

(Versión Final)



# ACOPLADOR LATERAL PARA LASERES DE FIBRA OPTICA



COMO REQUERIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN  
DEL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS (ÓPTICA)

***Asesor: Dr. Alejandro Martínez Ríos***

***Estudiante: Ing. Kenia Madrazo de la Rosa.***

*Noviembre de 2016*  
*León, Guanajuato, México*



**DEDICADO A:**

*“Esta tesis está dedicada especialmente a mis seres amados y adorados: mis padres, mi esposo, mi hermano y toda mi familia, porque me han dado la fuerza y la razón para seguir adelante cada día y alcanzar todas mis metas.”*



## ***AGRADECIMIENTOS***

Quiero agradecer sinceramente al *Conacyt* (Proyecto SEP-CONACYT 220444) por el apoyo brindado durante toda la etapa de mi maestría, lo cual me permitió realizar este proyecto de tesis. Especialmente agradezco a mi asesor, el Dr Alejandro Martínez Ríos, que más allá de guiarme y ayudarme durante mi investigación, se convirtió en un verdadero padre y amigo. También le agradezco a mi amado esposo, pues siempre me ha apoyado de manera excepcional y ha sido para mí un compañero de trabajo insustituible.

Agradezco además al *CIO*, por haberme dado la oportunidad de cursar este magnífico postgrado, haciéndome posible avanzar con mi superación personal. Extiendo también mi sincero agradecimiento a todos los profesores que me impartieron asignaturas, pues fueron quienes me ayudaron a crear las bases para poder desarrollar mi tesis. En general, le agradezco a todas las personas que me han ayudado de una forma u otra y le envío mi agradecimiento más sincero a mis compañeros de trabajo, pues han sido para mí una gran familia durante todo este tiempo, Daniel, Luis, Myriam, Ricardo y Po. Especialmente, quiero agradecerle a Teresa Elena, mi compañera, amiga y hermana mexicana porque se ha encargado de estar ahí para apoyarme incondicionalmente en cada segundo.

## **TABLA DE CONTENIDO**

Agradecimientos.....	5
Tabla de Contenido.....	6
Tabla de Figuras.....	8
Lista de Tablas.....	10
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 2. Láseres de Fibra de Doble Revestimiento.....</b>	<b>14</b>
Introducción.....	14
2.1 Láseres de Fibra de Doble Revestimiento.....	15
2.2 Configuración de Láser de Fibra con Bombeo de Revestimiento Lateral.....	17
2.2.1 El Bombeo Lateral.....	18
2.3 Diodos de Bombeo.....	20
2.3.1 Los diodos láser y el Escalado de Potencia en Láseres de Fibra.....	20
<b>Capítulo 3. Principios de Operación.....</b>	<b>22</b>
Introducción.....	22
3.1 Guías de Onda Cilíndricas. Fibras Ópticas.....	23
3.2 Fibra Óptica con Índice de Refracción Escalonado.....	23
3.2.1 Perfil del índice de refracción.....	23
3.2.2 Régimen Modal. Clasificación.....	24
3.2.3 Los Campos Electromagnéticos.....	25
3.2.4 Designación Modal y Campos.....	27
3.3 Fibras Multimodo.....	31
3.3.1 Patrón de Intensidad de los Modos. Simulación en Photodesing.....	31
3.3.2 El Taper Multimodo.....	32
3.4 Teoría de Acopladores Multimodo.....	34
3.4.1 Simulación del Acoplador Lateral.....	34
3.4.2 Consideraciones Geométricas del Acopladores Laterales.....	37
3.4.2.1 Cantidad Máxima de Bombeos.....	37
3.4.2.2 Ángulo Máximo de Acoplamiento. Diseño del Taper de Bombeo.....	37
<b>Capítulo 4. Metodología para la Fabricación del Acoplador Lateral.....</b>	<b>40</b>
Introducción.....	40

4.1	Diseño del Acoplador Lateral.....	41
4.2	Fabricación del Taper de Bombeo.....	42
4.3	Preparación de la fibra DC.....	44
4.4	Diseño del Proceso de Enrollado y Fusión.....	45
4.5	Proceso de Empaquetado.....	46
4.6	Medición del Acoplador Lateral.....	47
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>50</b>
	Introducción.....	50
5.1	Potencia Acoplada contra Longitud de Acoplamiento.....	51
5.2	Eficiencia de Acoplamiento.....	52
5.3	Acopladores Fabricados.....	53
5.4	Discusión de los Resultados.....	54
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>57</b>
<b>Referencias</b> .....		<b>58</b>

## TABLA DE FIGURAS

- 1.1).....Componentes de un láser de fibra óptica moderno.
- 2.1).....Configuración clásica de la fibra de doble revestimiento.
- 2.2).....Configuración de bombeo intra-cavidad con FBGs.
- 2.3).....Configuración geométrica de un acoplador lateral (Interacción superficial).
- 2.4).....Esquema del bombeo lateral de revestimiento todo-fibra basado en TFB.
- 2.5).....Diagrama de un láser de fibra con bombeo lateral de revestimiento.
- 3.1).....Perfil del índice de refracción en una fibra de índice escalonado.
- 3.2)..... a) fibra óptica monomodo y b) fibra óptica multimodo.
- 3.3)..... a) dimensiones de la fibra óptica monomodo y b) dimensiones de la fibra óptica multimodo.
- 3.4)..... Gráfica de dispersión  $b$  vs  $V$  para una fibra de índice escalonado.
- 3.5)..... Modos linealmente polarizados en la fibra step-index.
- 3.6)..... Gráfica  $b$  contra  $V$ . Modos:  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  y  $LP_{31}$ .
- 3.7)..... Perfil de intensidad de los modos:  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  y  $LP_{31}$ .
- 3.8)..... Fibra multimodo(105/125  $\mu\text{m}$ ) de 5 m de longitud con núcleo de sílice puro y revestimiento dopado con fluorine.
- 3.9)..... Perfil de intensidad de a) el modo 1 y b) modo 25. En ambos casos a la izquierda se muestra una gráfica 2D y a la derecha una gráfica 3D.
- 3.10).....Estructura de un taper con sus parámetros descritos.
- 3.11).....Geometría del taper de la fibra MM sin revestimiento.
- 3.12).....Sección transversal del acoplador lateral al inicio de la zona de fusión.
- 3.13).....Modos de la guía compuesta.
- 3.14).....Modo 1 lanzado desde la fibra de bombeo.
- 3.15).....Acoplamiento del modo 1 a) al principio, b) en el medio y c) al final de la zona de acoplamiento. En los tres casos se tienen gráficas 2D y 3D respectivamente.
- 3.16).....Modo 5 lanzado desde la fibra de bombeo.
- 3.17).....Acoplamiento del modo 5 a) al principio, b) en el medio y c) al final de la zona de acoplamiento. En los tres casos se tienen gráficas 2D y 3D respectivamente.
- 3.18).....Acoplamiento del modo 20 a) al principio, b) en el medio y c) al final de la zona de acoplamiento. En los tres casos se tienen gráficas 2D y 3D respectivamente.
- 3.19).....Comportamiento de la intensidad del modo 20.
- 3.20).....Geometría del acoplamiento de luz desde el taper MM hacia la fibra receptora.
- 4.1).....a) Acoplador lateral sin empaquetar y b) Acoplador lateral empaquetado.
- 4.2).....Procesadora Vytran serie 3000.
- 4.3).....Programa FFS3 para diseñar el taper.
- 4.4).....Tetrahidrofurano utilizado para remover el segundo revestimiento en la fibra DC.
- 4.5).....Programa para controlar la tensión durante la fusión.
- 4.6).....Mecanismo desarrollado para la manipulación del acoplador fabricado.
- 4.7).....Los elementos utilizados en la medición del diodo láser fueron: a) Fuente de corriente eléctrica, en b) diodo láser, en c) Medidor de potencia y en c) Pinzas.
- 4.8).....Arreglo para la medición de potencia de salida del diodo contra corriente.
- 4.9).....Potencia de salida del diodo Vs Corriente.
- 4.10).....Arreglo para la medición de la potencia acoplada en cada dispositivo.



- 5.1).....Potencias Acopladas contra potencia del diodo láser para cada dispositivo.
- 5.2).....Potencias Acopladas contra potencia del diodo láser para cada dispositivo.
- 5.3)..... Acopladores desarrollados en el laboratorio.
- 5.4)..... Caja protectora.

## ***LISTA DE TABLAS***

- 1).....Longitud de acoplamiento de cada dispositivo medido.
- 2).....Diseño de cada acoplador experimental.
- 3).....Parámetros de fabricación del taper fabricado para el “acoplador 1”.
- 4).....Parámetros de fabricación del taper fabricado para el “acoplador 2”.
- 5).....Parámetros de fabricación del taper fabricado para el “acoplador 3”.
- 6).....Potencia del diodo láser.
- 7).....Potencia de salida en el acoplador con longitud de fusión de 3 cm.
- 8).....Potencia de salida en el acoplador con longitud de fusión de 4 cm.
- 9).....Potencia de salida en el acoplador con longitud de fusión de 5 cm.

# Capítulo 1. Introducción

## Introducción

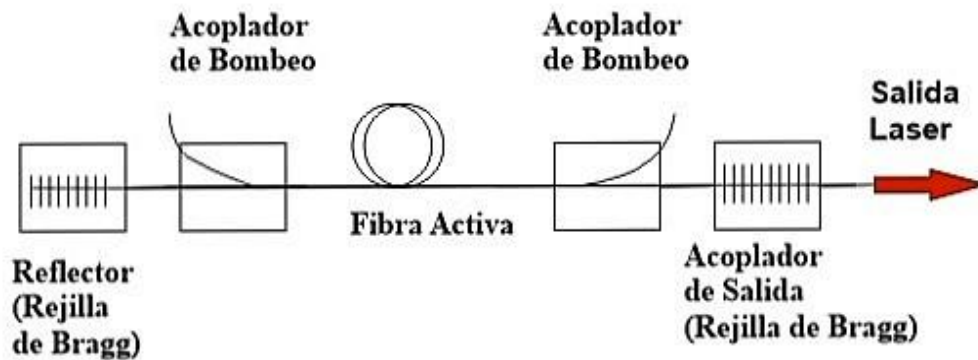
El surgimiento de las fibras ópticas se remonta a la década de los 1950`s y con el transcurso del tiempo esta tecnología se ha insertado cada vez más en las comunicaciones, industria, medicina, entre otras ramas. Desde sus inicios, las fibras ópticas tuvieron un desarrollo acelerado y solamente una década después de su surgimiento, en la década de los 1960`s se crearon las fibras de vidrio activadas con iones de tierra rara. Estas fibras tienen la particularidad de que pueden usarse como el medio activo para la implementación de un láser [1]. Aproximadamente dos décadas después del surgimiento del láser de fibra [2], y con las mejoras en los diodos láser y en la fabricación de fibras dopadas con tierras raras, particularmente de Erblio, esta novedosa tecnología tuvo un impacto trascendental en las telecomunicaciones por fibra óptica, ya que al usarse como medio de amplificación, aumentó la distancia de transmisión sin regeneración. A la par con las aplicaciones en amplificación, se comenzaron a explorar alternativas para la generación de altas potencias en láseres de fibra óptica, incluyendo otros dopantes como el Neodimio y el Iterbio.

Es importante mencionar que los primeros láseres eran bombeados con diodos láser, cuyos haces de salida eran acoplados directamente al núcleo de la fibra activa. Sin embargo, esto limitaba el nivel de potencia que podía acoplarse y por tanto la potencia láser máxima obtenible de la cavidad de fibra óptica, principalmente por dos razones: la poca calidad del haz de los diodos láser que limitaba la eficiencia de acoplamiento; y el hecho de que aun si se pudiera acoplar una potencia alta y el haz fuera de alta calidad, no es posible acoplar el 100% de la luz en el núcleo y la parte que se va hacia el recubrimiento puede ser suficiente para destruir la fibra por sobrecalentamiento [3].

La solución a dicho problema fue el uso de fibras con estructura de doble recubrimiento. En el año 1988, Snitzer, H. Po y colegas [4,5] presentaron la técnica del bombeo de revestimiento empleando esta fibra. Con esto demostraron que la técnica del bombeo de revestimiento posibilita insertar mayor cantidad de potencia de bombeo en la fibra, lo cual permite obtener una salida láser superior. También se constató que la fibra de doble revestimiento incrementa las posibilidades para un bombeo mayor, lo cual se traduce en un láser de fibra mucho más potente. En realidad, la fibra de doble revestimiento son dos guías de onda concéntricas, donde la guía de onda del bombeo está conformada por el recubrimiento de vidrio que rodea al núcleo de la fibra y un polímero de índice de

refracción menor al del recubrimiento. El proceso de absorción se realiza cada vez que el bombeo cruza el núcleo dopado con el material activo [4].

En las últimas décadas, el Iterbio se ha presentado como el dopante más poderoso para la fibra láser. Este ion presenta un defecto cuántico muy pequeño con bombeos de láseres diodo en el rango de 910nm a 980nm, de modo que la carga térmica es muy baja y puede emplearse una alta concentración de dopante[6]. Particularmente, la tecnología de la fibra de doble revestimiento dopada con Iterbio ha arrojado resultados relevantes y se ha demostrado que permite un acoplamiento eficiente de potencia de bombeo de láseres diodo, lo cual se traduce en láseres con salidas más potentes. Durante años, ha quedado bien establecido que el escalado de potencia en los láseres de fibra de doble revestimiento depende principalmente del ion dopante, la geometría de la fibra y los diodos multimodales de alta potencia (*MM*) LDs [6].



