



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS



IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE
ACOPLAMIENTO ENTRE GUÍAS DE ONDA CON DIFERENTE GEOMETRÍA

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS

PRESENTA:

I.F. GUILLERMO MÁRQUEZ RODRÍGUEZ

DIRECTOR(ES) DE TESIS:

DRA. AMPARO RODRÍGUEZ COBOS
DR. OSVALDO DEL POZO ZAMUDIO

SAN LUIS POTOSÍ, SLP.

JULIO 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS

Yo, Guillermo Márquez Rodríguez, estudiante del Posgrado en Ciencias Aplicadas de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, como autor de la tesis "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE ACOPLAMIENTO ENTRE GUÍAS DE ONDA CON DIFERENTE GEOMETRÍA", declaro que la tesis es una obra original, inédita, auténtica, personal, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales vigentes que protegen los derechos de autor y de propiedad intelectual e industrial. Las ideas, doctrinas, resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.

R E S U M E N

La tesis titulada "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE ACOPLAMIENTO ENTRE GUÍAS DE ONDA CON DIFERENTE GEOMETRÍA" se centra en el desarrollo y aplicación de un sistema para evaluar pérdidas de acoplamiento entre guías de onda ópticas. Aborda desde los principios teóricos básicos de las guías de onda y su importancia en tecnologías ópticas, hasta la metodología de fabricación y caracterización de guías de onda canal mediante fotolitografía e intercambio iónico. El documento detalla la implementación de un sistema de medición de pérdidas de acoplamiento basado en las dimensiones de los perfiles de haz involucrados, resaltando su precisión y relevancia para el avance de dispositivos de interconexión basados en guías de onda canal. Incluye también resultados significativos, discusiones y aplicaciones potenciales futuras del sistema propuesto.

A B S T R A C T

The thesis titled "IMPLEMENTATION OF A SYSTEM FOR MEASURING COUPLING LOSSES BETWEEN WAVEGUIDES WITH DIFFERENT GEOMETRIES" focuses on the development and application of a system to evaluate coupling losses between optical waveguides. It covers everything from the basic theoretical principles of waveguides and their importance in optical technologies to the methodology for the fabrication and characterization of channel waveguides through photolithography and ion exchange. The document details the implementation of a coupling loss measurement system based on the dimensions of the involved beam profiles, highlighting its precision and relevance for the advancement of interconnection devices based on channel waveguides. It also includes significant results, discussions, and potential future applications of the proposed system.

D E D I C A C I Ó N

"No importa cuán capacitado estés, tú solo no puedes cambiar el mundo. Pero eso es lo maravilloso del mundo."

Anónimo

Este trabajo de tesis la dedico a mis padres Guillermo y Noemí, y a mi hermana Naomi con mucho cariño para ustedes que siempre me apoyaron incondicionalmente en todo mi recorrido para que pudiera culminar con éxito, muchas gracias por todo, los quiero mucho.

Guillermo Márquez Rodríguez.

A G R A D E C I M I E N T O S

Mucha gente me apoyó para poder completar este desafío. Sin ustedes, no lo habría logrado, y por ello estaré eternamente agradecido.

A mi padre, Guillermo, quien, aunque ya no soy un niño, sigue preocupándose por mi bienestar. Gracias por tus consejos, por tus regaños, y sobre todo, por apoyarme en cada decisión que tomé. Te agradezco por estar siempre a mi lado.

A mi madre, Noemí, mi faro, quien jamás me ha dejado solo. Gracias por ser un ejemplo a seguir, por demostrarme que siempre puedo contar contigo, por compartir mis alegrías y mis tristezas, y por todos los sacrificios que hiciste para que yo pudiera alcanzar mis metas. No hay palabras suficientes para agradecer todo el apoyo que me has brindado.

A mi hermana, Naomi, mi mayor confidente, por iluminar mis días. A pesar de nuestras peleas, sé que siempre estás conmigo, en las buenas y, sobre todo, en las malas. Gracias por hacerme sentir que, pase lo que pase, siempre podré contar contigo.

A mis asesores, la Dra. Amparo Rodríguez Cobos, por darme la oportunidad de trabajar con ella, por su confianza, enseñanzas y apoyo incondicional durante mi formación; y al Dr. Osvaldo del Pozo Zamudio, por todo el respaldo brindado durante mi estancia. Su guía ha sido fundamental en este proceso. Además, agradezco al Ing. Francisco Jacobo Ramírez, miembro de los técnicos académicos, por su valiosa colaboración y apoyo.

A los sinodales que evaluaron mi trabajo, el Dr. Raúl Eduardo Balderas Navarro, el M.C. José Antonio Álvarez Salas, el Dr. Marco Vinicio Hernández Arriaga y al Dr. Oscar Ruiz Cigarillo, por sus valiosas observaciones, aportaciones y apoyo durante todo el proceso. Aprecio profundamente su tiempo y dedicación.

A mis amigos y compañeros del IICO, por los momentos compartidos, por hacer más amena la estancia en el instituto y por estar ahí en los momentos difíciles. Gracias por su amistad y compañía.

Al SECIHTI, por la beca que me permitió cursar la maestría, dándome la oportunidad de enfocarme en mis estudios sin preocupaciones económicas. Su apoyo fue clave para que esta meta se hiciera realidad.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN (interés y aplicaciones de la implementación del sistema).
2. ASPECTO TEÓRICO.
 - 2.1. Guías de ondas.
 - 2.2. El guiado de ondas.
 - 2.3. Modos de propagación y distribución de campos en guías de onda.
 - 2.3.1. Modos de propagación en guías dieléctricas.
 - 2.3.2. Distribución de campos electromagnéticos.
 - 2.4. Proceso de fotolitografía.
 - 2.5. Proceso de intercambio iónico.
 - 2.6. Fabricación de guías de onda por intercambio iónico en sustratos de vidrio.
 - 2.7. Metodología de evaluación de las pérdidas en guías de onda.
3. ASPECTO EXPERIMENTAL.
 - 3.1. Fabricación de las guías de onda mediante fotolitografía e intercambio iónico.
 - 3.1.1. Clivado de los sustratos.
 - 3.1.2. Limpieza de los sustratos.
 - 3.1.3. Depósito del material de barrera.
 - 3.1.4. Depósito y horneado de la resina.
 - 3.1.5. Insolación y revelado de la resina.
 - 3.1.6. Grabado del material de barrera.
 - 3.1.7. Intercambio iónico.
 - 3.1.8. Pulido de los extremos de las guías de onda.
 - 3.2. Caracterización de las guías de onda fabricadas.
 - 3.2.1. Caracterización al microscopio.
 - 3.2.2. Caracterización al perfilómetro.
 - 3.3. Simulación de una guía de onda canal.
 - 3.4. Montaje del sistema para la medición de pérdidas.
 - 3.4.1. Montaje experimental implementado.
 - 3.5. Procedimiento experimental.
 - 3.5.1. Acoplamiento de la luz visible a la guía de onda canal.
 - 3.5.2. Acoplamiento de la señal de análisis (NIR) a la guía de onda canal.
 - 3.5.3. Determinación de la distancia fibra-analizador, guía-analizador.
 - 3.5.4. Procesado de la información.
 - 3.6. Procesamiento de los datos.
 - 3.6.1. Código 1: Visualización y análisis del FWHM.
 - 3.6.2. Código 2: Estimación de Pérdidas de Acoplamiento.
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.
 - 4.1. Simulación de guías de onda tipo canal.
 - 4.2. Caracterización de las guías de onda fabricadas.
 - 4.2.1. Caracterización al microscopio.

Caracterización al perfilómetro.

- 4.3. Montaje del sistema para la medición de pérdidas.
- 4.4. Caracterización del perfil de haz de las guías de onda con diferente geometría.
 - 4.4.1. Fibra óptica.
 - 4.4.2. Guía iónica 1.
 - 4.4.3. Guía iónica 2.
 - 4.4.4. Guía iónica 3.
 - 4.4.5. Guía iónica 4.
 - 4.4.6. Guía polimérica 1.
 - 4.4.7. Guía polimérica 2.
- 5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.
- 6. REFERENCIAS.
- 7. APÉNDICES.

1. INTRODUCCIÓN

La fotónica se dedica al estudio de la generación, manipulación, detección e interacción de los fotones con la materia. El fotón, una partícula fundamental del campo electromagnético, proviene del término griego "phos", que significa luz. Este campo ha revolucionado diversas áreas tecnológicas y científicas, desde las telecomunicaciones hasta la computación cuántica, gracias a las excepcionales propiedades de la luz y su capacidad para transmitir información de manera rápida y eficiente [1].

Una de las aplicaciones más destacadas en fotónica es la transmisión de luz mediante guías de onda ópticas, estructuras dieléctricas diseñadas para dirigir la luz a lo largo de rutas predeterminadas. Estas guías están formadas por un núcleo dieléctrico rodeado de un material con un índice de refracción menor, lo que permite confinar la luz mediante el fenómeno de RIT. Existen diversos tipos de guías de onda, como las planas, de canal y cilíndricas, cada una con aplicaciones particulares en comunicaciones y procesamiento de señales ópticas. Las guías de onda tipo canal, en particular, son especialmente útiles para concentrar la luz en espacios reducidos, lo que las convierte en una opción ideal para dispositivos fotónicos integrados.

Con el avance de la fotónica, ha cobrado mayor importancia la comprensión y medición precisa de las pérdidas en las guías de onda, causadas por factores como la absorción del material, la dispersión superficial y la difracción. Estas pérdidas pueden limitar el desempeño de los dispositivos ópticos, lo que hace necesario contar con métodos de caracterización precisos para optimizar el diseño de los sistemas fotónicos. Este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema para medir las pérdidas en guías de onda tipo canal, utilizando un perfil de haz detallado como herramienta de análisis. La implementación de este sistema en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO) representa un avance significativo en la caracterización de guías de onda, proporcionando un método no invasivo y altamente preciso [2].

La interconexión de dispositivos ópticos juega un papel crucial en el desarrollo de nuevas tecnologías fotónicas, especialmente en aplicaciones como las ópticas de co-empaquetado para centros de datos. Estos sistemas de próxima generación requieren una alta densidad de ancho de banda, empaquetado eficiente y un bajo consumo energético. La eficiencia en la transferencia de señales ópticas a través de las guías de onda es clave para optimizar el desempeño de este tipo de sistemas. A medida que los dispositivos se integran en espacios más pequeños y con mayores velocidades de transmisión, la medición precisa de las pérdidas de acoplamiento se

convierte en un componente esencial para garantizar la calidad, fiabilidad y eficiencia energética de las conexiones ópticas [3].

Es en este contexto, de las interconexiones ópticas, en el que incide el presente trabajo: la implementación de una técnica de medición de pérdidas de acople entre dispositivos fotónicos basados en guías de onda.

Este documento está estructurado en siete capítulos:

1. **INTRODUCCIÓN:** Se presenta la relevancia del estudio de las pérdidas en guías de onda y la necesidad de sistemas de medición eficientes, especialmente en el contexto de la interconexión óptica para centros de datos.
2. **ASPECTO TEÓRICO:** Se abordan los principios básicos sobre las guías de onda y sus pérdidas, además de explicar el método de medición en el que se basa el sistema implementado.
3. **ASPECTO EXPERIMENTAL:** Se describe la implementación del sistema de medición, incluyendo la configuración experimental y los métodos de análisis de datos, así como el trabajo experimental realizado en la fabricación de guías de onda tipo canal.
4. **RESULTADOS Y ANÁLISIS:** Se discuten los resultados obtenidos, destacando la precisión y eficacia de la técnica empleada.
5. **CONCLUSIONES:** Se sintetizan los hallazgos clave y se exploran posibles mejoras y aplicaciones futuras del sistema de medición propuesto.
6. **Referencias:** Se listan las fuentes bibliográficas y científicas utilizadas en el desarrollo del estudio, incluyendo artículos y libros relevantes.
7. **Apéndices:** Se incluyen los códigos utilizados para el procesamiento y análisis de datos, así como scripts de simulación empleados en el estudio de las pérdidas en guías de onda.

2. ASPECTO TEÓRICO

2.1 Guías de ondas

Las guías de ondas son estructuras físicas utilizadas para dirigir ondas electromagnéticas desde un punto a otro. Estas pueden ser de diversos tipos (rectangulares, circulares, de tipo canal, etc.) como se muestra en la figura 1. Se caracterizan por su capacidad para confinar y guiar la energía de las ondas en direcciones específicas [4].

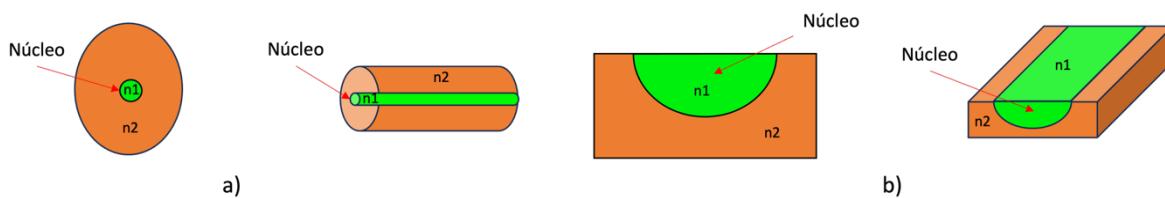


Figura 1. Diagramas de guías de onda de tipo cilíndrica y tipo canal vista de perfil
a) guía cilíndrica b) guía canal.

La estructura básica de una guía de onda óptica consiste en dos componentes principales: el núcleo y el revestimiento. El núcleo es el medio con mayor índice de refracción (n_1) dentro del cual se propaga la luz, mientras que el revestimiento circundante es un material con un índice de refracción menor (n_2). Esta diferencia en los índices de refracción es esencial para garantizar el confinamiento de la luz dentro del núcleo mediante el fenómeno de RIT. Cuando la luz incide en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento a un ángulo mayor que el ángulo crítico, la luz se refleja completamente dentro del núcleo sin perder energía hacia el revestimiento, permitiendo que la onda se guíe de manera eficiente a lo largo de la estructura [5].

El tipo de luz que una guía de onda puede confinar depende en gran medida de su composición y geometría. En guías de onda óptica, por ejemplo, se suelen confinar ondas en el rango del espectro visible e infrarrojo cercano, típicamente utilizadas en sistemas de telecomunicaciones. Las guías ópticas pueden ser diseñadas para soportar diferentes modos de propagación dependiendo de las dimensiones relativas del núcleo. Las guías de onda monomodo, por ejemplo, confinan la luz de tal manera que solo se permite la propagación de un único modo transversal, lo que minimiza la dispersión modal y es ideal para aplicaciones en las que la pureza de la señal es crucial, como en las telecomunicaciones de alta velocidad. En contraste, las guías multimodo permiten la propagación de múltiples modos, lo que puede llevar a la dispersión modal, pero resultan más adecuadas en aplicaciones donde se requiere el transporte de grandes cantidades de energía luminosa o donde la

distancia de propagación no es un factor crítico, como en sensores ópticos o en iluminación.

En términos de aplicaciones, las guías de onda rectangular son ampliamente utilizadas en sistemas de microondas, donde su geometría permite la propagación eficiente de señales en el rango de las frecuencias de microondas. Las guías de onda cilíndricas o fibras ópticas, por otro lado, son fundamentales en la transmisión de datos a través de redes de telecomunicaciones, permitiendo la transferencia de grandes volúmenes de información mediante pulsos de luz. Dentro de las fibras ópticas, el núcleo suele estar hecho de vidrio de sílice de alta pureza o polímeros especiales, mientras que el revestimiento está diseñado para ofrecer un contraste en el índice de refracción que asegure el confinamiento óptimo de la luz.

Las guías de onda de tipo canal, comúnmente empleadas en sistemas de óptica integrada y fotónica, permiten un confinamiento más eficiente de la luz en estructuras de tamaño reducido, haciendo posible la integración de múltiples funciones ópticas en un solo chip. Esto es fundamental para el desarrollo de tecnologías como los circuitos fotónicos integrados (PICs) al ofrecer velocidades mucho más rápidas y menor consumo energético en comparación con la electrónica convencional [6].

2.2 El Guiado de Ondas

El guiado de las ondas en el campo óptico está profundamente vinculado con la ley de Snell, esta describe cómo la luz cambia de dirección al pasar de un medio a otro con diferente índice de refracción. La ley establece que la relación entre el ángulo de incidencia (θ_1) y el ángulo de refracción (θ_2) está dada por la ecuación 1:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \dots \quad (1)$$

donde n_1 y n_2 , representan los índices de refracción de los dos medios involucrados. Este principio es fundamental para comprender cómo se produce el fenómeno de la reflexión interna total (RIT). Cuando la luz se propaga desde un medio de mayor índice de refracción (n_1) hacia un medio de menor índice (n_2), y si el ángulo de incidencia supera un cierto valor, conocido como ángulo crítico, el rayo de luz no se refracta hacia el segundo medio, sino que se refleja completamente dentro del medio de mayor índice de refracción como se muestra un ejemplo en la figura 2.

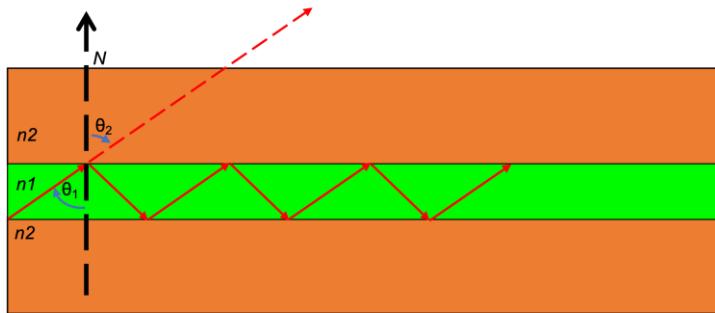


Figura 2. Ejemplo de la RIT entre dos medios ($n_1 > n_2$).

El ángulo crítico (θ_c) es el ángulo a partir del cual ocurre la RIT y puede calcularse mediante la ecuación 2:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \dots \quad (2)$$

Este fenómeno ocurre únicamente cuando $n_1 > n_2$, es decir, cuando el medio del cual proviene la luz tiene un índice de refracción mayor que el del medio al que la luz intenta transmitir. Si el ángulo de incidencia es menor al ángulo crítico, parte de la luz será transmitida al segundo medio; sin embargo, si el ángulo de incidencia es mayor al ángulo crítico, la luz permanecerá confinada en el primer medio debido a la RIT [7].

La RIT es esencial en la tecnología de las guías de onda y las fibras ópticas, ya que permite confinar y transportar la luz a lo largo de grandes distancias sin pérdidas significativas. Las fibras ópticas, aprovechan este principio para dirigir la luz dentro de su núcleo el cual tiene un índice de refracción mayor que su revestimiento de menor índice, lo que facilita que la luz se refleje en las paredes internas del núcleo sin escapar.

2.3 Modos de propagación y distribución de campos en guías de onda

2.3.1 Modos en guías dieléctricas

Las guías dieléctricas soportan modos de propagación, que son soluciones discretas de las ecuaciones de Maxwell, definidas por las condiciones de frontera impuestas por el índice de refracción de la guía y el sustrato. Estos modos describen las distribuciones espaciales de los campos eléctricos y magnéticos dentro de la guía y son responsables del confinamiento de la luz (figura 3).

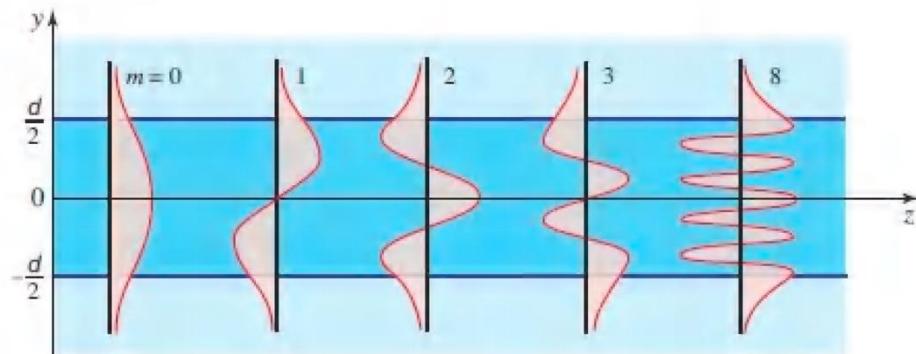


Figura 3. Distribuciones de campo para los modos guiados [8].

Existen dos categorías principales de modos: el modo fundamental y los modos superiores. El modo fundamental es el que presenta el menor número de nodos en su distribución transversal y es el más fácil de acoplar en una guía de onda debido a su alta eficiencia de confinamiento. Los modos superiores tienen distribuciones de campo más complejas y aparecen cuando la guía tiene un ancho suficientemente grande para soportarlos. Esto se describe matemáticamente mediante el número adimensional V , conocido como el número de normalización, que se define en la ecuación 3:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots \quad (3)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz, a es el ancho de la guía, y n_1 y n_2 , son los índices de refracción del núcleo y el revestimiento, respectivamente. Cuando $V < 2.405$, solo se permite el modo fundamental, mientras que valores mayores permiten la propagación de modos superiores [7].

En guías dieléctricas, los modos se clasifican además como TE (Transversal Eléctrico) y TM (Transversal Magnético), dependiendo de la orientación de los campos eléctricos y magnéticos. Los modos TE tienen su componente eléctrico completamente transversal a la dirección de propagación, mientras que los modos TM tienen esta propiedad para el componente magnético. Estas características son esenciales para entender el comportamiento de los campos en las guías [5].

2.3.2. Distribución de campos electromagnéticos

La forma en que se distribuyen los campos electromagnéticos dentro de una guía dieléctrica está determinada por las Ecuaciones de Maxwell, las cuales, en un

medio lineal, no dispersivo, homogéneo, isótropo y libre de fuentes, toman la siguiente forma:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \dots\dots (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \dots\dots (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \dots\dots (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \dots\dots (7)$$

en este contexto, los campos de desplazamiento eléctrico D y la inducción magnética B están relacionados con los campos eléctricos y magnéticos a través de las siguientes expresiones: $D=\epsilon E$ y $B=\mu H$. El campo eléctrico \mathbf{E} describe la parte eléctrica de la onda, mientras que el campo magnético \mathbf{H} se relaciona con la inducción magnética \mathbf{B} . Por su parte, μ (permeabilidad) caracteriza la respuesta de un material ante la presencia de campos magnéticos, y ϵ (permitividad) describe la respuesta del medio frente a campos eléctricos. Es importante destacar que, en un material cualquiera, estos parámetros (μ y ϵ) pueden diferir de los valores del vacío, denotados como μ_0 y ϵ_0 , respectivamente.

A partir de estas ecuaciones puede comprenderse cómo se propaga y se confina la energía electromagnética en el interior de la guía, dependiendo de las propiedades del núcleo y el revestimiento. En particular, para estudiar la propagación de campos electromagnéticos en el tiempo y el espacio dentro de la guía, se recurre a la ecuación de onda, que puede expresarse como:

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \dots\dots (8)$$

donde ∇^2 es el operador Laplaciano (que corresponde a las coordenadas cartesianas $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$), y c es la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio, definida como:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \dots\dots (9)$$

Esta constante representa la velocidad con la que se propagan las ondas electromagnéticas en el material dado. En el caso particular del vacío, esta velocidad toma su valor máximo, conocido como la velocidad de la luz en el vacío (3.0×10^8 m/s).

Dicha expresión (10) se obtienen combinando y desarrollando las ecuaciones de Maxwell para campos alternos y asumiendo que no hay fuentes libres dentro del medio (por ejemplo, ausencia de cargas y corrientes libres en la región de la guía).

Ahora bien, para simplificar el análisis se suele asumir que las ondas son armónicas en el tiempo, es decir, que pueden describirse mediante una dependencia del tipo $e^{-j\omega t}$. En esta expresión, e es la base de los logaritmos naturales, $-j$ denota la unidad imaginaria, ω es la frecuencia angular, definida como $\omega=2\pi f$ siendo f la frecuencia en Hz y t el tiempo. Mediante esta aproximación, se separa la dependencia temporal de la espacial, y la ecuación de onda se transforma en la ecuación de Helmholtz que permite estudiar los campos espaciales para cada frecuencia:

$$\nabla^2 U + k^2 U = 0 \dots \dots (10)$$

donde $k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$ es el número de onda en el medio.

La ecuación de Helmholtz resulta fundamental para determinar los modos de propagación (TE, TM o híbridos) en la guía y, en cada uno de ellos, la forma en que se distribuyen los campos en el plano transversal (perpendicular a la dirección de propagación). Por ejemplo, se pueden encontrar expresiones analíticas que describen el perfil del campo eléctrico o magnético dependiendo de las condiciones de frontera en la interfaz núcleo-revestimiento [9].

