sirve para disminuir las pérdidas de luz, dispersión en la superficie del núcleo, proteger a la fibra de contaminantes además de brindarle resistencia mecánica.(Hisham, 2018 pág. 3).

- El revestimiento es la capa más externa de la fibra óptica, conocido también como buffer, se encarga de absorber golpes, muescas, raspaduras además de la humedad que podría llegar a afectar al revestimiento (Ramos, 2019 pág.33).

El número de recubrimientos depende de las aplicaciones a las que esté destinada la fibra, pues de esto depende en primera instancia la resistencia de la fibra óptica al medio en el que se va a instalar, brindando protección contra factores como el aplastamiento, humedad, etc. Sirve además como medio de agrupación de varios hilos de fibra óptica.

### **2.2.3 Ventajas de la fibra óptica**

Las principales ventajas que tiene la fibra óptica son las siguientes según Prieto citado por (Ramos 2019):

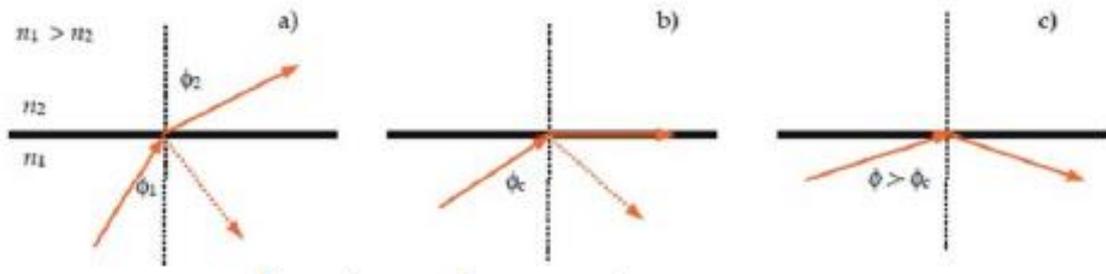
- Soporta un gran ancho de banda por lo que permite una transmisión a altas velocidades.
- Al estar constituida de plástico o vidrio que no son conductores se elimina la diafonía también conocida como crosstalk.
- Son inmunes al ruido producido por rayos, motores eléctricos, etc. (interferencia por estática)
- No radian energía por lo que no producen ruido electromagnético.
- Al transportar luz en lugar de señales eléctricas son más seguras en ambientes que presenten líquidos volátiles o gases.
- Los costos de uso se pueden ver disminuidos debido al bajo costo de materiales de instalación u equipos de amplificación o repetidores.

### **2.2.4 Principios de funcionamiento**

#### **2.2.4.1 Propagación Luminosa**

La transmisión de la luz a través de la fibra se basa en el principio de refracción interna total, que relaciona el ángulo de luz incidente entre dos materiales de dos materiales con índices de refracción diferentes como se muestra en la Ilustración 2-9. Dicho principio dicta que cuando la luz se propaga desde un material con un índice de refracción alto,  $n_1$ , hacia otro con índice de refracción bajo,  $n_2$ , el haz transmitido siempre aparecerá en un ángulo  $\varphi_2$  siendo mayor que el ángulo incidente  $\varphi_1$ . Al aumentar el ángulo  $\varphi_1$  se llega a que el ángulo crítico,  $\varphi_2$  sea igual a  $90^\circ$  valor del ángulo conocido como ángulo crítico en el cual se produce la reflexión interna total, sin embargo, si el ángulo de incidencia del rayo es mayor que el ángulo crítico la reflexión no se

producirá y la luz se verá completamente reflejada cómo se muestra en el en la Ilustración 2-9.(Hisham, 2018 pág. 4).

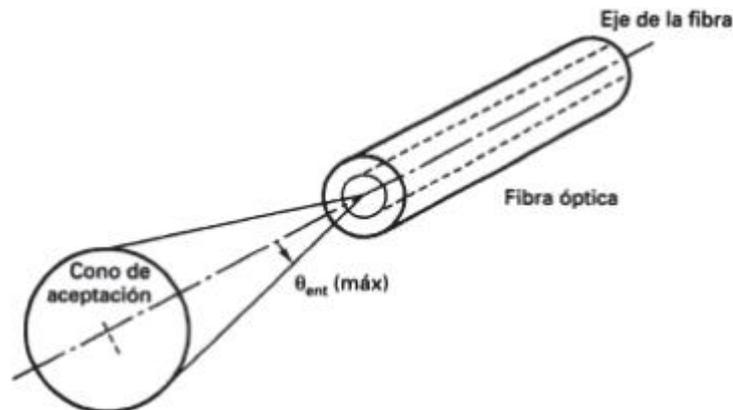


**Ilustración 2-9:** Reflexión interna total y ángulo crítico  
Fuente: (Hisham, 2018)

### 2.2.5 Apertura numérica

Según (Cortez, 2016 págs. 23), la apertura numérica se refiere a la cantidad de luz que ingresa a la fibra óptica. Dicha cantidad de luz dependerá del tamaño de la apertura numérica, es decir, mientras mayor sea más luz será recogida por la fibra de la fuente transmisora.

La Ilustración 2-10 muestra la apertura numérica en una fibra óptica.



**Ilustración 2-10:** Apertura numérica de una fibra óptica  
Fuente:(Cortez, 2016)

### 2.2.6 Atenuación de señal

Se entiende como el deterioro de la potencia de la señal conforme se propaga. Dicha disminución puede darse a causa de las características propias del material que compone la fibra óptica o por las características de la guía de onda. La atenuación limita las capacidades de velocidades de transmisión que pueden ser utilizadas por las fibras ópticas, limita la potencia óptica que se transmite lo a su vez establece las distancias máximas de transmisión en un tramo de fibra.

(Popoca 2018). La ecuación (3) muestra la relación de atenuación existente entre la potencia y distancia recorrida por la fibra óptica.

$$a(\lambda) = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_e}{P_s} \text{ (dB/km)} \quad (3)$$

Donde:

$P_s$ : Potencia luminosa a la salida  
 $P_e$ : Potencia luminosa a la entrada  
L: Longitud de tramo de fibra óptica

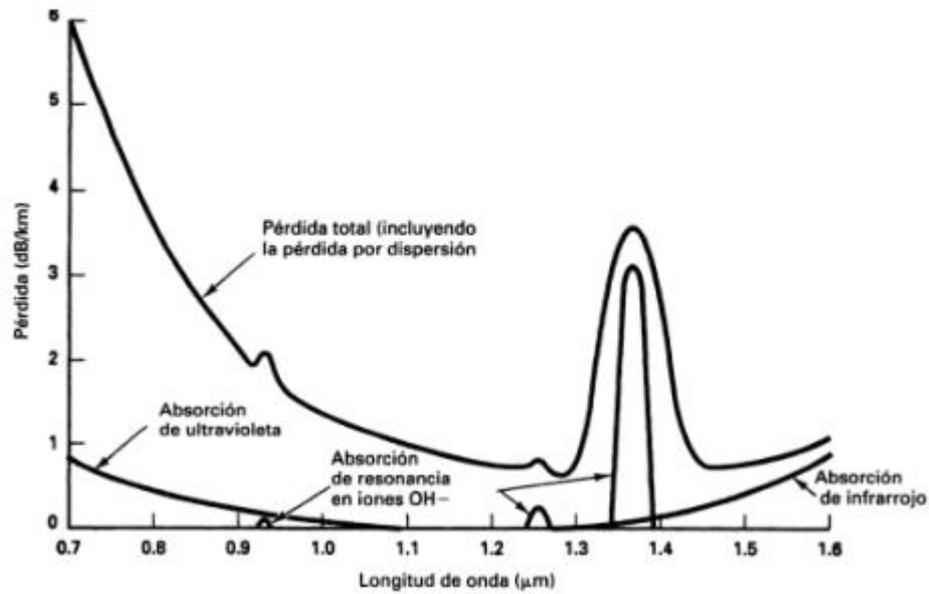
Según (Popoca 2018), la atenuación puede clasificarse de la forma que sigue:

- Pérdidas intrínsecas: Son pérdidas propias de la fibra debido al material con el que están hechas o su construcción por lo que no pueden ser eliminadas. Entre estas podemos encontrar:
  - Absorción
  - Dispersión por efecto Rayleigh
  - Desajuste de la apertura numérica
  - Desajuste del diámetro del núcleo
- Pérdidas extrínsecas: Son pérdidas que no son propias de la fibra y que dependen del proceso de producción. Entre las cuales se puede enlistar:
  - Impurezas (Hidrogeno, iones metálicos)
  - Irregularidades geométricas
  - Macro curvaturas
  - Micro curvaturas

#### 2.2.6.1 Pérdidas intrínsecas

##### 2.2.6.1.1 Pérdidas por absorción

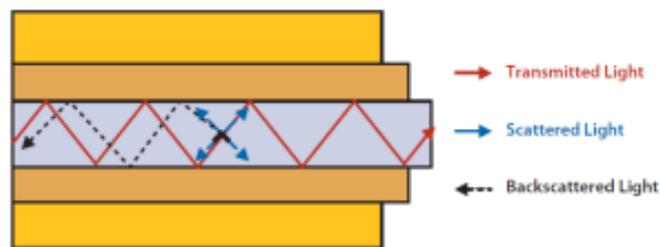
Las perdidas por absorción se deben a que las impurezas de las fibras absorben la luz y la convierten en calor, en la Ilustración 2-11 se muestran las pérdidas por absorción totales en la fibra óptica en función de la longitud de onda.(Cortez, 2016 pág.23).



**Ilustración 2-11:** Pérdidas por absorción  
Fuente: (Cortez, 2016)

#### 2.2.6.1.2 Dispersión por Scattering de Rayleigh

Según Galeano citado por (Benavides, 2016 pág.62), son anomalías físicas que provocan el Scattering de Rayleigh entre las que se citan las irregularidades submicroscópicas u obstrucciones las cuales generan cambios en la densidad del material que a su vez provocan alteraciones en el índice de refracción. Estas anomalías se encuentran embebidas en la estructura del material del que está constituido la fibra debido a imperfecciones en las técnicas de fabricación generando difracción causando dispersión de la luz que se dirige hacia la cubierta convirtiéndose en una pérdida como se evidencia en la Ilustración 2-12:



**Ilustración 2-12:** Scattering de Rayleigh en fibra óptica  
Fuente:(Benavides, 2016)

Generalmente estas pérdidas dependen del tipo de material con el que está diseñada la fibra óptica y la longitud de onda a la que trabaja como ejemplo se muestra la Tabla 2-1:

**Tabla 2-1:** Perdidas por Scattering de Rayleigh

Tipo de material	Perdidas por Scattering de Rayleigh (dB/Km) a 850 nm
Silice	1.2
Silicato potásico	0.7
Borosilicato sódico	2.3
Silicato de sodio y calcio	0.8

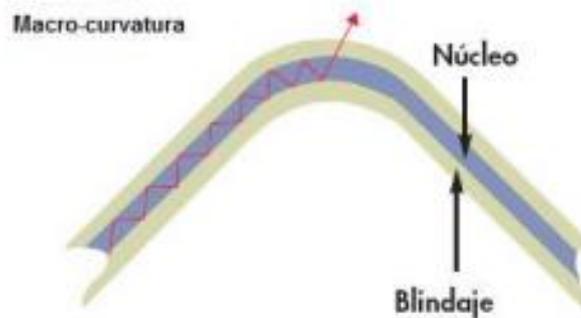
Fuente:(Popoca, 2018)

Realizado por: (Caluña, A., 2024)

### 2.2.6.2 Pérdidas extrínsecas

#### 2.2.6.2.1 Macro curvaturas

En la Ilustración 2-13 se muestra que las curvaturas producidas por bobinado, tendidos, entre otros producen atenuaciones adicionales debido al cambio del ángulo de incidencia en la frontera Core-revestimiento causado por las curvaturas producidas, en este caso el principio de reflexión interna total produciendo en consecuencia, fuga de la luz hacia el revestimiento.(Benavides, 2016 págs.70-74).

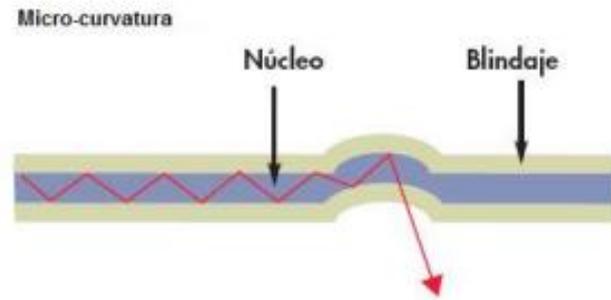


**Ilustración 2-13:** Macro curvatura en una fibra óptica

Fuente: (Benavides, 2016)

#### 2.2.6.2.2 Micro curvaturas

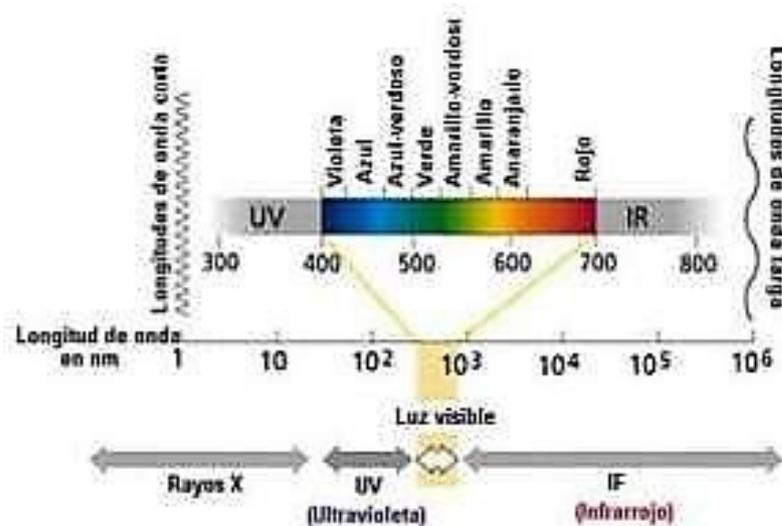
La Ilustración 2-14 muestra como los errores o imperfecciones durante el proceso de fabricación de la fibra pueden producir irregularidades entre el núcleo y la cubierta de la fibra, variaciones en su diámetro y principalmente tortuosidades en su eje que causan las denominadas pérdidas por micro curvaturas.