**Figura 1.1** Componentes de un láser de fibra óptica moderno.

Los modernos sistemas láser de fibra óptica son capaces de generar niveles de potencia en el orden de decenas de (*kWs*). La figura 1.1 muestra las partes que componen un láser de fibra óptica moderno. Uno de los componentes clave del láser de fibra óptica de alta potencia es el acoplador de bombeo. En general, existen dos tipos de acopladores de bombeo: frontal y lateral [7].

Un acoplador de bombeo frontal tiene un grupo de fibras de bombeo unidas y fusionadas, y una fibra de salida con geometría de doble revestimiento. Dentro del grupo de fibras fusionadas hay una fibra central por donde entra la señal monomodal láser y a esta la rodean varias fibras multimodales provenientes de los diodos láser de bombeo. Este grupo de fibras se estrecha hasta alcanzar el diámetro de la fibra de doble revestimiento de salida con la cual es empalmada por fusión[7]. Una desventaja del acoplador de bombeo frontal es su limitada capacidad de recibir potencia de bombeo en niveles de (*kW*), debido a la gran carga térmica generada en el punto de fusión que puede conducir a daño óptico catastrófico. Para superar esta limitante se prefiere el uso de acopladores de bombeo lateral.

En el caso de un acoplador de bombeo lateral, la fibra de doble revestimiento tiene fusionadas lateralmente una o varias fibras multimodales provenientes de los diodos láser de bombeo. Para su fabricación, las fibras de bombeo se estrechan individualmente antes de fusionarse con el recubrimiento de la fibra de doble revestimiento. El estudio y fabricación de este tipo de acopladores es el tema principal de esta tesis y para el desarrollo de la misma, se planteó el siguiente objetivo general.

*Objetivo General:*

- Fabricar acopladores de bombeo lateral altamente eficientes.

*Objetivos Secundarios:*

- Desarrollar una metodología para la fabricación de acopladores de bombeo lateral (1 + 1).
- Desarrollar una metodología para el empaquetamiento de los acopladores de bombeo.
- Realizar la descripción teórica del funcionamiento del acoplador.

Esta tesis está dividida de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se analiza la geometría de la fibra que emplean los láseres de fibra de doble revestimiento, la geometría del bombeo lateral de revestimiento y la importancia de los diodos láser en el escalado de potencia de los láseres de fibra. En el capítulo 3 se presentan los principios básicos de los acopladores multimodales. El capítulo 4 muestra la metodología para la fabricación y el empaquetado de los acopladores de bombeo lateral. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos con el acoplador lateral fabricado y se realiza una discusión de estos. Finalmente en el capítulo 6 se presenta las conclusiones de la tesis.

# Capítulo 2. Láseres de Fibra de Doble Revestimiento

## Introducción

En este capítulo enuncian las principales ventajas de la tecnología de los láseres de fibra de doble revestimiento. Se describe la geometría de la fibra de doble revestimiento y su rol determinante para la eficiencia de estos sistemas láseres. También se presenta la configuración más común de láser de fibra con bombeos laterales por el revestimiento y se describe la geometría del bombeo lateral de revestimiento basado en múltiples bombeos individuales simultáneos. Se presenta el esquema experimental que se empleó para realizar el bombeo mediante el uso del acoplador de bombeo lateral fabricado en el laboratorio. Finalmente se describe la importancia de la evolución de la tecnología de los diodos láser para el escalado de potencia en los láseres de fibra.

## 2.1 Láseres de Fibra de Doble Revestimiento.

Durante los últimos años, los avances en el desarrollo y aplicaciones de láseres de fibra óptica de multi-kW han sido sorprendentes, de manera que actualmente son muy utilizados en procesos avanzados de manufactura, aplicaciones científicas y otras. Se puede asegurar que estos avances se han debido en gran medida a los perfeccionamientos en la tecnología de diodos láser, el desarrollo de fibras pasivas y activas de alta calidad, acopladores de bombeos altamente eficientes, aisladores, removedores de bombeo residual, rejillas de Bragg (FBGs) y otros dispositivos [8]. En la última década, las potencias alcanzadas han mostrado un promedio de crecimiento de 1.7 veces cada año, de manera que se ha logrado un aumento de hasta dos órdenes de magnitud durante los últimos años. Se distinguen totalmente de otras tecnologías láser por su funcionalidad y comportamiento. Algunas de sus características más apreciadas son las siguientes [6]:

- ✓ Operación monomodal robusta (no sufren de distorsiones inducidas térmicamente como en el caso de láseres de estado sólido).
- ✓ Anchos de línea de ganancia muy grandes ( $20 \text{ THz} = 66.6 \text{ nm}$ ), lo que permite generación de pulsos ultra-cortos, y se puede sintonizar en un rango muy amplio de longitud de onda.
- ✓ Ganancias altas.
- ✓ Altas eficiencias de conversión (eléctrica a óptica, óptica a óptica).
- ✓ Posibilidades de cavidades hechas totalmente de fibra óptica.

En el láser de fibra óptica se combinan perfectamente dos tecnologías diferentes, el láser y la fibra óptica. Un láser de fibra óptica consiste en una cavidad láser donde el núcleo de la fibra está dopado con un material activo, generalmente una tierra rara como el Iterbio, y los espejos de retroalimentación pueden ser rejillas de Bragg grabadas directamente en el núcleo. Generalmente el bombeo proviene de diodos láser semiconductores u otro láser fibra. Una de las ventajas del bombeo por diodo láser es que la luz puede acoplarse eficientemente en fibras ópticas, por esa razón en la actualidad los diodos láser se consideran la fuente ideal para el bombeo de láseres de fibra óptica.

La historia del láser de fibra comienza con la primera demostración realizada por el estadounidense Elias Snitzer y otros colegas en el año 1960[9-10], donde la fibra empleada estuvo dopada con la tierra rara neodimio (Nd). Posteriormente en la década de los 70s, Stone y Burrus demostraron un láser de fibra basada en sílice[11]. En el año 1985, David Payne y otros colegas[12-

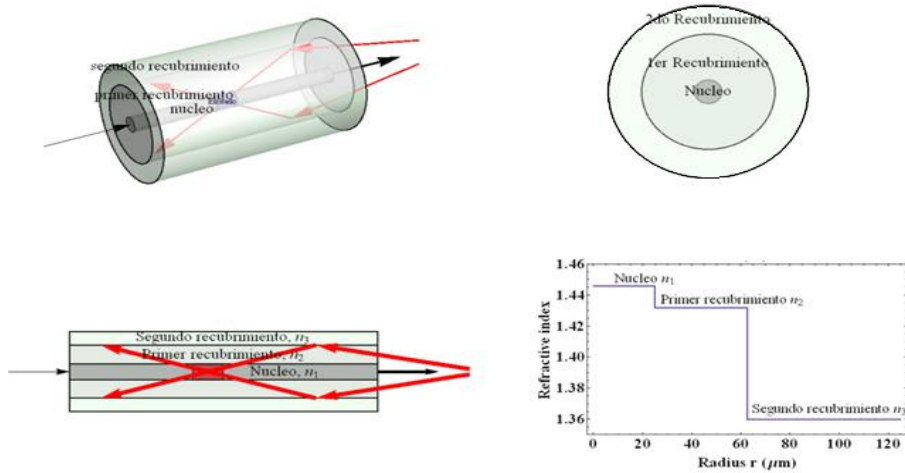
13] revelaron el potencial de las fibras dopadas con neodimio para obtener ganancias ópticas de varios decibeles por miliwatt( $mW$ ) de potencia bombeo absorbida. Dos años después de dicha demostración, este mismo grupo presentó un amplificador de fibra dopada con iones de Erblio ( $Er^{3+}$ ) [14], cuya longitud de onda de  $1.55 \mu m$  cae en la tercera ventana de comunicación. Cabe destacar, que este trabajo tuvo gran impacto en las telecomunicaciones y determinó en gran medida el internet de la actualidad. Sin embargo, a pesar del resultado alcanzado con los amplificadores, el interés en los láseres de fibra no disminuyó y en el año 1999 [15] se obtuvo el primer láser de fibra dopada con iones de Iterbio ( $Yb^{3+}$ ) que superó los  $100 (W)$  y con el paso de años ya se ha logrado alcanzar los niveles ( $kW$ ).

Debe destacarse que antes del surgimiento de la fibra con geometría de doble revestimiento, los láseres de fibra óptica estaban muy limitados en cuanto a la potencia de la luz láser que podían generar, particularmente debido a que los diodos láser de bombeo se acoplaban directamente al núcleo de la fibra, por lo cual debían ser diodos láser monomodales, cuya potencia de salida está limitada a menos de  $1 (W)$ . En ese entonces, aun cuando se lograban combinar la potencia de varios diodos láser monomodales, debido al diámetro tan reducido del núcleo, la intensidad podía resultar lo suficientemente alta como para provocar daño óptico y efectos térmicos. Sin embargo, ese problema fue erradicado con la estructura de doble revestimiento, debido a que la luz del diodo láser de bombeo tiene un área mucho mayor por la que puede ser acoplada y por eso pueden emplearse diodos láser multimodales que pueden entregar potencias inclusive en el orden de ( $kW$ ).

En las fibras con geometría de doble revestimiento, el núcleo dopado con una tierra rara (Erblio, Iterbio, Neodimio, etc.) actúa como medio activo y está rodeado por un revestimiento interno de diámetro mucho mayor, que a la vez se encuentra acotado por un segundo revestimiento con menor índice de refracción. De esa forma se tienen dos guías de onda concéntricas, una para la señal láser en el núcleo y otra para el bombeo dentro del revestimiento interno. Como resultado, durante la propagación del bombeo por la fibra, éste es absorbido progresivamente por el núcleo y se facilita la conversión de la radiación de bombeo con bajo nivel de brillo proveniente del diodo, en una salida láser con alto brillo.

En la figura 2.1 se muestra la configuración clásica de la fibra de doble revestimiento. Sin embargo, se debe mencionar que en la actualidad existen múltiples diseños que presentan diferentes geometrías del núcleo.





**Figura 2.1** Configuración clásica de la fibra de doble revestimiento.

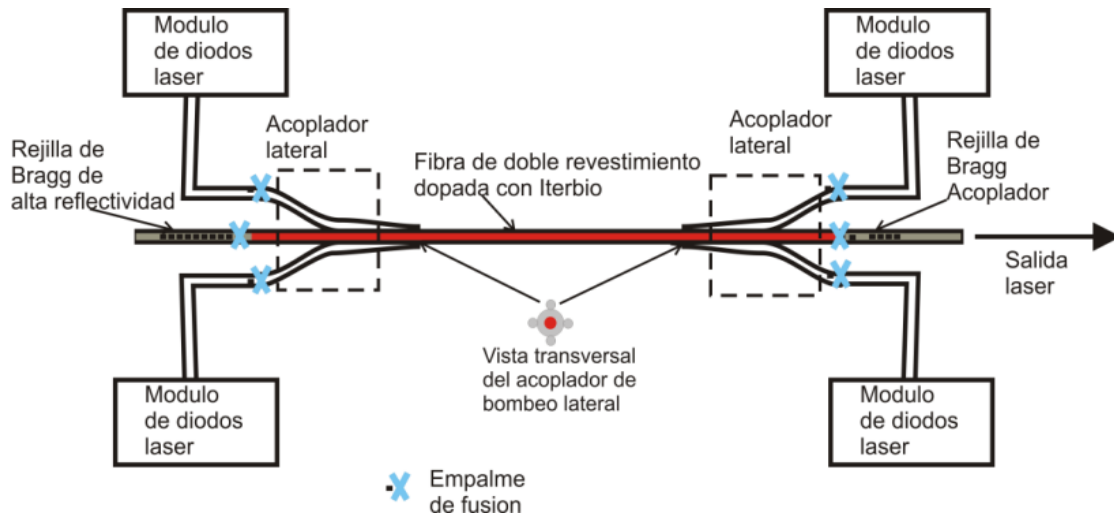
Debe mencionarse que para el desarrollo del láser de fibra, el surgimiento de la tecnología del bombeo por revestimiento ha sido fundamental, pues en poco tiempo se ha escalado la potencia de salida desde 1 W hasta niveles de kW. Esta novedosa tecnología multiplica las posibilidades del láser de fibra en cuanto a potencia de salida.

En el capítulo 1 se mencionaron los dos tipos principales de bombeos por el revestimiento y a continuación en la sección 2.2 se menciona la configuración más común de láser de fibra con bombeos de revestimiento y se describe la geometría del bombeo lateral.

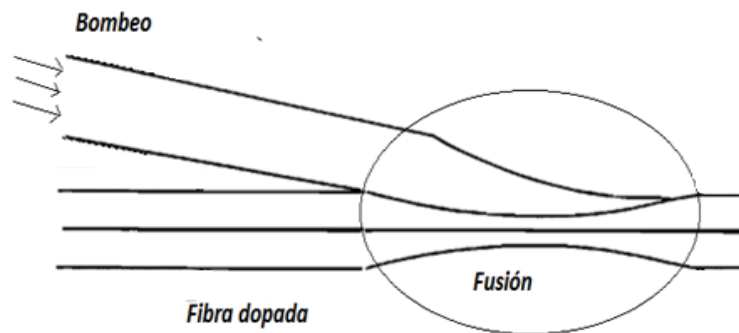
## 2.2 Configuración de Láser de Fibra con Bombeo de Revestimiento Lateral.