Al resolver las condiciones de continuidad del campo en las fronteras de la guía, se obtienen las siguientes expresiones generales para el campo en la región central (interno) y en la región externa (fuera del núcleo asumiendo $-2d \leq y \leq 2d$ para la parte interna y $|y| > 2d$ para la parte externa, como se observa en la figura 3):

$$u_m \propto \begin{cases} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_m y\right), & \text{para } m = 0, 2, 4, \dots \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_m y\right), & \text{para } m = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \dots \dots (11)$$

$$u_m \propto \begin{cases} \exp(-\gamma_m y), & \text{para } y > 2d, \\ \exp(\gamma_m y), & \text{para } y < -2d \end{cases} \dots \dots (12)$$

donde γ_m está relacionado con la constante de propagación evanescente (en la región externa), λ es la longitud de onda en el medio y θ_m el ángulo relacionado con el modo de propagación m .

u_m representa la distribución transversal (o función de amplitud transversal) asociada al modo m . Es decir, para cada modo m , la solución del campo en la región interna se describe mediante funciones seno o coseno (dependiendo de la paridad de m), mientras que en la región externa decrece exponencialmente debido a la presencia de la constante γ_m .

Estos resultados permiten describir cómo los campos electromagnéticos permanecen confinados en el núcleo (campo interno) y decaen exponencialmente en la región externa, lo que asegura la propagación guiada en el interior de la estructura [10].

2.4 Proceso de fotolitografía

La fotolitografía es una técnica que utiliza la luz para transferir un patrón geométrico de una máscara a un químico sensible llamado fotorresina. El proceso básico consta de cinco etapas que se esquematizan en la figura 4, las cuales son: limpieza del sustrato (1); depósito (2), horneado (3), exposición UV (4) y revelado de la fotorresina (5) [11, 13].

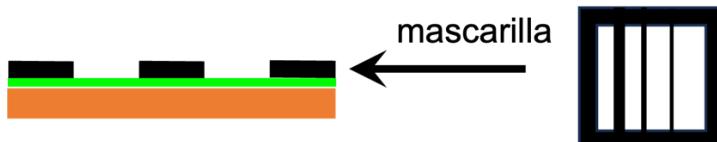
1. Limpieza del sustrato



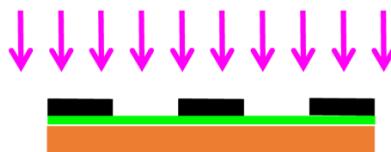
2. Depósito de la fotorresina



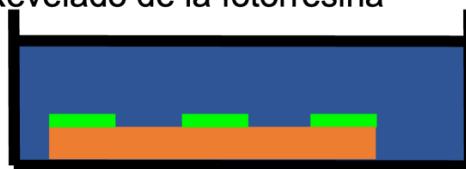
3. Horneado de la fotorresina



4. Exposición UV de la fotorresina



5. Revelado de la fotorresina



6. Resultado



Figura 4. Esquema del proceso de fotolitografía.

Primeramente (etapa 1), el sustrato se somete a un proceso de limpieza para después calentar a una temperatura que elimine cualquier humedad que pueda estar presente en la superficie.

Después (etapa 2), sobre el sustrato se deposita la fotorresina mediante la técnica de depósito llamada "spin coating", en donde, la fotorresina se vierte sobre el sustrato y se centrifuga rápidamente para producir una capa delgada.

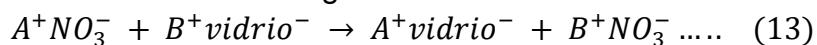
A continuación (etapa 3), el sustrato se hornea a temperatura controlada para solidificar la fotorresina, mejorar su adhesión al sustrato y eliminar el exceso de disolvente.

Después de finalizado el proceso de horneado, el sustrato se expone a la luz ultravioleta (UV) (etapa 4) interponiendo la máscara en la que se encuentra el diseño que se desea imprimir sobre la resina. La exposición a la luz provoca un cambio químico que permite eliminar parte de la fotorresina mediante una solución especial, llamada "revelador" (etapa 5) [12].

Obteniendo como resultado (etapa 6) el grabado de la mascarilla sobre la fotorresina.

2.5 Proceso de intercambio iónico

El propósito del proceso de intercambio iónico es modificar el índice de refracción del vidrio, lo que permite confinar la luz dentro del material. Para lograr este efecto, es necesario delinear y definir la región deseada sobre la superficie del vidrio, utilizando fotolitografía, como se describe en el apartado 2.3. Este proceso se basa en la existencia de múltiples sitios estables dentro de la red del vidrio que pueden alojar iones modificadores. En consecuencia, los iones alcalinos presentes en la estructura vítreos pueden activarse térmicamente y desplazarse fácilmente entre dichos sitios. Este movimiento facilita el reemplazo de los iones alcalinos cercanos a la superficie del vidrio por otros iones de dopaje de igual valencia, tales como la sustitución de iones, Na^+ por Ag^+ , Na^+ por K^+ , Na^+ por Tl^+ , etc. La reacción química que describe esta dinámica es la siguiente:



En esta ecuación, A^+ representa el ion dopante (proveniente de la fuente de iones) y B^+ es el ion original del vidrio. Este proceso de sustitución de iones modifica parcialmente la composición y, por lo tanto, las propiedades ópticas del vidrio [12].

La Figura 5 ilustra este proceso.

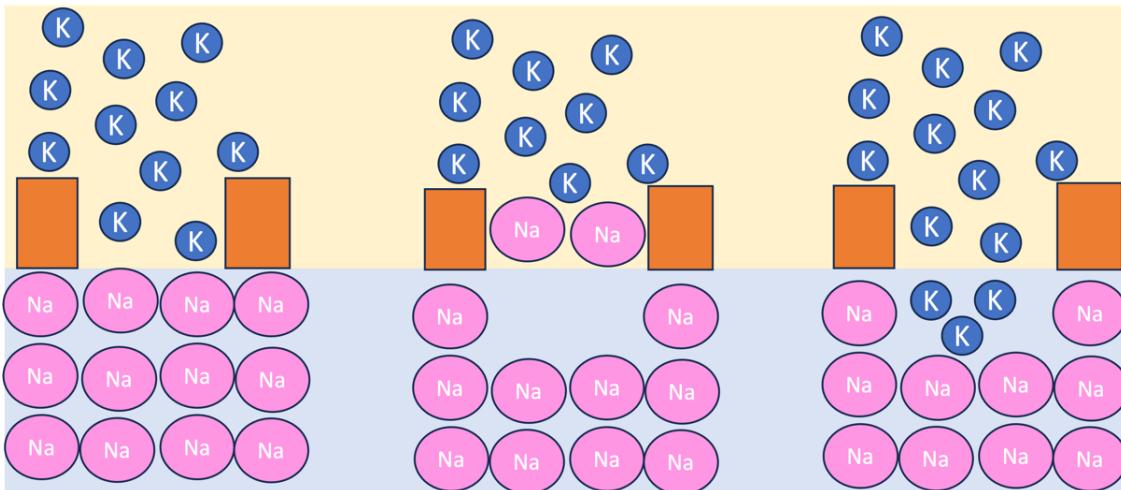


Figura 5. Diagrama de un intercambio iónico entre iones de Na^+ por K^+ .

Con base en el mecanismo de modificación del índice de refracción, es posible fabricar guías de onda del tipo canal a través del intercambio iónico sobre un sustrato de vidrio. Para ello, se genera un patrón en un material previamente depositado sobre el sustrato, que actúa como una barrera durante el intercambio iónico. Existen dos métodos principales de configuración para el intercambio de iones: uno se basa en el uso de sales fundidas, y el otro en películas metálicas, dependiendo de la fuente de iones de dopaje. De estos, el método de intercambio con sales fundidas es el más común [13].

Este proceso puede llevarse a cabo de diferentes maneras. Una secuencia típica incluye el intercambio térmico de sales fundidas, con o sin un campo eléctrico aplicado, seguido de un entierro asistido por campo eléctrico y un recocido térmico. Esta combinación de técnicas ha demostrado ser eficaz para la fabricación de guías de ondas en vidrio [11].

2.6 Fabricación de guías de onda por intercambio iónico en sustratos de vidrio

Este proceso de fabricación permite obtener guías de onda con perfiles del índice de refracción graduales y bajas pérdidas de propagación, optimizando su rendimiento para aplicaciones fotónicas avanzadas [14].

La fabricación de guías de onda por intercambio iónico incluye el proceso de fotolitografía descrito en la sección 2.4. La diferencia en este caso, radica en la etapa 2 (figura 6) que consiste en el depósito de un material de barrera sobre el sustrato de vidrio.

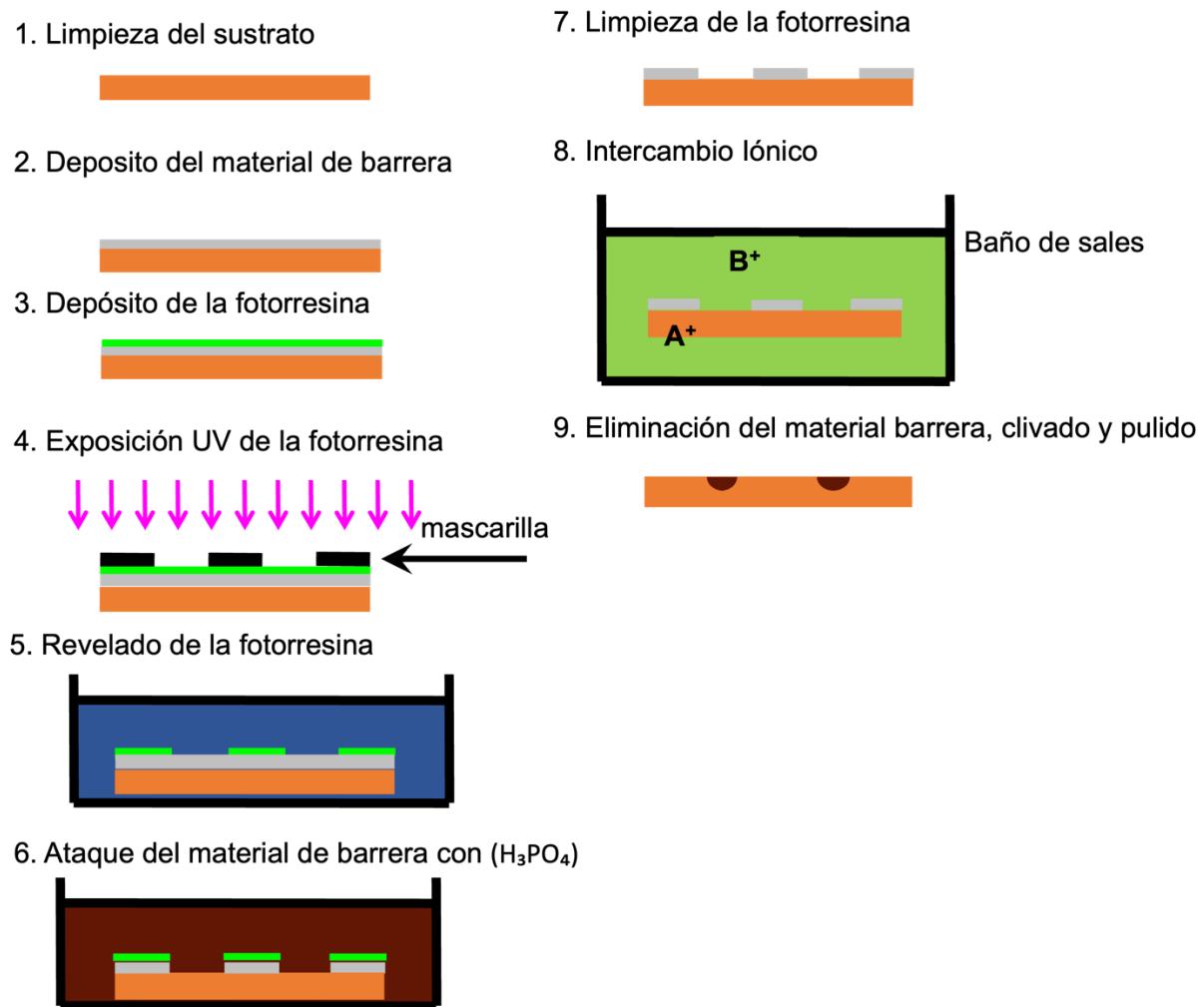


Figura 6. Proceso de fabricación de guías onda del intercambio iónico.

En este caso el proceso incluye 4 etapas diferentes a las descritas en el apartado anterior (2.4), estas etapas son:

- Etapa 2: Depósito del material de barrera.
El material de barrera, actúa como una protección en las áreas donde no se quiere que ocurra el intercambio iónico. La uniformidad del recubrimiento es crucial, ya que define con precisión las regiones donde el intercambio no ocurrirá. La elección de este material depende de los iones a intercambiar.
- Etapa 6: Ataque del material de barrera.
Tras el revelado de la resina, el material de barrera expuesto en esas zonas se somete a un ataque químico selectivo para eliminarlo, dejando completamente expuesta la superficie del sustrato en los lugares donde se formarán las guías de onda.
- Etapa 8: Intercambio iónico.

En esta fase, el sustrato se sumerge en un baño de sal fundida, por ejemplo nitrato de potasio (KNO_3), lo que permite que los iones de potasio (K^+) se intercambien con los iones de sodio (Na^+) presentes en la matriz vítreo en las zonas expuestas. Este intercambio iónico altera localmente el índice de refracción del material, formando los canales por los que se guiará la luz. La profundidad y el perfil del índice de refracción se controlan mediante la temperatura de la solución y el tiempo de inmersión del sustrato.

- Etapa 9: Eliminación del material de barrera, clivado y pulido.
Tras el intercambio iónico, se realiza la eliminación del material de barrera restante a través de otro ataque químico, seguido del clivado y pulido del sustrato para obtener superficies limpias y planas en los extremos de las guías de onda. Este pulido es vital para garantizar un buen acoplamiento óptico entre la guía de onda y otros dispositivos, ya que ayuda mucho en la minimización de las pérdidas de acoplamiento y mejora la eficiencia del dispositivo final [13].

2.7 Metodología de evaluación de las pérdidas en guías de onda

La estimación de las pérdidas de acoplamiento cara a cara entre dos guías de onda cualesquiera es crucial para la optimización del diseño y fabricación de dispositivos fotónicos integrados [15, 16]. En el desarrollo de este proyecto, se implementó un sistema óptico para medir las pérdidas de acoplamiento que se presentan al conectar cara a cara una fibra óptica y una guía de onda de tipo canal.

El principio del funcionamiento de este método está basado en la estimación del desajuste entre el tamaño de los modos guiados a la entrada de la fibra óptica y de la guía de onda. Estas pérdidas se pueden calcular conociendo el diámetro de los modos respectivos y determinando de manera precisa el parámetro conocido como “coeficiente de acoplamiento” dado por la teoría de propagación de modos [17, 18].

Las pérdidas son un aspecto inevitable a considerar dentro de la tecnología de fabricación de dispositivos basados en guías de onda y se clasifican principalmente en pérdidas de transmisión y pérdidas por acoplamiento del haz de luz a la entrada de la guía.

Las pérdidas de transmisión causadas por la interacción del haz de luz con el material de la guía están ligadas a las propiedades físicas del material y su capacidad para transmitir luz con una mínima absorción y dispersión. Estas pérdidas son el resultado de varios factores, entre ellos la absorción, la dispersión causada por irregularidades dentro del material, y la radiación de la señal fuera de la guía de onda [19].

Las pérdidas de acoplamiento por otro lado están asociadas con los aspectos geométricos y estructurales de la guía de onda. Resultan tanto de las geometrías, es decir, de las variaciones en las dimensiones de las guías de onda involucradas que causen desviación en la propagación del modo guiado como pérdidas adicionales en la entrada debido a las imperfecciones de las interfaces y a la alineación deficiente entre las guías de onda acopladas.

En este tipo de dispositivos las Pérdidas Totales (P_T) de la potencia acoplada en una guía de onda están dadas por la ecuación 14 [6, 20].

$$P_T[dB] = P_t + P_a \quad (14)$$

en donde P_t y P_a representan las Pérdidas de transmisión y de acoplamiento, respectivamente. Teniendo como definición de Pérdidas de transmisión (15).

$$P_t[dB] = -10 \log \left[\frac{P(z)}{P(0)} \right] \quad (15)$$

en donde P_z y P_0 representan la Potencia de la señal guiada después de propagarse una distancia z en la guía de onda y la Potencia acoplada al inicio respectivamente.

Las Pérdidas de acoplamiento, en la ecuación (16), están dadas en función del coeficiente de acoplamiento (η). Dicho parámetro deducido por la teoría de propagación de modos es posible formularlo en términos de las dimensiones de los modos guiados por las guías de onda involucradas tal y como es expresado en la ecuación (17) [20].

$$P_a[dB] = -10 \log \eta \quad (16)$$

$$\eta = \frac{4 \left[\left(\left[\frac{1}{b^2} + \frac{1}{e^2} \right]^{-1/2} + \left[\frac{1}{c^2} + \frac{1}{f^2} \right]^{-1/2} \right)^2 \right]}{ad(b+c)(e+f)\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{d^2}\right)} \quad (17)$$

En donde los parámetros a , b , c , d , e , y f representan las dimensiones de los modos guiados obtenidos del ancho de pulso a la mitad de la máxima intensidad (FWHM), tal y como se ilustra en la figura 1. En la cual se esquematiza el caso particular del acoplamiento de luz entre una guía de onda cilíndrica o fibra óptica (izquierda) y una guía de onda canal (derecha).

En la Figura 7a, se muestra el sentido de propagación de un haz de luz acoplado inicialmente a la fibra óptica que se encuentra cara a cara con la guía de onda tipo canal para el acoplamiento de la señal transmitida que se observa a la salida de la guía proyectada en el plano (x, y).

En la Figura 7b se muestra una vista de la cara transversal de ambas guías de onda, en la que se pueden apreciar las geometrías de cada estructura sin guardar una proporción a escala real. Se observa que en el caso de la fibra óptica el núcleo es circular mientras que en la guía de onda tipo canal es semi-elíptico [21].

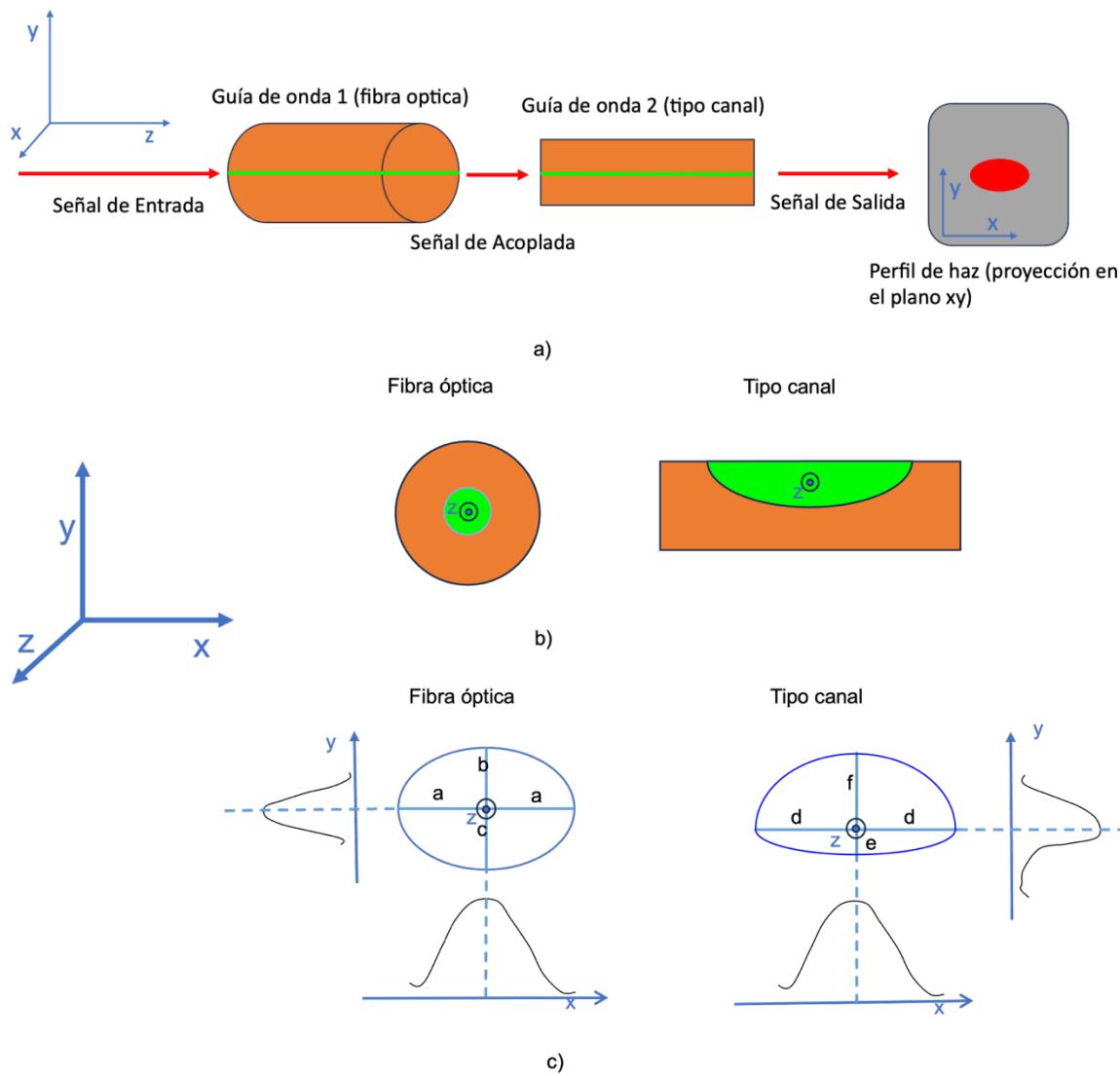


Figura 7. Esquema de las proyecciones de los modos guiados por dos guías de onda con diferente geometría.

En la Figura 7c, se visualiza una perspectiva de la distribución de intensidad modal de cada guía de onda. Para cada modo se esquematizan las proyecciones ortogonales sobre los ejes (x, y) representadas inferior y lateralmente, respectivamente. Las proyecciones inferiores en dirección “x” muestran una distribución gaussiana para ambas geometrías mientras que las proyecciones laterales en la dirección “y” corresponden a una distribución gaussiana para la fibra óptica y una distribución semi-gaussiana elíptica y achataada para la guía de onda de tipo canal. Cabe mencionar que tales características de las guías de onda canal se derivan directamente del método de fabricación mediante intercambios iónicos de sales. Este perfil semi-elíptico achataado se presenta independientemente del tipo de sal o sustrato dieléctrico empleado en el proceso del intercambio iónico.

Como se mencionó anteriormente, el tamaño y la geometría de los modos guiados son cruciales para el acoplamiento eficiente de la luz entre diferentes tipos de guías de onda. Es en este contexto donde incide la importancia del desarrollo del presente trabajo, cuyo objetivo radica en implementar, en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO), un método preciso y confiable para la medición de pérdidas de acoplamiento entre guías de onda de diferentes geometrías. La implementación de este sistema promete mejorar significativamente la comprensión y el diseño de guías de onda, contribuyendo al avance de la fotónica integrada en el IICO mediante el desarrollo de dispositivos fotónicos más eficientes e incidiendo en la formación de alumnos más capacitados en técnicas avanzadas de medición óptica.

3. ASPECTO EXPERIMENTAL

3.1 Fabricación de las guías de onda tipo canal mediante fotolitografía e intercambio iónico

El proceso de fabricación de guías de onda canal consta de varios pasos, en los cuales es muy importante trabajar en un ambiente óptimo para tener los mejores resultados, por lo cual la mejor opción es trabajar en un cuarto limpio.

El proceso se revisó de una manera general en la sección 2.4 (Proceso de fotolitografía) y se ilustra en el esquema de la figura 4, a continuación se describen a detalle las diferentes etapas de este proceso.

3.1.1 Clivado de los sustratos

Durante el proceso de fabricación, se trabaja con sustratos de vidrio de aproximadamente una pulgada cuadrada. Para obtener estas piezas, se parte un portaobjetos de microscopio en dos secciones iguales, tal como se puede observar en la figura 8 (c). El procedimiento comienza realizando una marca en la superficie del vidrio utilizando un lápiz con punta de diamante (figura 8 (a)), y luego se aplica una leve presión hasta que las dos partes se separan con cuidado (figura 8 b).