**Ilustración 2-14:** Microcurvatura en la fibra óptica  
Fuente: (Benavides, 2016)

### 2.2.7 Ventanas de operación

Las fibras ópticas deben sus características de transmisión a la longitud de onda con la que transporta la información, siendo esta la distancia que cubre un ciclo de una onda electromagnética. En la Ilustración 2-15 se muestra el espectro de la longitud de onda electromagnético.

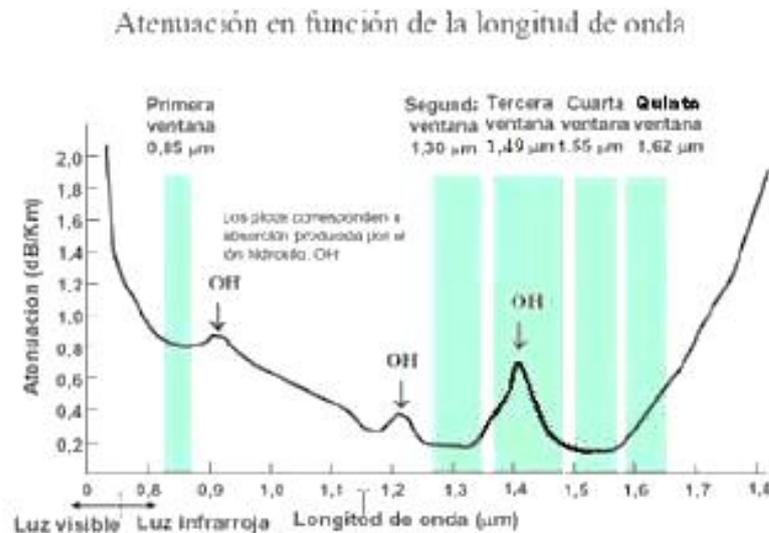


**Ilustración 2-15:** Espectro electromagnético

Fuente:(Bautista et al., 2019)

A determinadas frecuencias se ha demostrado que, las ondas pasarán a través de algunos materiales con mayor facilidad, para las fibras ópticas si se realiza una modulación a ciertas frecuencias los efectos de dispersión y las pérdidas a causa de la propagación llegan a cancelarse unas con otras creando ventanas de operación.

Una ventana de transmisión es la zona en la que la atenuación en función de la longitud de onda es menor y cercana a mantenerse constante como se ve en la Ilustración 2-16.



**Ilustración 2-16:** Ventanas de trabajo fibra óptica

**Fuente:** (Acosta, 2012)

Las ventanas de trabajo típicas de la fibra óptica son los 850, 1310 y 1550 nm de longitud de onda que corresponde a la luz infrarroja que tendrá una menor atenuación contrario a la luz visible como menciona Prieto citado por (Ramos, 2019 pag.32).

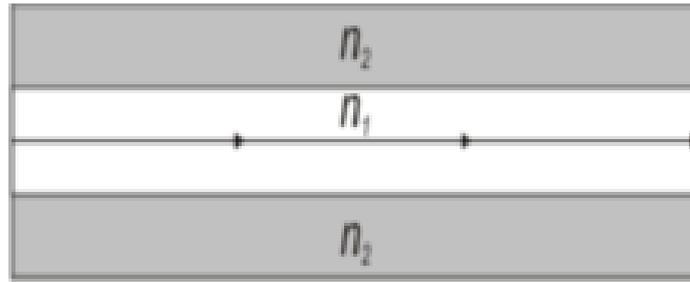
### 2.2.8 Clasificación de la fibra óptica

Existen diferentes formas de clasificar las estructuras de la fibra óptica, la más usada es la clasificación por los modos de transmisión en la que se encuentran la fibra monomodo y la fibra multimodo, sin embargo, también se puede clasificar por los materiales que la conforman y por las dimensiones del núcleo y revestimiento.

#### 2.2.8.1 Por el modo de Transmisión

##### 2.2.8.1.1 Fibra monomodo

La fibra monomodo como se ve en la Ilustración 2-17 tienen un solo modo de propagación de la luz, por lo que esta toma un único camino a través del núcleo. Tienen la característica de presentar un gran ancho de banda pero tienen la dificultad de inyectar la señal luminosa. (Popoca 2018).



**Ilustración 2-17:** Trayectoria de la luz en fibra monomodo

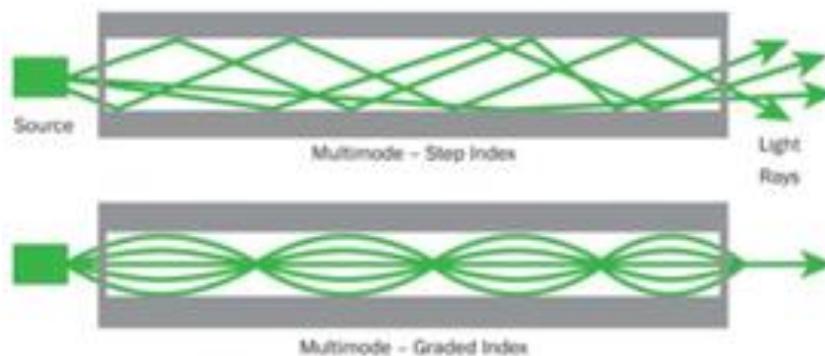
Fuente: (Popoca, 2018)

El elevado ancho de banda de este tipo de fibras, junto con sus bajas pérdidas y su dispersión modal inexistente, la convierten en una fibra perfecta para enlaces de larga distancia según Prieto citado por (Ramos, 2019 pág.35).

#### 2.2.8.1.2 Fibra multimodo

Las fibras multimodo (ver Ilustración 2-18) son aquellas que a través de su núcleo pueden transmitir varios rayos de luz, es decir dichos rayos pueden tomar más de un camino a lo largo de la fibra. (Popoca 2018). Esta variedad de caminos también son llamados modos por lo que se puede transportar mayor cantidad de información, pero es más susceptible a tener atenuaciones por distancia o dispersión modal, debido a estas características no son aptas para cubrir grandes distancias, pero brindan altas tasas de transferencia de información.

Se pueden encontrar dos tipos de esta fibra óptica referidos al índice de refracción interno. La fibra de índice escalonado en la que el núcleo en su totalidad está constituido de un material que tiene el mismo índice de refracción, por lo que los haces de luz que viajan con diferentes trayectorias provoca dispersión. Por otro lado, la fibra de índice gradual está formada por diferentes índices de refracción concéntricos al núcleo lo que garantiza la coherencia entre emisor y receptor. Hay que recalcar que la fibra de índice escalonado tiene un mejor desempeño en cuanto a ancho de banda y atenuación se refiere. (Valle, 2021 págs.26-28). En la Ilustración 2-18 se muestran las fibras de índice escalonado y gradual.



**Ilustración 2-18:** Fibras multimodo, índice escalonado y gradual

Fuente: (Valle, 2021)

Según Prieto citado por (Ramos, 2019 pág.34) el hecho de que transmitan varios modos simultáneamente, hace que este tipo de fibras posean una dispersión particular llamada dispersión intermodal. Se produce debido a que los haces de luz recorren distancias diferentes y no llegan a su destino al mismo tiempo.

En la Tabla 2-2 se muestra una relación comparativa entre los diferentes tipos de fibra óptica según el modo de transmisión según sus las características que muestran ventajas o desventajas.

**Tabla 2-2:** Comparación de modos de transmisión

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
MONOMODO	-Dispersión de pulso mínima -Mayor ancho de banda -mayor velocidad de transmisión de información	-Núcleo muy pequeño, difícil de acoplar la luz. -Menor apertura numérica. -Fuente de luz y dispositivos de empalme costosos
MULTIMODO INDICE ESCALÓN	-Bajos costos y fáciles de fabricar -Fácil acoplamiento de la fuente de emisión de luz -Apertura numérica relativamente grande	-Alta dispersión de pulso -Bajo ancho de banda -Baja velocidad de transmisión
MULTIMODO INDICE GRADUAL	No existen ventajas y desventajas sobresalientes. Este tipo de fibra se considera una fibra intermedia comparada con los otros tipos	

Fuente: Cortez, 2016.

#### 2.2.8.2 *Por los materiales que conforman el núcleo y revestimiento*

Se conocen en esencia, tres combinaciones de materiales que conforman las fibras ópticas que son clasificadas en la Tabla 2-3:

**Tabla 2-3:** Tipos de fibra según los materiales que la componen

NUCLEO	REVESTIMIENTO	CATEGORIA
Vidrio	Vidrio	A1: Índice gradual A2: Índice escalón
Vidrio	Plástico	A3
Plástico	Plástico	A4

Fuente: Cortez, 2016

El material de diseño de las fibras monomodo siempre es de núcleo y revestimiento de vidrio, son llamadas SCS (sílice-cubierta de sílice) las cuales ofrecen las mejores características de propagación y poca atenuación, además, mecánicamente resultan ser más fuertes, sin embargo, son las más susceptibles a tener altos valores de atenuación al ser expuestas a radiación. Por otro lado, las fibras de plástico son flexibles y por tanto más resistentes que el vidrio, más livianas y menos costosas que el vidrio. Su principal desventaja es que presentan altos niveles de atenuación.(Cortez, 2016 pág.24).

### 2.2.8.3 Por las dimensiones de núcleo y revestimiento

Las principales fibras ópticas usadas en las telecomunicaciones clasificadas en función a los diámetros de su núcleo y protección se muestran en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4:** Diámetros de fibras ópticas comunes: Núcleo, revestimiento, recubrimiento y protección

CLASE	NUCLEO	REVESTIMIENTO	RECUBRIMIENTO	TUBO O PROTECCIÓN
I	8 a 10	125	250 o 500	900 o 2000
II	50	125	250 o 500	900 o 2000
III	62,5	125	250 o 500	900 o 2000
IV	85	125	250 o 500	900 o 2000
V	100	140	250 o 500	900 o 2000

Fuente: Cortez, 2016

Las fibras clase I son fibras monomodo, las clases de la II a la IV se consideran multimodo. Las características de cada clase se muestran en una comparación en la Tabla 2-5.

**Tabla 2-5:** Comparativa de clases de fibras ópticas

CLASE	NÚCLEO	AN	PERDIDAS	ANCHO DE BANDA	LONGITUD DE ONDA
I	8 a 10	La más pequeña	Las más bajas	El mayor	1350-1550
II	50	Más alta	Más bajas	Más grande	850-1310
III	62,5	Media	Bajas	Medio	850-1310
IV	85	Grande	Altas	Más pequeño	850-1310

V	100	La más grande	Más altas	El más pequeño	850-1310
---	-----	---------------	-----------	----------------	----------

Fuente: Cortez ,2016

### 2.3 Sensores de fibra óptica

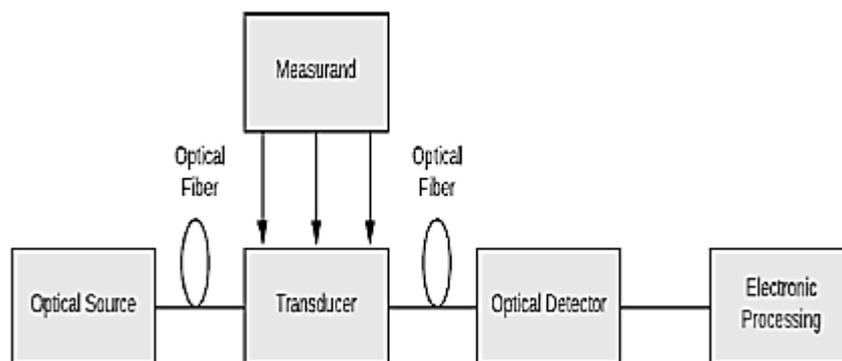
Un sensor óptico es un dispositivo que puede transformar la variación de uno o varios parámetros de interés en variaciones de una o más propiedades de la luz que viaja a lo largo de la fibra, que luego es detectada y procesada para determinar el valor del parámetro censado.(Mesa, 2018 pág.22).

Según (Dhingra et al, 2020 págs.75-77), los sensores de fibra óptica son sensores ópticos que transforman los rayos de luz en señales eléctricas. Hacen uso de la fibra óptica o un transductor externo para la detección de diferentes fenómenos, entre los que están; temperatura, presión, tensión, humedad, posición, viscosidad, intensidad de luz, nivel de líquido, etc.

Los sensores de fibra óptica detectan las propiedades de la luz como intensidad, la frecuencia, longitud de onda y la polarización que se ven afectadas por un gran número de perturbaciones. Lo que implica que las perturbaciones externas modificarán el parámetro de la fuente de luz óptica en el que se basan el principio de funcionamiento de los sensores de fibra óptica.(Eid, 2022 pág.5).

Una de las ventajas más destacables de los sensores ópticos es su tamaño reducido en comparación a otros sensores que no sean ópticos de similar sensibilidad, una cualidad de estos es la inmunidad a la interferencia electromagnética debido a que la luz que circula por una fibra hace caso omiso de cualquier tipo de interferencia electromagnética.(Pradas, 2020 págs.8-10)

En la Ilustración 2-19 Ilustración 2-19 se plasma la estructura base de un sensor de fibra óptica que es formado por 5 elementos: fuente óptica (Led o laser), la fibra óptica, elemento sensor o modulador, detector óptico (pin o APD) y al final se encuentran dispositivos de procesamiento final.