Previamente, en el capítulo 1, se mencionó que el tipo de fibra activa y la tecnología de bombeo disponible son determinantes para lograr una eficiente generación láser. En la figura 2.2 se muestra la configuración todo-fibra más empleada de láseres de fibra con bombeos de tipo lateral. En este caso se incluyen los acopladores laterales de bombeo de revestimiento y se puede observar que la unión de las fibras es por la superficie.

Por otro lado, en la figura 2.3 se muestra la geometría de un acoplador lateral con interacción superficial entre una fibra de bombeo y la fibra receptora (fibra de doble revestimiento).



**Figura 2.2** Configuración de bombeo intra-cavidad con FBGs.



**Figura 2.3** Configuración geométrica de un acoplador lateral (Interacción superficial).

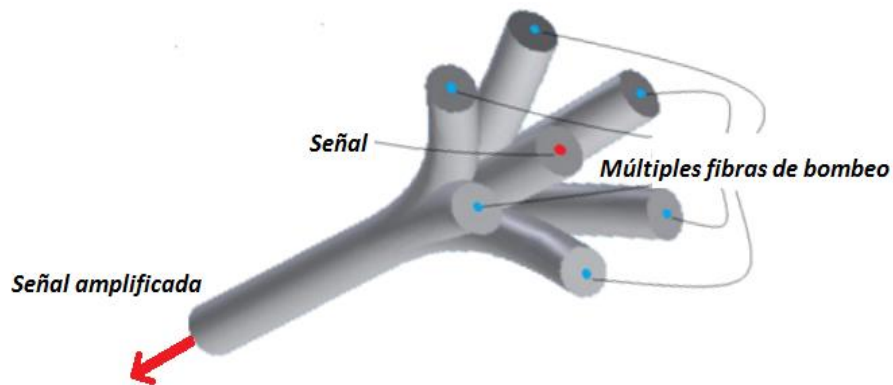
En la actualidad, es común utilizar múltiples fuentes simultáneamente. Con esto, la potencia de bombeo se ha incrementado considerablemente y por lo tanto la potencia de láser que se puede generar.

### 2.2.1 El Bombeo Lateral.

En la actualidad existen diferentes técnicas para realizar el bombeo lateral de revestimiento y entre los esquemas principales se pueden mencionar [1]:

- ✓ V-groove.
- ✓ Fibra de bombeo fusionada (diámetro normal o taper) con cierto ángulo pulido.
- ✓ Arreglo basado en un grupo compacto de fibras estrechadas en diámetro y unidas por un revestimiento común sobre una cierta longitud. Taper Fiber Bundle (*TFB*).

La figura 2.4 muestra la geometría de un esquema de bombeo lateral de revestimiento basado en *TFB*.



**Figura 2.4** Esquema del bombeo lateral de revestimiento todo-fibra basado en TFB.

El bombeo lateral basado en *TFB* requiere que todas las fibras individuales de bombeo estén contacto lateralmente con la fibra de la señal antes de realizar la fusión [16]. En la figura 2.4 se muestra la configuración de bombeo lateral donde se facilita que el bombeo lanzado a través de múltiples fibras de bombeo se acople gradualmente dentro de la fibra activa. La mayor ventaja que se presenta con esta geometría es que el acoplamiento ocurre de manera distribuida sobre toda la longitud de la fibra de la señal y se logra una distribución eficiente de la carga térmica, evitando puntos de sobrecalentamiento. Utilizando este tipo de acoplamiento de bombeo es posible construir una cavidad monolítica sin necesidad de utilizar componentes ópticos complejos y sin interrupción de la señal láser. A pesar de que múltiples fibras de bombeo son adheridas a la fibra de la señal, esta permanece con sus extremos libres y eso posibilita que se puedan incluir una rejilla de alta reflectividad y un acoplador de salida en cada uno de los extremos para formar un láser. Este esquema lateral se utiliza para realizar el bombeo en la configuración de la figura 2.2.

A pesar de que existen muchas técnicas para desarrollar bombeos laterales eficientes, en la actualidad la tecnología del láser de fibra es liderada por IPG Photonics Corporation. Esta compañía ha desarrollado innovadoras técnicas de bombeo de revestimiento y componentes de alto rendimiento, entre los que se pueden mencionar: diodos semiconductores, fibras especiales, componentes ópticos, láseres de fibra y amplificadores. Los diodos individuales de áreas grandes desarrollados por IPG para lograr bombeos de alta potencia, son mucho más potentes y confiables que las otras tecnologías de diodos que se pueden encontrar en el mercado y tienen una esperanza de vida de 10 años. Dentro de los láseres de fibra que desarrolla IPG están los: monomodo, multimodo, pulsados (nanosegundos) y en operación de onda continua(CW).

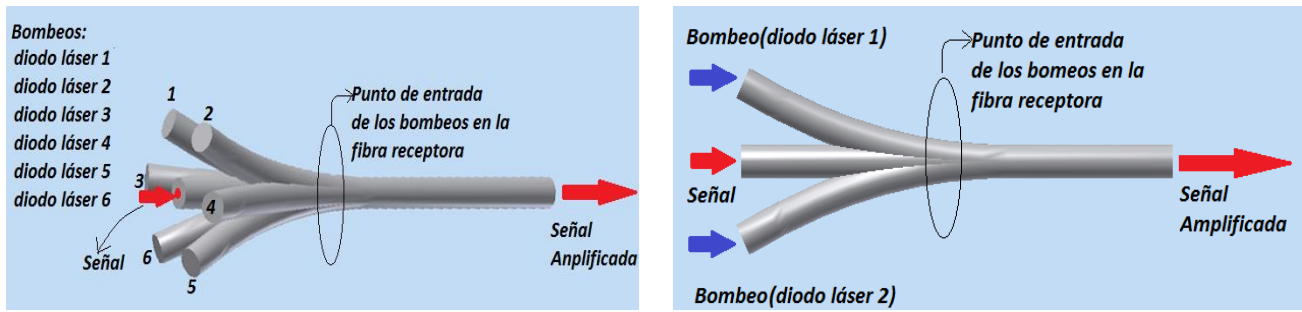
## **2.1 Diodos de Bombeo.**

### ***2.3.1 Los diodos láser y el escalado de potencia en láseres de fibra.***

En el capítulo anterior se mencionó que el exitoso escalado de potencia en los láseres de fibra de doble revestimiento depende de varios factores, donde el ion dopante es uno de ellos. Particularmente, el ion Iterbio ha demostrado ser la tierra rara más poderosa para el escalado de potencia debido a que tiene un defecto cuántico muy pequeño con bombeos de diodos láser en el rango de 910 nm a 980 nm, de modo que la carga térmica es muy baja y puede emplearse una alta concentración de dopante. Para las fibras de sílice dopadas con este ion es posible realizar bombeos con diferentes diodos láser, siendo los más comunes aquellos que emiten alrededor de 915 nm [19], 940 nm [20] y 976 nm [21]. En los bombeos, debe prestarse particular atención al daño de los diodos y no-linealidades de la fibra, pues son factores importantes que deben tenerse en cuenta.

En el caso de los láseres de fibra de Iterbio, el uso de un bombeo a 976 nm tiene muchas ventajas en lo que respecta a la eficiencia de absorción de la fibra activa. En este caso se requiere menos longitud de fibra para construir una cavidad, lo cual aumenta el umbral de los efectos no-lineales como el esparcimiento Raman, que puede limitar la potencia láser que es posible generar. Además, debido a que el pico de absorción en el Iterbio es muy estrecho, para una operación estable del láser de fibra, es necesario que la longitud de onda de emisión del diodo láser se mantenga fija alrededor de 976 nm, lo cual se logra con técnicas conocidas como “wavelength locking [21]” que en algunos casos pueden ser complejas y aumentan el costo de operación. Por otro lado, el bombeo con diodos láser a 915 nm es más conveniente, debido a que la banda de absorción del Iterbio alrededor de esta longitud de onda es más ancha, por lo cual es menos sensible a las variaciones en la longitud de onda de emisión del diodo láser, aunque la absorción es menor y por lo tanto se requiere una mayor longitud de fibra para construir la cavidad láser.

Los diodos láser de bombeo comerciales más utilizados en la actualidad generalmente entregan la luz de bombeo a través de una fibra óptica multimodal, por lo cual, para un buen diseño de acoplador lateral es necesario tomar en cuenta las características de la fibra de salida del diodo láser (pigtail) [2], en particular el diámetro del núcleo y la abertura numérica. Estos dos parámetros, junto con las características de la fibra láser receptora (diámetro del núcleo y abertura numérica) determinan cuantos diodos láser podemos combinar en un solo punto de acoplamiento.



**Figura 2.6** Esquema del bombeo lateral de revestimiento con a) dos diodos láser entregando luz de bombeo a través de fibras ópticas multimodo por un mismo punto en la fibra receptora y b) seis diodos láser entregando luz de bombeo a través de fibras ópticas multimodo por un mismo punto en la fibra receptora.

El número límite de fibras que pueden acoplarse lateralmente en un punto de la fibra receptora (Ver figura 2.6) para minimizar las pérdidas en el acoplador lateral está determinado por una condición conocida como Etendue (conservación del brillo) [22], la cual se muestra en la ecuación (2.1).

$$S_{\text{receptora}} (NA_{\text{receptora}})^2 \geq \sum S_{i,\text{salida}} (NA_{\text{salida}})^2 \quad (2.1)$$

donde la  $NA_{\text{receptora}}$ ,  $NA_{\text{salida}}$  son las aperturas numéricas de la fibra receptora y las fibras multimodo del bombeo.  $S_{\text{receptora}}$  es el área del núcleo de la fibra receptora y  $\sum S_{i,\text{salida}}$  es la suma de las áreas de las secciones transversales de las fibras del bombeo. Esta relación se emplea para un caso particular que se describe en el siguiente capítulo.

# Capítulo 3. Principios de operación

## Introducción

En este capítulo se presentan conceptos teóricos de acopladores laterales que son importantes para comprender la importancia de estos dispositivos en la obtención de láseres de fibra altamente eficientes. Se describen principios geométricos que deben tenerse en cuenta para el diseño del taper que se emplea en la fabricación de un acoplador lateral de bombeo. También se analiza la cantidad máxima de bombeos que puede emplearse en un acoplador lateral para minimizar las pérdidas mediante un caso de estudio. Finalmente se realiza la simulación de un acoplador lateral con el objetivo de comprender cómo ocurre el acoplamiento de los modos desde la fibra de bombeo hacia la fibra receptora.

## 3.1 Guías de Onda cilíndricas. Introducción a las Fibras ópticas.

Una guía de onda es un dispositivo diseñado para confinar la energía electromagnética en una pequeña región del espacio y guiarla a través de un canal de espacio muy reducido. La limitada región en la cual queda confinada la onda luminosa, es generalmente del orden de una longitud de onda y actualmente se conocen diferentes tipos guías de onda, aunque la más utilizada es la fibra óptica de índice escalonado [23].

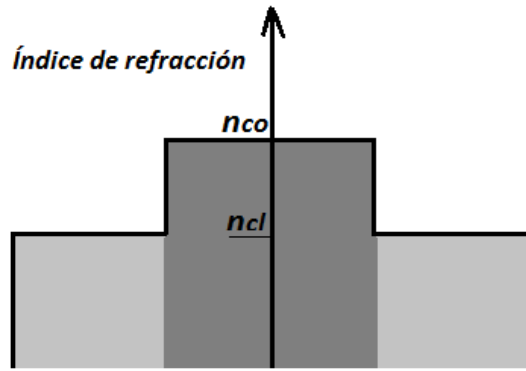
Las fibras ópticas estándares tienen un núcleo de vidrio con alta pureza que está rodeado por un revestimiento que también es de vidrio, pero con un índice de refracción ligeramente menor. Con el objetivo de proteger el núcleo y el revestimiento contra daño físico, humedad y contaminación, se inserta una o varias capas de polímero alrededor del revestimiento. No obstante, la cubierta de polímero (generalmente de índice de refracción mayor al del recubrimiento) no tiene efectos considerables en las propiedades ópticas de la fibra. Por lo general, cuando se analizan las características de transmisión de la fibra, se tiene en cuenta: el tamaño, la forma, el perfil del índice del núcleo y el índice del revestimiento [24]. Un parámetro muy importante de las fibras ópticas es el cono de aceptación o apertura numérica,  $NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}$ , donde  $n_{co}$  es el índice del núcleo y  $n_{cl}$  es el índice del recubrimiento. La NA determina la cantidad máxima de luz que puede recibir la fibra óptica y propagarse por el núcleo. Otro parámetro determinante en la fibra, es la frecuencia normalizada  $V$ , pues permite identificar el régimen modal de operación. Este parámetro está definido como:  $V = akNA$ , donde  $a$  es el radio de la fibra,  $NA$  es la apertura numérica,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el número de onda y depende de la longitud de onda  $\lambda$  [23]. Si se cumple que:  $V < 2.405$ , la fibra óptica opera en régimen monomodo y si  $V > 2.405$ , entonces opera en régimen multimodo [25]. La diferencia de índices que existe entre el núcleo y el revestimiento es también otro de los parámetros relevantes de la fibra y se define como:  $\Delta = \frac{(n_{co} - n_{cl})}{n_{co}}$  [23].