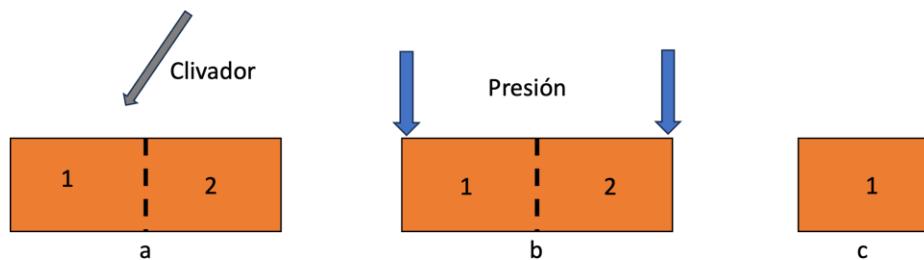


Figura 8. Esquema del proceso de clivado.

3.1.2 Limpieza de los sustratos

La limpieza de los sustratos es crucial para garantizar una adecuada adherencia de los materiales que se aplicarán sobre ellos durante el proceso de fabricación. Para remover la suciedad, los sustratos se colocan en un soporte adecuado y se sumergen en un vaso de precipitado que contiene una mezcla de 100 ml de agua con 5 ml de jabón líquido (figura 9). El vaso se coloca sobre una parrilla eléctrica hasta que la solución comience a hervir. En ese momento, se reemplaza el agua con jabón por agua limpia, repitiendo el enjuague varias veces hasta que

desaparezca toda la espuma. Posteriormente, cada sustrato se enjuaga cuidadosamente de forma individual, asegurándose de eliminar completamente los restos de jabón. Luego, se secan utilizando una pistola de nitrógeno, dirigiendo el flujo de gas hacia la pinza que los sostiene. Después, se cambia a una pinza limpia para secar cualquier área que aún esté húmeda. Una vez que los sustratos están completamente secos, se almacenan en sobres individuales para prevenir daños o contaminaciones.



Figura 9. Vaso precipitado con agua y jabón.

3.1.3 Depósito del material de barrera

Como material de barrera se deposita aluminio ya que este es inerte al baño de sales fundidas de potasio y no altera el proceso de ionización en el baño de sales. Además, el aluminio posee buena adherencia al sustrato y se ataca químicamente con relativa facilidad sin que se vea afectado el sustrato.

3.1.4 Depósito y horneado de la resina

El método de *spin coating* se emplea para aplicar la resina sobre el material de barrera. En la figura 10 se muestra la centrífuga utilizada. El procedimiento comienza colocando el sustrato en el centro de la centrífuga, asegurándose mediante vacío, y depositando entre 8 y 10 gotas de resina en el centro. Luego, el sustrato se hace girar durante 10 segundos a 2500 rpm, lo que permite que la resina se extienda uniformemente sobre la superficie del sustrato gracias a la fuerza centrífuga, formando una capa delgada. La distribución de la resina puede variar dependiendo de factores como su viscosidad, la velocidad de rotación y la duración del giro; si el tiempo o la velocidad son insuficientes, se puede obtener una capa más gruesa que no cubra completamente el sustrato. Para este proceso se utilizó

resina positiva del modelo MICROPOSITS1800 SERIES PHOTO RESISTS de la marca Shipley. Para asegurar que la resina se adhiera correctamente al material de barrera, se somete a un horneado durante 25 minutos a una temperatura cercana a los 90 °C, lo que ayuda a evaporar los solventes de la película y compacta la resina tras su aplicación. Es fundamental destacar que, tras la aplicación de la resina, el sustrato debe mantenerse alejado de la luz natural, ya que la exposición a radiación ultravioleta puede alterar su composición química, volviéndola inservible para el proceso de fabricación.



Figura 10. Chematec KW-4A.

3.1.5 Insolación y revelado de la resina.

Una vez que el sustrato con la resina ha sido horneado, se deja enfriar antes de proceder al proceso de insolación, el cual tiene como objetivo grabar el patrón deseado sobre la fotorresina. En este caso, el patrón de interés corresponde a los canales presentes en la mascarilla utilizada, los cuales se muestran en la figura 11.



Figura 11. Imagen de la máscara que se utilizó en el proceso de litografía.

La figura 12 presenta los diferentes componentes del sistema de alineación e insolación utilizado. Este sistema permite inmovilizar el sustrato en el portamuestras

mediante succión por vacío, evitando cualquier movimiento indeseado cuando el sustrato entra en contacto con la mascarilla. Previo a la insolación, el sistema de iluminación y el microscopio integrado permiten alinear con precisión los motivos de la mascarilla sobre el sustrato. Una vez lograda la alineación óptima y con ambos elementos en contacto, se procede a la exposición ultravioleta (insolación) utilizando los parámetros previamente establecidos, aplicando una radiación UV durante un tiempo de 900 segundos.

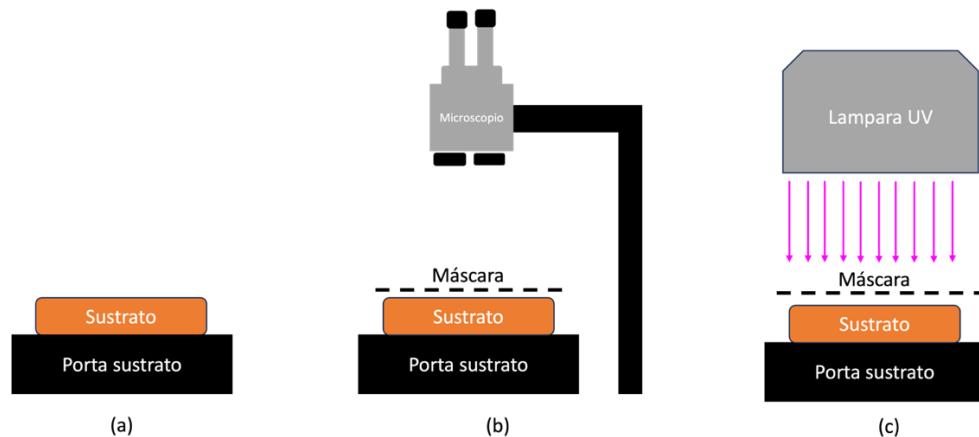


Figura 12. Esquema del sistema de insolación UV. (a) porta sustrato con sustrato succionado, (b) microscopio-porta sustrato- mascarilla, (c) porta sustrato- insoladora UV.

Como se mencionó anteriormente, se utilizó una resina positiva sobre los sustratos. Este tipo de resina tiene la característica de volverse completamente soluble en el disolvente revelador en las áreas expuestas a la radiación ultravioleta, a diferencia de las áreas no expuestas, que permanecen insolubles. Para llevar a cabo el proceso de revelado, el sustrato se sumerge en el revelador durante aproximadamente 10 segundos, lo que provoca que las áreas irradiadas comiencen a disolverse y desaparezcan paulatinamente. Fue fundamental no exceder el tiempo de inmersión en el revelador, ya que un tiempo excesivo podría eliminar el patrón obtenido mediante la mascarilla, afectando así la definición de los canales.

Tras el revelado inicial, el sustrato se enjuaga cuidadosamente con agua para eliminar cualquier residuo de revelador. Luego, se inspecciona bajo un microscopio para evaluar la calidad del proceso. En algunos casos, es necesario realizar un segundo revelado de 5 a 10 segundos adicionales, dependiendo del tiempo de uso del revelador. En total, el proceso de revelado tuvo una duración aproximadamente de 20 segundos, distribuidos en tres intervalos de 10, 5 y 5 segundos, respectivamente, garantizando un resultado óptimo.

3.1.6 Grabado del material de barrera

Para grabar los canales en el aluminio, se lleva a cabo un ataque químico sumergiendo la muestra en ácido ortofosfórico (H_3PO_4) a 40°C, calentado mediante baño maría, como se ilustra en la figura 13. El tiempo de exposición del aluminio al ácido varía dependiendo del estado previo del ácido y del grosor de la capa de aluminio aplicada. Después de que el aluminio ha sido atacado, la muestra se enjuaga con abundante agua y se revisa bajo el microscopio para asegurarse de que los canales hayan quedado completamente abiertos y que el sustrato de vidrio esté totalmente expuesto, lo que indica que está listo para el siguiente paso, el intercambio iónico. Si es necesario, se puede repetir el proceso de ataque químico.

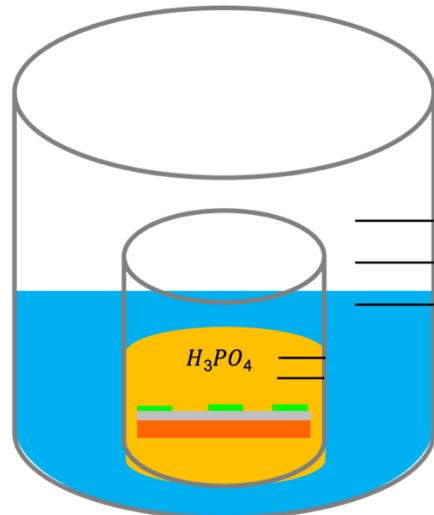


Figura 13. Imagen de un ataque de aluminio.

3.1.7 Intercambio iónico

Tras completar la fotolitografía y con los canales abiertos en el aluminio, el siguiente paso es el proceso de intercambio iónico, realizado en el horno mostrado en la figura 14. Este equipo se ajusta a 380°C. A dicha temperatura, los iones de sodio en el vidrio adquieren suficiente movilidad para intercambiarse con los iones de potasio del baño de sales de nitrato de potasio (KNO_3), el sustrato debe mantenerse sobre el recipiente desde el comienzo del calentamiento para que se caliente gradualmente junto con las sales, esto es así para evitar el caso donde el vidrio explote por un cambio brusco de temperatura.

Con el horno a la temperatura necesaria se desciende la muestra de manera controlada, sumergiéndola lentamente en el baño de sales fundidas para iniciar el intercambio iónico. La duración del proceso puede variar según las características

del sustrato y del tipo de sal utilizada; en este caso, el intercambio tomó aproximadamente ocho horas. Una vez terminado el tiempo de intercambio, el horno se apaga y la muestra se eleva, dejándola sobre el recipiente hasta que se enfrie gradualmente. Este enfriamiento controlado es fundamental para prevenir cualquier tipo de fractura o fisura en el sustrato debido a un cambio térmico abrupto.



Figura 14. Horno de temperatura controlable para intercambios iónicos.

3.1.8 Pulido de los extremos de las guías de onda canal

Para realizar el pulido de los extremos de las guías de onda, la muestra se coloca en posición vertical y se utilizan discos abrasivos con tamaños de grano progresivamente más finos, que van desde 60 hasta 0.1 micrómetros. Cada disco se aplica durante un tiempo aproximado de 5 minutos en cada extremo de la guía, reduciendo gradualmente el tamaño del grano en cada etapa.

Antes de cambiar a un disco de grano más fino, se inspecciona la calidad del pulido en el microscopio para asegurar que la superficie esté libre de defectos significativos y verificar que el proceso avanza correctamente. Este paso intermedio es crucial, ya que permite identificar cualquier imperfección que aún necesite corregirse.

El objetivo principal de este procedimiento es eliminar los defectos en las entradas y salidas de los canales de las guías. Estas imperfecciones pueden causar pérdidas significativas de luz al acoplarse a las guías, disminuyendo la eficiencia de acoplamiento y afectando el rendimiento en la transmisión de luz a través de ellas.

3.2 Caracterización de las guías de onda fabricadas

La caracterización de las guías de onda es una etapa en el proceso de fabricación, ya que permite verificar el ancho de los canales grabados y modificar los parámetros experimentales utilizados en caso de ser necesario. Se utilizan dos métodos para la caracterización de las guías de onda tipo canal: el primero consiste en una verificación visual de los canales a través de un microscopio y el segundo es la medición del ancho y la altura de los canales mediante el uso de un perfilómetro.

3.2.1 Caracterización al microscopio

En la primera etapa, se llevó a cabo una verificación visual de los canales utilizando un microscopio. Esto permite observar la superficie del material de barrera y evaluar posibles defectos. Las muestras se montan sobre la platina limpiada previamente. Posteriormente, se realizan las observaciones con un objetivo de 5x que permite capturar imágenes detalladas de los canales. Durante esta inspección, se evalúan la calidad y continuidad de los canales grabados, así como la presencia de cualquier irregularidad que pudiera afectar el desempeño óptico de las guías.

3.2.2 Caracterización al perfilómetro

En el segundo método, se utiliza un perfilómetro modelo Alpha-Step 500 de la marca Tencor para medir con precisión tanto el ancho como la altura de los canales grabados en aluminio (figura 15).

Esta caracterización comienza con el posicionamiento de la muestra, que se coloca cuidadosamente sobre la plataforma del perfilómetro y asegura una fijación estable. El área de interés, los canales, se identifica mediante el sistema de visualización del perfilómetro para optimizar el proceso. Luego, la punta del perfilómetro hace un barrido a lo ancho de los canales registrando los datos correspondientes al espesor del material, el ancho de los canales y la separación entre estos.

En conclusión, la combinación de la caracterización mediante el perfilómetro y la inspección visual a través del microscopio proporciona una robusta evaluación inicial de los canales grabados en aluminio.

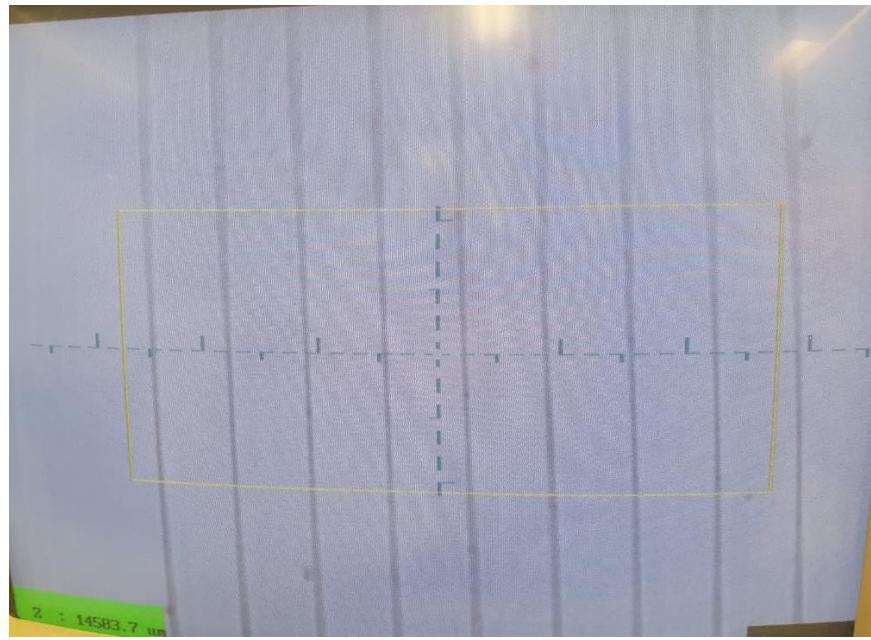


Figura 15. Vista del perfilómetro sobre una muestra.

3.3 Simulación de guías de onda canal

En todo proceso experimental, las simulaciones son fundamentales para predecir y analizar el comportamiento de los sistemas. En el caso de las guías de onda tipo canal, herramientas como FreeBPM [22] permiten estimar los modos de propagación y los índices efectivos, facilitando la comparación con los resultados experimentales y optimizando el diseño. Los valores de los parámetros introducidos en el simulador corresponden a los valores experimentales de fabricación de las guías de onda tipo canal por intercambio iónico y la longitud de onda λ de caracterización.

Los parámetros que se modifican se muestran en la tabla 1 y son los siguientes: la longitud de onda $\lambda = 1360$ nm, el índice de refracción del sustrato $n_s = 1.5098$, el índice de refracción de la guía $n_g = 1.5198$, el ancho de la guía (w) toma los valores de 1.6, 2.5, 20, 50 y 90 μm .

| Parámetros en el simulador FreeBPM | Valor(es) |
|---|----------------------|
| Longitud de onda, λ , [nm] | 1360 |
| Índice de refracción del sustrato | 1.5098 |
| Índice de refracción de la guía | 1.5198 |
| Ancho de la guía, w , [μm] | 1.6, 2.5, 20, 50, 90 |

Tabla 1. Tabla de parámetros utilizados en el simulador FreeBPM.

La figura 16 muestra el esquema de la simulación de la guía de onda canal, donde el eje vertical z representa la dirección de propagación de la onda simulada, y el eje horizontal x corresponde al ancho de la guía. La región verde indica la guía de onda, mientras que la región naranja corresponde al sustrato con un índice de refracción menor.

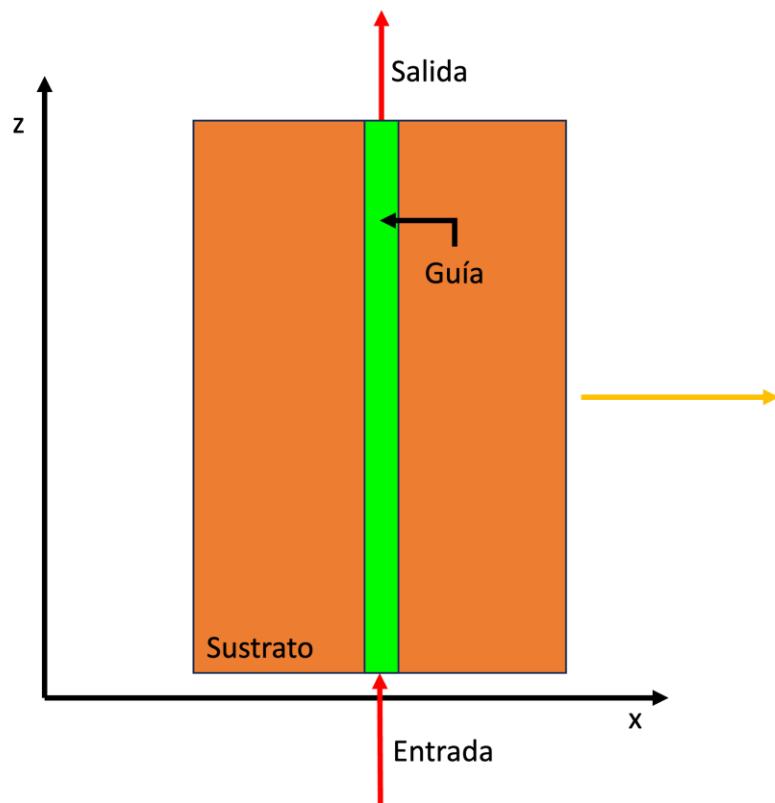


Figura 16. Esquema de simulación.

3.4 Montaje del sistema para la medición de pérdidas

3.4.1 Montaje experimental implementado

El proceso de acoplamiento de la luz a una guía de onda canal requiere de la visualización del haz acoplado, por lo que al trabajar con una fuente de luz en el cercano infrarrojo (NIR) es necesario implementar un montaje experimental que permita acoplar simultáneamente dos haces de luz a la guía de onda. El primer haz, la señal a analizar, con una emisión en el cercano infrarrojo y el segundo haz, la señal de visualización, en el rango del visible.

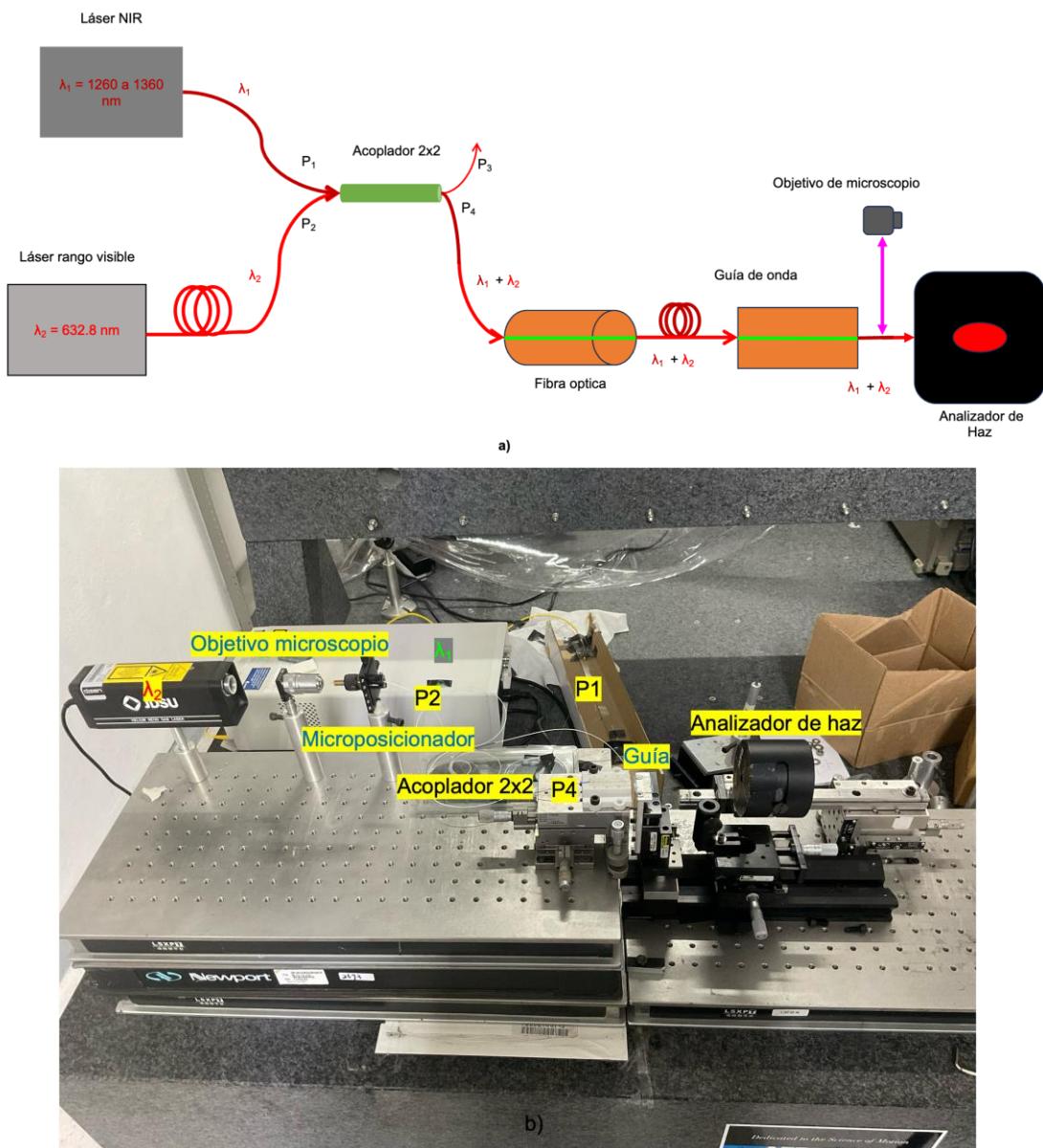


Figura 17. Montaje experimental implementado a) Esquema b) Imagen.

En la figura 17 se tienen un esquema (a) y una imagen (b) del montaje experimental implementado. Como fuente de luz NIR se emplea un láser sintonizable de la marca Santec modelo TSL-510 con un rango de sintonización en el NIR de ($\lambda_1 = 1260-1360$) nm, capaz de ofrecer una potencia de salida dentro del rango de 0.63 a 20 mW, como fuente de luz visible se tiene un láser He-Ne ($\lambda_2 = 632.8$ nm) con potencia de 1 mW. Ambas señales se acoplan a los puertos de entrada de un acoplador 2x2 de fibra óptica.

El láser infrarrojo se acopla mediante un empalme de fusión entre la fibra del conector de salida del láser y la fibra del puerto 1 (P1, figura 18 (a)). El acoplamiento del láser He-Ne al puerto 2 (P2) se lleva a cabo mediante un objetivo de microscopio

que focaliza la luz a la entrada de la fibra mediante un micro posicionador de fibra óptica, figura 18 (b).



Figura 18. Acoplamiento de las señales a) de análisis b) de visualización.

Por el puerto 4 (P4) de salida del acoplador 2x2 emergen ambas señales para ser acopladas simultáneamente a la guía de onda. Esta fibra se posiciona en la estructura que se visualiza en la figura 19 (a), formada por una base translacional, milimétrica y multidireccional (x,y,z) en cuya superficie se fija una base diseñada e impresa en 3D (figura 19 (b)) en donde se adhiere la fibra cuya punta queda saliente de la base. El acoplamiento de la luz a la guía de onda requiere de un porta-muestras micro posicionador como el que se muestra en la figura 19 (c). Este porta muestras se implementó al ensamblar dos bases translacionales que permiten un movimiento micrométrico en las direcciones (x,y); el movimiento en el eje z de este sistema lo proporciona el carro sobre el que se encuentra montado para ser desplazado en un riel óptico.