**Ilustración 2-19:** Sensor de fibra óptica

Fuente:(Dhingra et al., 2020)

El principio de funcionamiento de estos sensores parte de la conversión de una magnitud en una señal óptica para realizar una operación de detección. La fuente óptica genera una señal luminosa que viaja por la fibra pasando por el transductor. El transductor realiza la modulación (basándose en el cambio de intensidad, fase, color, estado de polarización) luego de convertir la cantidad física medida en una señal óptica. El detector óptico recoge las características de la señal recibida variada. Entonces, resulta más maleable usar un sensor de fibra óptica debido a que este ubre la diferencia de conversión entre la electrónica y la fotónica en el lugar de detección que es lo que menciona (Sabri et al., 2013 págs. 2-3) citado por (Dhingra et al., 2020 pág. 5).

### 2.3.1 Clasificación de sensores ópticos

(Eid, 2022 pág.6) clasifica los sensores ópticos en tres diferentes categorías basadas en el principio de funcionamiento, ubicación de los sensores y finalmente por su aplicación como se observa en la Tabla 2-6:

**Tabla 2-6:** Clasificación de sensores ópticos

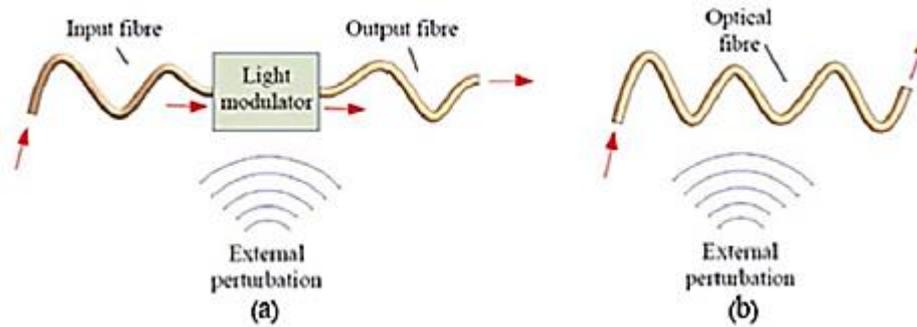
CATEGORIA	TIPOS
Localización del sensor	Intrínsecos Extrínsecos
Distribución espacial	Sensores puntuales Sensores distribuidos Sensores casi distribuidos
Principio de funcionamiento	Sensores de intensidad Sensores de fase Sensores de frecuencia/longitud de onda Sensores de polarización
Aplicación	Sensores físicos Sensores químicos

Fuente:(Eid, 2022) y (Dhingra et al., 2020)

#### 2.3.1.1 Según la localización del sensor

La división más conocida de esta clasificación es la que los divide en sensores intrínsecos (sensores internos), y sensores extrínsecos (sensores externos) como se muestra en la Ilustración 2-20, en la que el ítem 2-20 a) muestra los sensores ópticos extrínsecos debido a que usan un elemento transductor externo para llevar a cabo la detección. En este caso la fibra óptica solo es

usada como medio para llevar la señal luminosa de la fuente hacia el sensor externo, para luego, del sensor hasta el detector de luz. Es decir, se usan dos tramos de fibra para conectar el sistema. Por otro lado, en el ítem 2-20 b) se muestra un sensor intrínseco ya que la fibra se utiliza para la detección y para la transmisión de luz al usuario final.(Dhingra et al., 2020 pág. 3).



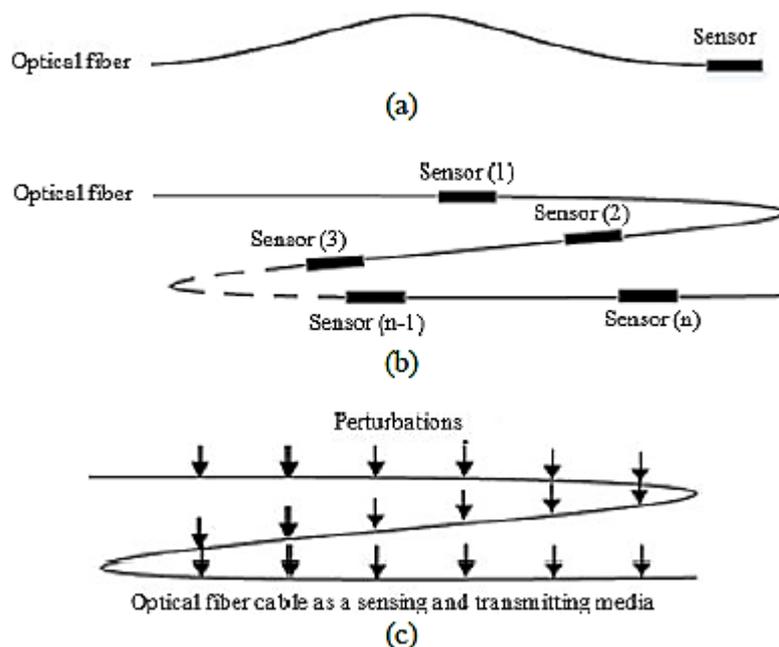
**Ilustración 2-20:** Sensores ópticos por su localización: Intrínsecos y Extrínsecos  
Fuente: (Hisham, 2018)

### 2.3.1.2 Según la distribución espacial

(Dhingra et al., 2020 pág. 2-13) los clasifica como sigue:

- a) Sensores puntuales: Usados para medir un espacio puntual único.
- b) Sensores casi-distribuidos: Presentan un número fijo de puntos a lo largo del cable de fibra óptica para el que se calcula la magnitud medida a lo largo del mismo.
- c) Sensores distribuidos: Permiten la monitorización continua y en tiempo real de los datos.

La Ilustración 2-21 muestra la clasificación de los sensores ópticos según la distribución espacial:



**Ilustración 2-21:** Tipos de distribución de sensores ópticos según la distribución  
Fuente: (Hisham, 2018)

### 2.3.1.3 Según el principio de funcionamiento

(Eid, 2022 pág.6) explica su clasificación como sigue:

- a) Basados en intensidad: Se miden las variaciones de la intensidad de la luz transmitida a través de la detección de influencias externas. Es posible usar componentes ópticos, como lentes, espejos o prismas con el fin de dirigir la luz al punto de medición que se desea.
- b) Sensor óptico por fases: Es más preciso y sensible que el de modulación de intensidad, se basa en la modulación de fase.
- c) Basados en frecuencia/longitud de onda: A través de una perturbación externa, los cambios de frecuencia o longitud de onda es detectada.
- d) Basados en polarización: Toma en cuenta los campos eléctricos y magnéticos de la luz, existen tres tipos de luz polarizada: Polarización, lineal, elíptica y circular. Sin embargo, si el campo eléctrico está en más de un plano la luz es no polarizada.

### 2.3.1.4 Según las aplicaciones

Si bien el campo de uso de los sensores ópticos se ha expandido considerablemente se citará a (Eid, 2022 págs. 5-8) que los clasifica como se muestra en la Tabla 2-7

**Tabla 2-7:** Clasificación en función de las aplicaciones

	SENSORES FÍSICOS	SENSORES QUÍMICOS	SENSORES BIOMÉDICOS
Descripción	Usados ampliamente para supervisar y controlar varios procesos industriales	Pequeños dispositivos analíticos que brindan información necesaria sobre la asistencia de algunos iones o compuestos en muestras complejas.	Dispositivos optoelectrónicos que convierten las señales biológicas en señales eléctricas medibles.
Usos	Medición de propiedades físicas como fuerza, presión, temperatura, deformación, distancia, posición, aceleración y radiación.	Usado en espectroscopía, análisis de gases y humos, contaminación atmosférica, contaminación del suelo y concentración de algún compuesto determinado como el PH.	Usados en el diagnóstico médico; medición del flujo sanguíneo, presión arterial, temperatura, nivel de oxígeno, contenido de glucosa y presión intercraneal.

Fuente: Hisham, 2018

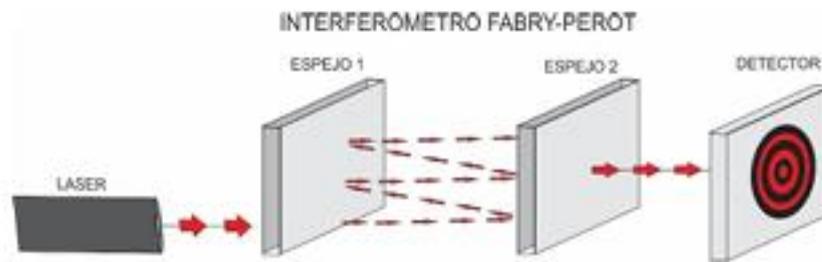
### 2.3.2 *Sensores ópticos con aplicación a la fotoacústica*

Los sensores de fibra óptica proveen una alternativa competitiva para la detección de ultrasonidos debido a las ventajas de tamaño disminuido, alta sensibilidad y excelente inmunidad a interferencias electromagnéticas (EMI). (Yang, Li, et al. 2022, pág. 3)

#### 2.3.2.1 *Sensor interferométrico Fabry-Pérot*

Cuando la señal óptica las atraviesa, ésta sufre múltiples reflexiones con diferente fase cada una. Así, se forma un conjunto de valles y picos característico de cada micro cavidad. Dicho conjunto se puede desplazar en función de la elongación aplicada, ya que esta modifica la longitud de la

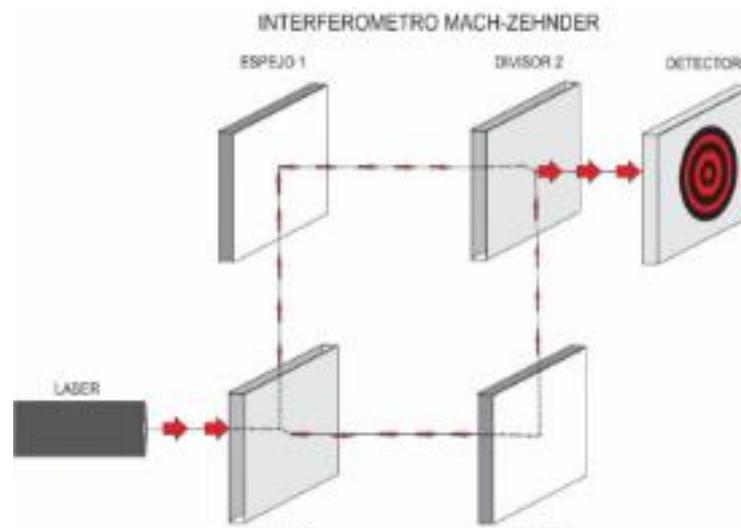
micro cavidad, de modo que se puede determinar la tensión aplicada en función del desplazamiento producido.(Pradas, 2020 pág. 26). En la Ilustración 2-22 se muestra un esquema de su estructura.



**Ilustración 2-22:** Sensor Fabry Perot  
Fuente: (Calderon, 2019)

### 2.3.2.2 Sensor interferométrico Mach-Zehnder.

Estos sensores están compuestos por una guía de onda óptica que se divide en dos ramas, una de ellas funciona como brazo de referencia y la otra, que tiene un sensor, como brazo de detección. Después, las dos ramas se vuelven a unir de forma que la diferencia de fase entre ambos brazos produce una modulación de intensidad.(Pradas, 2020 pág.27). En la Ilustración 2-23 se muestra un esquema de su funcionamiento.

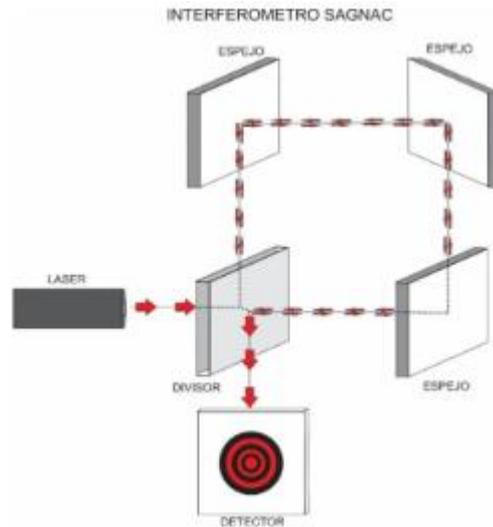


**Ilustración 2-23:** Interferómetro Mach-Zehnder  
Fuente: (Calderon, 2019)

### 2.3.2.3 El interferómetro de Sagnac

Es un dispositivo de división de amplitud muy estable. En la Ilustración 2-24 se observa su estructura. En este interferómetro, los haces de luz toman el mismo camino, pero en direcciones

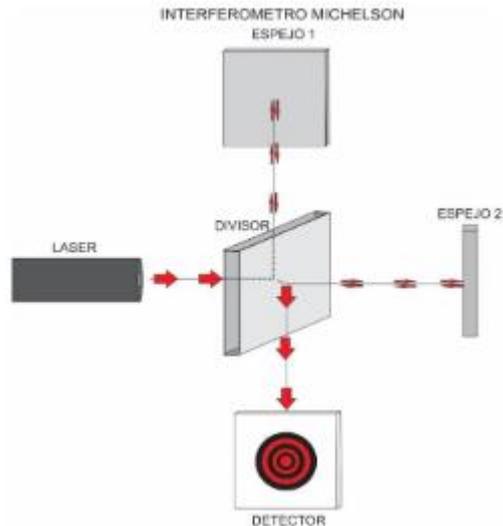
opuestas, con la característica de que estos son caminos cerrados como se puede observar en la Ilustración 2-24. Un desplazamiento o giro en alguna de las dos direcciones de los haces, producirá una diferencia en el recorrido por el camino óptico del haz, produciendo un patrón de interferencia.(Calderón, 2019 pág.23).



**Ilustración 2-24:** Interferómetro Sagnac  
Fuente: (Calderón, 2019)

#### 2.3.2.4 El interferómetro de Michelson

Es un dispositivo de división de onda. Se constituye por un divisor de haz y dos espejos reflectivos. El haz de luz se divide en dos en el divisor, viajan por caminos diferentes hasta llegar a un espejo donde se reflejan y regresan al divisor, donde un haz pasa a través del divisor hacia el detector y parte del haz que viene del segundo espejo es desviada hacia el detector en donde se unen y forman las franjas de interferencia (Calderón, 2019 pag.24). Esta configuración se puede observar en la Ilustración 2-25.



**Ilustración 2-25:** Interferómetro de Michelson

Fuente: (Calderón, 2019).