## 3.2 Fibra Óptica con Índice de Refracción Escalonado.

### 3.2.1 Perfil del índice de refracción.

Las fibras ópticas pueden ser clasificadas de acuerdo al perfil transversal del índice de refracción. En la figura 3.1 se muestra el perfil del índice de refracción en una fibra de índice escalonado, que es uno de los más utilizados. El índice de refracción del núcleo se mantiene

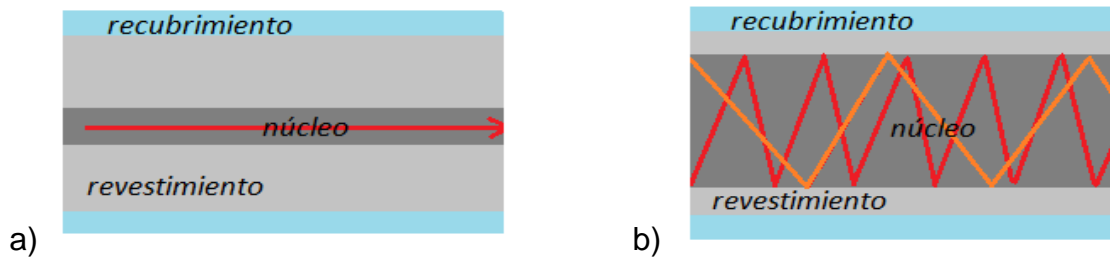
constante a lo largo de toda la fibra y el índice de refracción del revestimiento también tiene ese comportamiento.



**Figura 3.1** Perfil del índice de refracción en una fibra de índice escalonado.

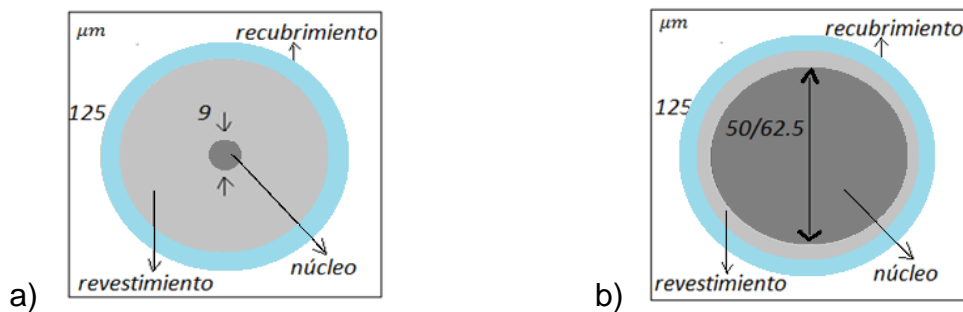
### 3.2.2 Régimen modal. Clasificación.

En la sección 3.1 se mencionó que las fibras ópticas pueden operar en régimen monomodo o multimodo. A continuación en la figura 3.2 a) se muestra una fibra “step index” que opera en régimen monomodo y tanto el núcleo como el revestimiento son circulares. Mientras que la figura 3.2 b) corresponde una fibra “step index” multimodo con núcleo y revestimiento circulares.



**Figura 3.2** a) fibra óptica monomodo y b) fibra óptica multimodo.

En la figura 3.2 a) se observa que solamente un modo se propaga por el núcleo de la fibra monomodo, mientras que en la figura 3.2 b) se muestran múltiples modos propagándose por el núcleo de la fibra multimodo, que tiene mayor diámetro.



**Figura 3.3** a) dimensiones de la fibra óptica monomodo y b) dimensiones de la fibra óptica multimodo.



En la figura 3.3 a) se muestra la sección transversal correspondiente al caso a) de la figura 3.2, mientras que la figura 3.3 b) corresponde a la sección transversal de la figura 3.2 b).

Cuando se analiza el régimen modal en que opera una fibra óptica, se debe conocer primeramente que un modo se refiere a una distribución específica del campo eléctrico transversal, que es una solución permitida de las ecuaciones de Maxwell. Esta distribución permanecerá estacionaria mientras no se den interacciones adicionales (por ejemplo, acoplamiento de modos). La cantidad de modos de propagación soportados en la fibra va a depender del radio del núcleo, los índices de refracción del núcleo y el revestimiento y la longitud de onda de la luz que se propaga dentro de la fibra. Cada modo que se propaga dentro de la fibra tiene un índice de refracción propio que se conoce como índice efectivo de la guía de onda  $N = \frac{\beta}{k}$  [25], donde  $\beta$  es la constante de propagación del modo particular.

En el caso de las fibras monomodales, típicamente el perfil del modo fundamental es un haz aproximadamente Gaussiano. Tienen un diámetro de núcleo muy reducido en comparación con el diámetro del revestimiento. Se caracterizan por una alta capacidad de transmisión de información, que viaja en un solo modo y así se reduce considerablemente la *distorsión de los pulsos de información* (ocurre cuando partes del pulso viajan en diferentes modos con velocidades distintas y cuando esto sucede los pulsos se ensanchan y llega el momento en que se superponen). Debido a que la fibra monomodo no presenta ese problema, entonces puede mantener la forma de cada pulso de luz sobre distancias mucho más largas que las fibra multimodales. Además tienen una baja atenuación en comparación con las fibras multimodales, por lo que se puede transmitir más información por unidad de tiempo [26].

En el caso de las fibras multimodales generalmente el núcleo tiene un radio mayor a 50  $\mu\text{m}$  y/o una mayor diferencia entre el valor del índice del núcleo y revestimiento, de manera que aceptan múltiples modos de propagación con distribuciones de intensidades diferentes. Para una mayor diferencia entre los valores de índice del núcleo y revestimiento, el perfil espacial de la luz emergente del núcleo de la fibra dependerá de las condiciones de acoplamiento haz-fibra, lo cual determina la distribución de energía entre los modos espaciales [26].

### **3.2.3 Los Campos Electromagnéticos.**

Para analizar la propagación de onda en las fibras ópticas se debe comenzar con las ecuaciones de Maxwell armónicas en el tiempo ( $e^{+j\omega t}$ ), que están dadas por [23]:

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, \omega) = j\omega \mathbf{D}(\mathbf{r}, \omega) \quad (3.2)$$

y para un modo de propagación, todas las componentes de campo varían de acuerdo con  $(e^{-j\beta z})$ . Por lo tanto, se tiene que[23]:

$$\mathbf{E}(r, \phi, z) = [\mathbf{e}_t(r, \phi) + \hat{\mathbf{z}}e_z(r, \phi)]e^{-j\beta z} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{H}(r, \phi, z) = [\mathbf{h}_t(r, \phi) + \hat{\mathbf{z}}h_z(r, \phi)]e^{-j\beta z} \quad (3.4)$$

Tanto la sección transversal de la fibra como el perfil del índice son independientes de  $z$  y por lo tanto todas las componentes transversales del campo pueden ser expresadas en términos de las componentes longitudinales.

En la sección 3.2.2 se introdujo el término de índice efectivo de la guía( $M$ ) que a continuación se emplea en la definición del índice de guía generalizado  $b$ [24]. Por otro lado, se define la frecuencia generalizada  $V$  en términos de los índices de refracción del núcleo y el revestimiento[25]. Las ecuaciones (3.5) y (3.6) muestran estas dos definiciones.

$$b = \frac{N^2 - n_{cl}^2}{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (3.5)$$

$$V = ka\sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (3.6)$$

En términos de  $V$  y  $b$  para la región del núcleo se tiene que [25]:

$$k^2 n_{co}^2 - \beta^2 = \frac{V^2}{a^2} (1 - b) \quad (3.7)$$

y para la región del revestimiento[25]:

$$\beta^2 - k^2 n_{cl}^2 = \frac{V^2}{a^2} b \quad (3.8)$$

La solución general para las componentes:  $e_z(r, \phi)$ ,  $h_z(r, \phi)$ ,  $e_\phi(r, \phi)$ ,  $h_\phi(r, \phi)$  está dada por [24]:

$$e_z(r, \phi) = \begin{cases} A_l J_l \left( V \sqrt{1 - b} \frac{r}{a} \right) \cos l\phi & 0 \leq r \leq a \\ C_l K_l \left( V \sqrt{b} \frac{r}{a} \right) \cos l\phi & r \geq a \end{cases} \quad (3.9)$$

$$h_z(r, \phi) = \begin{cases} B_l J_l \left( V \sqrt{1 - b} \frac{r}{a} \right) \sin l\phi & 0 \leq r \leq a \\ D_l K_l \left( V \sqrt{b} \frac{r}{a} \right) \sin l\phi & r \geq a \end{cases} \quad (3.10)$$

$$e_{\phi}(r, \phi) = \begin{cases} \frac{jka}{V^2(1-b)} \left[ A_l \frac{a n_l}{r} J_l \left( V \sqrt{1-b} \frac{r}{a} \right) \right. \\ \quad \left. + B_l \eta_0 V \sqrt{1-b} J'_l \left( V \sqrt{1-b} \frac{r}{a} \right) \right] \sin l\phi & 0 \leq r \leq a \\ -\frac{jka}{V^2 b} \left[ C_l \frac{a n_l}{r} K_l \left( V \sqrt{b} \frac{r}{a} \right) \right. \\ \quad \left. + D_l \eta_0 V \sqrt{b} K'_l \left( V \sqrt{b} \frac{r}{a} \right) \right] \sin l\phi & r \geq a \end{cases} \quad (3.11)$$

$$h_{\phi}(r, \phi) = \begin{cases} \frac{-jka}{V^2(1-b)} \left[ A_l \frac{n_{co}^2}{\eta_0} V \sqrt{1-b} J'_l \left( V \sqrt{1-b} \frac{r}{a} \right) \right. \\ \quad \left. + B_l \frac{l n_a}{r} J_l \left( V \sqrt{1-b} \frac{r}{a} \right) \right] \cos l\phi & 0 \leq r \leq a \\ \frac{jka}{V^2 b} \left[ C_l \frac{n_{cl}^2}{\eta_0} V \sqrt{b} K'_l \left( V \sqrt{b} \frac{r}{a} \right) \right. \\ \quad \left. + D_l \frac{l n_a}{r} K_l \left( V \sqrt{b} \frac{r}{a} \right) \right] \cos l\phi & r \geq a \end{cases} \quad (3.12)$$

Las componentes  $e_r(r, \phi)$  y  $h_r(r, \phi)$ , se omiten debido a que únicamente las componentes dadas por las ecuaciones (3.9-3.12) son relevantes en la frontera núcleo-revestimiento. Al aplicar las condiciones en la frontera se obtiene la ecuación característica, a partir de la cual se calculan las constantes de propagación de los modos que soporta la fibra óptica [24]:

$$\left[ \frac{1}{V \sqrt{1-b}} \frac{J'_l(V \sqrt{1-b})}{J_l(V \sqrt{1-b})} + \frac{(1-\Delta)^2 K'_l(V \sqrt{b})}{V \sqrt{b} K_l(V \sqrt{b})} \right] \times \left[ \frac{1}{V \sqrt{1-b}} \frac{J'_l(V \sqrt{1-b})}{J_l(V \sqrt{1-b})} + \frac{1}{V \sqrt{b}} \frac{K'_l(V \sqrt{b})}{K_l(V \sqrt{b})} \right] = l^2 \frac{b+(1-\Delta)^2(1-b)}{[V^2 b(1-b)]^2} \quad (3.13)$$

Para una fibra dada operando a cierta longitud de onda, se conocen,  $V$  y  $\Delta$ ;  $l$  es un entero. Con estos parámetros  $b$  puede resolverse numéricamente.

### 3.2.4 Designación Modal y Campos.

En las fibras ópticas, los modos de propagación se clasifican como sigue[25]:

1) Modos  $TE$ (transversal eléctrico) y  $TM$ (transversal magnético): Rotacionalmente simétricos y no dependen de  $\phi$ .

2) Modos híbridos: Son dependientes de  $\phi$ ,  $e_z(r, \phi)$  y  $h_z(r, \phi)$ , son diferentes de cero y además se dividen en los siguientes grupos:

- ✓ Modo  $HE$ : Si  $e_z(r, \phi)$  y  $h_z(r, \phi)$  tienen la misma polaridad ( $P = +1$ )
- ✓ Modo  $EH$ : Si  $e_z(r, \phi)$  y  $h_z(r, \phi)$  tienen diferente polaridad ( $P = -1$ )

Para describir las distribuciones de campo se emplean los subíndices: “l”(número modal azimutal), el cual se relaciona a la variación angular del campo y “m”(número modal radial) que describe la variación del campo en la dirección radial. Si  $l = 0$ , entonces  $e_z(r, \phi)$  y  $h_z(r, \phi)$  son independientes de  $\phi$ . En cambio, si  $l \neq 0$ ,  $e_z(r, \phi)$  y  $h_z(r, \phi)$  varían como  $\cos l\phi$  y  $\sin l\phi$  respectivamente (o a la inversa). Particularmente cuando  $l \neq 0$ , no hay modos  $TE_{lm}$  o  $TM_{lm}$  [23].

Por otro lado, se tiene que:  $|e_z(r, \phi)|$  y  $|h_z(r, \phi)|$  tienen  $m$  máximos cada uno en la dirección radial, incluyendo el pico, si existe, en el origen[24]. En resumen, se puede decir que los modos guiados de una fibra óptica de índice escalonado(step-index) son:  $TE_{0m}$ ,  $TM_{0m}$ ,  $HE_{lm}$  y  $EH_{lm}$ . Los modos  $TE_{0m}$  y  $TM_{0m}$  son modos no degenerados independientes de  $\phi$ , mientras que los modos  $HE_{lm}$  y  $EH_{lm}$  son doblemente degenerados [24]. Utilizando la ecuación característica se generó la gráfica mostrada en la siguiente figura.