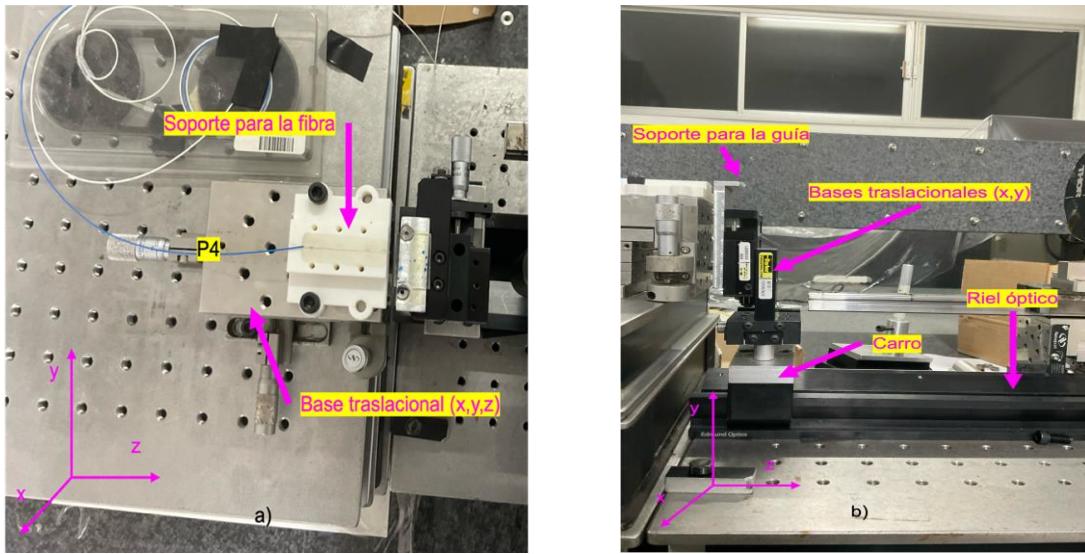


Figura 19. Micro posicionadores del montaje experimental a) Fibra óptica (P4) b) Guía de onda.

A la salida de la guía de onda, se coloca otro objetivo de microscopio con un aumento de x20 (figura 20 (a)) cuya función es focalizar la señal visible (λ_2) en una pantalla para después retirarla y sustituir la pantalla por el analizador de haz. En la imagen de la figura 20 (b) se puede observar el sistema de posicionamiento del analizador, este se desplaza sobre su propio riel previamente posicionado en una base milimétrica multidireccional. Una vez ajustada la posición del analizador se procede a tomar el registro de los datos.

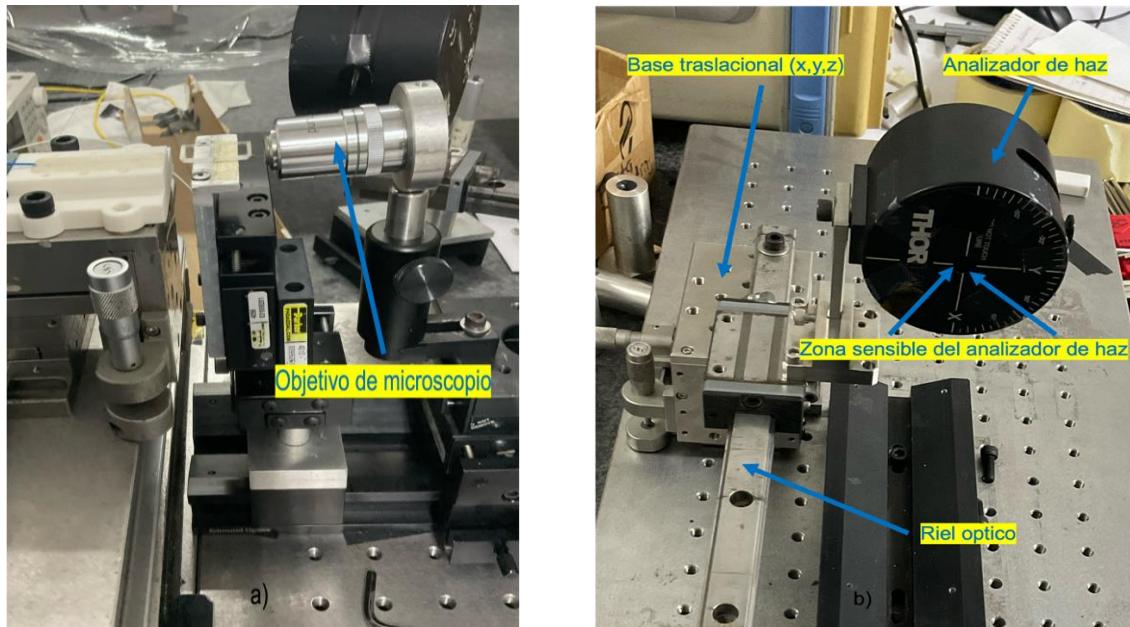


Figura 20. Detalles del montaje experimental a la salida de la guía de onda a) Objetivo de microscopio b) Analizador de haz.

El análisis detallado del haz y la distribución espacial de la luz que sale de la fibra óptica o de la guía de onda se lleva a cabo mediante un analizador de haz de la marca THORLABS modelo BP209-IR, el cual cubre un amplio rango de longitudes de onda detectadas de 900 a 2700 nm. Este instrumento es capaz de reconstruir la distribución de energía espacial en formatos 2D y pseudo 3D, ofreciendo una visión completa del comportamiento del haz detectado.

3.5 Procedimiento experimental

3.5.1 Acoplamiento de la luz visible a la guía de onda canal

El puerto 4 (P4) del acoplador 2x2 permite el acople simultáneo de la señal de análisis (λ_1) y de la luz visible (λ_2). Sin embargo, durante este proceso la señal (λ_1) permanece apagada por lo que el procedimiento de acoplamiento sólo se hace con el haz de visualización (λ_2). La luz del láser se acopla en el extremo de entrada de las guías de onda canal para después proyectar la luz que emerge de la guía en una pantalla.

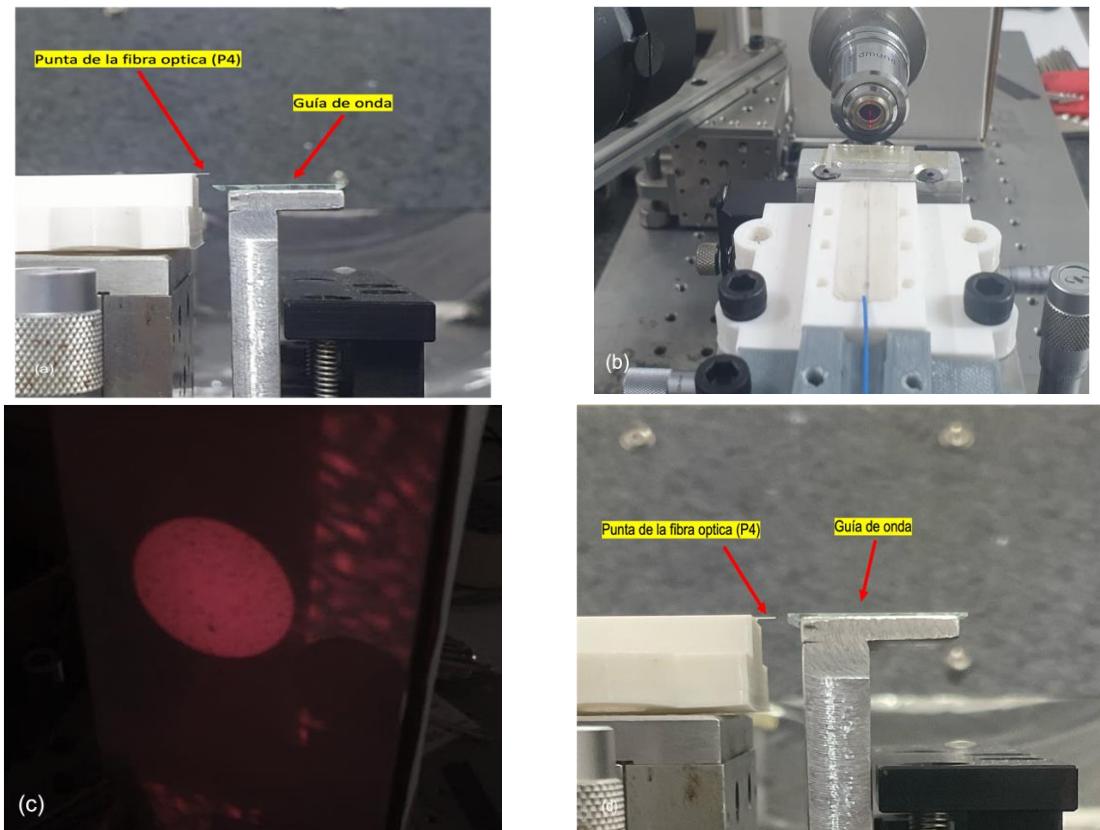


Figura 21. Imagen de a) Posición relativa entre puerto 4 (P4) y la guía de onda (b) haz de láser incidiendo en el objetivo de microscopio (c) Imagen del haz en la pantalla d) Posición relativa entre puerto 4 (P4) y la guía de onda.

El proceso de acoplamiento inicia con la visualización del haz emergente de la fibra óptica, para ello es necesario asegurarse que la muestra se encuentre a menor altura, como se muestra en la figura 21 (a). El objetivo del microscopio se alinea de manera que forme la imagen del haz en una pantalla tal y como se visualiza en la figura 21 (b) y (c). Una vez alineados el haz de salida de la fibra y el objetivo de microscopio, se comienza a subir la muestra hasta que el haz del láser incide en el borde la muestra, como se ilustra en la figura 21 (d).

Debido a que las guías canal no se visualizan a simple vista, la única forma de acoplar la luz a una de ellas es mediante la visualización del haz proyectado en la pantalla (figura 22). Conforme la muestra se mueve lentamente hacia arriba para que el haz del láser incide en ella, en la pantalla se observa la formación del patrón de difracción (figura 23 (a)). Este patrón de difracción se forma desde que el sustrato comienza a interponerse al haz del láser, aún antes de que la luz se acople a la guía canal.

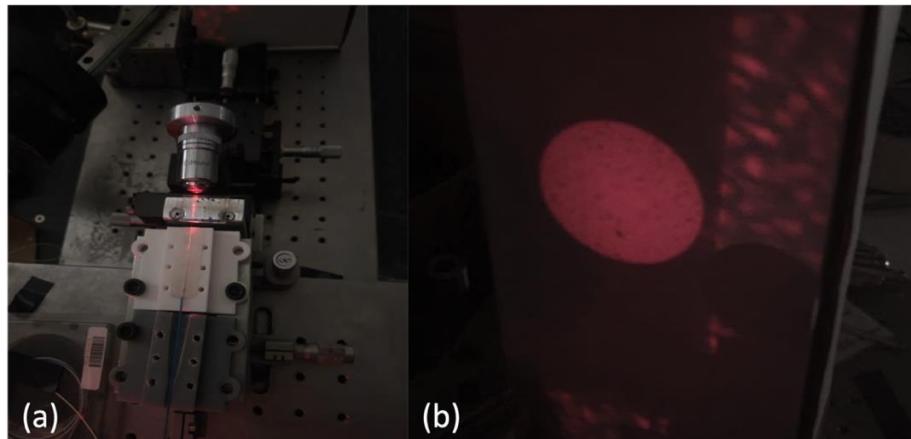


Figura 22. Imagen de (a) haz de láser incidiendo sobre la muestra y (b) proyección en la pantalla del patrón de difracción.

Al subir aún más la muestra, las líneas del patrón de difracción se van haciendo más gruesas hasta que solo se visualizan en la parte inferior de la pantalla dando paso a una franja oscura intermedia (figura 23 (b)) que nos indica la altura correcta de la muestra para intentar el acople de la luz en la entrada de una de las guías canal. Después, se comienza a mover lentamente la muestra en las direcciones horizontal y vertical respecto al haz, hasta que se logra observar un pequeño punto de luz que indica el inicio del acople de la luz a la guía y que se optimiza moviendo la muestra hasta observar una mayor potencia del haz emergente de la guía (figura 23 (c) y figura 24).

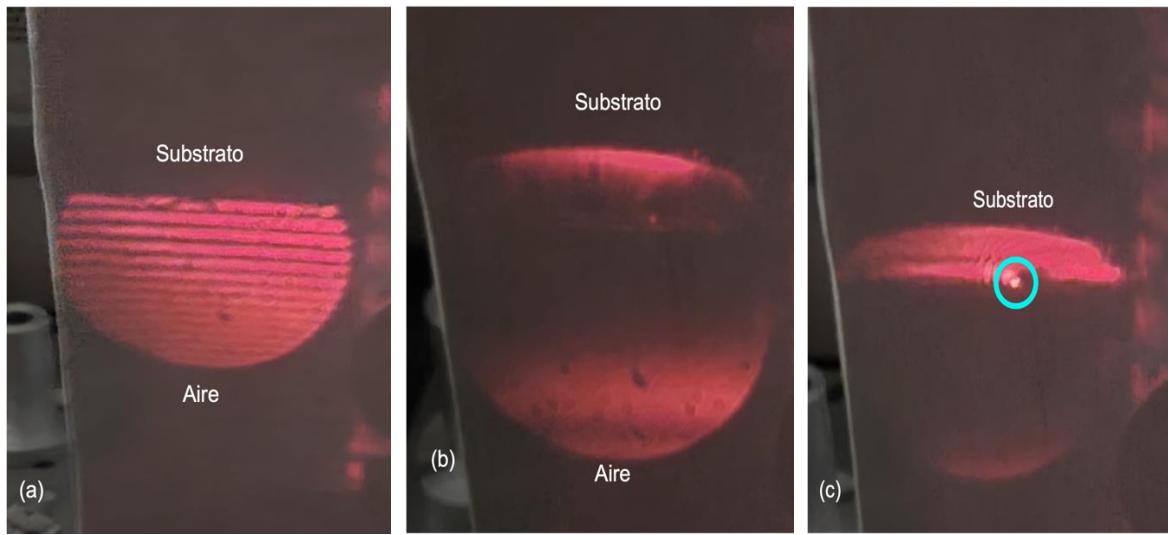


Figura 23. Imágenes de la evolución del patrón proyectado en la pantalla.



Figura 24. Imagen de la proyección en la pantalla cuando se incide el láser dentro de un canal de la muestra.

3.5.2 Acoplamiento de la señal de análisis (NIR) a la guía de onda canal

Una vez que se ha acoplado la luz visible (λ_2) en una de las guías de onda canal, que se ha optimizado la cantidad de potencia acoplada y que es posible visualizar la imagen del haz emergente tal y como se observa en la figura 24, se procede a aproximar la pantalla lo más cerca posible al objetivo de microscopio ajustando la focalización de este para después sustituir la pantalla por el analizador de haz (figura 25).

Con ayuda del objetivo de microscopio se focaliza el haz en la zona sensible del analizador. Después, se procede a apagar el láser de visualización (λ_2) y a remover el objetivo de microscopio que se encuentra a la salida de la guía de onda.

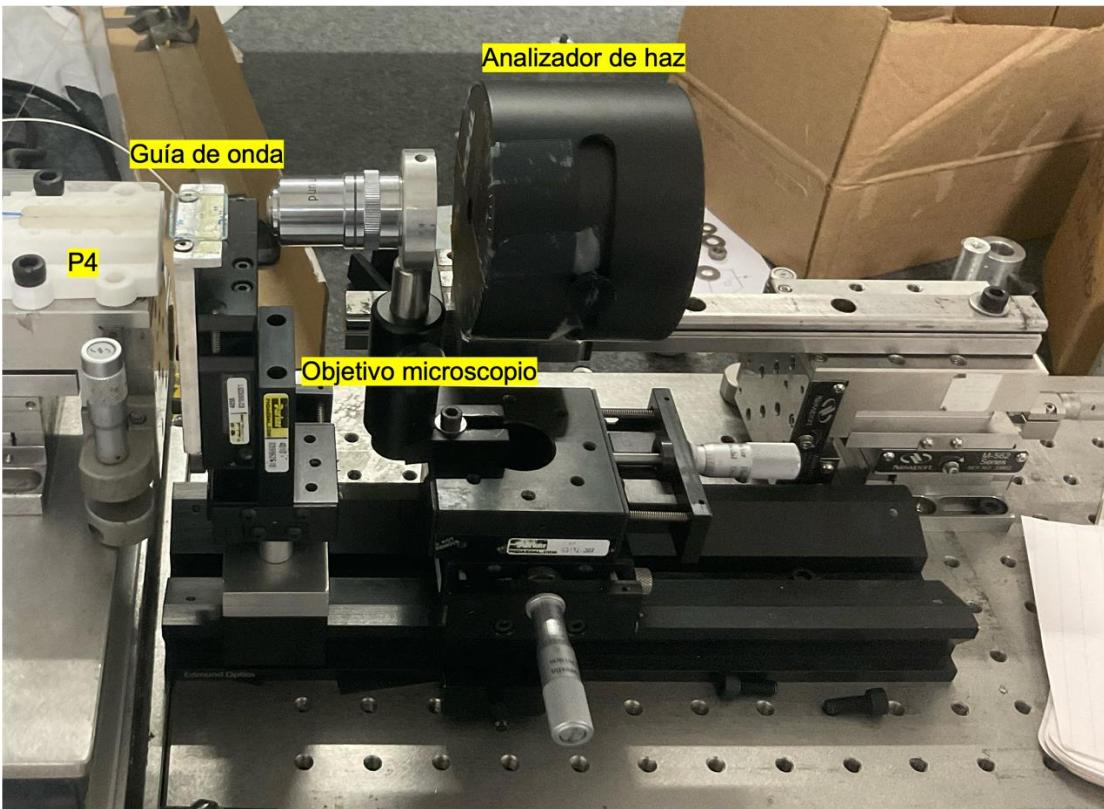


Figura 25. Montaje experimental implementado.

A continuación, se enciende el haz de análisis (λ_1) y se ajusta el posicionamiento del analizador de tal forma que el perfil de haz se observa centrado en el monitor del equipo de cómputo conectado al analizador de haz. Después, del mismo modo en que se procede con el haz de visualización (inciso 3.5.1), se mueve la guía lentamente hacia abajo para observar solamente la reconstrucción del perfil del haz sin acoplar, como se muestra en la figura 26 (a).

En seguida, se sube lentamente la muestra monitoreando en todo momento la imagen del perfil del haz, con esta señal sucede lo mismo que con la luz visible, es decir, se visualiza el patrón de difracción cuando la muestra interactúa con el haz. La evolución del patrón de difracción se aprecia en las figuras 26 (b) y (c); conforme la muestra va subiendo, las franjas del patrón aumentan de tamaño. La figura 26 (d) corresponde al momento en que se comienza a acoplar luz en la guía de onda canal, el lóbulo de la izquierda es la porción del haz de la fibra no acoplado, mientras que el lóbulo de la derecha corresponde a la porción del haz acoplado y emergente de la guía de onda.

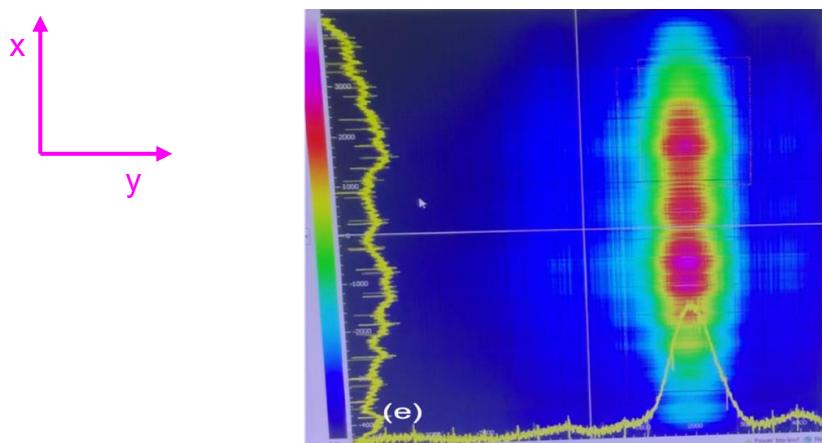
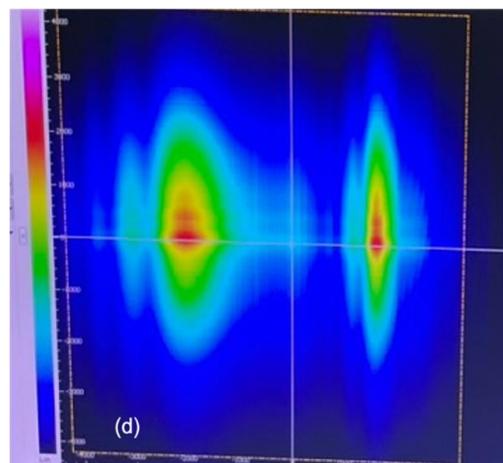
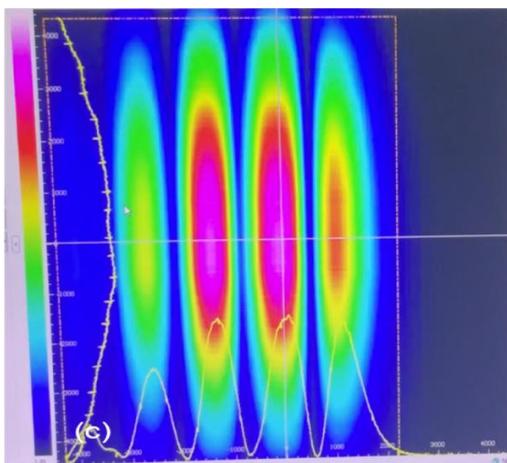
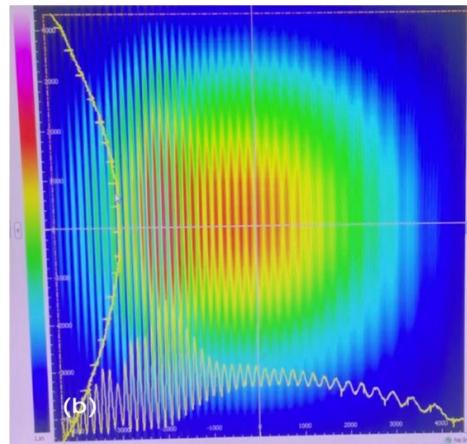
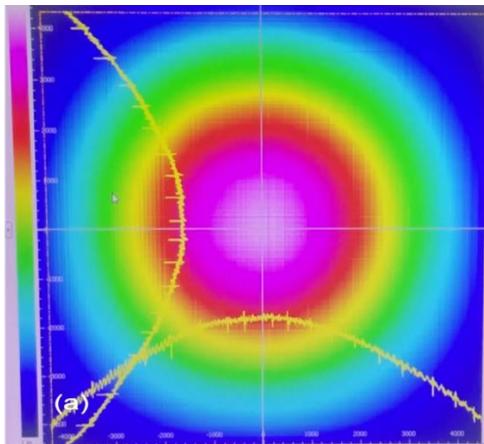


Figura 26. Imágenes de la evolución del haz del láser conforme se va enfocando.

Cuando se tiene la altura óptima de la muestra respecto al haz, tan solo se observa el haz emergente de la guía (figura 26 (e)). Cabe mencionar, que el software del analizador permite visualizar los perfiles x y del haz correspondiente, por ejemplo, en la figura 26 estos perfiles son graficados en color amarillo en la parte izquierda (x) y en el extremo inferior (y).

3.5.3 Determinación de distancia fibra-analizador, guia-analizador

El cálculo de las pérdidas de acoplamiento basado en las dimensiones de los perfiles de haz (sección 2.7) requiere que el registro de los perfiles de las guías de onda involucradas se tomen a la misma distancia respecto al analizador. Por ello, es necesario medir las distancias entre el analizador y la punta de la fibra óptica (P4) y el analizador y la salida de la guía de onda. Por lo tanto, fue necesario realizar medidas lo más precisas posibles de las distancias fibra-analizador y guía-analizador. Cabe mencionar que estas mediciones se toman un momento antes del registro de los perfiles. El procedimiento seguido es el que se ilustra en la figura 27. Primero, se mide la distancia (a) desde el extremo de la fibra óptica al analizador; después, se estima la distancia (b) entre el extremo de la fibra óptica y el extremo de entrada de la guía de onda y la distancia (c) corresponde a la longitud de la muestra determinada con anterioridad. Ya con estas medidas se procede primeramente, a registrar el perfil del haz emergente de la fibra óptica para después alejar el analizador la distancia $b+c$ y registrar el perfil del haz emergente de la guía de onda. Todas las mediciones se hacen utilizando un vernier teniendo la precaución de no mover ningún componente del montaje experimental.