### 2.3.3 Herramientas de simulación

#### 2.3.3.1 Fimmwave

Es un software diseñado para la modelación de guías de onda en 2D y 3D, ofreciendo interfaces de usuario destinadas a facilitar la definición de diversos tipos de guías. Cuenta con varios solucionadores de modos, entre los que encontramos semianalítico, numéricos haciendo posible para el usuario seleccionar el método más eficiente y preciso para su diseño.

Ofrece tres interfaces principales para la definición de guías de onda, la RWG que es ideal para las estructuras de crecimiento epitaxial, la FWG que se encarga de los dispositivos con simetría cilíndrica, como las fibras ópticas y la interfaz MWG que es más versátil pues permite al usuario diseñar casi cualquier cosa en base a formas básicas como rectángulos y elipses, incluyendo objetos de índice graduado o fibras con agujeros.

Cada método de resolución de modos tiene sus propias ventajas y áreas de competencia. Cuenta además con MOLAB que es un escáner y buscador de modos completamente automático y robusto, que facilita la definición flexible de modos como los primeros 10 modos tipo TE con un índice efectivo inferior a 1.75'' . («Fimmwave», 2022)

##### 2.3.3.1.1 Solucionador FMM (Film Mode Matching)

Es un solucionador enteramente vectorial y semianalítico para guías de onda, se basa en el método de emparejamiento de modos de película (FMM) desarrollado por Sudbo. Casi puede identificar cualquier orden de modo, ya sea horizontal o vertical con polarización arbitraria o mixta.

Ofrece una velocidad y precisión superiores a cualquier técnica numérica dentro de su área de aplicación. Debido a eso, es la opción más usada para estructuras epitaxiales o guías de onda con grandes áreas de índice de refracción uniforme. Incluye, además, el solucionador FMM complejo que puede manejar estructuras con pérdidas metálicas y radiantes e incluye una versión para calcular modos en guías de onda curvas usando coordenadas cilíndricas. («Fimmwave», 2022)

#### 2.3.3.1.2 Solucionadores de modos numéricos

Para guías de onda con muchas características o para modelar estructuras con índice de refracción graduado, es preferible usar los métodos numéricos como los solucionadores FDM (Diferencias Finitas) y FEM (Elementos Finitos). («Fimmwave», 2022)

#### 2.3.3.1.3 Solucionador FDM

Usa un método de diferencias finitas completamente vectorial y es compatible con diversas condiciones de contorno que incluyen eléctricas/magnéticas, transparentes, ABC y periódicas, así como capas perfectamente adaptadas. Además, se encuentran disponibles versiones semivectoriales y unidimensionales. Permite modelar guías de onda con perfiles de índice de refracción pronunciados con precisión, además de interfaces inclinadas o curvas, y perfiles graduales. («Fimmwave», 2022)

#### 2.3.3.1.4 Solucionador FEM

Implementa el método FEM y es capaz de resolver guías de onda tanto reales como complejas, incluyendo efectos vectoriales y anisotrópicos. («Fimmwave», 2022)

#### 2.3.3.1.5 Solucionadores cilíndricos

Se tienen disponibles dos solucionadores para calcular modos en guías de onda con simetría cilíndrica, como fibras ópticas: el solucionador GFD (General Fibre Solver) y el solucionador FDM para fibras. («Fimmwave», 2022)

#### 2.3.3.1.6 Otros solucionadores

Solucionador de índice efectivo para un modelado rápido de estructuras bajo delta-n o estructuras 2D. («Fimmwave», 2022)

#### 2.3.3.1.7 FIMMPROP

Es un complemento de FIMMWAVE, destaca por su capacidad de analizar la propagación de la luz en estructuras ópticas con geometrías complejas de forma precisa y eficiente. Al emplear el método de expansión de modos propios, esta herramienta permite modelar tanto variaciones abruptas como graduales en la sección transversal de la guía de onda. Lo que lo convierte en una herramienta invaluable para el diseño de dispositivos ópticos como acopladores, convertidores, filtros, entre otros.(«Fimmwave», 2022)

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLOGICO

En este capítulo se realiza la descripción del proceso de desarrollo de las secciones del sensor óptico fotoacústico, su acoplamiento, y simulación mediante el software Fimmwave, además, se realiza la recolección de información respecto al comportamiento del mismo referente a la potencia que atraviesa la estructura y al comportamiento de la luz dentro de su estructura.

#### 3.1 Enfoque de investigación

El proyecto tiene un enfoque descriptivo, cuantitativo debido a que el funcionamiento del sensor se lo analiza en base a los resultados obtenidos de la potencia transmitida a la longitud de onda deseada y el comportamiento de la luz sobre la estructura diseñada.

#### 3.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación se define como descriptivo y aplicativo por medio del análisis bibliográfico realizado previamente en el capítulo 2 y el análisis del funcionamiento del sensor óptico fotoacústico en base a su simulación en el software Fimmwave, con el objetivo de estudiar el funcionamiento de dicho dispositivo y su aplicabilidad en la Fotoacústica.

#### 3.3 Diseño de investigación

El diseño de la investigación presentada tiene como fin cumplir con los objetivos de estudio planteados. Dicha investigación resulta ser de tipo análisis bibliográfico y aplicativo, debido a que se manipula diferentes parámetros establecidos con antelación con el fin de realizar un análisis de resultados de la simulación planteada con el software Fimmwave siendo esta una herramienta para el diseño y simulación de sistemas de fibra óptica a nivel de propagación de la señal.

##### 3.3.1 *Según la manipulación o no de la variable independiente*

La variable dependiente en el desarrollo son la potencia y comportamiento de la luz transmitida, las cuales varían de acuerdo la manipulación de diferentes parámetros de la sección, índices de refracción, etc. Los cuales para la investigación están sujetos a parámetros intrínsecos de la fibra

óptica presentada. Se observa la variación de la potencia y comportamiento de luz a la longitud de onda de trabajo, las mismas que se consideran como variable independiente.

### **3.3.2 *Según las intervenciones en el trabajo de campo***

La recolección de datos se realizó a través de instrumentos para medición incorporados en el software usado para la simulación. Principalmente, para la visualización de la potencia recibida obtenida mediante la percepción del haz de luz que atraviesa la estructura del sensor además de las gráficas de potencia que muestran los niveles de potencia en la longitud de onda de trabajo bajo las diferentes condiciones de estudio presentadas.

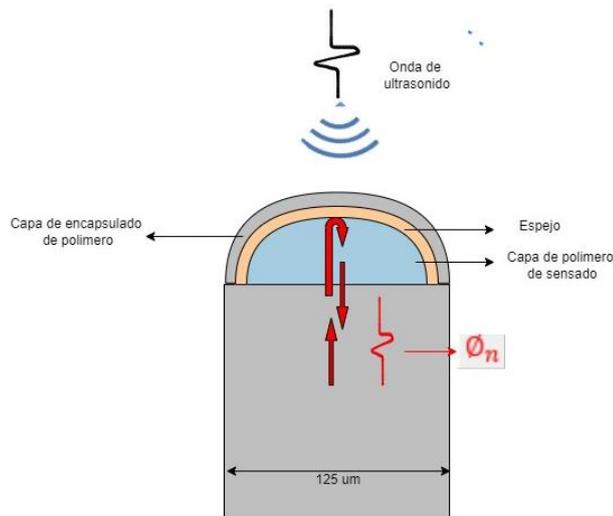
### **3.4 Tipo de estudio**

Mediante la realización de un estudio descriptivo y aplicativo en el que se evalúa el comportamiento del diseño de sensor presentado mediante la simulación en el software Fimmwave, con el uso de las variables de los componentes que forman las secciones del sensor, el cuerpo como la punta de reflexión.

### **3.5 Población y planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra**

El proyecto de investigación se basa en el análisis del diseño de un sensor óptico fotoacústico, basándose en simulaciones, por lo que no se requiere hacer uso de datos referentes a población o muestra.

### **3.6 Métodos, técnicas e instrumentos de investigación**

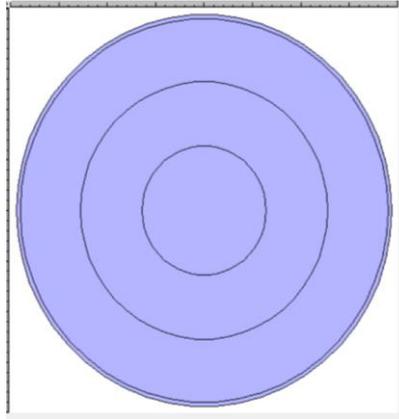


**Ilustración 3-1:** Diagrama esquemático del sensor óptico fotoacústico  
**Realizado por:** (Caluña, A.,2024)

La Ilustración 3-1 muestra un diagrama esquemático del sensor fotoacústico, debido a la naturaleza del sensor se tomó como referencia las características de una fibra óptica monomodo conocida como SMF-28 (ANEXO 1) que es un tipo de fibra de tipo comercial de amplio uso dentro del campo de las Telecomunicaciones por lo que resulta de ser de fácil adquisición.

La cual al ser una fibra monomodo tiene solamente un canal por el que se propaga la luz hacia la cubierta de espejo en el extremo de la fibra, al llegar la luz al extremo la luz se refleja al contacto con las muestras externas, que serán dos en este caso; aire y una onda ultrasónica.

El diseño de la fibra monomodo se puede observar en la Ilustración 3-2, la cual muestra las áreas del núcleo, revestimiento y recubrimiento del sensor el cual, al ser construido a partir de una fibra óptica, sus características dependerán enteramente de ella. Es decir, el diámetro del sensor dependerá del diámetro de la fibra elegida, generalmente las fibras monomodo tienen un diámetro de revestimiento de 125 μm que es con el que se estará trabajando en este proyecto. El recubrimiento corresponde a un polímero de sensado que será la parte importante del diseño, el grosor del mismo se toma en referencia a las condiciones de una cubierta de bajo grosor para evitar la contaminación con agentes externos por lo que el mismo no debe ser muy ancho.



**Ilustración 3-2:** Vista frontal del sensor, en el que se observa núcleo, revestimiento y recubrimiento

Realizado por: (Caluña, A., 2024)

Los valores de las variables de diseño se detallan en la Tabla 3-1, valores que se usan para la dinámica de propagación del diseño basado en fibra monomodo, por lo que se toma como referencia valores comunes de fibras ópticas comerciales.

**Tabla 3-1:** Definición de parámetros del diseño sección de fibra óptica

Parámetros	Valores
dc (Diámetro de core)	5 $\mu\text{m}$
d1 (Diámetro revestimiento)	125 $\mu\text{m}$
d2 (Diámetro recubrimiento)	127 $\mu\text{m}$
nc (Índice de refracción core)	1.468
nd (Índice de refracción revestimiento)	1.44
nr (índice de refracción recubrimiento)	1.45
Lambda (ventana de trabajo)	1550 nm
Longitud de sección	1 cm

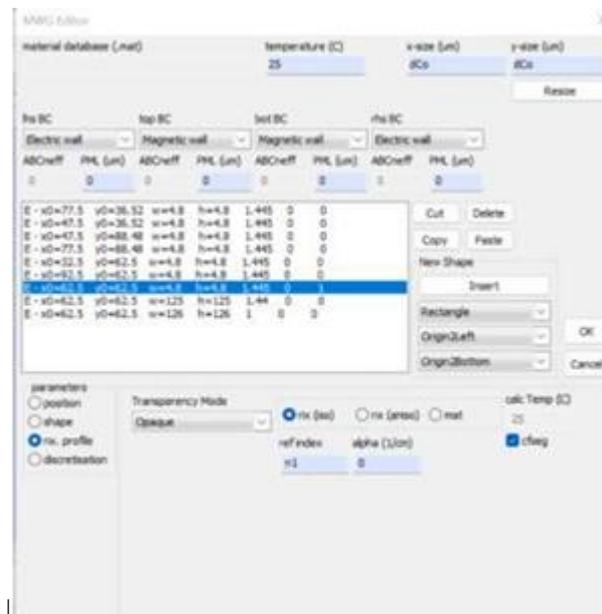
Realizado por: (Caluña, A., 2024)

Los parámetros especificados como dc correspondiente al diámetro del core, d1 el revestimiento de la fibra y d2 corresponde al recubrimiento de polímero que se estableció con un valor de 2  $\mu\text{m}$ . La Ilustración 3-3 muestra una vista lateral de la sección de fibra óptica monomodo que será el cuerpo del sensor.