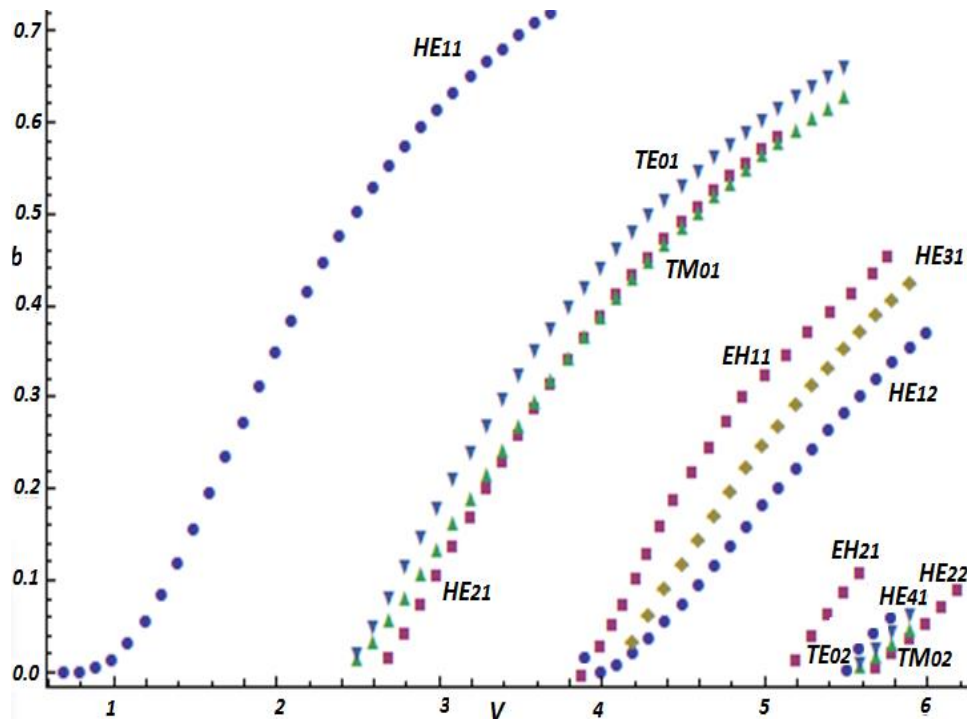


Figura 3.4 Gráfica de dispersión  $b$  vs  $V$  para una fibra de índice escalonado.

En la figura 3.4 se muestra la gráfica de la constante de propagación normalizada  $b$  en función del parámetro  $V$ . Se puede observar que para  $V < 2.4048$ , la fibra soporta un solo modo, el denominado modo fundamental  $HE_{11}$ .

Previamente, en la sección 3.1 se mencionó que un parámetro importante de la fibra óptica es su diferencia de índices( $\Delta$ ). Cuando  $\Delta \rightarrow 0$ , entonces se emplea la aproximación de guiado débil, conocida por sus siglas en inglés como *Weakly Guiding Aproximation*. En este caso, los campos guiados son aproximadamente polarizados linealmente en la región del núcleo y para referirse a los

modos linealmente polarizados, se emplea la notación de modos  $LP$ . Para una fibra con  $\Delta$  pequeña, el campo transversal en la región del núcleo y el recubrimiento tiene una polarización que es aproximadamente lineal, mientras que en fibras con  $\Delta$  grande, el campo es linealmente polarizado en la región del núcleo, pero fuera de la región del núcleo no lo es. En la gráfica de la figura 3.5 se muestra que para valores de  $\Delta$  pequeños, los modos  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  y  $HE_{21}$  son indistinguibles individualmente y que juntos forman el modo  $LP_{11}$  [25].

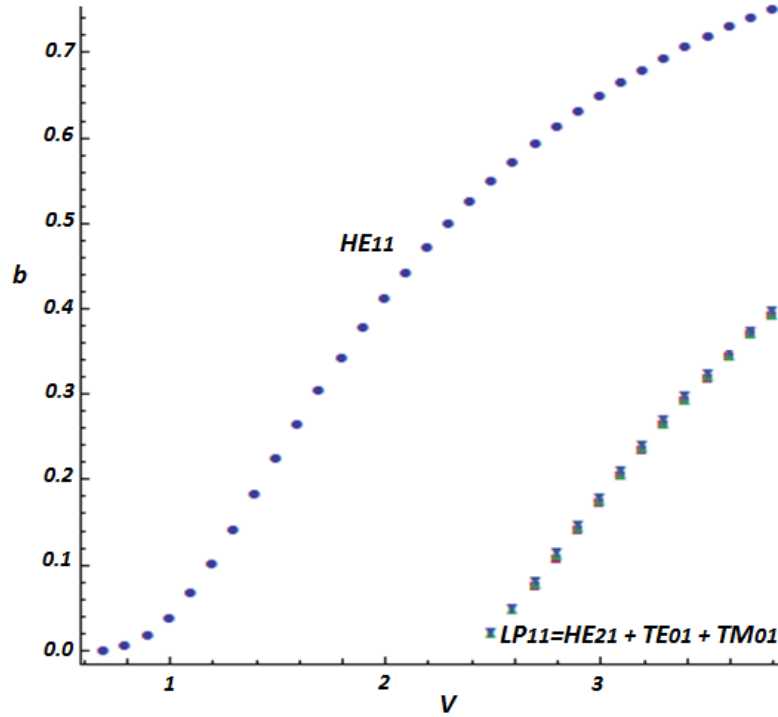


Figura 3.5 Modos linealmente polarizados en la fibra step-index.

En el caso de guiado débil resulta fácil deducir las siguientes relaciones [24]:

$$\mathbf{e}_t(r, \phi) = \hat{\mathbf{x}} \begin{cases} E_l \frac{J_l(V\sqrt{1-b^2}/a)}{J_l(V\sqrt{1-b})} \cos l\phi & 0 \leq r \leq a \\ E_l \frac{K_l(V\sqrt{b^2}/a)}{K_l(V\sqrt{b})} \cos l\phi & r \geq a \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{h}_t(r, \phi) = \hat{\mathbf{y}} \frac{\beta}{\omega\mu_0} \begin{cases} E_l \frac{J_l(V\sqrt{1-b^2}/a)}{J_l(V\sqrt{1-b})} \cos l\phi & 0 \leq r \leq a \\ E_l \frac{K_l(V\sqrt{b^2}/a)}{K_l(V\sqrt{b})} \cos l\phi & r \geq a \end{cases} \quad (3.15)$$

y la "Ecuación Característica" es[23]:

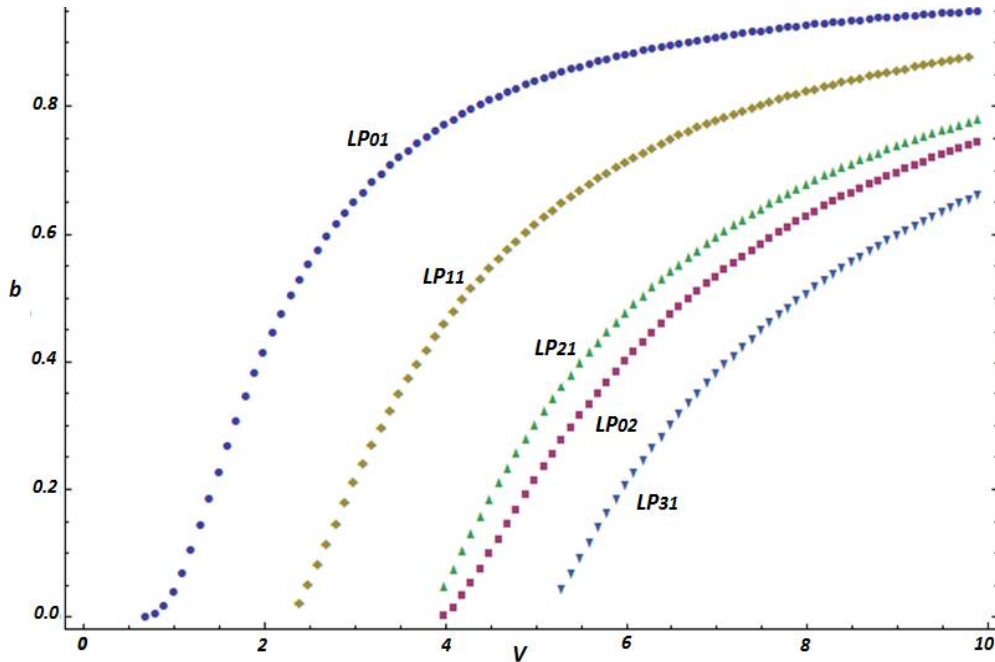
$$V\sqrt{1-b} \frac{J_{l-1}(V\sqrt{1-b})}{J_l(V\sqrt{1-b})} + V\sqrt{b} \frac{K_{l-1}(V\sqrt{b})}{K_l(V\sqrt{b})} = 0 \quad (3.16)$$

O equivalentemente:

$$V\sqrt{1-b} \frac{J_{l+1}(V\sqrt{1-b})}{J_l(V\sqrt{1-b})} - V\sqrt{b} \frac{K_{l+1}(V\sqrt{b})}{K_l(V\sqrt{b})} = 0 \quad (3.17)$$

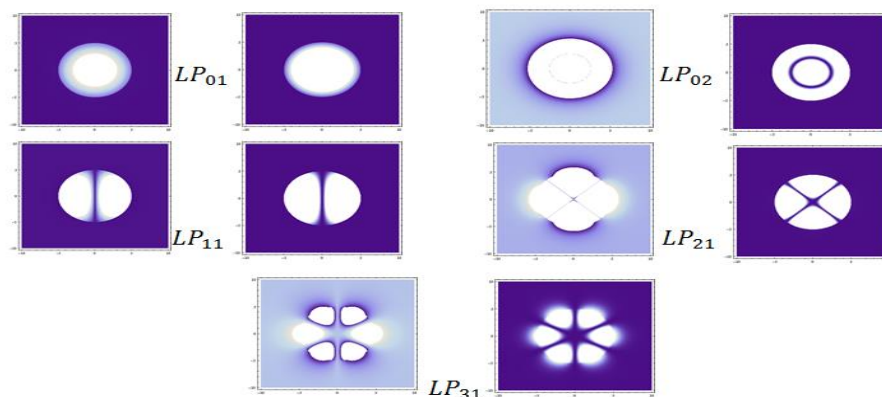
Cada solución de (3.16) o (3.17) corresponde a un modo linealmente polarizado (Modos  $LP_{lm}$ ). Si el número modal azimutal  $l = 0$ , entonces el campo eléctrico transversal es independiente de  $\phi$ .

Por otro lado, el número modal radial corresponde a la  $m$ -ésima raíz de (3.16) o (3.17) para  $V$  y  $l$  dados. Se toma la solución con el valor de  $b$  más grande como la primera solución y se hace  $m = 1$  [24].



**Figura 3.6** Gráfica  $b$  contra  $V$ . Modos:  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  y  $LP_{31}$ .

En la gráfica de la figura 3.6 se muestra el comportamiento del índice de guía generalizado  $b$  al variar la frecuencia generalizada  $V$  para los modos:  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  y  $LP_{31}$ . En este caso el mayor valor de  $b$  corresponde al modo  $LP_{01}$ , por lo que le corresponde  $m = 1$ . Así, cada uno de los restantes modos se asociará a un valor de  $m$  dependiendo del valor de  $b$ . Los perfiles de intensidad para algunos de los modos  $LP$  se muestran en la figura 3.7.

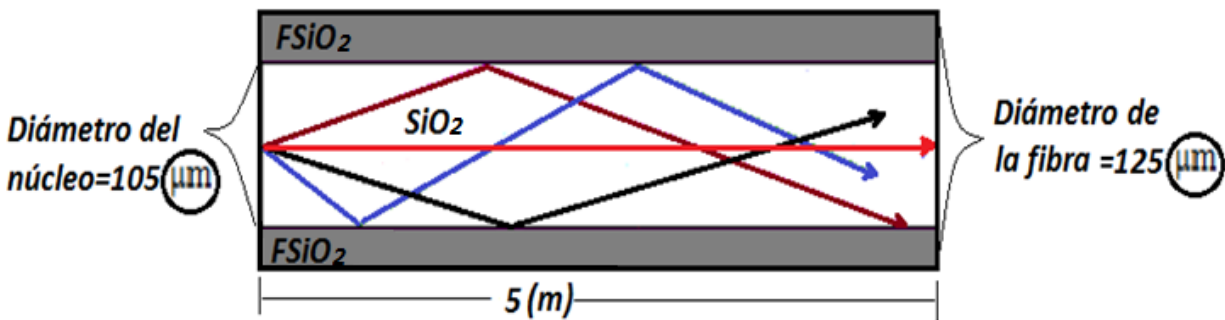


**Figura 3.7** Perfil de intensidad de los modos:  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  y  $LP_{31}$ .

### 3.3 Fibras Multimodo.

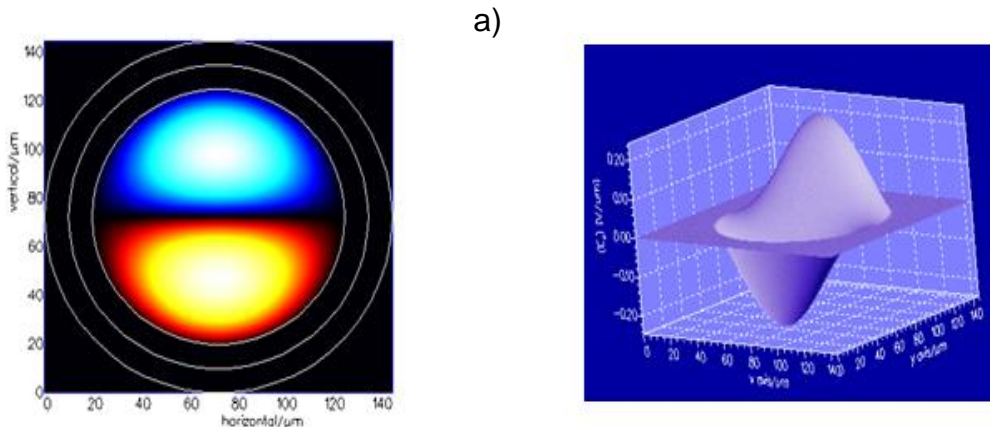
#### 3.3.1 Patrón de Intensidad de los Modos. Simulación en Photodesing.