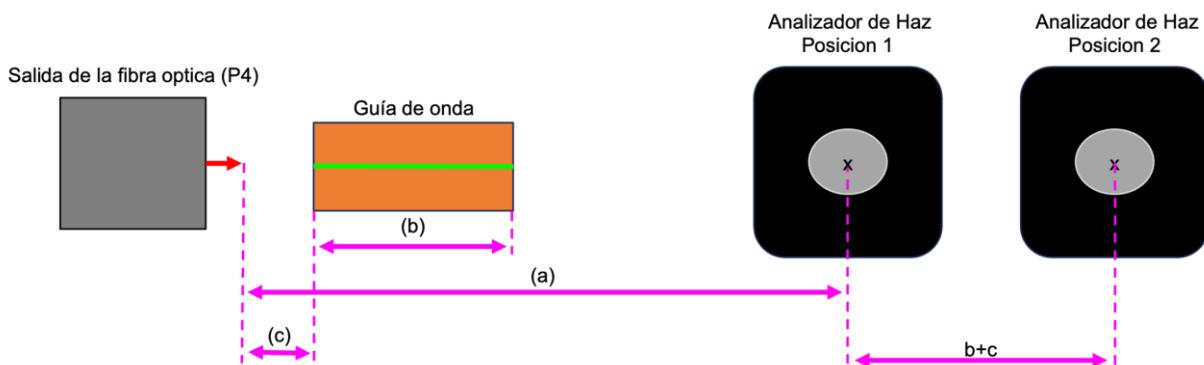


Figura 27. Esquema del proceso de determinación de distancias.

3.5.4 Procesado de la información

La toma de mediciones se lleva a cabo a través de un sistema integrado que consta de un analizador de haz conectado a un equipo de cómputo. Este analizador de haz utiliza un software especializado que permite la captura y análisis de las características del perfil del haz. Una vez inicializado el software si éste capta una señal, comienza la lectura de los datos de manera automática, registra la potencia relativa en función de la distancia (x, y). En todo momento el software despliega el número de tomas realizadas, siendo en cada toma el número de puntos almacenados de 7500 datos. El usuario puede escoger la toma que desea guardar para el procesamiento de los datos. Se optó por trabajar con una toma de alrededor de 750, considerando que en este tiempo la emisión del haz es estable.

3.6 Procesamiento de los datos

El proceso de visualización de los datos, el cálculo de los parámetros que definen el coeficiente acoplamiento (η) y la estimación de pérdidas de acoplamiento (P_a) entre dos guías de onda se llevó a cabo a través de dos códigos desarrollados en Python. A continuación, se describen a detalle los diagramas de flujo de los códigos (Figuras 28 y 29) y la metodología aplicada en cada paso del procesamiento de datos.

3.6.1 Código 1: Visualización y análisis del FWHM

(FWHM: Full Width at Half Maximum, es decir, la anchura de la curva a la mitad de su valor máximo) Los datos generados por las mediciones realizadas con el sistema son guardados en archivos de texto (.txt) para la facilidad de su manipulación y análisis. Estos archivos contienen información esencial sobre la intensidad y posición del haz (x, y) de la guía de onda; los datos están estructurados de manera que permiten su fácil importación y procesamiento con la herramienta de Pandas en Python.

El código 1 figura (28) utiliza varias bibliotecas de Python, incluyendo Pandas, Numpy, Matplotlib y Scipy, para realizar un análisis más avanzado del perfil del haz. Este análisis incluye el cálculo del FWHM y el ajuste de curvas gaussianas para modelar el perfil del haz de luz.

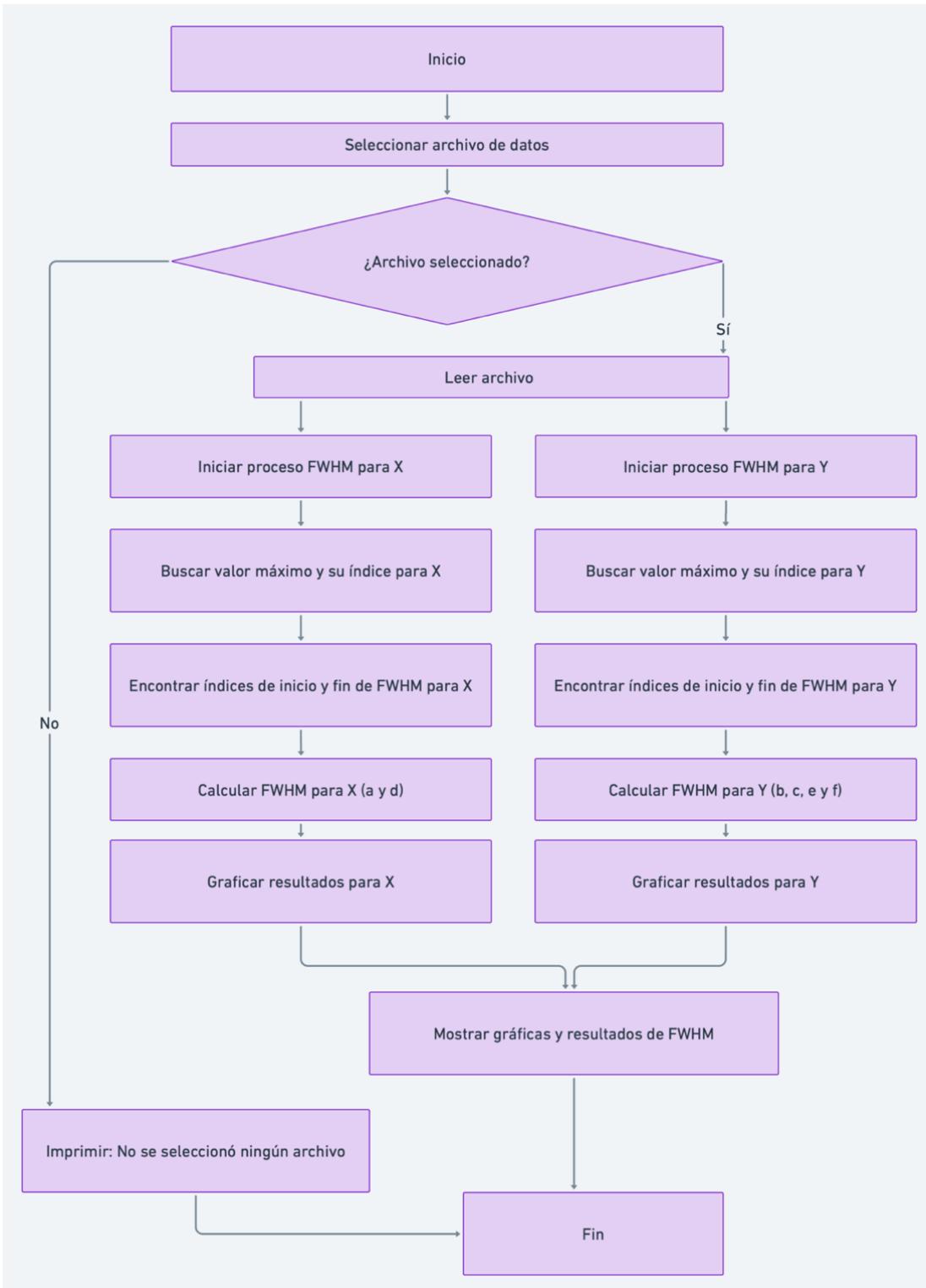


Figura 28. Diagrama de flujo para el cálculo de FWHM.

El proceso comienza con la importación de las librerías necesarias: Pandas para la manipulación de datos, Numpy para operaciones numéricas, Matplotlib para visualización y Scipy para análisis de señales y ajuste de curvas. Se establece el backend de Matplotlib para utilizar Tkinter como interfaz gráfica.

Se definen varias funciones clave en el código. La función gaussiana define la forma de la curva gaussiana, que se utilizará para el ajuste de los datos. La función calcular_fwhm calcula el FWHM de los datos proporcionados, con la opción de usar una ventana de búsqueda alrededor del valor máximo para acotar el cálculo. Otra función similar, calcular_fwhm_y, se encarga del cálculo específico para la dirección Y sin la opción de ventana de búsqueda. La función principal, procesar_y_graficar, maneja la importación de datos, el cálculo del FWHM y la visualización de los resultados junto con el ajuste gaussiano. El código utiliza una interfaz gráfica de Tkinter para seleccionar el archivo de texto (.txt) que contiene los datos del perfil del haz. Los datos del archivo seleccionado se importan y se convierten a un DataFrame de Pandas, asegurando que los valores numéricos se interpreten correctamente. A continuación, se calcula el FWHM en la dirección X utilizando la función calcular_fwhm, determinando los puntos de inicio y fin del FWHM y calculando las distancias relativas al valor máximo. Luego, se realiza un ajuste gaussiano sobre los datos de la dirección X para modelar el perfil del haz, utilizando estimaciones iniciales basadas en los datos importados. Los resultados se visualizan en gráficos que muestran los datos originales junto con el ajuste gaussiano. Se añaden líneas que indican la mitad del valor máximo, el valor máximo, y los inicios y finales del FWHM basados en el ajuste gaussiano. También se presenta un gráfico del ajuste gaussiano solo, con las mismas líneas indicadoras. El mismo proceso se repite para la dirección Y: se calcula el FWHM y se realiza el ajuste gaussiano, generando gráficos que muestran los datos originales y el ajuste gaussiano para la dirección Y, con las correspondientes líneas indicadoras. Finalmente, se calcula el FWHM a partir de los parámetros obtenidos del ajuste gaussiano y se imprimen los resultados.

Además, se generan gráficos adicionales que muestran los perfiles de pulso en ambas direcciones, X Y, con las líneas indicadoras para el FWHM. El código solicita al usuario que ingrese el número de picos en la señal X, lo cual afecta el uso de una ventana de búsqueda en el cálculo del FWHM.

3.6.2 Código 2: Estimación de Pérdidas de Acoplamiento

En el segundo código se enfoca en calcular tanto el coeficiente de acoplamiento (η , ecuación 16) entre dos guías de onda y las pérdidas por acoplamiento (ecuación 15) basándose en los parámetros físicos obtenidos por el código 1. La función

`optimized_calculo_eta` realiza cálculos matemáticos para estimar el coeficiente de acoplamiento entre dos guías de onda. Esta función aplica fórmulas específicas que consideran las propiedades geométricas de las guías de onda, como las dimensiones para calcular η . Una vez obtenido el coeficiente de acoplamiento, se utiliza la función `optimized_calculo_pa_db` para estimar las pérdidas por acoplamiento. Esta operación es de tipo logarítmica y refleja la eficiencia de la transferencia de energía entre las guías de onda en términos de pérdidas.

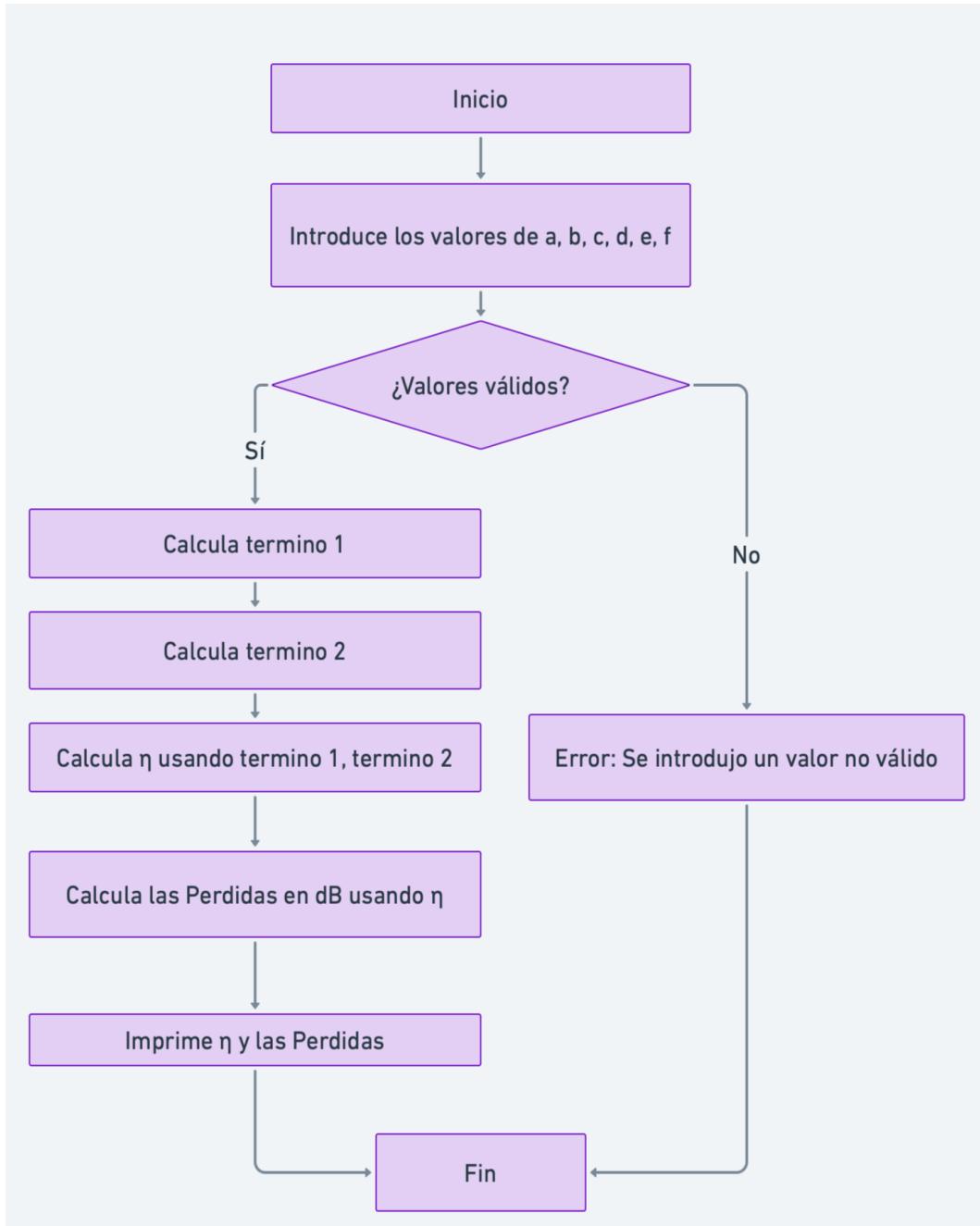


Figura 29. Diagramas de flujo para el cálculo de η y las pérdidas de acople.

La geometría y dimensiones de los modos guiados es fundamental para el acoplamiento eficiente de la luz entre diferentes guías de onda. La implementación del sistema descrito en este trabajo aborda los aspectos críticos y presenta un método robusto para estimar con precisión las pérdidas de acoplamiento usando dos códigos desarrollados en Python. Este enfoque metodológico permite una visualización detallada de los parámetros de acoplamiento, optimizando así el diseño y la fabricación de dispositivos fotónicos integrados en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO). Con esta herramienta, se espera mejorar la eficiencia de los sistemas fotónicos y enriquecer la formación de los estudiantes en técnicas avanzadas de medición óptica.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Simulación de guías de onda tipo canal

Los resultados arrojados se muestran en la figura siguiente (figura 30), donde se observa la propagación de la luz a lo largo de la guía.

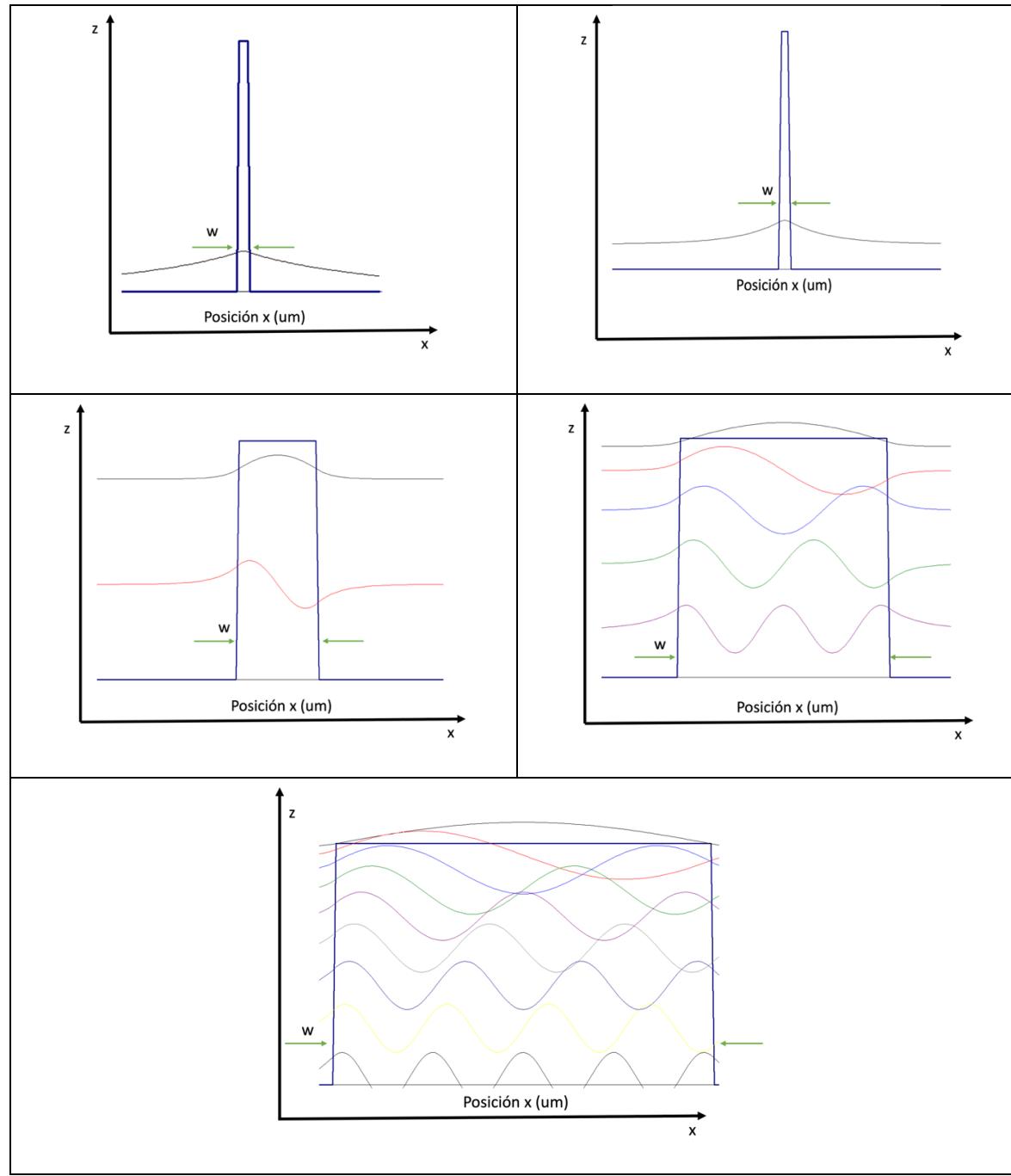


Figura 30. Simulaciones de 1.6, 2.5, 20, 50 y 90 μm para el ancho de canal (w).

Se observa que para las guías simuladas de 1.6 μm (izquierda arriba) y 2.5 μm (derecha arriba) de ancho de canal solo se acopla un modo de propagación, sin embargo se aprecia un modo mejor confinado en la guía de 2.5 μm .

Observando las siguientes simulaciones se constata que al aumentar el ancho de canal de la guía aumenta el número de modos propagados. Para la guía de 20 μm de ancho de canal (izquierda centro) se propagan dos modos y aumenta a 5 modos acoplados para la guía de 50 μm (derecha centro). Finalmente, para una guía de 90 μm de ancho los modos acoplados son 8.

En la tabla 2 se resumen los valores de los índices efectivos de los modos guiados para cada estructura simulada. En los anchos mayores, como 20, 50 y 90 μm , se observa un incremento progresivo en los valores de los índices efectivos de los modos superiores, mientras que el modo fundamental (n_1) se mantiene prácticamente invariante, lo que evidencia su fuerte confinamiento. Esto ocurre porque los modos de mayor orden tienen una mayor penetración en el sustrato (es decir, están menos confinados) y, como consecuencia, su índice efectivo se acerca al valor n_s [5, 23].

| Índice efectivo del modo n | Ancho del canal de la guía simulada (μm) | | | | |
|----------------------------|---|--------|--------|--------|--------|
| | $n_g = 1.5198$ | | | | |
| | 1.6 | 2.5 | 20 | 50 | 90 |
| n_1 | 1.5098 | 1.5099 | 1.5108 | 1.5109 | 1.5109 |
| n_2 | - | - | 1.5102 | 1.5108 | 1.5109 |
| n_3 | - | - | - | 1.5106 | 1.5108 |
| n_4 | - | - | - | 1.5103 | 1.5107 |
| n_5 | - | - | - | 1.5099 | 1.5106 |
| n_6 | - | - | - | - | 1.5104 |
| n_7 | - | - | - | - | 1.5102 |
| n_8 | - | - | - | - | 1.5099 |

Tabla 2. Índices efectivos con el software free BPM.

Se observa que a medida que el número de modos aumenta, los índices efectivos tienden a acercarse al índice de la guía y los modos superiores comienzan a aparecer únicamente para anchos mayores ($\geq 20 \mu\text{m}$), lo que confirma que las estructuras monomodos se obtienen para anchos de canal menores a 20 μm para una longitud de onda guiada de 1.36 μm .

4.2 Caracterización de las guías de onda fabricadas

4.2.1 Caracterización al microscopio

Las imágenes obtenidas (figura 31, 32, 33) evidencian bordes bien definidos y una superficie homogénea, sin defectos significativos que pudieran afectar la estructura.

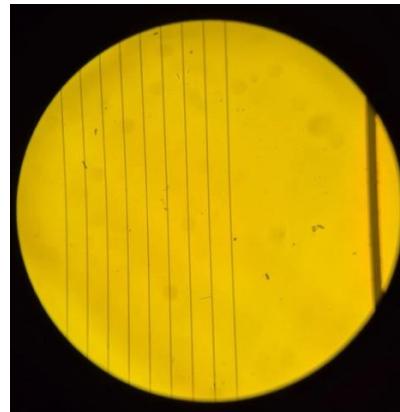


Figura 31. Visualización al microscopio de los canales mas delgados ($2.5 \mu\text{m}$) de la mascarilla de intercambio iónico.

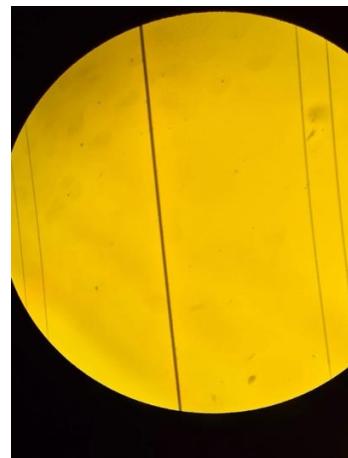


Figura 32. Visualización al microscopio de los canales ($25 \mu\text{m}$) la mascarilla de intercambio iónico.

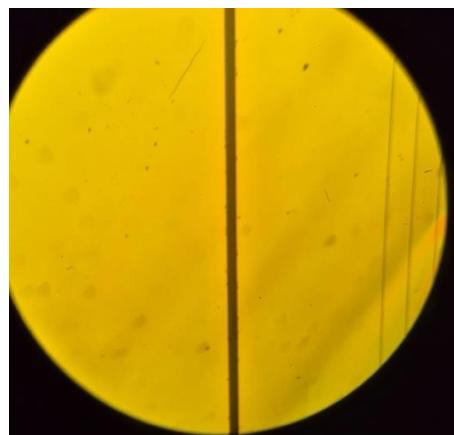


Figura 33. Visualización al microscopio del canal mas grande ($90 \mu\text{m}$) mascarilla de intercambio iónico.

En términos generales, los resultados obtenidos confirman que la mascarilla de intercambio iónico cumple con los estándares de calidad esperados para su aplicación.

4.1.2 Caracterización al perfilómetro

La caracterización de las guías iónicas no pudo realizarse de manera directa con el perfilómetro, debido a que estas no son medibles por dicho método. En su lugar, se llevó a cabo la caracterización de su mascarilla de fabricación que contenía canales con diferentes dimensiones de ancho. A partir de los datos obtenidos y tal como se observa en las figuras 34 y 35, se presentan algunos ejemplos representativos de estas mediciones. Se determinó que las guías de onda canal fabricadas por intercambio iónico presentan anchos de aproximadamente 2.5 y 90 μm , mientras que, para las guías poliméricas, dichos canales alcanzan un aproximado de ancho de 25 μm . Adicionalmente, se encuentra reportado que la profundidad de difusión de los iones de potasio intercambiados (K^+) de las guías de onda fabricadas mediante intercambio iónico es de aproximadamente 8 μm , medida desde la superficie [24]. En la figura 34, se presenta la medición al perfilómetro correspondiente a un canal con un ancho de 24.45 μm .