**Ilustración 3-3:** Vista lateral sección fibra monomodo  
 Realizado por: (Caluña, A.,2024)

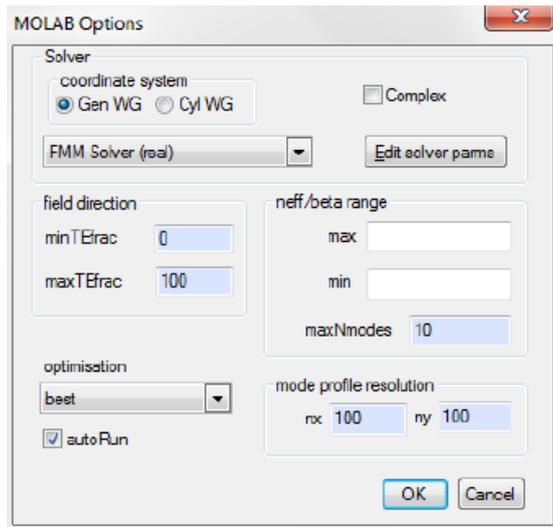
Para elegir el lugar de la propagación se activa la opción **cfseg** en la casilla del core donde por el que se realizará la transmisión como se ve en la Ilustración 3-4:



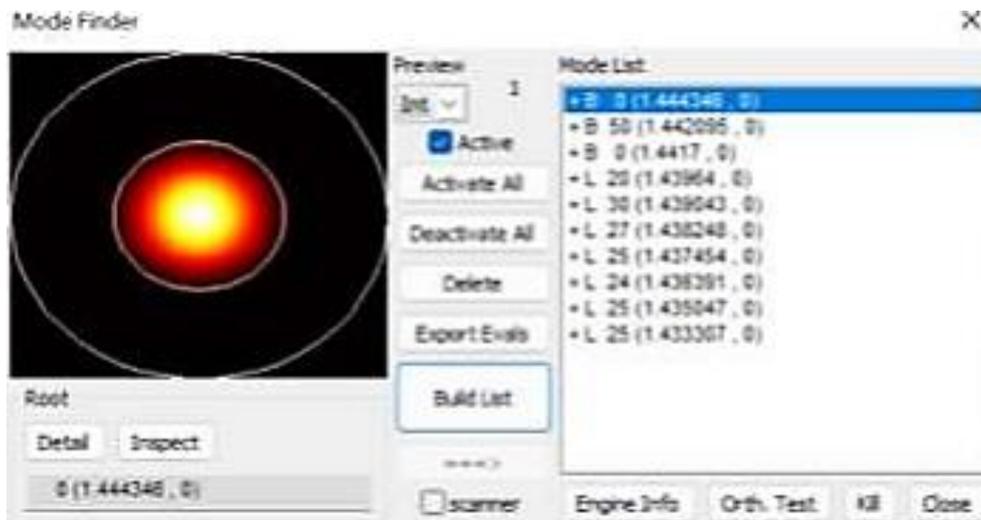
**Ilustración 3-4:** Activación segmento para transmisión (cfseg)  
 Realizado por: (Caluña, A., 2024)

Para los solucionadores que nos brinda el software de simulación encontramos varios tipos, sin embargo, en este caso se usará el solucionador de fibra monomodo SFM que es elegida en la ventana que se observa en la Ilustración 3-5 además que el sistema de coordenadas usado es el CYL WG debido a que se está trabajando con una estructura cilíndrica, este modo es el simple mode Finder que brinda un análisis completo de las fibras ópticas.

Debido a que se está trabajando sobre una fibra monomodo se usara el sistema de coordenadas cilíndricas que es el recomendado por el software para trabajar con este tipo de fibra.



**Ilustración 3-5.** Solucionador de modo  
 Realizado por: (Caluña, A., 2024)



**Ilustración 3-6.** Encontrar el modo de propagación  
 Realizado por: (Caluña, A., 2024)

Finalmente, en la Ilustración 3-6 se muestra la interfaz correspondiente a Mode Finder o buscador de modo en el que se busca el modo de propagación de la luz dentro de la fibra óptica, tener en cuenta que al trabajar con una fibra monomodo se trabaja principalmente un solo modo de propagación como se explicó en la sección anterior.

Como siguiente paso, se tiene que elegir los modos de operación, siguiendo este orden: Se da clic en “Mode Finder” - “Build List” – “New Build” – “Start” el resultado se observa en la Ilustración 3-6. Esto permite observar el comportamiento de propagación del modo en el core, se debe tener en cuenta que este proceso se tiene que realizar en cada parte del diseño para comprobar que haya

un correcto funcionamiento de transmisión a lo largo del diseño, es decir, que exista un correcto acoplamiento entre secciones.

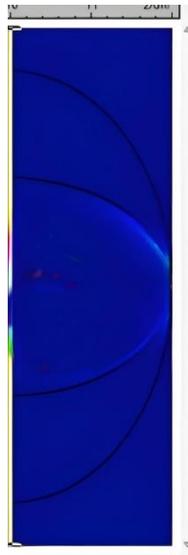
Para la sección final del sensor se aprovecha los recursos provistos por el software y se realizaron cambios en los parámetros de la cubierta reflectiva, estableciendo para eso parámetros como la curvatura del espejo reflector que en este caso debe ser cóncavo, tener en cuenta que dicha sección cuenta con un espejo integrado lo que permite el funcionamiento de la sección como punta del sensor.

**Tabla 3-2:** Parámetros de punta (cubierta) del sensor

Parámetros	Valores
Tipo de punta (cubierta)	Reflectiva
Material	Espejo
Tipo de espejo	Cóncavo
Longitud de la sección	100nm

Realizado por: (Caluña, A.,2024)

Finalmente, se realiza la juntura de la sección de la fibra óptica junto con la sección de la punta del sensor como se observa en la Ilustración 3-7, cabe destacar que para realizar el acoplamiento entre estas secciones se usa una juntura simple debido a que simula el término de la propia fibra óptica.



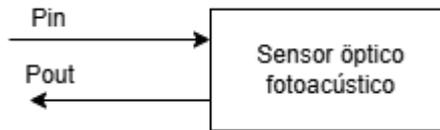
**Ilustración 3-7:** Cubierta del sensor

Realizado por: (Caluña, A., 2024)

Para las pruebas de simulación se plantearon tres escenarios que se muestran a continuación en donde se detalla las variables de cada sección simulada:

### 3.7 Escenarios propuestos

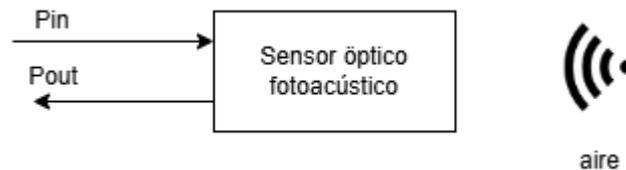
#### 3.7.1 Escenario 1: Diseño principal del sensor



**Ilustración 3-8:** Diseño del sensor  
Realizado por: (Caluña, A., 2024)

La simulación del Escenario 1 se centra en el diseño previsto anteriormente, cuyos valores se detallan en la Tabla 3-1, que corresponden a la sección de fibra óptica del sensor, y por otro lado los valores de la Tabla 3-2 que corresponden a la punta del sensor que reflejará la señal enviada. Cabe recalcar que la cubierta del sensor adoptará los parámetros de las secciones de la sección de fibra óptica por lo que esos campos no son necesarios definirlos en la misma.

#### 3.7.2 Escenario 2: Diseño del sensor enfrentado a una sección de aire



**Ilustración 3-9:** Sensor enfrentado con una sección de aire  
Realizado por: (Caluña, A., 2024)

Para la prueba 2 se mantiene el diseño principal del sensor con los datos especificados en las tablas 3-1 y 3-2, en adición se muestra una tercera sección en la parte derecha, la cual por motivos ilustrativos ha sido diseñada con las mismas secciones que la sección de fibra óptica sin embargo con el fin de simular una sección de aire el valor del índice de reflexión en cada parte es igual a la unidad como se muestra en Tabla 3-3.

**Tabla 3-3:** Parámetros de diseño de la sección de aire

Parámetros	Valores
dc (Diámetro de core)	5 $\mu\text{m}$
d1 (Diámetro revestimiento)	125 $\mu\text{m}$
d2 (Diámetro recubrimiento)	127 $\mu\text{m}$
nc (Índice de refracción core)	1

nd(Índice de refracción revestimiento)	1
nr (índice de refracción recubrimiento)	1
Lambda (ventana de trabajo)	1550 nm
Longitud de sección	1 cm

Realizado por: (Caluña, A.,2024)

### 3.7.3 Escenario 3: Diseño del sensor enfrentado a una sección de aire



**Ilustración 3-10:** Sensor enfrentado a ultrasonido simulado

Realizado por: (Caluña, A., 2024)

Finalmente, en el escenario 3 se intentó simular una onda de ultrasonido teniendo en cuenta dos aspectos: la velocidad a la que viaja el sonido a través de un tejido que es considerado en promedio de 1540 m/s y la frecuencia de ultrasonido usada en medicina para fines de diagnóstico, la cual en general es de 30 MHz.

Para obtener el valor de la longitud de onda que simulará la señal de ultrasonido se calcula con la fórmula siguiente:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$= \frac{1540 \frac{m}{s}}{30 * 10^6 \frac{1}{s}}$$

$$\lambda = 0.51mm = 510nm$$

Una vez obtenido el valor aproximado de la longitud de onda del ultrasonido se procede a cambiar los valores de la sección que simula el escenario por los mostrados en la Tabla 3-4.

**Tabla 3-4:** Parámetros de simulación sección ultrasonido

Parámetros	Valores
dc (Diámetro de core)	5 um
d1 (Diámetro revestimiento)	125 um
d2 (Diámetro recubrimiento)	127 um
nc (Índice de refracción core)	1
nd(Índice de refracción revestimiento)	1

nr (índice de refracción recubrimiento)	1
Lambda (ventana de trabajo)	510 nm
Longitud de sección	1 cm

**Realizado por:** (Caluña, A.,2024)

## CAPITULO IV

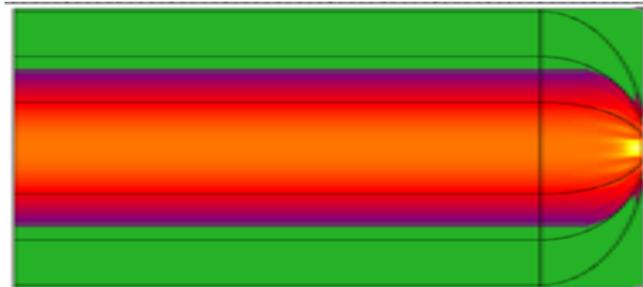
### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados de las distintas experimentaciones realizadas que abarcan diferentes escenarios planteados del sensor. Primero, se midió el comportamiento de la propagación de la potencia en el mismo a la longitud de onda propuesta; 1550nm, como un escenario base. Luego se realizaron pruebas con una sección que simula el espacio vacío (aire) a la misma longitud de onda. Finalmente, se realizaron pruebas con una sección que simula una señal ultrasónica de características comunes en los sensores de ultrasonido usados para la obtención de imágenes por este método.

Cabe destacar que el parámetro principal evaluado fue la potencia disponible en el software de simulación. Destacando el funcionamiento del sensor basado en la respuesta de esta en términos de potencia en la longitud de onda propuesta.

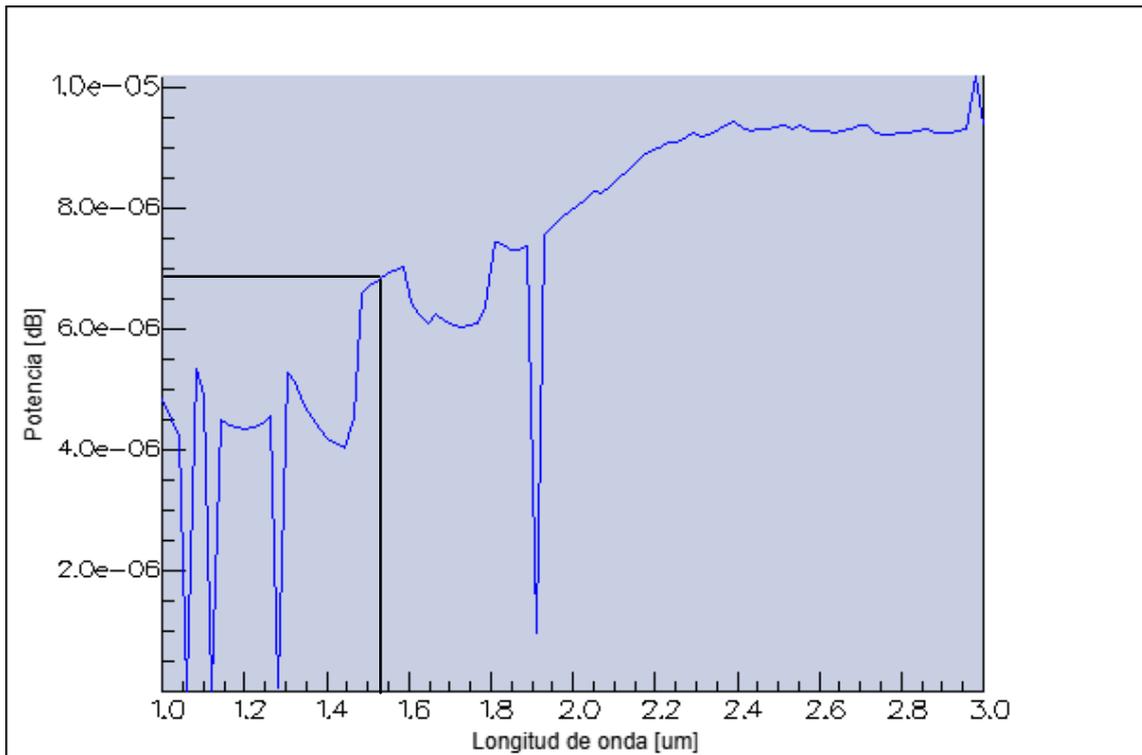
#### 4.1 Prueba en el diseño individual del sensor

En la Ilustración 4-1, se muestra la cantidad de energía transmitida a través del sensor diseñado con los parámetros detallados en el capítulo anterior. En el cual se puede ver como la luz atraviesa el núcleo principal o core de la fibra óptica.



**Ilustración 4-1:** Escenario 1  
**Realizado por:** (Caluña, 2024)

La Ilustración 4-2 muestra una gráfica que enfrenta los valores de potencia contra la longitud de onda sobre la que se trabaja, mostrando un amplio espectro.