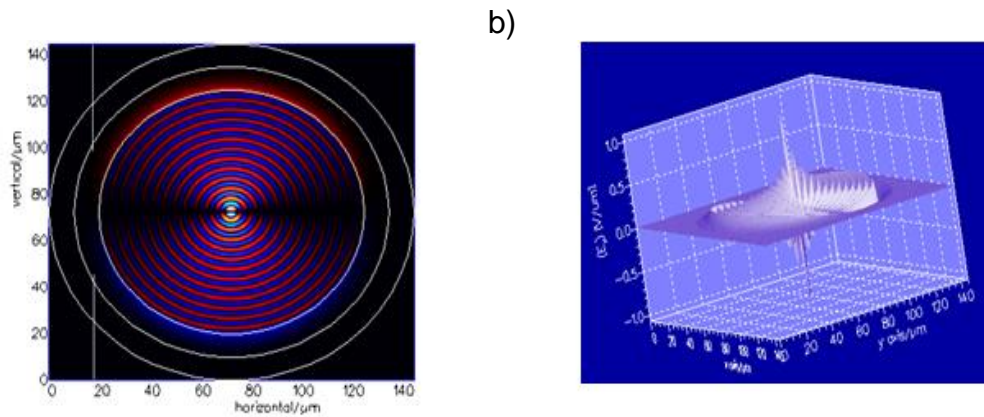
En la sección 3.2 se explicó que las fibras (step-index) presentan un núcleo con índice de refracción constante y además existe una discontinuidad en la frontera entre el núcleo y el revestimiento. La luz se propaga mayormente por el núcleo de la fibra, aunque algunos modos llegan a viajar por el revestimiento y otros se fugan. En la siguiente figura se muestra el esquema de una fibra multimodo con núcleo de sílice puro ( $\text{SiO}_2$ ), revestimiento dopado con fluorine y  $\text{NA} = 0.22$ . Debido al dopaje de fluorine, entonces el revestimiento tiene menor índice de refracción que el núcleo. Empleando la herramienta PhotoDesign, se simuló el comportamiento de varios modos de propagación soportados por esta fibra.



**Figura 3.8** Fibra multimodo (105/125  $\mu\text{m}$ ) de 5 m de longitud con núcleo de sílice puro y revestimiento dopado con fluorine.

Se determinó que el índice de refracción del material  $\text{SiO}_2$  a  $\lambda = 915 \text{ nm}$  es 1.4515 y el índice de refracción del revestimiento es aproximadamente 1.4347307. El número de modos que soporta la fibra multimodo es aproximadamente:  $M = \frac{V^2}{2}$ , y esto se traduce en un total de 3145 modos a 915 nm para la fibra multimodo (105/125  $\mu\text{m}$ ) con  $\text{NA} = 0.22$ . Algunos de los modos de propagación que soporta esta fibra se muestran en la figura 3.9.

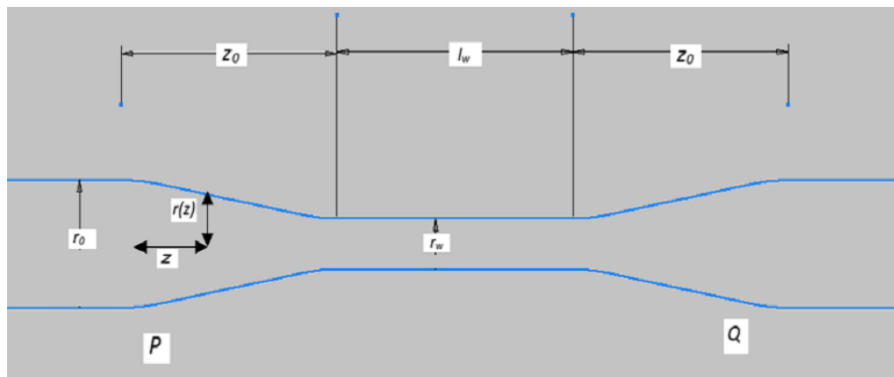




**Figura 3.9** Perfil de intensidad de a) el modo 1 y b) modo 25. En ambos casos a la izquierda se muestra una gráfica 2D y a la derecha una gráfica 3D.

### 3.2.2 El Taper Multimodo.

En el capítulo 1 se hizo referencia a los acopladores laterales empleados en bombes de revestimiento de láseres de fibra. La fabricación de estos dispositivos implica el estrechamiento o la fabricación de un taper sobre la fibra multimodo de bombeo. En principio, es posible conseguir fibras estrechadas de variada configuración y las magnitudes que definen al taper son: el diámetro de su cintura (región más estrecha), la longitud del estrechamiento y el perfil de la región de transición (ver figura 3.10). En la zona estrechada donde ese campo va a estar en contacto con el medio exterior (el núcleo se debe reducir a un diámetro prácticamente despreciable) y como consecuencia el campo es guiado por el revestimiento. Este efecto es extremadamente importante para que la luz proveniente de las fibras de bombeo se acople eficazmente a la fibra de la señal.



**Figura 3.10** Estructura de un taper con sus parámetros descritos.

En la figura 3.10, el radio de la fibra sin adelgazar es  $r_0$ , y la cintura uniforme del taper es de longitud  $l_w$  y radio  $r_w$ . Cada zona de transición tiene una longitud  $z_0$  y el perfil es descrito por la función radial decreciente  $r(z)$ , donde  $z$  es la coordenada longitudinal. En la figura se puede observar que el origen de  $z$  al inicio de la zona de transición izquierda está representado por  $P$ , de manera que



$r(0) = r_0$  y  $r(z_0) = r_w$ . El taper decae linealmente en la zona de transición, conservando un radio de cintura uniforme[27]. El perfil de la zona de transición del taper debe ser suficientemente gradual para satisfacer el criterio de adiabaticidad, con el cuál se garantiza básicamente que las pérdidas de potencia óptica ocasionadas por los cambios en el perfil de la fibra sean despreciables.

Empleando la herramienta PhotoDesign se realizó la simulación de un taper multimodo simétrico para una fibra con las características de la figura 3.8. Debe mencionarse que durante el desarrollo experimental de los acopladores laterales se desarrollaron tapers utilizando la fibra descrita en la figura 3.8 pero con diferentes perfiles.

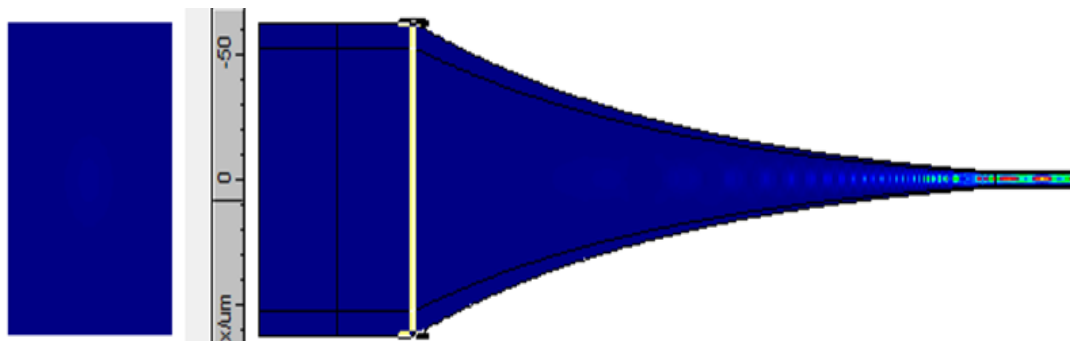
El perfil del taper simulado se diseñó de la siguiente manera:

- Longitud de la zona de transición: 20 mm
- Longitud de la zona de la cintura: 10 mm
- Diámetro de la cintura: 10  $\mu\text{m}$

Por conveniencia, para el posterior análisis del acoplador lateral(Ver sección 3.4), se consideró que la fibra no tenía revestimiento, solamente un núcleo de 105  $\mu\text{m}$ . En la práctica la remoción del recubrimiento de la fibra de bombeo se realiza mediante la exposición controlada en ácido fluorhídrico.

Cabe mencionar que en realidad el cálculo de los modos en la fibra *MM* individual no tiene mucha utilidad para el modelado del acoplador lateral. Esto se debe al hecho de que cuando se realiza la fusión de la fibra de bombeo multimodo con la fibra receptora, estas en conjunto constituyen una estructura guía de ondas, con sus propios modos de propagación.

El perfil del taper se muestra en la figura 3.11.

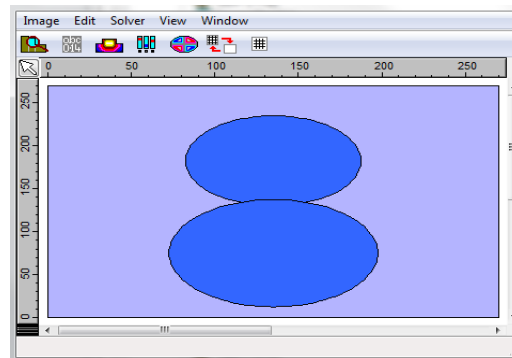


**Figura 3.11** Geometría del taper de la fibra MM sin revestimiento.

## 3.4 Teoría de Acopladores Multimodo.

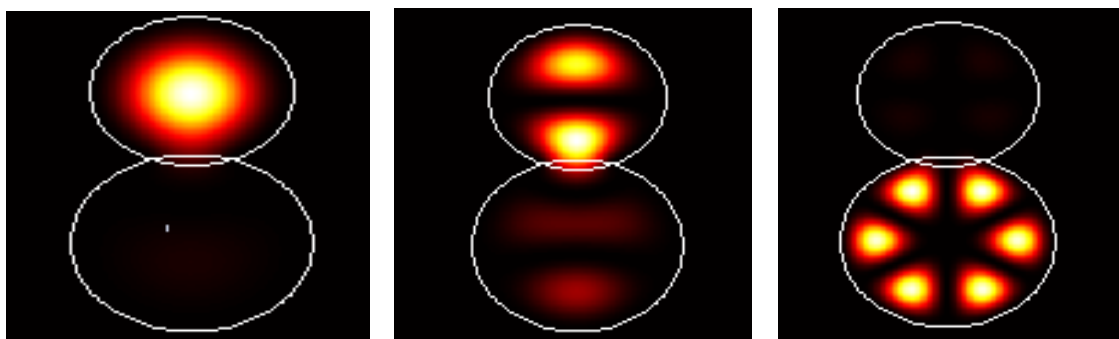
### 3.4.1 Simulación del Acoplador Lateral.

Con el objetivo de ilustrar gráficamente el principio de un acoplador lateral, a continuación se realiza el análisis de una simulación realizada en la herramienta PhotoDesign.



**Figura 3.12** Sección transversal del acoplador lateral al inicio de la zona de fusión.

La figura 3.12 muestra dos fibras *MM* en contacto, donde cada una soporta modos específicos. La fibra ubicada en la parte superior se emplea como fibra de bombeo, mientras que la otra fibra ejerce como receptora. La fibra de bombeo tiene un diámetro de  $105 \mu m$ , mientras que la otra tiene un diámetro de  $125 \mu m$ . Ambas fibras tienen igual índice de refracción y están inmersas en aire. Dado que las dos fibras están en contacto (fusionadas lateralmente), entonces determinan una estructura de guía de onda que tiene sus propios modos permitidos (modos de la guía compuesta). En la figura 3.13 se muestran algunos modos de la guía compuesta mostrada en la figura 3.12.



**Figura 3.13** Modos de la guía compuesta.

En el acoplador lateral, la fibra de bombeo varía su diámetro a lo largo de la zona de acoplamiento y por tal razón, los modos de la guía compuesta también varían. A continuación se muestra el acoplamiento del modo 1 lanzado desde la fibra de bombeo.

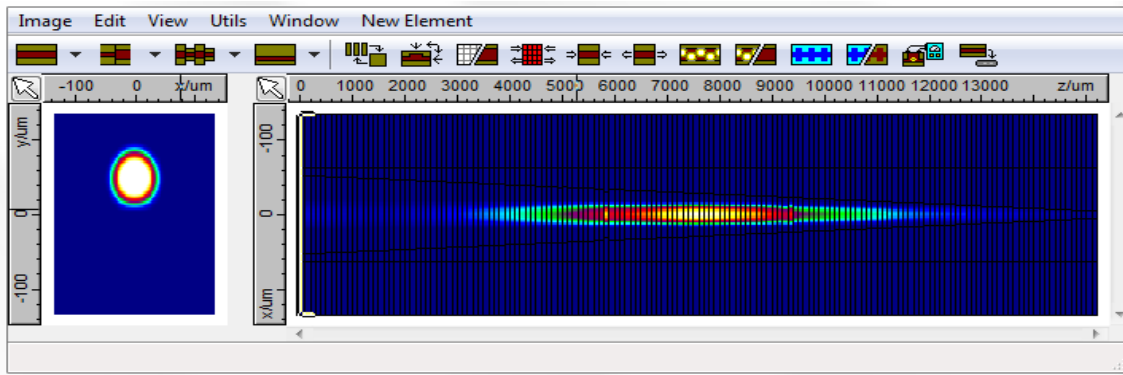


Figura 3.14 Modo 1 lanzado desde la fibra de bombeo.