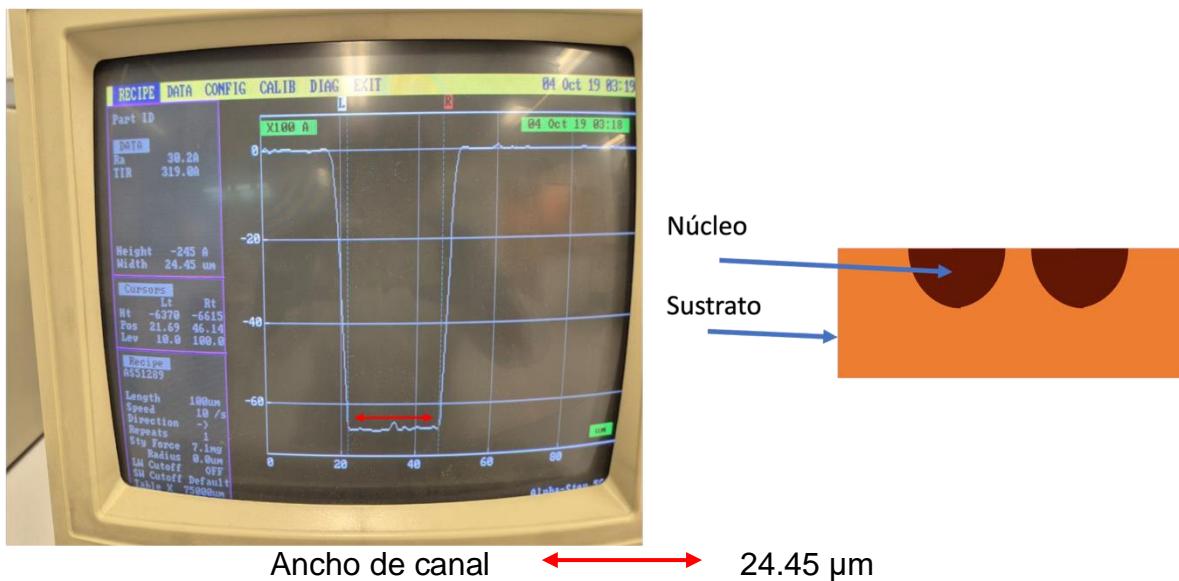


Figura 34. Ejemplo medición de perfilómetro de una muestra de 24.45 μm .

Por último, la figura 35 muestra otro ejemplo de medición, en este caso corresponde a una guía polimérica fabricada sobre el sustrato (sección 2.4), en donde se registra un ancho de 10.45 μm y un espesor del polímero de aproximadamente 1.38 μm . De esta manera, se observa la consistencia en la lectura de la topografía de la muestra, puesto que las mediciones del perfilómetro reflejan el relieve esperado según los diseños establecidos.

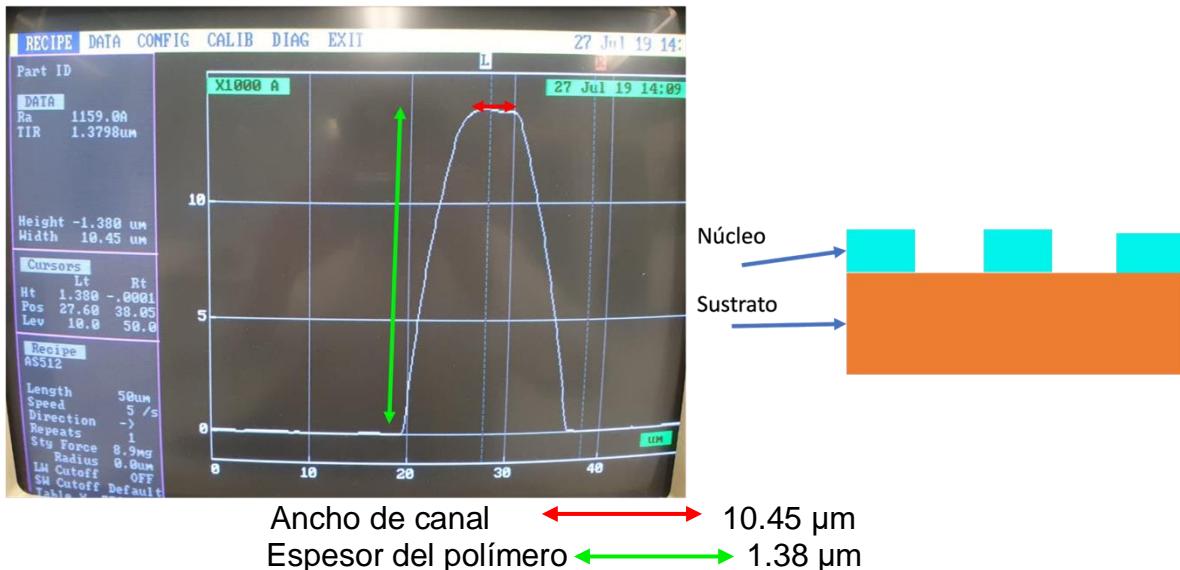


Figura 35. Ejemplo medición de perfilómetro de una muestra de 10.45 μm .

Estas dos figuras ilustran la forma en que se corroboran los anchos de los canales de las diferentes guías de onda fabricadas, evidenciando la eficacia del perfilómetro para caracterizar anchos y alturas en las estructuras. Aunque las guías iónicas no pueden medirse directamente por este método, la comparación de los resultados de la mascarilla con las mediciones de los canales en las muestras ofrece información relevante sobre la precisión del proceso de litografía y la fidelidad con que se transfiere el diseño de los canales al sustrato en cuestión.

4.3 Montaje del sistema para la medición de pérdidas.

La implementación del sistema de medición de pérdidas en guías de onda ha representado un avance significativo en el laboratorio, aunque no exento de desafíos. A lo largo del proceso, surgieron varias dificultades técnicas que influyeron en la precisión y consistencia de las mediciones. Estas dificultades no solo afectaron el rendimiento inmediato del sistema, sino que también sentaron las bases para identificar áreas clave de mejora que se deberán abordar en investigaciones futuras.

Uno de los principales desafíos fue lograr una alineación precisa del haz de luz con las guías de onda. Dado que el sistema mide las pérdidas de acoplamiento entre la fibra óptica y la guía de onda, cualquier desajuste en la alineación provocaba pérdidas adicionales que no estaban relacionadas con la calidad intrínseca de las guías, sino con las limitaciones del propio sistema. Esto resultó en la necesidad de desarrollar protocolos muy estrictos de alineación y ajuste fino de los componentes ópticos, lo que prolonga el tiempo necesario para realizar cada medición y aumenta la complejidad del proceso.

Además, la estabilización del sistema óptico presentó otros obstáculos. La medición de pérdidas requiere estabilidad no solo en la fuente de luz, sino también en los componentes mecánicos y ópticos que dirigen y manipulan el haz. En algunos casos, las vibraciones del entorno afectaron las mediciones, lo que resultó en fluctuaciones que se controlaban volviendo a linear el sistema. Este problema se evidenció particularmente durante sesiones prolongadas de medición.

A pesar de los desafíos, los resultados obtenidos hasta la fecha han permitido caracterizar de manera precisa las pérdidas de acoplamiento y propagación en guías de onda canal.

4.4 Caracterización del perfil de haz de las guías de onda con diferente geometría

Se presentan los resultados obtenidos y su análisis. Se reportan los cálculos de las pérdidas de acople entre el haz emergente de la fibra óptica (P4) y cuatro guías de onda canal. Se presentan los cálculos de las pérdidas al acoplar algunas guías de onda canal entre ellas mismas. Se caracterizaron dos guías de onda fabricadas mediante intercambio iónico (sección 2.5), ambas pertenecientes al mismo sustrato pero con diferente ancho de canal. Así como también, dos guías orgánicas con las mismas dimensiones y sobre el mismo sustrato, fabricadas por deposición de un polímero (resina fotosensible) (sección 2.4).

4.4.1 Fibra óptica

En la figura 36 se muestra la imagen del haz de la fibra óptica (P4) captado por el analizador y sus respectivos perfiles en las direcciones (x, y). Las lecturas extraídas son tratadas mediante el código 1 (sección) para obtener las gráficas de la figura 37 (a) y (b).

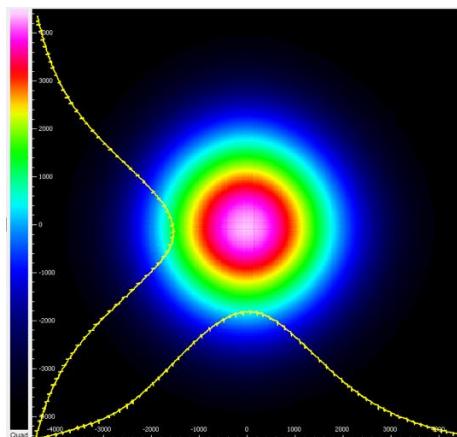


Figura 36. Reconstrucción del perfil de haz de la fibra óptica.

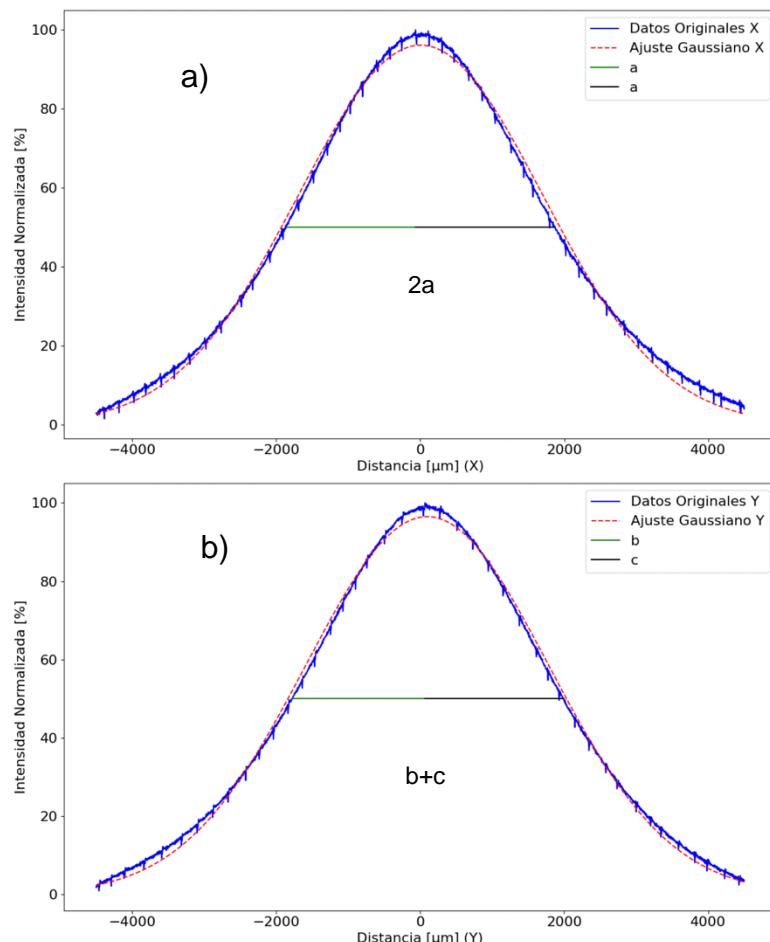


Figura 37. Perfil del haz de la fibra óptica con ajuste gaussiano en las direcciones
a) x, b) y.

En la reconstrucción del perfil de haz de la figura 36 los diferentes colores indican la distribución de intensidad, correspondiendo el rojo a un mayor valor en la parte central que va disminuyendo al alejarse espacialmente. Las proyecciones de perfil de haz (x,y) corresponden a una gaussiana simétrica espacialmente. En la figura 37 se grafican dichos perfiles, el eje vertical corresponde a la intensidad normalizada en función de la distancia (x o y). La curva continua corresponde a los datos registrados por el analizador mientras que la curva punteada muestra el ajuste gaussiano implementado. De la misma forma, en cada una de estas gráficas se señalan el FWHM y el valor correspondiente al parámetro “a” en la figura 37 (a) y los parámetros “b” y “c” en la figura 37 (b), en concordancia con la figura 1 presentada anteriormente.

4.4.2 Guía iónica 1

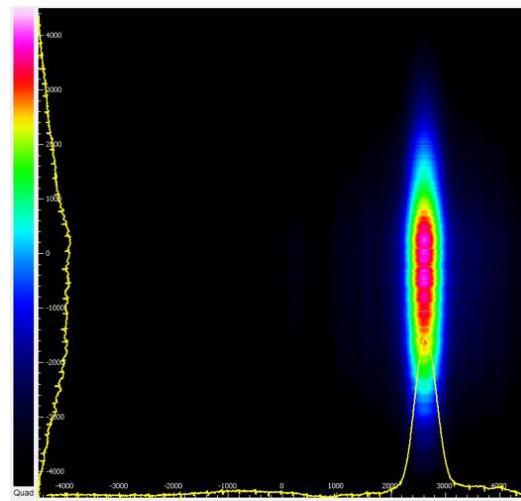


Figura 38. Reconstrucción del perfil de haz de la guía iónica 1.

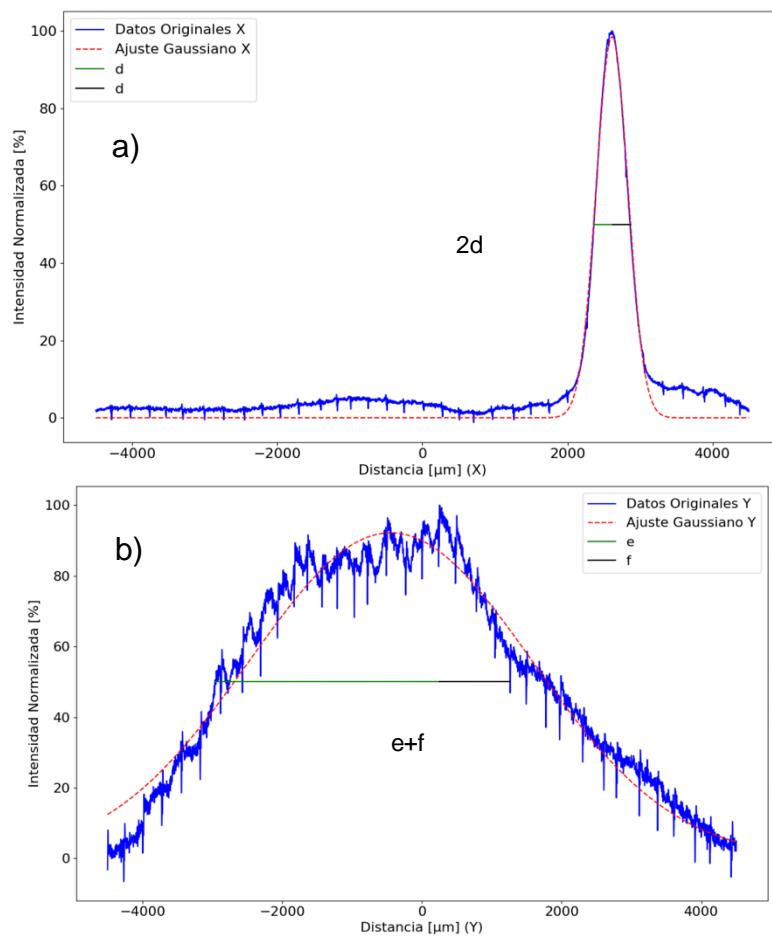


Figura 39. Perfil del haz de la guía de onda con ajuste gaussiano en las direcciones a) x, b) y.

La figura 38 corresponde al perfil de una guía canal fabricada por intercambio iónico de potasio (K^+) en un sustrato de vidrio Menzel (porta objetos). Las guías canal fabricadas mediante este intercambio presentan profundidades del orden de 8 μm aproximadamente y en particular, esta guía posee un ancho aproximado de 2.5 μm . En la figura 39 se grafican los perfiles (x, y). La curva continua corresponde a los datos registrados por el analizador mientras que la curva punteada muestra el ajuste gaussiano implementado. De la misma forma, en cada una de estas gráficas se señalan el FWHM y el valor correspondiente al parámetro “d” en la figura 39 (a) y los parámetros “e” y “f” en la figura 39 (b), en concordancia con la figura 1 presentada anteriormente. El ancho del haz de la guía iónica, en el eje horizontal (figura 37 (a)) se asemeja más al de la fibra óptica (figura 37 (a)), mientras que el perfil del haz en el eje vertical presenta diferente forma y menor longitud. En la tabla 3 se enlistan los valores de los parámetros calculados a partir del FWHM de cada uno de los perfiles. Estos valores permiten corroborar que horizontalmente el haz de la guía iónica 1 se asemeja al de la fibra ($d \sim a$). Cabe mencionar que solamente se listan seis de las doce tomas registradas. En general, se observó que en alguna de las tomas, uno de los datos puede disminuir o aumentar en un 10% aproximadamente respecto a su valor en otra toma diferente. Se observó que esto sucede debido a que el programa (código 1) que calcula el valor del FWHM, toma como referencia del máximo de potencia, un punto ligeramente descentrado.

| Fibra óptica | a [μm] | b [μm] | c [μm] | $FWHM_x$ (2a) [μm] | $FWHM_y$ (b+c) [μm] |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------------------|----------------------------|
| Toma 1 | 2041.20 | 1904.40 | 1904.40 | 4082.40 | 3716.40 |
| Toma 2 | 1894.80 | 1939.20 | 1782.00 | 3789.60 | 3721.20 |
| Toma 3 | 1914.00 | 1822.80 | 1908.00 | 3828.00 | 3730.80 |
| Toma 4 | 1899.60 | 1854.00 | 1894.80 | 3799.20 | 3748.80 |
| Toma 5 | 1977.60 | 1875.60 | 1862.40 | 3955.20 | 3738.00 |
| Toma 6 | 1962.00 | 1812.00 | 1954.80 | 3924.00 | 3766.80 |
| Guía iónica 1 | d [μm] | e [μm] | f [μm] | $FWHM_x$ (2d) [μm] | $FWHM_y$ (e+f) [μm] |
| Toma 1 | 249.60 | 3217.20 | 1006.80 | 499.20 | 4224 |
| Toma 2 | 249 | 3045.60 | 1675.20 | 498 | 4720.80 |
| Toma 3 | 249 | 3079.20 | 1479.60 | 498 | 4558.80 |
| Toma 4 | 247.80 | 3256.80 | 1486.80 | 495.60 | 4743.60 |
| Toma 5 | 247.80 | 3118.80 | 1378.80 | 495.60 | 4497.60 |
| Toma 6 | 250.20 | 3170.40 | 1275.60 | 500.40 | 4446 |

Tabla 3. Parámetros del FWHM de la fibra óptica y la guía iónica 1.

Una vez determinados los parámetros (a , b , c , d , e y f) se procede al cálculo del coeficiente η (ecuación 4) y de las pérdidas de acoplamiento (ecuación 3) entre la fibra óptica y la guía iónica 1, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

| Toma | η | P_a (dB) |
|----------|------------------|-----------------|
| 1 | 0.20 | 7.11 |
| 2 | 0.24 | 6.20 |
| 3 | 0.23 | 6.47 |
| 4 | 0.22 | 6.52 |
| 5 | 0.22 | 6.65 |
| 6 | 0.21 | 6.80 |
| Promedio | 0.22 ± 0.012 | 6.63 ± 0.28 |

Tabla 4. Valores de coeficiente de acoplamiento (η) y pérdidas de acoplamiento (P_a) de la guía de onda iónica 1.

4.4.3 Guía iónica 2

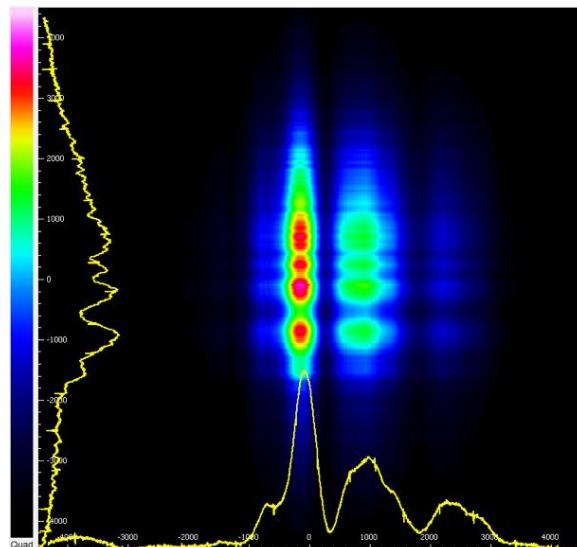


Figura 40. Reconstrucción del perfil de haz de la guía iónica 2.

En este caso la guía iónica caracterizada (figura 40) tiene un ancho de canal de 90 μm y 8 μm de profundidad, basándose en los perfiles de la figura 41 (a y b) se aprecia como una guía multimodo a la longitud de onda guiada. De la misma forma, como se muestra en cada caso también se grafican los ajustes gaussianos implementados. En la tabla 5 se listan los parámetros calculados de la guía iónica 2.

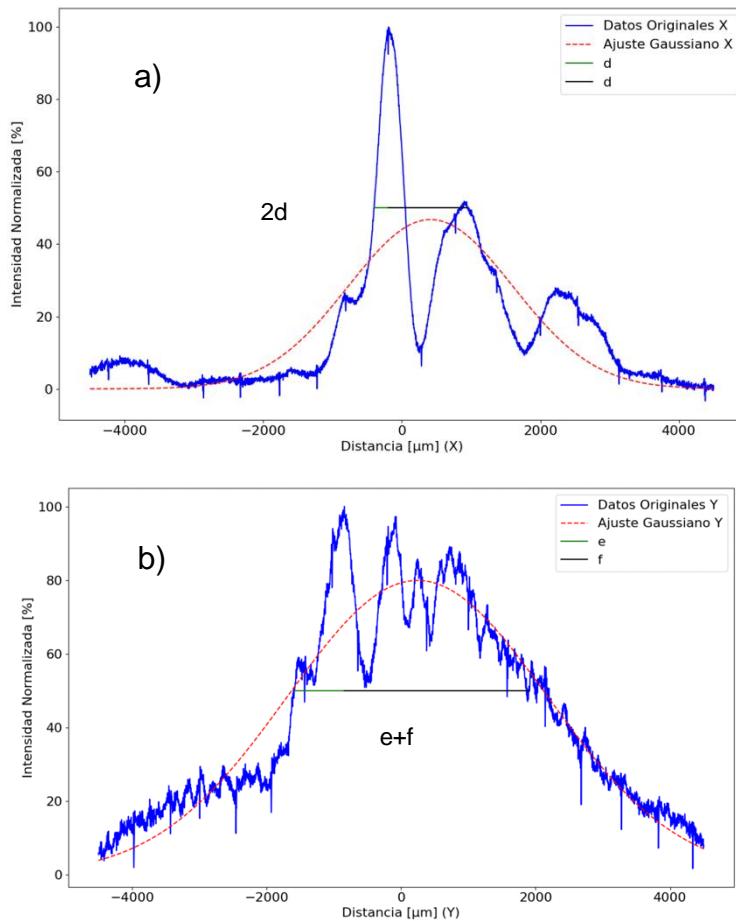


Figura 41. Perfil del haz de la guía de onda con ajuste gaussiano en las direcciones a) x, b) y.

| Guía iónica 2 | d [μm] | e [μm] | f [μm] | FWHM _x (2d) [μm] | FWHM _y (e+f) [μm] |
|---------------|--------|---------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Toma 1 | 673.20 | 740.40 | 2743.20 | 1346.40 | 3483.60 |
| Toma 2 | 600.60 | 724.80 | 2767.2 | 1201.20 | 3492 |
| Toma 3 | 627.60 | 700.80 | 320.40 | 1255.20 | 1021.2 |
| Toma 4 | 678 | 2845.20 | 722.40 | 1356 | 3567.60 |
| Toma 5 | 619.2 | 750 | 2836.80 | 1238.40 | 3586.80 |
| Toma 6 | 620 | 721.20 | 2774.40 | 1260 | 3495.60 |

Tabla 5. Parámetros del FWHM de la fibra óptica y la guía iónica 2.