**Ilustración 4-2:** Potencia emitida hacia el sensor

**Realizado por:** (Caluña, A., 2024)

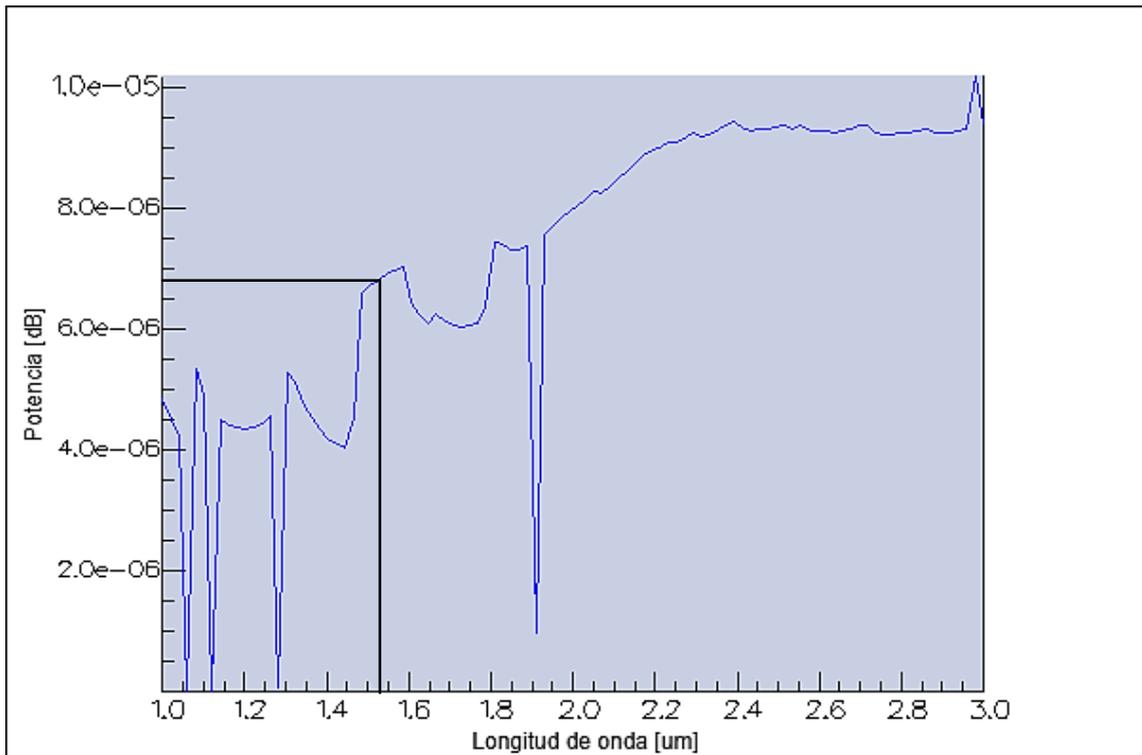
Así mismo, la Ilustración 4-2 muestra el nivel de potencia al ser reflejada desde la punta del sensor de fibra óptica. Donde se observa que los valores son relativamente bajos, teniendo fluctuaciones a lo largo de las diferentes longitudes de onda.

Los valores expresados en la gráfica muestran valores de potencia expresados en dB en función de la longitud de onda, vale recalcar que los valores de potencia no se calculan en función de un valor ingresado manualmente, debido a que el software analiza los parámetros de la guía de onda con el fin de que la propagación sobre la misma sea óptima, dicha potencia sigue la siguiente ecuación:

$$Potencia [dB] = 10 \log \left( \frac{P_o}{P_{in}} \right)$$

Donde:  $P_o$  es la potencia de prueba y  $P_{in}$  es la potencia de referencia.

A la longitud de onda de trabajo que es de 1550nm se ve que la potencia es de aproximadamente  $7e^{-6}dB$  una potencia bastante baja cumpliendo lo que dice la teoría que los valores censados son bastante bajos por lo que necesita de más técnicas para el análisis de los datos recogidos.



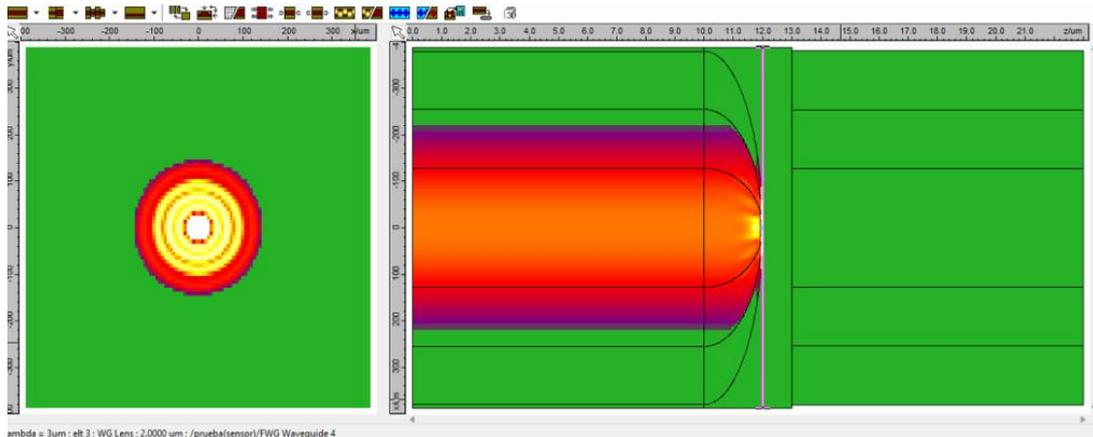
**Ilustración 4-3:** Potencia medida en la punta del sensor

Realizado por: (Caluña, A., 2024)

La potencia recibida en el extremo sensor de la fibra a la longitud de onda deseada parece no variar respecto a la de entrada pues no tiene ningún agente externo que lo excite al grado de modificar la potencia de manera drástica, así mismo se evidencia que los materiales del extremo sensor resultan tener cierta influencia la cual afecta el valor de la potencia en el censado.

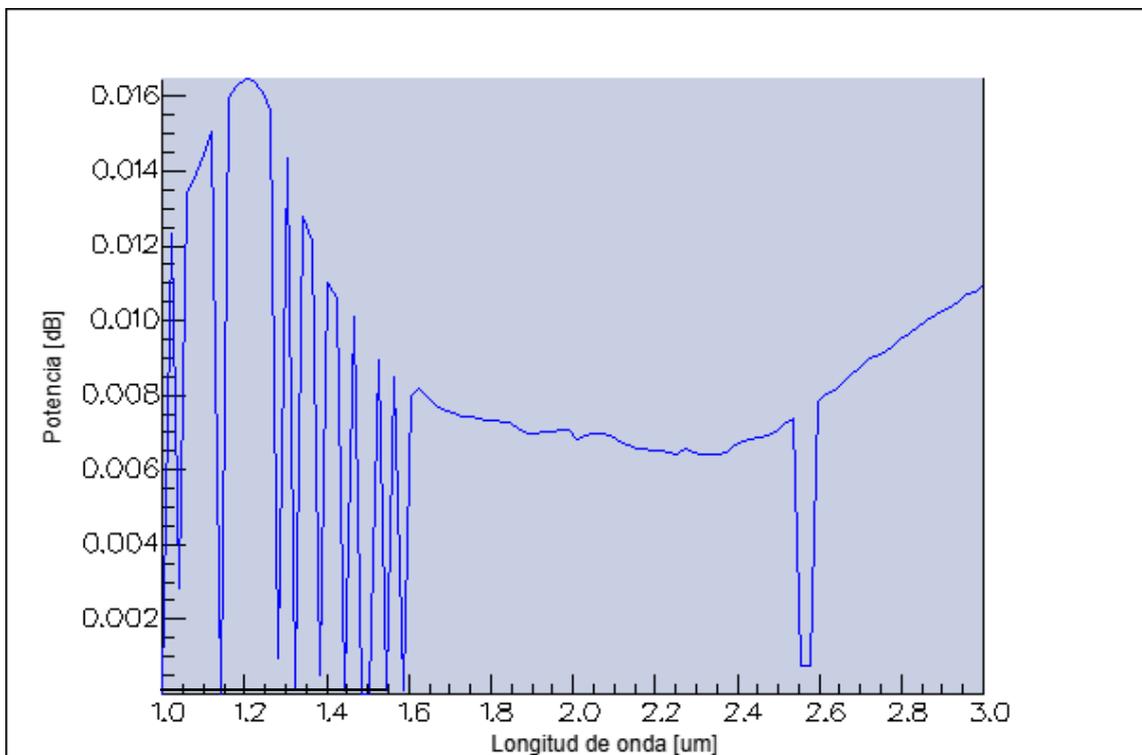
#### 4.2 Sensor enfrentado a una sección de aire simulado

La Ilustración 4-4 muestra el nivel de potencia emitido por el software en el diseño del sensor, es decir es el valor de la misma medida en el tramo de ingreso de la luz hacia el sensor. Donde se observa que la señal es transmitida con éxito pues se evidencia en la calidad de la luz emitida que puede observarse de un color amarillo anaranjado.



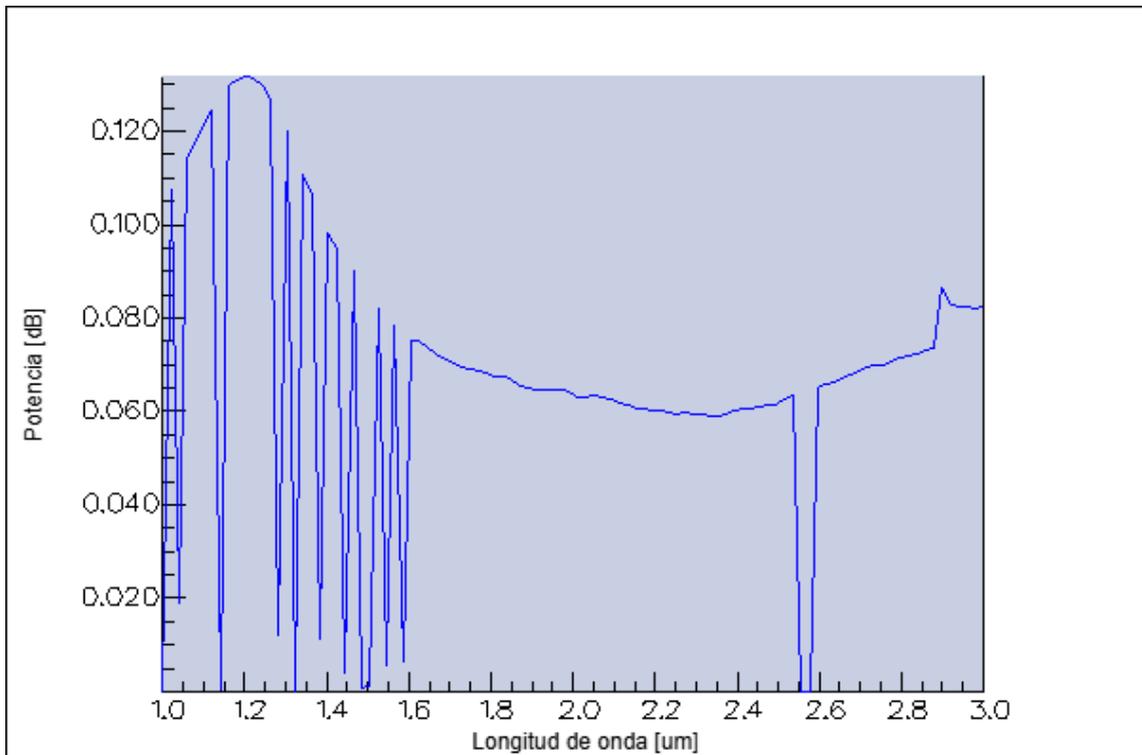
**Ilustración 4-4:** Escenario 2  
**Realizado por:** (Caluña, 2024)

La Ilustración 4-4 muestra además como el nivel de luz se desplaza por el core de la fibra, siendo mantenida dentro del mismo y evitando las filtraciones hacia las coberturas de este. La sección mostrada a la derecha del diseño representa una sección de aire simulado, siendo usado el índice de refracción de 1 que es el valor usado de manera práctica. Esto se logra gracias a la base de datos de materiales disponibles en el sensor o puede construirse de manera manual al agregar las características del material con el que se desea trabajar en base a su índice de reflexión.



**Ilustración 4-5:** Potencia emitida en el sensor enfrentado a una sección con aire  
**Realizado por:** (Caluña, A., 2024)

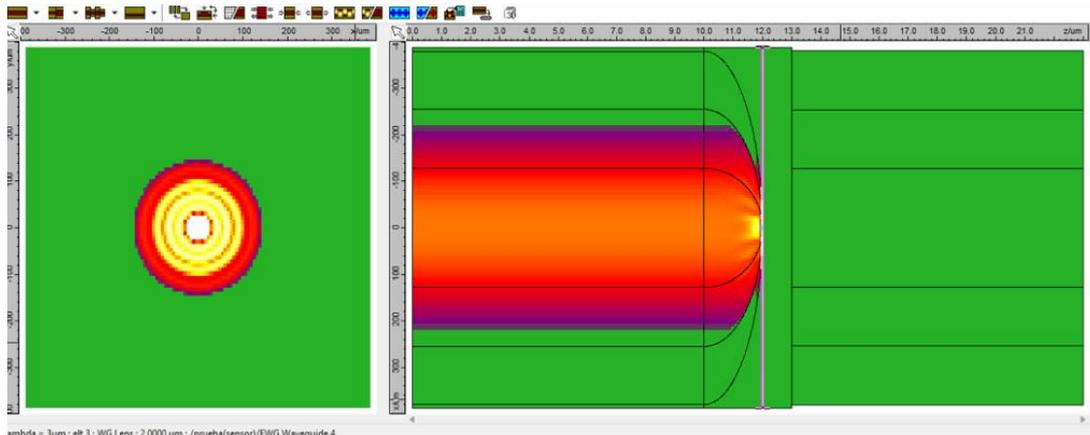
La Ilustración 4-5 muestra el comportamiento en función de la potencia en contraste con la longitud de onda de trabajo, es decir es el valor de la misma medida en el tramo de ingreso de la luz hacia el sensor. Donde se observa que los valores de potencia en la longitud de onda de trabajo son realmente bajos con un valor de aproximadamente 0.001 dB, lo que indica que el comportamiento varía dependiendo de los agentes externos.