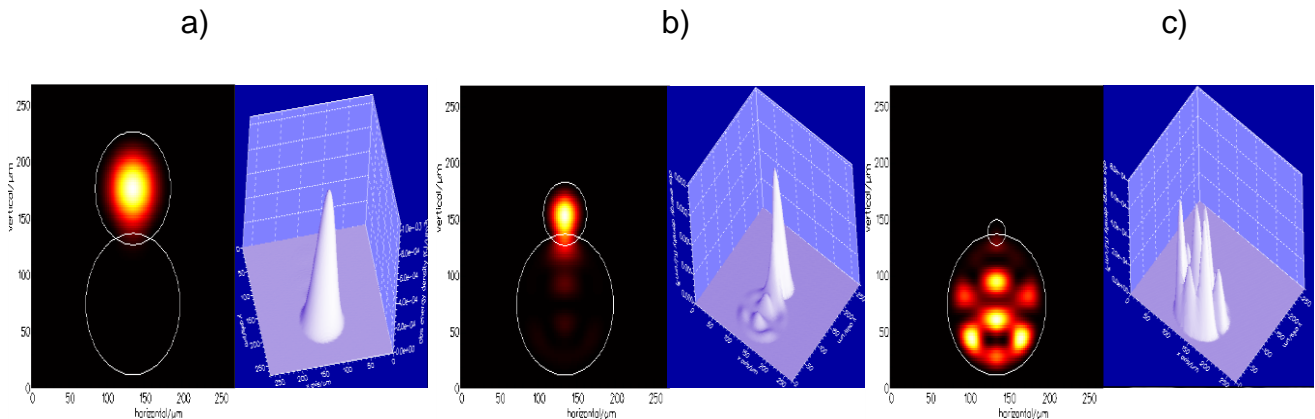


Figura 3.15 Acoplamiento del modo 1 a) en 1mm, b) en 7.5mm y c) 15mm(punto donde se alcanza el acoplamiento total). En los tres casos se tienen gráficas 2D y 3D respectivamente.

En la figura 3.15 se muestra cómo ocurre el acoplamiento de intensidad desde la fibra de bombeo hacia la fibra receptora cuando se lanza el modo 1. Para lograr que toda la intensidad de este modo lanzado se acople eficazmente a la fibra receptora, es necesaria una longitud de 15 cm. Con el objetivo de comparar la rapidez del acoplamiento de este modo con respecto a un modo de orden superior, a continuación se analiza lo que ocurre en el acoplador lateral cuando se lanza el modo 5.

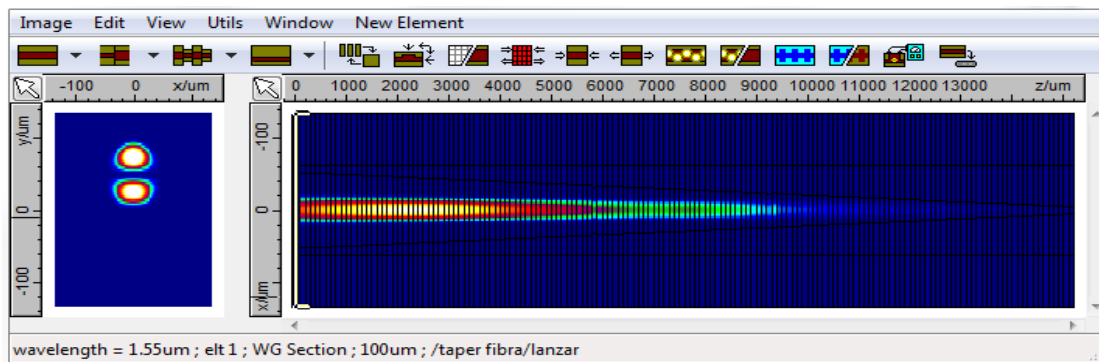
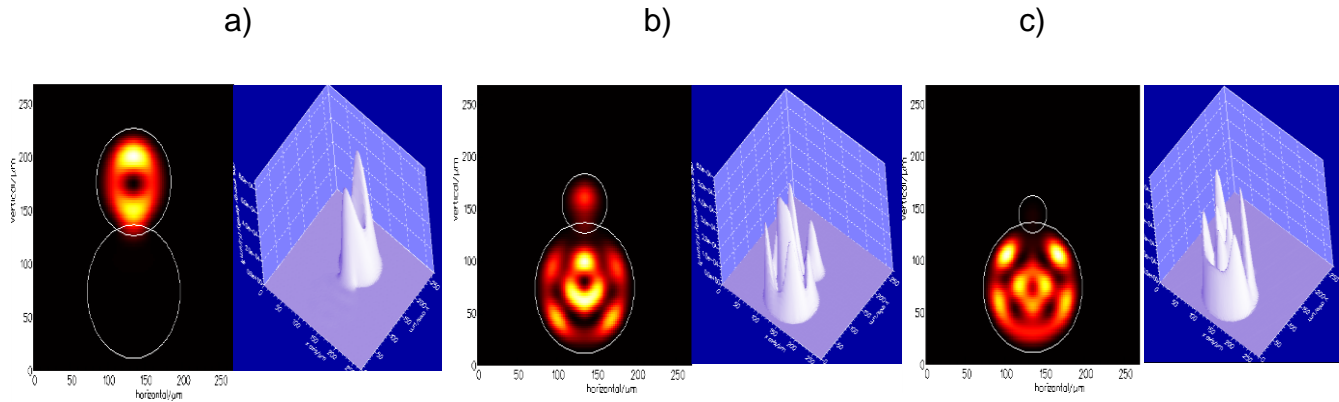


Figura 3.16 Modo 5 lanzado desde la fibra de bombeo.

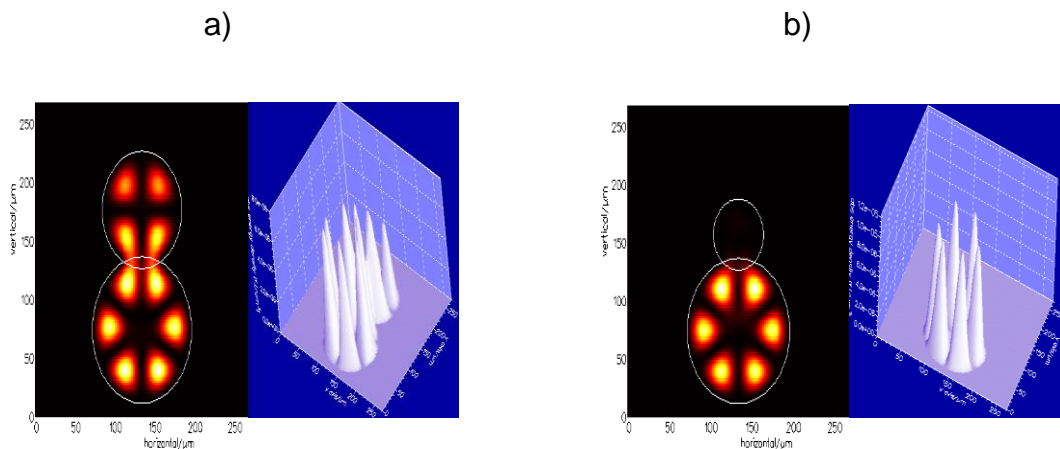
De manera similar al caso anterior, se analizó también para este modo, el acoplamiento en diferentes puntos.



**Figura 3.17** Acoplamiento del modo 5 a) en 1mm, b) en 7.5mm y c) 11mm(punto donde se alcanza el acoplamiento total). En los tres casos se tienen gráficas 2D y 3D respectivamente.

Se puede constatar que el modo 5 se acopla más rápido desde la fibra de bombeo hacia la fibra receptora que el modo 1, pues en este caso, con solamente 11mm de longitud, toda la intensidad se transfiere a la fibra receptora. Esto corrobora el hecho bien conocido de que los órdenes modales más altos se acoplan más fácilmente hacia la fibra receptora.

Empleando un modo con un orden considerablemente mayor al modo 5, se puede una vez más comprobar que ciertamente a medida que el modo tiene mayor orden, más rápido será su acoplamiento y por lo tanto requerirá una longitud de acoplamiento menor.



**Figura 3.18** Acoplamiento del modo 5 a) en 1mm, b) en 7.5mm (punto donde se alcanza el acoplamiento total). En los tres casos se tienen gráficas 2D y 3D respectivamente.

En la figura 3.18 se muestra lo que sucede cuando se lanza el modo 20 desde la fibra de bombeo. En este caso se alcanzó el acoplamiento total en 7.5 mm o sea en la mitad de la longitud necesaria para el modo 1. Por lo tanto, una vez más se demuestra que los modos de mayor orden se

acoplan más rápidamente y debe prestarse especial atención a los modos de menor orden debido que su acoplamiento es más complejo porque necesitan mayor longitud de acoplamiento.

### **3.4.2 Consideraciones Geométricas sobre Acopladores Laterales.**

#### **3.4.2.1 Cantidad Máxima de Bombeos.**

En esta sección se considera un de acoplador lateral donde se emplea fibra multimodo  $MM(105/125, NA\ 0.22)$  para el bombeo y fibra  $DC(10/125, NA\ 0.46)$  como receptora. Inicialmente se utiliza la condición que determina la cantidad máxima de bombeos, o fibras que se pueden combinar en un mismo punto sobre la fibra receptora. Esta condición está dada por la ecuación 2.1 del capítulo 2.

$$S_{receptora}(NA_{receptora})^2 \geq \sum S_{i,salida} (NA_{salida})^2$$

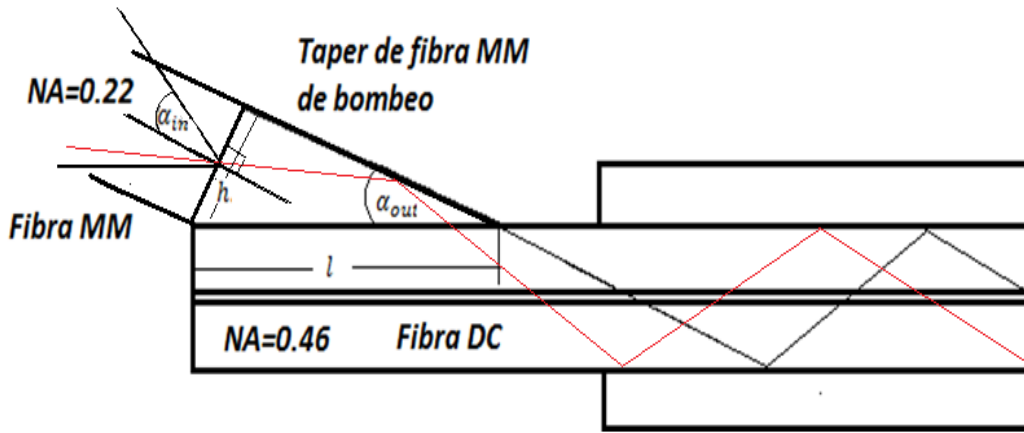
$$\pi(62.5)^2 (0.46)^2 \geq \sum_n \pi(52.2)^2 [0.22]^2$$

donde  $S_{receptora}$  denota el área del primer revestimiento de la  $DC$ ,  $NA_{receptora}$  es la apertura numérica de esa fibra,  $S_{i,salida}$  es el área de cada fibra  $MM$  y  $NA_{salida}$  es la apertura numérica correspondiente. Para un acoplador lateral con estas características se pudo concluir que la cantidad de bombeos máxima de bombeos posibles es  $n=6$ , pues para un valor superior no se satisface la condición debido a que la fibra receptora ya no sería capaz de aceptar todo el bombeo.

#### **3.4.2.2 Ángulo Máximo de Acoplamiento. Diseño del Taper de Bombeo.**

Mediante el análisis de un bombeo  $MM$  individual se puede conocer la cintura óptima del taper que se debe emplear, así como la longitud de transición de este para que la luz se logre acoplar eficientemente hacia la fibra receptora. Se debe decir que esta información es determinante para el diseño de un taper que posibilite minimizar las pérdidas en el acoplador lateral.

En la figura 3.20 se muestra la geometría que describe como la luz de bombeo que se propaga por el taper ingresa a la fibra receptora.



**Figura 3.20** Geometría del acoplamiento de luz desde el taper MM hacia la fibra receptora.

La razón óptima entre el área de la sección transversal de la fibra *MM* sin estrechar y la mínima sección transversal estrechada debe estar en el rango de 0.01 a 0.7 y en nuestro análisis empleamos el valor mínimo del rango[28]. En nuestro caso tenemos que el área de la fibra *MM* sin estrechar es:

$$A_{MM} = \pi \cdot \left(\frac{105}{2}\right)^2$$

y el área de la cintura del taper es:

$$A_{MM_{taper}} = \pi \cdot \left(\frac{105}{2}\right)^2 \cdot (0.01)$$

por lo tanto, el diámetro de la cintura del taper es aproximadamente  $10.5 \mu m$ .