Al igual que en el primer caso con la guía iónica 1, en base a los parámetros de la tabla (d, e y f) se procede al cálculo del coeficiente η y de las pérdidas de acoplamiento entre esta guía y la fibra óptica, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

| Toma | η | P_a (dB) |
|----------|------------------|-----------------|
| 1 | 0.46 | 3.41 |
| 2 | 0.42 | 3.77 |
| 3 | 0.29 | 5.34 |
| 4 | 0.47 | 3.28 |
| 5 | 0.43 | 3.65 |
| 6 | 0.45 | 3.48 |
| Promedio | 0.42 ± 0.061 | 3.82 ± 0.70 |

Tabla 6. Valores de coeficiente de acoplamiento (η) y pérdidas de acoplamiento (P_a) de la guía de onda iónica 2.

Comparando las tablas 2 y 4 se observa que las pérdidas fibra - guía 1 son mayores que las de fibra - guía 2 debido a que la guía 2 y la fibra se asemejan más en sus dimensiones. Los cálculos hasta el momento presentados se hicieron basados en los perfiles reales. A continuación, en la tabla 7 se listan los cálculos obtenidos en base a los ajustes gaussianos implementados para la guía iónica 2. El ajuste gaussiano muestra las menores pérdidas registradas, esto se atribuye a que la forma del gaussiano perfecto que toma el ajuste se apega más al perfil de haz de la fibra óptica.

| Guía iónica 2 | d [μm] | e [μm] | f [μm] | FWHM _x (2d) [μm] | FWHM _y (e+f) [μm] |
|---------------|---------|---------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Toma 1 | 1396.75 | 2275.71 | 2275.71 | 2793.49 | 4551.42 |
| Toma 2 | 1402.35 | 2267.24 | 2267.24 | 2804.70 | 4534.49 |
| Toma 3 | 1394.70 | 2278.07 | 2278.07 | 2789.41 | 4556.14 |
| Toma 4 | 1393.61 | 2278.69 | 2278.69 | 2787.22 | 4557.37 |
| Toma 5 | 1390.42 | 2273.61 | 2273.61 | 2780.84 | 4547.23 |
| Toma 6 | 1391.80 | 2270.55 | 2270.55 | 2783.60 | 4541.10 |

Tabla 7. Parámetros del FWHM de la fibra óptica y el ajuste gaussiano de la guía iónica 2.

Debido a esto, el valor del parámetro η se aproxima más a 1, lo que indica que las pérdidas de acople correspondientes disminuyen tal y como se muestra en la tabla 8.

| Toma | η | P_a (dB) |
|------|--------|------------|
| 1 | 0.93 | 0.31 |
| 2 | 0.93 | 0.30 |
| 3 | 0.93 | 0.31 |
| 4 | 0.93 | 0.31 |

| | | |
|----------|--------------|-------------------|
| 5 | 0.93 | 0.32 |
| 6 | 0.93 | 0.31 |
| Promedio | 0.93 ± 0 | 0.31 ± 0.0058 |

Tabla 8. Valores del coeficiente de acoplamiento (η) con un ajuste gaussiano, pérdidas de acoplamiento (P_a) de la guía de onda iónica 2.

4.4.4 Guía iónica 3

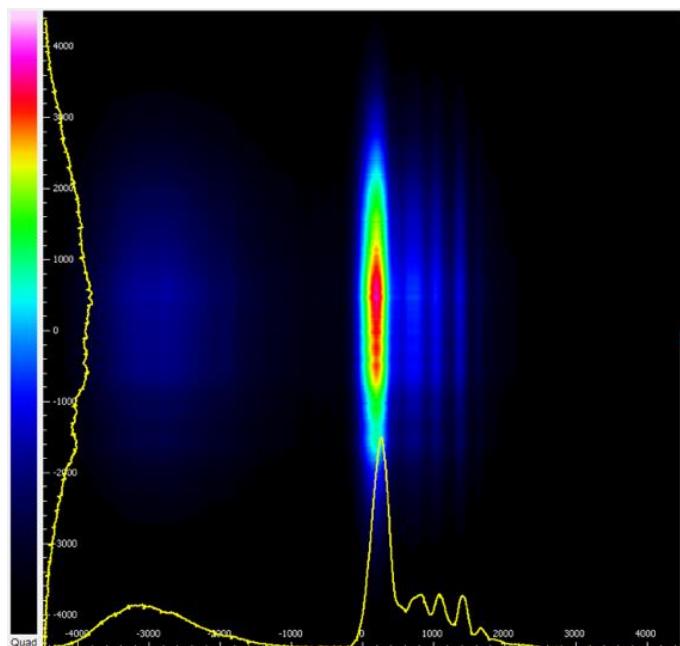


Figura 42. Reconstrucción del perfil de haz de la guía iónica 1.

La guía iónica 3, presenta un diseño similar en estructura y perfil de canal a las guías iónicas 1 y 2. Sin embargo, a diferencia de las primeras dos guías, esta fue sometida a un proceso de pulido en sus extremos, con el fin de mejorar la forma del perfil del haz y eliminar formas extraña que se aprecian cuando se realiza el proceso de acoplamiento del haz de análisis, aunque esto no se logró se obtuvo una mejora en la calidad óptica en las zonas de entrada y salida, esto es así, por que el pulido permite reducir significativamente las pérdidas de acoplamiento de luz al disminuir los defectos superficiales, facilitando una mejor transmisión de señal. Las dimensiones son iguales a la guía iónica 1.

Los valores calculados a partir del FWHM en cada toma y en cada dirección se detallan en la tabla 9, donde se observa una mayor similitud con el perfil de la fibra óptica en el eje horizontal, manteniendo una forma coherente con el objetivo de reducción de pérdidas en el acoplamiento de luz.

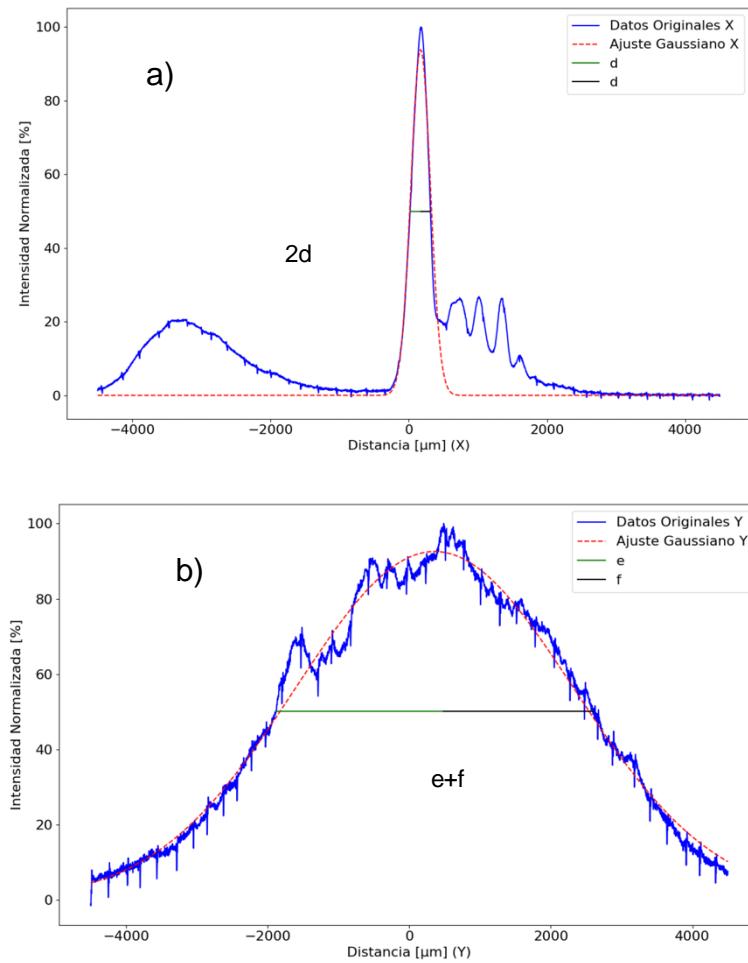


Figura 43. Perfil del haz de la guía de onda con ajuste gaussiano en las direcciones a) x, b) y.

| Guía iónica 3 | d [μm] | e [μm] | f [μm] | FWHM _x (2d) [μm] | FWHM _y (e+f) [μm] |
|---------------|--------|---------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Toma 1 | 147 | 2370 | 2116.80 | 294 | 4486.80 |
| Toma 2 | 146.4 | 2356.80 | 2079.60 | 292.80 | 4436.40 |
| Toma 3 | 146.4 | 2377.20 | 2151.60 | 292.80 | 4528.80 |
| Toma 4 | 140.4 | 2529.60 | 1914 | 280.80 | 4443.60 |

Tabla 9. Parámetros del FWHM de la fibra óptica y la guía iónica 3.

Al igual que en los casos anteriores, en base a los parámetros de la tabla (d, e y f) se procede al cálculo del coeficiente η y de las pérdidas de acoplamiento entre esta guía y la fibra óptica, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 10.

| Toma | η | P _a (dB) |
|------|------|---------------------|
| 1 | 0.14 | 8.50 |

| | | |
|----------|-------------------|------------------|
| 2 | 0.14 | 8.52 |
| 3 | 0.14 | 8.52 |
| 4 | 0.13 | 8.74 |
| Promedio | 0.14 ± 0.0043 | 8.57 ± 0.099 |

Tabla 10. Valores de coeficiente de acoplamiento (η) y pérdidas de acoplamiento (P_a) de la guía de onda iónica 3.

4.4.5 Guía iónica 4

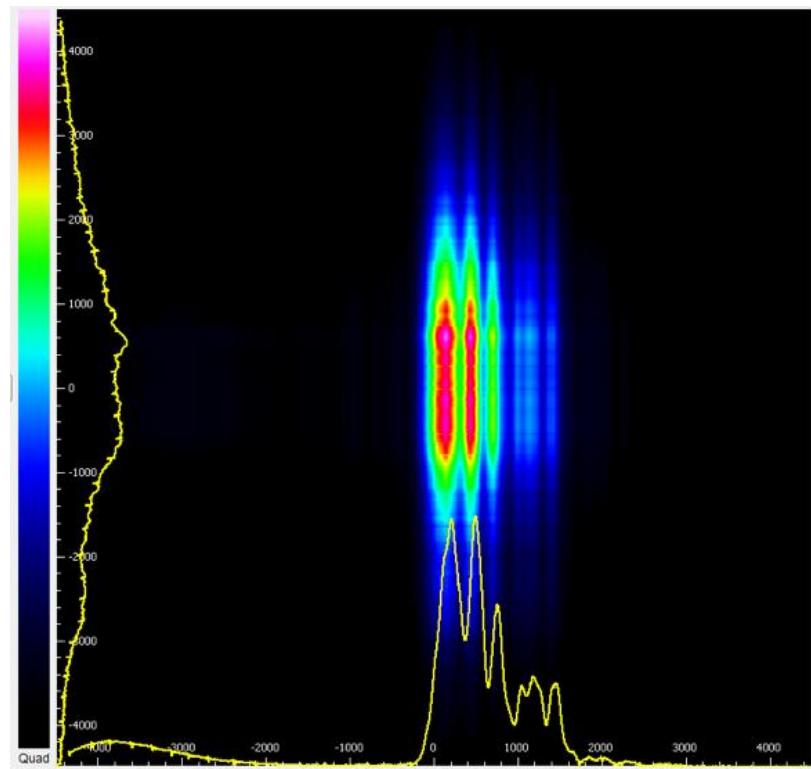


Figura 44. Reconstrucción del perfil de haz de la guía iónica 1.

La guía iónica 4, es la misma en dimensiones y diseño de canal que la guía iónica 2. Donde el ancho de canal es de aproximadamente 90 μm , con una profundidad de 8 μm con la diferencia del proceso de pulido al igual que la guía iónica 3.

En este caso la tabla 11 detalla los parámetros del FWHM obtenidos en cada una de las tomas registradas. Cabe mencionar que, al igual que en el caso de las guías anteriores, el programa utilizado para el análisis toma como referencia el punto de máxima potencia, lo que puede introducir variaciones de hasta un 10% en los datos obtenidos generando una singularidad en los resultados, que, para corregirlo se tuvo que eliminar los datos con mucha variación por esta razón en este caso solo se cuenta con dos tomas.

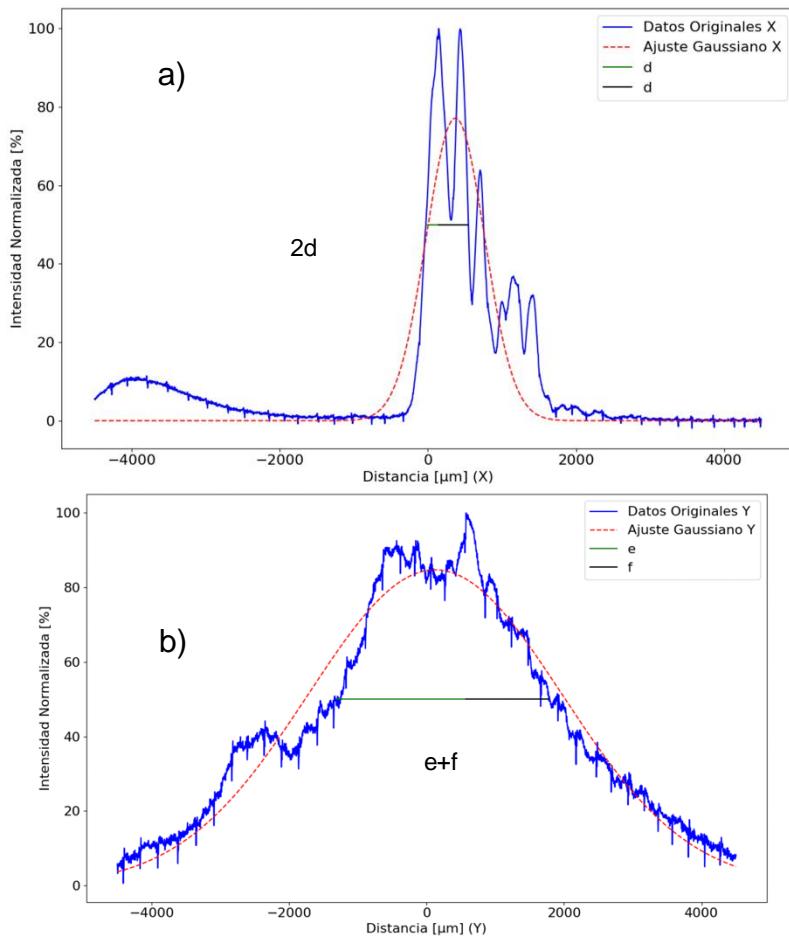


Figura 45. Perfil del haz de la guía de onda con ajuste gaussiano en las direcciones a) x, b) y.

| Guía iónica 4 | d [μm] | e [μm] | f [μm] | FWHM_x (2d) [μm] | FWHM_y (e+f) [μm] |
|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Toma 1 | 388.2 | 1906.80 | 1287.60 | 776.40 | 3194.40 |
| Toma 2 | 386.4 | 1864.80 | 1161.60 | 772.80 | 3026.40 |

Tabla 11. Parámetros del FWHM de la fibra óptica y la guía iónica 4.

Al igual que en los casos anteriores, se procede al cálculo del coeficiente η y de las pérdidas de acoplamiento entre esta guía y la fibra óptica, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 12.

| Toma | η | P_a (dB) |
|----------|--------------|---------------------------|
| 1 | 0.36 | 4.39 |
| 2 | 0.35 | 4.54 |
| Promedio | 0.36 ± 0.005 | 4.47 ± 0.08 |

Tabla 12. Valores de coeficiente de acoplamiento (η) y pérdidas de acoplamiento (P_a) de la guía de onda iónica 4.

4.4.6 Guía polimérica 1

En la figura 46 se presentan los perfiles característicos de esta guía multimodo. Donde a pesar de que la altura de esta guía es pequeña ($1.5 \mu\text{m}$) en comparación con la profundidad de las guías iónicas fabricadas ($8 \mu\text{m}$) presenta múltiples modos. Esto se debe a que el índice de refracción de la resina fotosensible utilizada en su fabricación se encuentra en el rango de 1.57 a 1.59 para una longitud de onda de 632.8 nm de acuerdo a lo mostrado en la sección 2.6

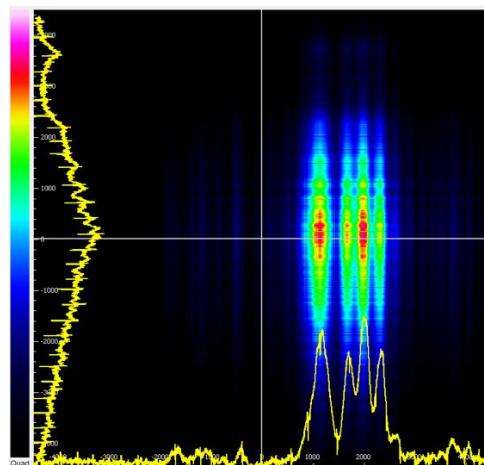
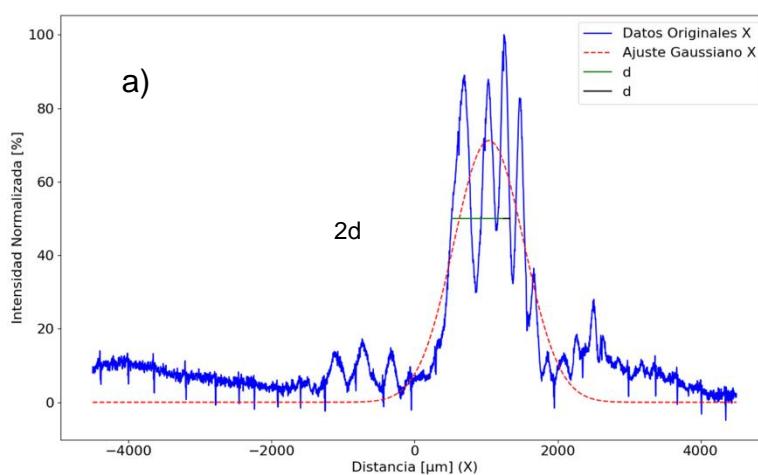


Figura 46. Reconstrucción del perfil de haz de la guía polimérica 1.

En la gráfica de la figura 47 se observan a detalle los perfiles (x, y) y los ajustes gaussianos. Cabe destacar que el perfil en su eje “y” refleja la geometría pseudo-rectangular de la guía de onda.



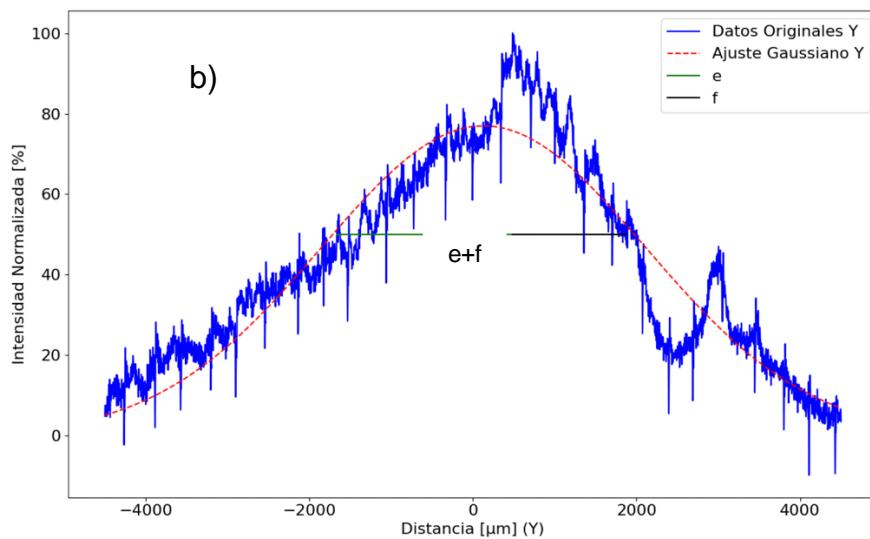


Figura 47. Perfil del haz de la guía de onda con ajuste gaussiano en las direcciones a) x, b) y.

Al posicionar las guías poliméricas para ser caracterizadas en el banco óptico de la figura 4, se movió también la posición de la fibra óptica por lo que fue necesario caracterizar nuevamente el espectro de esta. En la tabla 13 se listan los parámetros calculados tanto de la fibra como de la guía orgánica.

| Fibra óptica | a [μm] | b [μm] | c [μm] | FWHM _x (2a) [μm] | FWHM _y (b+c) [μm] |
|-------------------|---------|---------|---------|-----------------------------|------------------------------|
| Toma 1 | 1974.00 | 2020.80 | 1789.20 | 3867.60 | 3810.00 |
| Toma 2 | 1933.20 | 1983.60 | 1792.80 | 3848.40 | 3776.40 |
| Guía polimérica 1 | d [μm] | e [μm] | f [μm] | FWHM _x (2d) [μm] | FWHM _y (e+f) [μm] |
| Toma 1 | 407.4 | 2148 | 388.40 | 814.80 | 3536.40 |
| Toma 2 | 408 | 2114.40 | 1447.20 | 816 | 3561.60 |

Tabla 13. Parámetros del FWHM de la fibra óptica y la guía polimérica 1.

Utilizando los valores calculados se obtiene el coeficiente η y las pérdidas de acoplamiento de la tabla 14.

| Toma | η | P _a (dB) |
|----------|-------------|---------------------|
| 1 | 0.28 | 5.51 |
| 2 | 0.40 | 4 |
| Promedio | 0.34 ± 0.06 | 4.76 ± 0.76 |

Tabla 14. Valores de coeficiente de acoplamiento (η) y pérdidas de acoplamiento (P_a) de la guía de onda polimérica 1.

4.4.7 Guía polimérica 2

Esta guía se encuentra en el mismo sustrato que la guía polimérica 1 y presenta características muy semejantes. Las figuras 48 y 49 corresponden al perfil del haz guiado.

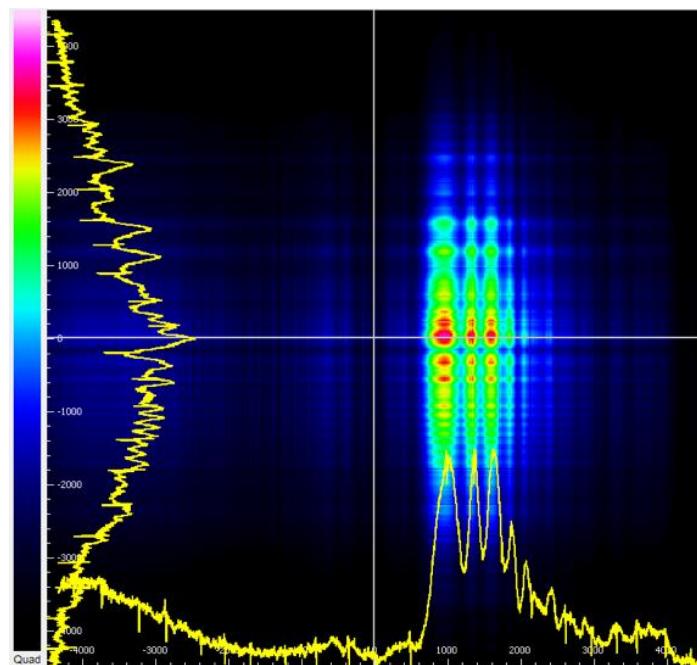
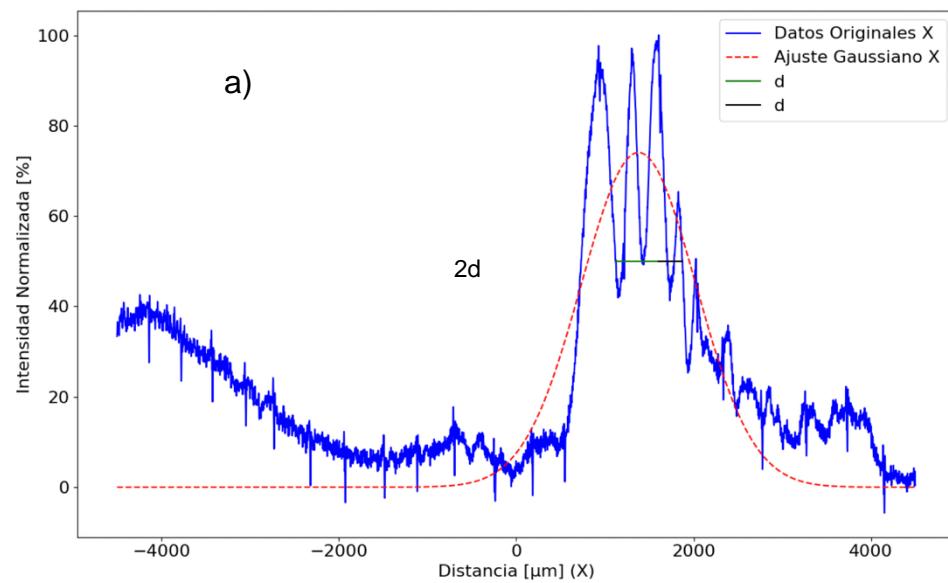


Figura 48. Reconstrucción del perfil de haz de la guía polimérica 2.