**Ilustración 4-6:** Potencia recibida en la punta del sensor enfrentado a una sección con aire  
**Realizado por:** (Caluña, A.,2024)

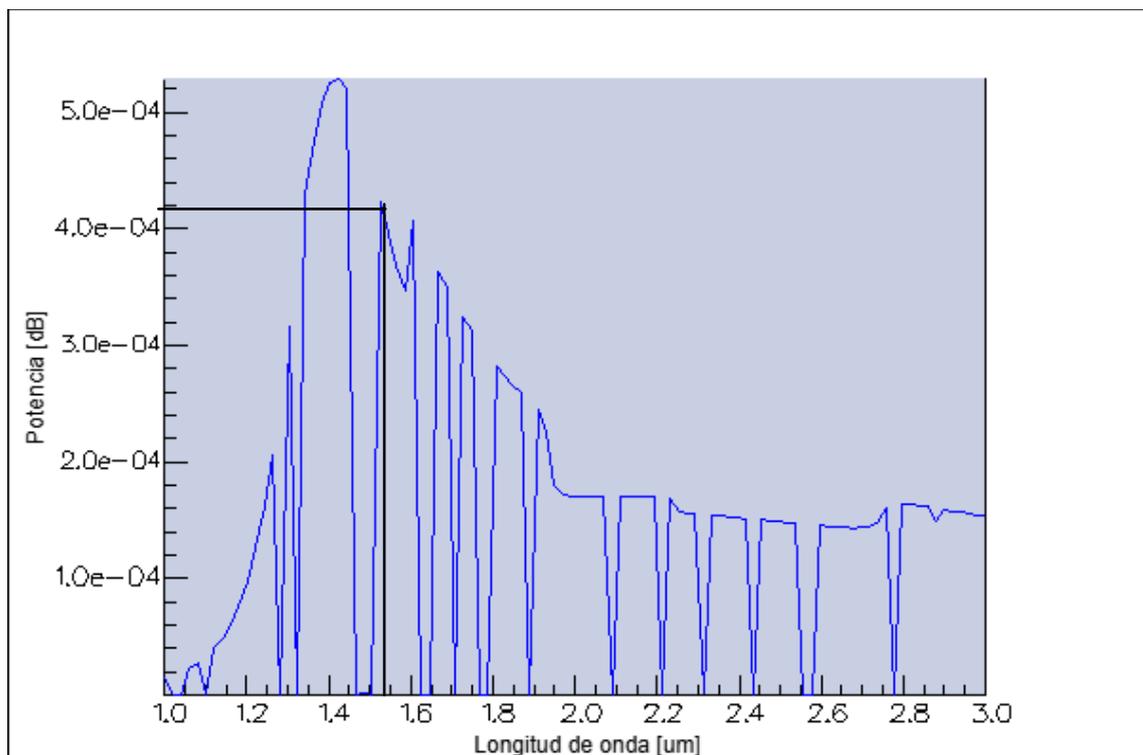
La Ilustración 4-6 muestra el nivel de potencia que se recibe en la punta del sensor, en la que podemos observar que tiene un decaimiento al retorno de la luz al chocar con el espejo reflector, en la longitud de onda de trabajo se observa un valor de aproximadamente 0.01 dB, lo que muestra que sigue existiendo pérdida de potencia probablemente causada por la capa censorsa.

#### 4.3 Sensor enfrentado a una sección de ultrasonido simulado



**Ilustración 4-7:** Escenario 3  
**Realizado por:** (Caluña, A., 2024)

La Ilustración 4-7 semejante a la Ilustración 4-4 muestra el esquema del sensor al ser expuesto a agentes externos como en este caso es un sensor simulado, la longitud de onda que se usó para dicha prueba fue de 500 nm que es un estimado del valor que los ultrasonidos actuales que son con los que se quiere contrastar la respuesta.



**Ilustración 4-8:** Potencia emitida al sensor siendo enfrentado a una sección con longitud de onda de ultrasonido  
**Realizado por:** (Caluña, 2024)

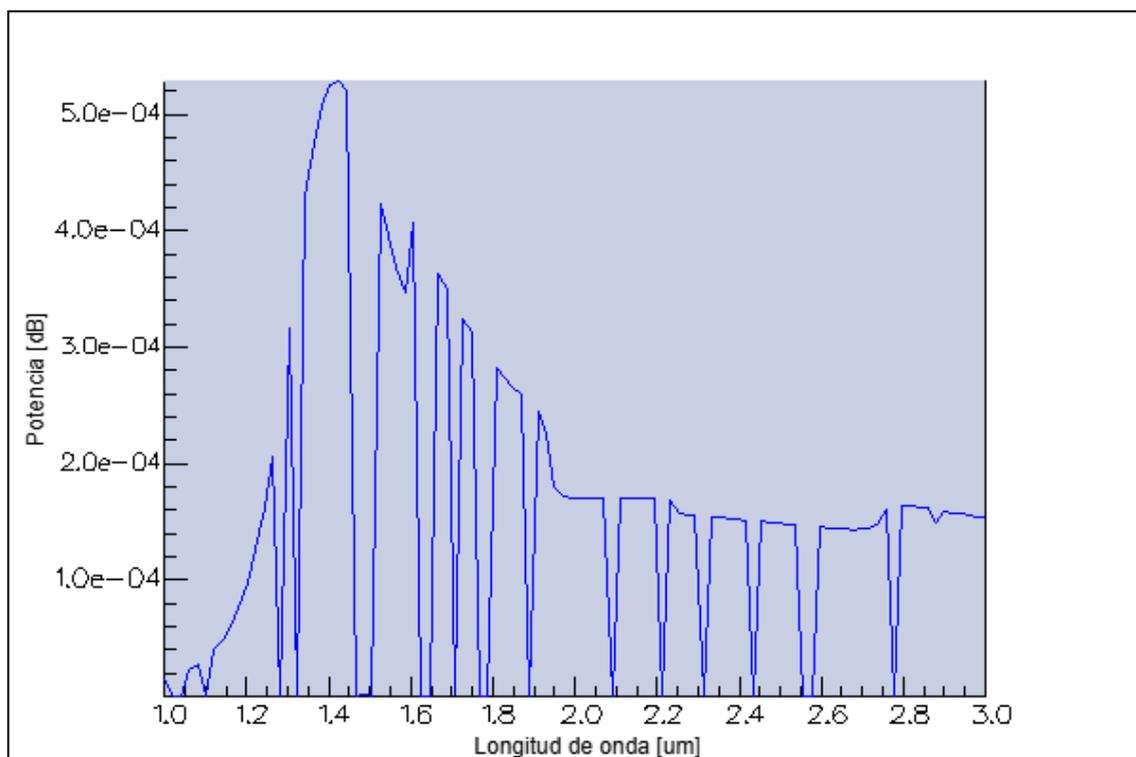
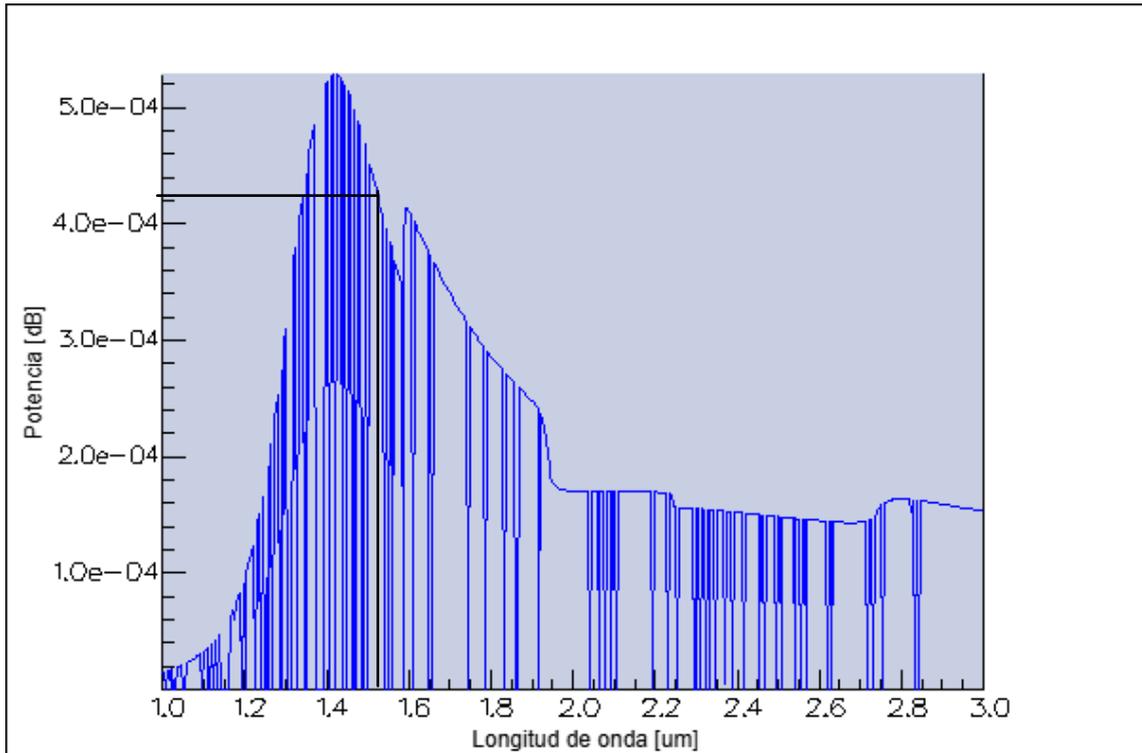


Ilustración 4-8 muestra la potencia del sensor al retorno de la interacción con la señal del ultrasonido, se puede observar fluctuaciones a lo largo de todo el ancho de banda y como en la longitud de onda deseada se tiene una disminución de la potencia de la señal respecto a las mediciones anteriores en las que el sensor no entraba en contacto con ningún agente externo que pueda llegar a modificar la señal transmitida debido a la interacción externa de la señal simulada. En la longitud de onda de trabajo se encuentra una potencia de aproximadamente  $4.2e^{-4} dB$  valor que una vez más resulta ser bastante bajo, además se puede inferir que las fluctuaciones producidas por los ultrasonidos van a modificar los valores de la potencia siendo este también influenciado por los materiales usados para la cubierta del sensor.



**Ilustración 4-9:** Potencia recibida en la punta del sensor

Realizado por: (Caluña, A., 2024)

En la Ilustración 4-9: Potencia recibida en la punta del sensor se observa los valores de potencia recibidos en la punta del sensor al ser puestos en contacto con la señal de ultrasonido simulado, se observa que los valores llegan a ser similares a los recibidos en el ingreso del mismo, mostrando como se mantiene a lo largo del trayecto. Cabe recalcar que la longitud de onda usada para la simulación de la sección de ultrasonido fue la frecuencia más baja usada por los ultrasonidos para realizar exploraciones a mayor profundidad de los tejidos humanos. Las fluctuaciones que se observan son el resultado del polímero usado provocado por la emisión de ondas de sonido provocadas por el tejido humano al ser expuesto al calor. Siendo un valor similar a la potencia de recepción en el punto de inicio del sensor lo que equivale a aproximadamente a  $4.2e^{-4}dB$  que se mantiene siendo un valor bajo, manteniendo la dinámica de que la potencia de este tipo de sensor tiene respuestas bajas.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- Se logró identificar los avances y aplicaciones de los sensores ópticos en la tecnología fotoacústica, destacando su uso en la medicina para el procesamiento de imágenes de alta resolución y profundidad. Se resalta que los sensores ópticos proporcionan ventajas sobre los piezoeléctricos en términos de tamaño, sensibilidad, y resistencia a interferencias electromagnéticas
- El diseño del sensor óptico fotoacústico basado en fibra óptica para la banda 1550 nm necesita de parámetros como el índice de refracción, el ancho del núcleo y la configuración de los componentes del sensor, además Fimmwave permite modificar valores de índices de refracción además de contar con un amplio catálogo de materiales provistos para el diseño de diferentes estructuras.
- Las simulaciones realizadas permitieron evaluar el desempeño del sensor bajo diferentes escenarios, incluyendo su comportamiento al ser expuesto a secciones de aire y ultrasonido. Los resultados indicaron que el sensor tiene una disminución de potencia en la longitud de onda de trabajo debido a factores como el material con el que se diseñó la cubierta del sensor o las juntas de este. La referencia de potencia obtenidas en las simulaciones se encuentra entre valores de 0 y 1dB siendo el valor más constante  $4.2e^{-4}dB$  que es el que se muestra en la longitud de interés.

#### 5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda ahondar en los estudios de la tecnología de sensores ópticos, para continuar con la investigación de este campo, la cual se ha visto en un auge constante en los últimos años.
- Se recomienda realizar estudios similares sobre diferentes tipos de fibra óptica para verificar los resultados que se obtengan, así como las respuestas que se pueden obtener al variar más parámetros ya sea en la fibra óptica o en los materiales de las cubiertas que se pueden diseñar.
- Antes de comenzar la ejecución de la simulación, es fundamental realizar la generación de los modos de propagación en cada sección del sensor. Esta etapa previa es crítica para asegurar que la propagación a través del mismo concuerde con una transmisión realista en condiciones reales, teniendo en cuenta las características inherentes de los diferentes

tipos de fibras ópticas que componen el sistema. Al simular los modos de propagación, se obtienen datos esenciales sobre la distribución espacial del campo eléctrico y las características de propagación de la señal en cada sección