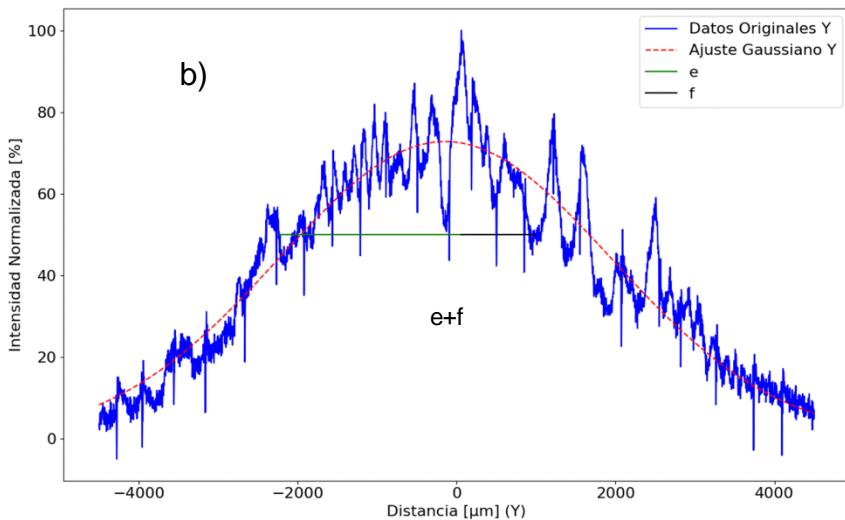


Figura 49. Perfil del haz de la guía de onda con ajuste gaussiano en las direcciones a) x, b) y.

En la tabla 15 se listan los valores calculados y en la tabla 16 el coeficiente η y las pérdidas de acoplamiento con la fibra óptica.

| Guía polimérica 2 | d [μm] | e [μm] | f [μm] | FWHM _x (2d) [μm] | FWHM _y (e+f) [μm] |
|-------------------|--------|---------|--------|-----------------------------|------------------------------|
| Toma 1 | 376.8 | 2282.40 | 920.40 | 753.60 | 3202.80 |
| Toma 2 | 362.4 | 2292 | 860.40 | 724.8 | 3152.40 |

Tabla 15. Parámetros del FWHM de la fibra óptica y la guía polimérica 2.

| Toma | η | P _a (dB) |
|----------|-------------|---------------------|
| 1 | 0.33 | 4.84 |
| 2 | 0.31 | 5.01 |
| Promedio | 0.32 ± 0.01 | 4.93 ± 0.085 |

Tabla 16. Valores de coeficiente de acoplamiento (η) y pérdidas de acoplamiento (P_a) de la guía de onda polimérica 2.

Las guías iónicas 1 y 2, presentaron rendimientos de acoplamiento distintos: la guía iónica 1 alcanzó un coeficiente de acoplamiento promedio de 0.22 y mostró pérdidas de 6.63 dB, lo cual sugiere una eficiencia de transmisión limitada. En contraste, la guía iónica 2, con un coeficiente de 0.42 y pérdidas reducidas a 3.82 dB, demostró una adecuación superior con la fibra óptica, optimizando la eficiencia de acoplamiento y reduciendo significativamente las pérdidas de propagación iónicas. 3 y 4 fueron sometidas a un proceso de pulido adicional en sus extremos de entrada y salida, como resultado, la guía iónica 3 presentó un coeficiente de acoplamiento promedio de 0.14 y pérdidas de 8.57 dB, mientras que la guía iónica 4, con un

rendimiento semejante al de la guía iónica 2, obtuvo un coeficiente de 0.36 y pérdidas de 4.49 dB.

Por su parte las guías poliméricas 1 y 2, aunque no lograron los niveles de eficiencia de las guía iónica 2, se ubicaron en un punto intermedio de rendimiento entre esta y la guía iónica 1. La guía polimérica 1 mostró un coeficiente de 0.34 y pérdidas de 4.76 dB, mientras que la guía polimérica 2 tuvo un coeficiente de 0.32 y pérdidas de 4.93 dB. Estos valores indican que, las guías poliméricas representan una alternativa viable en términos de coste y simplicidad de fabricación .

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La técnica implementada para medir las pérdidas de acoplamiento entre guías de onda se desarrolló a partir de un proceso experimental meticuloso que combinó diversas técnicas de caracterización visual y computacional. Su robustez se fundamentó en un montaje óptico diseñado para medir con precisión los perfiles de haz utilizando fuentes de luz en el rango visible y en el infrarrojo cercano. Este montaje permitió capturar de forma detallada los perfiles de los haces guiados, con el fin de estimar las pérdidas de acoplamiento entre guías de onda de diferentes geometrías. La implementación de códigos en Python para el análisis de los datos experimentales, como el cálculo del FWHM y la estimación del coeficiente de acoplamiento, evidenció la sinergia entre las herramientas experimentales y computacionales, reforzando la aplicabilidad de la técnica desarrollada. Los resultados obtenidos de mediciones experimentales sirvieron para estimar el coeficiente de acoplamiento y determinar las pérdidas de acoplamiento entre guías de onda de diferentes geometrías.

Adicionalmente, se llevó a cabo la fabricación de guías de onda mediante fotolitografía e intercambio iónico. Cada etapa del proceso, desde el clivado y la limpieza de los sustratos, pasando por el depósito, la insolación, el grabado y hasta el pulido de los extremos, demostró la rigurosidad y reproducibilidad del método empleado. Asimismo, se integraron técnicas de caracterización visual mediante microscopía y mediciones precisas a través de perfilometría con el fin de determinar los parámetros característicos de las guías de onda fabricadas.

En conclusión, el proyecto de tesis alcanzó su objetivo principal al demostrar la viabilidad de una técnica para medir las pérdidas de acoplamiento entre guías de onda con diversas geometrías. La validación de los resultados mediante mediciones experimentales sienta un precedente sólido para el desarrollo de dispositivos ópticos más eficientes y confiables.

Entre los puntos a mejorar se puede mencionar la incorporación de un sistema de semi-automatización en la alineación del haz de referencia visible, lo que incrementaría significativamente la velocidad del acoplamiento y la medición. En particular, este sistema permitiría un acoplamiento más rápido del haz visible proveniente de la fibra óptica hacia una de las guías de onda tipo canal en la estructura. Gracias a esta mejora en la alineación y el acoplamiento del haz de referencia, se podría optimizar el tiempo requerido para medir los perfiles de haz, permitiendo una caracterización más rápida de las pérdidas de acoplamiento y del comportamiento modal en la guía de onda.

Hasta este momento, la fiabilidad de la técnica implementada se garantiza para guías de onda monomodo. Sin embargo, es necesario depurar el análisis de los haces guiados para estructuras multimodo en la longitud de onda de caracterización. De la misma forma, se propone mejorar la precisión de la técnica explorando algoritmos de aprendizaje automático, como por ejemplo, redes

neuronales convolucionales (CNN) que permitan identificar patrones o desviaciones sutiles en los perfiles de haz, ampliando así la versatilidad y robustez de la metodología en diversos escenarios.

6. REFERENCIAS

1. García Devesa, A. (2020). *Diseño de acopladores direccionales fotónicos usando herramientas comerciales* (Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de València).
2. Brusberg, L., Whalley, S., Herbst, C., & Schröder, H. (2015). Display glass for low-loss and high-density optical interconnects in electro-optical circuit boards with eight optical layers. *Optics Express*, 23(25), 32528-32540. <https://doi.org/10.1364/OE.23.032528>
3. Brusberg, L., et al. (2019). "High-Density Optical Interconnects for Data Centers: Challenges and Opportunities." *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(6), A1-A12.
4. Lizárraga Medina, É. G. (2016). *Estudio de guías de onda ópticas de SiO_x* (Tesis doctoral). CICESE. Recuperado de <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1335/1/TesisEdTesisEderLi.pdf>
5. Snyder, A. W., & Love, J. D. (1983). *Optical waveguide theory*. Springer-Verlag.
6. Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2007). *Fundamentals of Photonics* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
7. Hecht, E. (2002). *Óptica* (5^a ed.). Pearson Educación.
8. Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of photonics* (3rd ed.). Wiley. Figura 9.2-5. Field distributions for TE guided modes in a dielectric waveguide. These results should be compared with those shown in Fig. 9.1-4 for the planar-mirror waveguide. In B. E. A. Saleh & M. C. Teich (Eds.), *Chapter 9: Guided-wave optics* (p. 9.2-5).
9. Marcuse, D. (1991). *Light Transmission Optics*. Springer-Verlag.
10. Barranco, D., Kuru, Ş., & Negro, J. (2024). Electric and magnetic waveguides in graphene: Quantum and classical. *arXiv preprint arXiv:2404.16114*. <https://doi.org/10.1063/10.1002>
11. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (3^a ed.). Wiley-Interscience.
12. Baker, R. S. (2005). *Semiconductor Material and Device Characterization* (3^a ed.). Wiley-Interscience.
13. Silva Juárez, C. V., Rodríguez Cobos, A., Bello Jiménez, M. Á., Ramírez Flores, G., & Álvarez Salas, J. A. (2022). Técnica de intercambio iónico en vidrio aplicada a la fabricación de circuitos de óptica integrada. *Pistas Educativas*, 43(141), 863-875.
14. Erdogan, T., B. Rochford, K. C. G. Askins, and J. S. Greene, "Low-loss single-mode ion-exchanged glass waveguides,"

- Applied Optics*, vol. 32, no. 6, 1993, pp. 885–893.
<https://doi.org/10.1364/AO.32.000885>
15. Kimerling, L. C., & Sercel, P. C. (1997). *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials*. Plenum Press.
16. Grenier, J. R., Brusberg, L., Wieland, K. A., Matthies, J., & Terwilliger, C. C. (2023). *Ultrafast laser processing of glass waveguide substrates for multi-fiber connectivity in co-packaged optics*. *Advanced Optical Technologies*, 12. <https://doi.org/10.3389/aot.2023.1244009>
17. Tung, K. K., Wong, W. H., & Pun, E. Y. B. (2005). Polymeric optical waveguides using direct ultraviolet photolithography process. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 80(4), 621–626. <https://doi.org/10.1007/s00339-003-2248-8>
18. Brusberg, L., Grenier, J. R., Wieland, K. A., Matthies, J., & Terwilliger, C. C. (2024). *Photonic glass interposer with integrated optical waveguides for fiber-to-chip coupling*. En *Proceedings of SPIE* (Vol. 12892, Artículo 128920C). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2692092>
19. Sattibabu, R., Bhaktha, S. B. N., & Ganguly, P. (2019). Estimation of fiber-waveguide coupling loss and waveguide propagation loss by spectral analysis. *IEEE Photonics Technology Letters*. <https://doi.org/10.1109/LPT.2019.2899729>
20. Chen, K., Chu, P. L., Chiang, K. S., & Chan, H. P. (2006). Design and fabrication of a broadband polymer vertically coupled optical switch. *Journal of Lightwave Technology*, 24(2), 904–909. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.862453>
21. Sun, Y., Jiang, X., Hao, Y., Yang, J., & Wang, M. (2008). Calculation of the coupling coefficients for spatial waveguides using the field matching method. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 10(9), 095305. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/10/9/095305>
22. <http://freebpm.software.informer.com/0.3/>
23. Sanchis, E. & Ejea, J. B. (2008). B.3. Propagación de la luz en guías de onda. Universidad de Valencia. Recuperado de: <https://www.uv.es/~esanchis/cef/pdf/Filminas/FilB3.PDF>
24. Ramaswamy, R., & Najafi, S. I. (1986). Planar, buried, ion-exchanged glass waveguides: Diffusion characteristics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 22(6), 883–890. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1074326>

7. APÉNDICES

Código 1: Visualización y Cálculo del FWHM

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib
from scipy.signal import savgol_filter
from scipy.optimize import curve_fit
matplotlib.use('TkAgg') # Establecemos el backend de Matplotlib para usar Tkinter
import matplotlib.pyplot as plt
import tkinter as tk
from tkinter import filedialog

# Aumentar el tamaño de la letra en todas las gráficas
plt.rcParams.update({'font.size': 16})

# Definición de la función gaussiana
def gaussiana(x, amp, mu, sigma):
    return amp * np.exp(-(x - mu)**2 / (2 * sigma**2))

def calcular_fwhm(df, columna_valor, columna_posicion, usar_ventana=True,
                  window_size=400):
    max_value = df[columna_valor].max()
    half_max_value = max_value / 2
    max_value_index = df[columna_valor].idxmax()

    if usar_ventana:
        window_start = max(0, max_value_index - window_size)
        window_end = min(len(df), max_value_index + window_size)
        df_window = df.iloc[window_start:window_end]

        start_index = df_window[df_window.index == max_value_index][columna_valor].sub(half_max_value).abs().idxmin()
        end_index = df_window[df_window.index == max_value_index][columna_valor].sub(half_max_value).abs().idxmin()

        start_index_global = df.index[window_start + (start_index - window_start)]
        end_index_global = df.index[window_start + (end_index - window_start)]
    else:
```

```

        start_index_global           =           df[df.index <
max_value_index][columna_valor].sub(half_max_value).abs().idxmin()
        end_index_global           =           df[df.index >
max_value_index][columna_valor].sub(half_max_value).abs().idxmin()

        fwhm = df.loc[end_index_global, columna_posicion] - df.loc[start_index_global,
columna_posicion]
        return fwhm, start_index_global, end_index_global, half_max_value,
max_value_index

def calcular_fwhm_y(df, columna_valor, columna_posicion):
    max_value = df[columna_valor].max()
    half_max_value = max_value / 2
    max_value_index = df[columna_valor].idxmax()

    start_index           =           df[df.index <
max_value_index][columna_valor].sub(half_max_value).abs().idxmin()
    end_index           =           df[df.index >
max_value_index][columna_valor].sub(half_max_value).abs().idxmin()

    fwhm     =     df.loc[end_index, columna_posicion] - df.loc[start_index,
columna_posicion]
    return fwhm, start_index, end_index, half_max_value, max_value_index

def procesar_y_graficar(file_path_new, num_picos_x, guia_tipo):
    with open(file_path_new, 'r', encoding='ISO-8859-1') as file:
        file_content_new = file.readlines()

    data = [line.split('\t') for line in file_content_new[11:]]
    columns = file_content_new[10].split('\t')
    df = pd.DataFrame(data, columns=columns)

    df['Pos X [\mu m]'] = pd.to_numeric(df['Pos X [\mu m]'].str.replace(',', '.'), errors='coerce')
    df['X Value [%]'] = pd.to_numeric(df['X Value [%]'].str.replace(',', '.'), errors='coerce')
    df['Pos Y [\mu m]'] = pd.to_numeric(df['Pos Y [\mu m]'].str.replace(',', '.'), errors='coerce')
    df['Y Value [%]'] = pd.to_numeric(df['Y Value [%]'].str.replace(',', '.'), errors='coerce')

    usar_ventana = num_picos_x > 1

```

```

fwhm_x, start_x, end_x, half_max_x, max_x_index = calcular_fwhm(df, 'X Value
[%]', 'Pos X [μm]', usar_ventana)
fwhm_start_to_max_x = df.loc[max_x_index, 'Pos X [μm]'] - df.loc[start_x, 'Pos X
[μm]']
fwhm_max_to_end_x = df.loc[end_x, 'Pos X [μm]'] - df.loc[max_x_index, 'Pos X
[μm]']

etiqueta_x1 = 'e' if guia_tipo == 2 else 'b'
etiqueta_x2 = 'f' if guia_tipo == 2 else 'c'

print(f"\nFWHM Y: {fwhm_x}")
print(f"Longitud {etiqueta_x1}: {fwhm_start_to_max_x}")
print(f"Longitud {etiqueta_x2}: {fwhm_max_to_end_x}")

# Estimaciones iniciales más robustas
initial_amp = df['X Value [%]'].max()
initial_mu = df['Pos X [μm]'][df['X Value [%]'].idxmax()]
initial_sigma = (df['Pos X [μm]'].max() - df['Pos X [μm]'].min()) / 6 # Suposición
basada en la dispersión de los datos

# Ajuste gaussiano para X
try:
    popt_x, pcov_x = curve_fit(gaussiana, df['Pos X [μm]'].values, df['X Value
[%]'].values,
                                p0=[initial_amp, initial_mu, initial_sigma], maxfev=100000)

    # Gráfica original con ajuste gaussiano
    plt.figure(figsize=(12, 6))
    plt.plot(df['Pos X [μm]'], df['X Value [%]'], 'b-', label='Datos Originales Y')
    plt.plot(df['Pos X [μm]'], gaussiana(df['Pos X [μm]'], *popt_x), 'r--', label='Ajuste
Gaussiano Y')
    plt.title('Ajuste Gaussiano para Y')
    plt.xlabel('Distancia [μm]')
    plt.ylabel('Intensidad Normalizada [%]')

    plt.plot([df.loc[start_x, 'Pos X [μm]'], df.loc[max_x_index, 'Pos X [μm]']],
              [half_max_x, half_max_x], color='g', linestyle='-', label=etiqueta_x1)
    plt.plot([df.loc[max_x_index, 'Pos X [μm]'], df.loc[end_x, 'Pos X [μm]']],
              [half_max_x, half_max_x], color='black', linestyle='-', label=etiqueta_x2)

    plt.legend()

```

```

plt.show()

# Calcula el FWHM basado en el ajuste gaussiano
fwhm_gauss_x = 2.355 * popt_x[2]
fwhm_start_x = popt_x[1] - fwhm_gauss_x / 2
fwhm_end_x = popt_x[1] + fwhm_gauss_x / 2
print(f"\nFWHM para Y después del ajuste gaussiano: {fwhm_gauss_x:.2f}")
print(f"Longitud {etiqueta_x1}: {fwhm_start_x - popt_x[1]:.2f}")
print(f"Longitud {etiqueta_x2}: {fwhm_end_x - popt_x[1]:.2f}")
except RuntimeError as e:
    print(f"No se pudo ajustar la curva gaussiana: {e}")

# Ajuste gaussiano para Y
initial_amp_y = df['Y Value [%]'].max()
initial_mu_y = df['Pos Y [μm]'][df['Y Value [%]'].idxmax()]
initial_sigma_y = (df['Pos Y [μm]'].max() - df['Pos Y [μm]'].min()) / 6 # Suposición
basada en la dispersión de los datos

try:
    popt_y, pcov_y = curve_fit(gaussiana, df['Pos Y [μm]'].values, df['Y Value [%]'].values,
                                p0=[initial_amp_y, initial_mu_y, initial_sigma_y],
                                maxfev=100000)

    # Gráfica original con ajuste gaussiano
    plt.figure(figsize=(12, 6))
    plt.plot(df['Pos Y [μm]'], df['Y Value [%]'], 'b-', label='Datos Originales X')
    plt.plot(df['Pos Y [μm]'], gaussiana(df['Pos Y [μm]'], *popt_y), 'r--', label='Ajuste
Gaussiano X')
    plt.title('Ajuste Gaussiano para X')
    plt.xlabel('Distancia [μm]')
    plt.ylabel('Intensidad Normalizada [%]')

    fwhm_y, start_y, end_y, half_max_y, max_y_index = calcular_fwhm_y(df, 'Y
Value [%]', 'Pos Y [μm]')

    etiqueta_y1 = 'd' if guia_tipo == 2 else 'a'
    etiqueta_y2 = 'd' if guia_tipo == 2 else 'a'

    plt.plot([df.loc[start_y, 'Pos Y [μm]'], df.loc[max_y_index, 'Pos Y [μm]']],
             [half_max_y, half_max_y], color='g', linestyle='-', label=etiqueta_y1)

```

```

plt.plot([df.loc[max_y_index, 'Pos Y [μm]'], df.loc[end_y, 'Pos Y [μm]']],
         [half_max_y, half_max_y], color='black', linestyle='-', label=etiqueta_y2)

plt.legend()
plt.show()

fwhm_start_to_max_y = df.loc[max_y_index, 'Pos Y [μm]'] - df.loc[start_y, 'Pos
Y [μm]']
fwhm_max_to_end_y = df.loc[end_y, 'Pos Y [μm]'] - df.loc[max_y_index, 'Pos
Y [μm]']
print(f"\nFWHM X: {fwhm_y}")
print(f"Longitud {etiqueta_y1}: {fwhm_start_to_max_y}")
print(f"Longitud {etiqueta_y2}: {fwhm_max_to_end_y}")

# Calcula el FWHM basado en el ajuste gaussiano
fwhm_gauss_y = 2.355 * popt_y[2]
fwhm_start_y = popt_y[1] - fwhm_gauss_y / 2
fwhm_end_y = popt_y[1] + fwhm_gauss_y / 2
print(f"\nFWHM para X después del ajuste gaussiano: {fwhm_gauss_y:.2f}")
print(f"Longitud {etiqueta_y1}: {fwhm_start_y - popt_y[1]:.2f}")
print(f"Longitud {etiqueta_y2}: {fwhm_end_y - popt_y[1]:.2f}")
except RuntimeError as e:
    print(f"No se pudo ajustar la curva gaussiana: {e}")

# Graficamos los pulsos para X con alisamiento
x_smooth = savgol_filter(df['X Value [%]'], window_length=51, polyorder=3)
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(df['Pos X [μm]'], x_smooth, label='Datos del Pulso Y')
plt.title('Perfil Y')
plt.xlabel('Distancia [μm]')
plt.ylabel('Intensidad Normalizada [%]')

plt.plot([df.loc[start_x, 'Pos X [μm]'], df.loc[max_x_index, 'Pos X [μm]']],
         [half_max_x, half_max_x], color='g', linestyle='-', label=etiqueta_x1)
plt.plot([df.loc[max_x_index, 'Pos X [μm]'], df.loc[end_x, 'Pos X [μm]']],
         [half_max_x, half_max_x], color='r', linestyle='-', label=etiqueta_x2)

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

```

```

# Graficamos los pulsos para Y con alisamiento
y_smooth = savgol_filter(df['Y Value [%]'], window_length=51, polyorder=3)
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(df['Pos Y [μm]'], y_smooth, label='Datos del Pulso X')
plt.title('Perfil X')
plt.xlabel('Distancia [μm]')
plt.ylabel('Intensidad Normalizada [%]')

plt.plot([df.loc[start_y, 'Pos Y [μm]'], df.loc[max_y_index, 'Pos Y [μm]']],
         [half_max_y, half_max_y], color='g', linestyle='-', label=etiqueta_y1)
plt.plot([df.loc[max_y_index, 'Pos Y [μm]'], df.loc[end_y, 'Pos Y [μm]']],
         [half_max_y, half_max_y], color='r', linestyle='-', label=etiqueta_y2)

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# Configuramos el Tkinter para el diálogo de selección de archivos
root = tk.Tk()
root.withdraw()

# Abrimos el diálogo para seleccionar un archivo de texto
file_path_new = filedialog.askopenfilename(
    title="Selecciona un archivo",
    filetypes=[("Archivos de texto", "*.txt")]
)

root.destroy()

if file_path_new:
    guia_tipo = int(input("Ingrese 1 para fibra óptica o 2 para guía de onda: "))
    num_picos_x = int(input("Ingrese el número de picos en la señal Y: "))
    procesar_y_graficar(file_path_new, num_picos_x, guia_tipo)
else:
    print("No se seleccionó ningún archivo.")

```

Código 2: Estimación de Pérdidas de Acoplamiento

```

import math

def optimized_calculo_eta(a, b, c, d, e, f):

```

```

# Aplicar la fórmula correctamente
term1 = (1 / b**2 + 1 / e**2)**(-0.5)
term2 = (1 / c**2 + 1 / f**2)**(-0.5)

# Fórmula de η (Coeficiente de acoplamiento)
eta = (4 * (term1 + term2)**2) / (a * d * (b + c) * (e + f) * (1 / a**2 + 1 / d**2))
return eta

def optimized_calculo_pa_db(eta):
    # Fórmula de P_a (Pérdidas por acoplamiento) en decibeles
    pa_db = -10 * math.log10(eta)
    return pa_db

def optimized_main():
    try:
        # Entradas
        values = [float(input(f"Introduce el valor para {var}: ")) for var in "abcdef"]
        a, b, c, d, e, f = values

        # Calcular η y P_a
        eta = optimized_calculo_eta(*values)
        pa_db = optimized_calculo_pa_db(eta)

        print(f"El coeficiente de acoplamiento es de: {eta}")
        print(f"Las perdidas por acoplamiento son de: {pa_db} dB")
    except ValueError:
        print("Error: Se introdujo un valor no válido.")

if __name__ == "__main__":
    optimized_main()

```