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ACOSTA ARIAS, Carlos Javier.** Diseño técnico de la red de acceso para la empresa ARCLAD S.A, mediante tecnología FTTH (Fiber to the X), a través de la infraestructura de red de CNT E.P. y criterios de instalación. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Electrónica y Telecomunicaciones Quito-Ecuador. 2012. Págs..1-10. [Consulta: 2024-05-15]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4845/1/CD-4439.pdf>.
2. **BAUTISTA, Rodrigo, CONSTANTE, Patricia & GORDON, Andrés & y MENDOZA, Darío.** “Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos de brócoli obtenidos mediante una aeronave pilotada remotamente”. *Infociencia* [En línea], 2019, (Ecuador) vol. 12 (1), págs.30-35. [Consulta: 15 mayo 2024]. ISSN 1390-339X. Disponible en: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/Infociencia/article/view/1230>
3. **BAYER, Carolyn, LUKE, Geoffrey & EMELIANOV, Stanislav.** “Photoacoustic Imaging for Medical Diagnostics”. *Acoustics Today* [En línea], 2012, (United States of America) vol.8, págs. 15-23. [Consulta: 03 mayo 2024]. DOI 10.1121/1.4788648. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/236909496\\_Photoacoustic\\_Imaging\\_for\\_Medical\\_Diagnostics](https://www.researchgate.net/publication/236909496_Photoacoustic_Imaging_for_Medical_Diagnostics)
4. **BENAVIDES CHAMORRO, Katherine Janeth.** Diseño de una red de acceso FTTH utilizando tecnología GPON en el sector centro de la ciudad de Tulcán para la Empresa Cine Cable TV. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador. 2016. Págs..60-76. [Consulta: 2024-05-04]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/5673>
5. **CALDERON AMBRIZ, José Manuel.** Sensor de temperatura basado en un interferómetro intermodal tipo Michelson con fibra óptica monomodo. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad de Guanajuato, Ingeniería Mecatrónica. Guanajuato-México. 2019. Págs..16-22. [Consulta: 2024-05-13]. Disponible en: <http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/1463/1/810162a.pdf>
6. **CORTEZ BUSTAMANTE, Pablo Ernesto.** Manual Práctico para el cableado de la red aérea de fibra óptica de Telconet en la ciudad de Quito. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Escuela de Formación de Tecnólogos. Quito-Ecuador. 2016. Págs..22-26. [Consulta: 2024-07-23]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16820/1/CD-7403.pdf>
7. **DHINGRA, Akshaya, SINDHU, Vikas & SANGWAN, Anil.** “Fiber Optic Sensors: A Leading Trend in Sensor Technology”. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/ Egyptology* [En línea], 2020, (Egypt) vol. 17 (9), págs.75-86. [Consulta: 8 mayo 2024]. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/351451708\\_Fiber\\_Optic\\_Sensors\\_A\\_Leading\\_Trend\\_in\\_Sensor\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/351451708_Fiber_Optic_Sensors_A_Leading_Trend_in_Sensor_Technology)

8. **HISHAM, Kadhum.** “Optical Fiber Sensing Technology: Basics, Classifications and Applications”. *American Journal of Remote Sensing* [En línea], 2018, (Irak) vol. 6 (1), págs.1-5. [Consulta: 08 febrero 2024]. ISSN 2328-5788. Disponible en: <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=138&doi=10.11648/j.ajrs.20180601.11>
9. **HOSSEINAE, Zohreh, LE, Martin, BELL, Kevan & HAJIREZA, Parsin.** “Towards non-contact photoacoustic imaging [review]”. *Photoacoustics* [En línea], 2020, (Canadá) vol. 20 (100207), págs.2-6. [Consulta: 04 marzo 2024]. ISSN 2328-5788. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100207>
10. **HUSEYIN, Durmus & BAKI, Karaboce.** “FOTOAKUSTİK ETKİ VE UYGULAMALARI”. *Ulusal Akustik Kongresi Ve Sergisi* [en línea]. 2023, (Turquía), págs. 2-15. [Consulta: 16 febrero 2024]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/375379413\\_FOTOAKUSTIK\\_ETKI\\_VE\\_UYGULAMALARI\\_PHOTOACUSTIC\\_EFFECT\\_AND\\_ITS\\_APPLICATIONS?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uRG93bmxvYWQqILCjwYWdlIjoic2VhcmNoIiwicHJldmlvdXNQYWdlIjoiaG9tZSJ9fQ](https://www.researchgate.net/publication/375379413_FOTOAKUSTIK_ETKI_VE_UYGULAMALARI_PHOTOACUSTIC_EFFECT_AND_ITS_APPLICATIONS?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uRG93bmxvYWQqILCjwYWdlIjoic2VhcmNoIiwicHJldmlvdXNQYWdlIjoiaG9tZSJ9fQ)
11. **JIANG, Daohuai, ZHU, Luyao & TONG, Shangqing, SHEN, Yuting, GAO, Feng & GAO, Fei .** “Photoacoustic imaging plus X: a review”. *Journal of Biomedical Optics* [En línea], 2023, (China) vol. 29 (S1), págs.2-15. [Consulta: 17 marzo 2024]. DOI: 10.1117/1.JBO.29.S1.S11513. Disponible en: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-Biomedical-Optic>
12. **LOMELÍ, Pedro, CASTELLANOS, Norma, MÉNDEZ, María, CRUZ,Alfredo & JIMENEZ, José.** “Aplicaciones biofísicas de la fotoacústica”. *Investigación en Discapacidad* [En línea], 2012, (México) vol. 1 (2), págs.90-94. [Consulta: 20 enero 2024]. ISSN: 2007-6452. Disponible en: <http://www.medigraphic.com/rid>
13. **MAHMOUD, Eid.** “Optical fiber sensors: review of technology and applications”. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* [En línea], 2022, (Arabia Saudí) vol. 25 (2), págs.38-46. [Consulta: 14 enero 2024]. ISSN 2502-4760, 2502-4752. Disponible en: <http://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJECS/article/view/26064>
14. **MARÍN, Ernesto.** “Escuchando la luz: Breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico”. *Latin American Journal of Physics Education* [En línea], 2008, (México) vol. 2 (2), págs.75-86. [Consulta: 8 mayo 2024]. ISSN: 1870-9095. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/26568519\\_Escuchando\\_la\\_luz\\_breve\\_historia\\_y\\_aplicaciones\\_del\\_efecto\\_fotoacustico](https://www.researchgate.net/publication/26568519_Escuchando_la_luz_breve_historia_y_aplicaciones_del_efecto_fotoacustico)
15. **MESA YANDY, Angélica María.** Diseño, Desarrollo, Caracterización y Análisis de Sensores de Fibras Ópticas: Aplicación al estudio de Materiales y Estructuras. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad Nacional de la Plata, Facultad de

Ingeniería. La Plata- Argentina. 2018. págs. 22-24 [Consulta: 2024-12-12]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66531>

16. **MUSDAL, Bengi & KURT, Mustafa.** “Design of EM-artifact-free earphone based on the photoacoustic effect”. *Photoacoustics* [En línea], 2021, (Turquía), vol.21 (100214), págs. 2-4. [Consulta: 16 enero 2024]. ISSN: 2213-5979. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100214>
17. **PHOTON DESIGN.** Fimmwave [blog]. Oxford: Photon Design, 2022. Disponible: <https://www.photond.com/products/fimmwave.htm>
18. **POPOCA ORTIZ, Fernando.** Simulador interactivo sobre funcionamiento y aplicaciones de la fibra óptica. [En línea]. (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Computación. Puebla-México. 2018. págs. 3-15 [Consulta: 2024-02-22]. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/e1a737b7-6c6a-44e8-8c8d-7ee409353fdd>
19. **PRADAS, Javier.** Desarrollo experimental de sensores de fibra óptica basados en micro cavidades. [en línea]. (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Pública de Navarra, E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación. Pamplona-España. 2020. págs. 4-20. [Consulta: 2024-02-22]. Disponible en: [https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/36732/Memoria%20TFG\\_JavierPradas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/36732/Memoria%20TFG_JavierPradas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
20. **RAMOS FLORES, Alba Verónica.** Diseño e implementación de una red de acceso con fibra óptica utilizando tecnología VDSL/FTTX para mejorar los servicios de telecomunicaciones, de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones Empresa Pública en Guano. [En línea] (Trabajo de Titulación) (Maestría). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2019. págs.22-40. [Consulta: 2024-02-14]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13354>
21. **SABRI, N, ALIJUNID, S.A, SALIM, M.S., AHMAD, R.B. &KAMARUDIN, R.** “Toward Optical Sensors: Review and Applications”. *Journal of Physics: Conference Series* [En línea], 2013, (Malasia), vol. 423 (012064), págs. 1-7. [Consulta: 27 marzo 2024]. DOI: 10.1088/1742-6596/423/1/012064. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/258800513\\_Toward\\_Optical\\_Sensors\\_Review\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/258800513_Toward_Optical_Sensors_Review_and_Applications)
22. **STEINBERG, Idan, HULAND, David, VERMESH, Ophir, FROSTIG, Hadas, TUMMERS, Willemieke, GAMBHIR, Shweta.** “Photoacoustic clinical imaging”. *Photoacoustics* [En línea], 2019, (United States), vol.14, págs. 77-98. [Consulta: 27 marzo 2024]. ISSN: 2213-5979. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2019.05.001>
23. **TAN, Gamze.** “Photoacoustic analysis and imaging techniques: Sound of light”. *Particulate Science and Technology* [En línea], 2018, (United States), vol.36 (1), págs. 29-37. [Consulta: 20 abril 2024]. ISSN: 0272-6351, 1548-0046. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1205689>

24. **VALLE CASTILLO, José Fernando.** Diseño de red pasiva de fibra óptica para servicios de telecomunicaciones y su modelo de gobierno para un edificio de comercios y oficinas. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Electrónica. Guatemala-Guatemala. 2021. Págs. 12-27. [Consulta: 2024-04-25]. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/15776>
25. **YANG, Liuyang, LI, Yanpeng, FANG, Fang, LI, Liangye, YAN, Zhijun, ZHANG, Lin.** “Highly sensitive and miniature microfiber-based ultrasound sensor for photoacoustic tomography”. *Opto-Electronic Advances* [En línea], 2022, (China), vol.5 (6), págs. 1-6. [Consulta: 27 marzo 2024]. DOI: 10.29026/oea.2022.200076. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/359926212\\_Highly\\_sensitive\\_and\\_miniature\\_microfiber-based\\_ultrasound\\_sensor\\_for\\_photoacoustic\\_tomography](https://www.researchgate.net/publication/359926212_Highly_sensitive_and_miniature_microfiber-based_ultrasound_sensor_for_photoacoustic_tomography)
26. **YANG, Liuyang, XU, Dongchen, CHEN, Geng, WANG, Anqi, LI, Liangye & SUN, Q.** “Miniaturized fiber optic ultrasound sensor with multiplexing for photoacoustic imaging”. *Photoacoustics* [En línea], 2022, (China), vol. 4 (100421), págs. 1-5. [Consulta: 24 febrero 2024]. ISSN: 2213-5979. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2022.100421>

# ANEXOS

## ANEXO A: DATASHEET FIBRA OPTICA SMF 28

### Corning® SMF-28® ULL Optical Fiber Product Information



Corning® SMF-28® ULL optical fiber has the lowest loss of any terrestrial-grade, single-mode fiber with a maximum attenuation of 0.17 dB/km at 1550 nm. SMF-28 ULL fiber has been deployed around the world in some of the most challenging network applications, where ultra-low attenuation can be leveraged to extend network span lengths, skip amplification sites, upgrade to faster bit rates, add network components for improved flexibility, or lengthen the distances between regenerators. As a result, long-haul and regional networks are scalable for the higher capacities required to meet the ever-increasing global demand for bandwidth without the need to sacrifice backwards compatibility with an existing ITU-T Recommendation G.652 installed base of fibers. SMF-28 ULL fiber complies with ITU-T Recommendation G.652.B and G.654.C.

#### Optical Specifications

##### Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	≤ 0.31
1550	≤ 0.17
1625	≤ 0.20

\*Alternate attenuation offerings available upon request.

##### Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.05
1525 – 1575	1550	0.02
1550 – 1625	1550	0.05

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

##### Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.1
50	100	1310	≤ 0.05
50	100	1550	≤ 0.05
60	100	1625	≤ 0.05

\*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

##### Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

##### Cable Cutoff Wavelength (λ<sub>c</sub>)

λ<sub>c</sub> ≤ 1260 nm

##### Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.2 ± 0.5
1550	10.5 ± 0.5

##### Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm-km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ<sub>0</sub>): 1304 nm < λ<sub>0</sub> < 1324 nm

Zero Dispersion Slope (S<sub>0</sub>): < 0.082 ps/(nm<sup>2</sup>-km)

##### Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value [ps/√km]
PMD Link Design Value	≤ 0.04*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

\*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD<sub>0</sub>). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.

#### How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department.  
Ph. 1-800-248-2000 (U.S. and Canada)  
+44-1244-525-020 (Europe)  
Email: [cafic@corning.com](mailto:cafic@corning.com)  
Please specify the fiber type, attenuation, and quantity when ordering.

H1470

Issued: July 2014  
Supersedes: May 2014

TL9000/ISO9001 Certified



## Dimensional Specifications

Glass Geometry		Coating Geometry	
Fiber Curl	$\geq 4.0$ m radius of curvature	Coating Diameter	$242 \pm 5 \mu\text{m}$
Cladding Diameter	$125.0 \pm 0.7 \mu\text{m}$	Coating-Cladding Concentricity	$< 12 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5 \mu\text{m}$		
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$		

## Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation
		1310 nm, 1550 nm & 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	$-60^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$ *	$< 0.05$
Temperature Humidity Cycling	$-10^{\circ}\text{C}$ to $+85^{\circ}\text{C}$ up to 98% RH	$< 0.05$
Water Immersion	$23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	$< 0.05$
Heat Aging	$85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$	$< 0.05$
Damp Heat	$85^{\circ}\text{C}$ at 85% RH	$< 0.05$

\*Reference temperature =  $+25^{\circ}\text{C}$

Operating Temperature Range:  $-60^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$

## Mechanical Specifications

### Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress  $\geq 100$  kpsi (0.69 GPa).\*

\*Higher proof test levels available.

### Length

Fiber lengths available up to 25.2 km/spool.

## Performance Characterization Specification

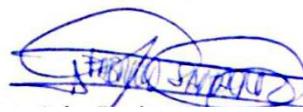
Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	$8.2 \mu\text{m}$
Numerical Aperture	0.14 NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.
Effective Group Index of Refraction ( $N_{eff}$ )	1310 nm: 1.4606 1550 nm: 1.4620
Fatigue Resistance Parameter ( $N_f$ )	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77 dB 1550 nm: -82 dB



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 27/11/2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Angie Selen Caluña Tisalema
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Facultad de Informática y Electrónica
<b>Carrera:</b> Telecomunicaciones
<b>Título a optar:</b> Ingeniera en Telecomunicaciones
 Hugo Oswaldo Moreno Avilés <b>Director del Trabajo de Titulación</b>
 Fabricio Javier Santacruz Sulca <b>Asesor del Trabajo de Titulación</b>