La *NA* de la fibra *MM* de bombeo está definida como:

$$NA = \text{sen } \alpha_{in},$$

Entonces, se puede conocer el ángulo de aceptación  $\alpha_{in}$  de esta fibra *MM*.

$$0.22 = \text{sen } \alpha_{in}$$

$$\alpha_{in} = 0.221814 \text{ rad}$$

Empleando este ángulo y las áreas de la fibra *MM* sin estrechar y la fibra *DC*, es posible conocer el ángulo máximo  $\alpha_{out}$  con el que la luz se puede acoplar desde la fibra de bombeo hacia la fibra receptora. La relación que permite determinar este ángulo está dada por la siguiente ecuación[28]:

$$\alpha_{out} = \alpha_{in} \left( \frac{A_{DC} + A_{MM}}{A_{DC}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

donde  $A_{DC}$  y  $A_{MM}$  denotan las áreas de las fibras receptora y bombeo respectivamente. Sustituyendo en la ecuación los valores de  $A_{DC}$ ,  $A_{MM}$  y  $\alpha_{in}$  se tiene que,

$$\alpha_{out} = 0.221814 \text{ rad} \left[ \frac{\pi(62.5)^2 + \pi(52.5)^2}{\pi(62.5)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{out} = 0.3 \text{ rad}$$

Conociendo el ángulo  $\alpha_{out}$ , se puede conocer la longitud de transición mínima que puede tener el taper para minimizar las pérdidas. En la figura 3.20 esta longitud mínima está dada por  $l$  y para un taper con menor longitud se tendrían pérdidas debido a que el ángulo con que ingresa la luz desde el taper hacia la fibra *DC* supera el ángulo  $\alpha_{out}$ . Mediante un análisis trigonométrico simple se obtiene el valor de  $l$ :

$$\tan \alpha_{out} = \frac{h}{l}$$

$$l = \frac{h}{\tan \alpha_{out}} = \frac{105 \mu m}{\tan(0.3)}$$

$$l \approx 339 \mu m$$

Un taper con menor longitud de transición no es eficiente, y se debe mencionar además que un taper que supere esa longitud, pero que se considere aún muy corto, va a permitir que solo una parte de la luz se logre acoplar a la fibra *DC*. Si se aumenta considerablemente la longitud de transición del taper manteniendo el diámetro de su cintura, entonces se incrementa la cantidad de rebotes de los rayos de luz de bombeo en la superficie lateral de la región del taper que está unida a la fibra receptora.

Durante el desarrollo experimental de los acopladores laterales que se fabricaron en esta tesis, se empleó una longitud mínima de acoplamiento muy superior al valor teórico obtenido. Esto se debe a que experimentalmente resulta muy complicado realizar el enrollado del taper sobre la fibra *DC* cuando la longitud de este es muy corta. Por esa razón, se empleó una longitud mínima de la zona de acoplamiento de 20 mm en la fabricación de nuestros dispositivos.

Se debe mencionar que en el año 2012[29], Thomas Theeg y colegas demostraron experimentalmente que manteniendo el diámetro de la cintura del taper e incrementando su longitud de transición se puede lograr un acoplamiento superior. Los mismos autores analizaron que para radios de taper aún más pequeños, la eficiencia de acoplamiento incrementa con la *NA* de la fibra de bombeo y demostraron que para fibras de bombeo con *NA* que estén en el rango de 0.15 a 0.30 no se tiene diferencias muy significativas en el acoplador si la longitud del taper es suficientemente larga.

# Capítulo 4. Metodología para la Fabricación del Acoplador Lateral

## Introducción

En este capítulo se presenta la metodología diseñada para la fabricación del acoplador lateral. Se describen de manera individual cada una de las etapas de fabricación del dispositivo. Además durante la descripción de estas etapas se mencionan algunos aspectos que deben tenerse en cuenta para la posterior optimización del acoplador. Finalmente se describe el proceso de medición de las características del acoplador fabricado.



## 4.1 Diseño del Acoplador Lateral.

Con el objetivo de corroborar el análisis realizado en el capítulo 3, en la fabricación del acoplador experimental se empleó la fibra *MM*(105/125, NA 0.22) para el bombeo y la fibra *DC*(10/125, NA 0.46) como receptora. Para conocer la dependencia que tiene la eficiencia del acoplador con la longitud de la zona de fusión entre el taper de bombeo y la fibra receptora, se determinó emplear diferentes longitudes para poder establecer una comparación. Estas longitudes se escogieron como se muestra en la tabla 1.

No. Acoplador	Longitud de la zona de fusión ( <i>DC</i> y <i>MM</i> unidas y fusionadas lateralmente)
1	3 cm
2	4 cm
3	5 cm

**Tabla 1.** Longitud de acoplamiento de cada acoplador medido.

Las longitudes propuestas en la tabla 1 para la interacción entre la fibra receptora y el taper de bombeo implican que este último debe ser suficientemente largo. En la sección 3.4.2.2 se analizó teóricamente la mejor forma de diseñar el taper de bombeo a partir de conocer el ángulo máximo de acoplamiento ( $\alpha_{out} = 0.3$ ) entre la fibra *MM*(105/125, NA 0.22) y la fibra *DC*(10/125, NA 0.46). En ese análisis se conoció que para este ángulo  $\alpha_{out} = 0.3$  se requiere una longitud de acoplamiento mayor a  $339 \mu m$ , pues esta es la mínima longitud para la cual se tiene acoplamiento desde la fibra *MM* hacia la fibra *DC*. Sin embargo, como se mencionó en el capítulo anterior, esta longitud de acoplamiento es muy corta y dificulta en gran medida el enrollado del taper sobre la fibra *DC* cuando se está fabricando el acoplador lateral. Por tal razón, se empleó una longitud mínima de 20 mm, la cual permitió realizar eficazmente el enrollado del taper *MM* sobre la fibra *DC*.

Del capítulo anterior se conoció que la cintura del taper óptimo es de aproximadamente 10  $\mu m$ , entonces se diseñaron los tapers con ese diámetro de cintura pero con diferentes longitudes de transición no menores de 20mm. Por otro lado, a la fibra *DC* se le retiró químicamente el segundo revestimiento sobre una longitud que coincidía con la longitud del taper en cada caso. En la tabla 2 se muestra cómo quedaron diseñados finalmente los tres acopladores.

No. Acoplador	Longitud de la zona de fusión	Taper <i>MM</i> Diseñado	
		Transición	Cintura
1	3 cm=30 mm	20 mm	10 mm

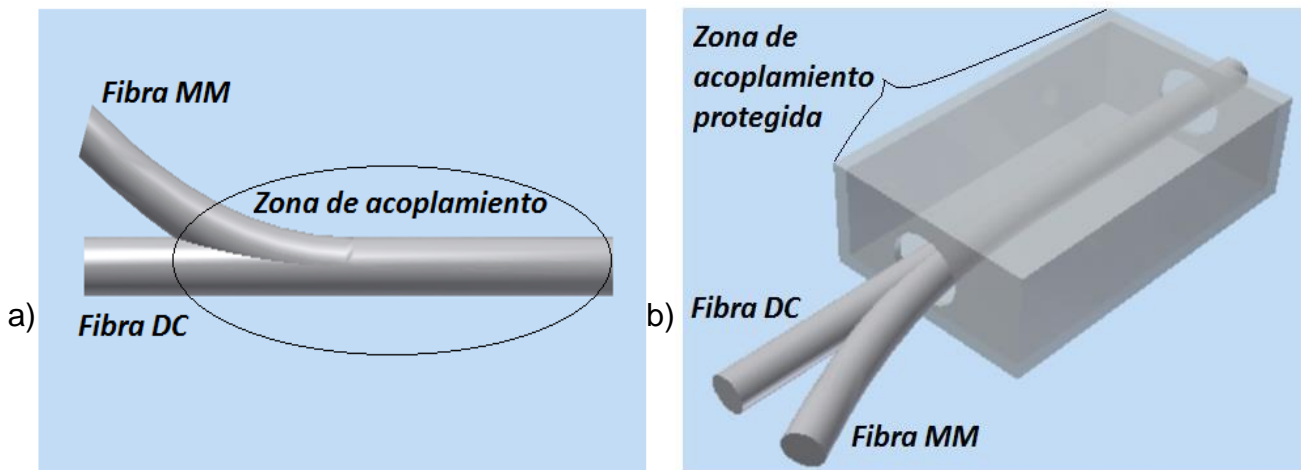
2	4 cm=40 mm	30 mm	10 mm
3	5 cm=50 mm	40 mm	10 mm

**Tabla 2.** Diseño de cada acoplador experimental.

En la tabla 2 se muestra el perfil del taper de bombeo en cada caso. Se debe decir que la geometría general de cada caso se puede comprender a partir del análisis de la figura 3.20 del capítulo 3.

En los tres casos, el taper diseñado y la fibra DC fueron enrollados y posteriormente fusionados. Una etapa crítica en el desarrollo experimental de los acopladores fue el proceso empaquetado, donde se protege totalmente el dispositivo. Debe mencionarse que durante esta etapa se dañaron varios acopladores fabricados con altas eficiencias, debido a que aún no se ha identificado la forma óptima de protegerlos. El principal problema se presenta a la hora de sellar los orificios de la caja protectora sin que se afecte el acoplador.

En la figura 4.1 se muestra el diseño de un acoplador lateral antes y después del empaquetado.

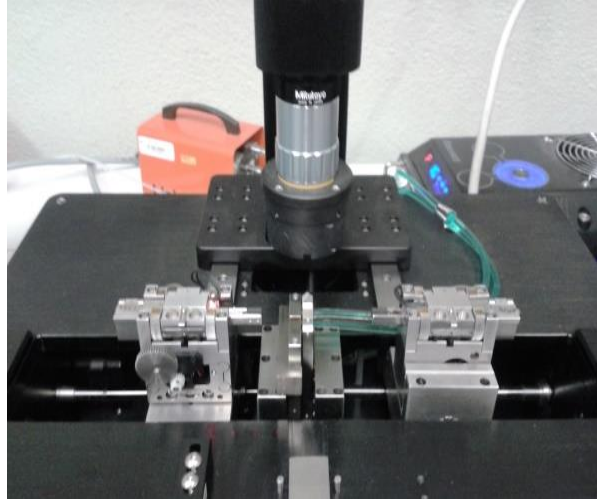


**Figura 4.1** a) Acoplador lateral sin empaquetar y b) Acoplador lateral empaquetado.

## 4.2 Fabricación del Taper de Bombeo.

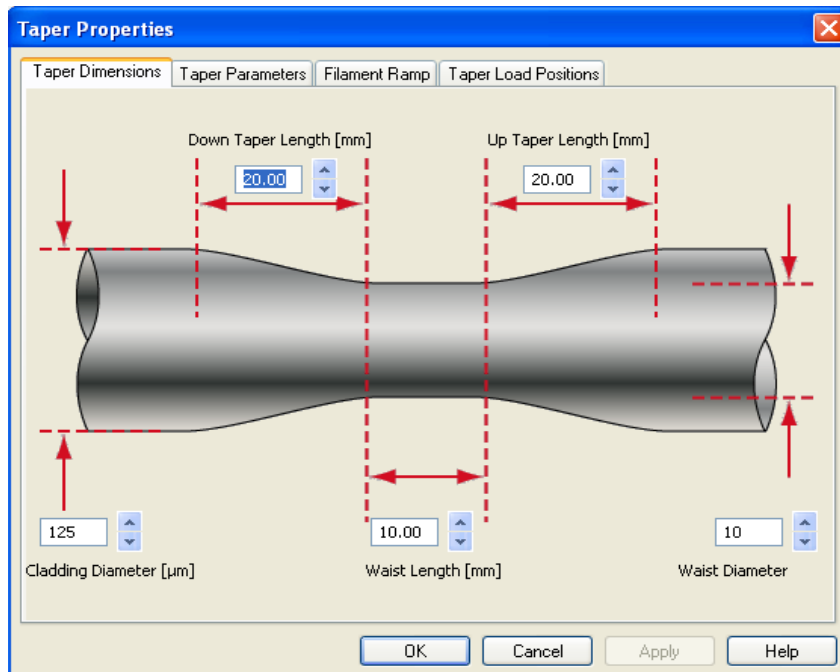
Para la fabricación de los tapers se empleó la procesadora Vytran serie 3000 que se muestra en la figura 4.2. Los holders (sostenedores) que se muestran en ambos lados permiten asegurar la fibra para el proceso de adelgazamiento mediante calentamiento. Antes de comenzar la fabricación del

taper se requiere normalizar la Vytran, debido a que la potencia de normalización del equipo debe tenerse en cuenta para la fabricación del taper.



**Figura 4.2** Procesadora Vytran serie 3000.

En la siguiente figura se muestra el software “FFS3” que se empleó para diseñar el taper que luego se fabricó en la procesadora Vytran.



**Figura 4.3** Programa FFS3 para diseñar el taper.

Los parámetros de fabricación de cada uno de los taper son los mostrados en la tabla 3, 4 y 5.

Parámetro	Valor
Initial clad diameter	125 $\mu$ m
Taper down transition	20 mm
Taper Waist	10 $\mu$ m

Taper length	10 mm
Taper Up transition	20 mm

**Tabla 3.** Parámetros de fabricación del taper fabricado para el “acoplador 1”.

Parámetro	Valor
Initial clad diameter	125 $\mu$ m
Taper down transition	30 mm
Taper Waist	10 $\mu$ m
Taper length	10 mm
Taper Up transition	30 mm

**Tabla 4.** Parámetros de fabricación del taper fabricado para el “acoplador 2”.

Parámetro	Valor
Initial clad diameter	125 $\mu$ m
Taper down transition	40 mm
Taper Waist	10 $\mu$ m
Taper length	10 mm
Taper Up transition	40 mm

**Tabla 5.** Parámetros de fabricación del taper fabricado para el “acoplador 3”.

De las tablas 3, 4 y 5 se puede constatar que los taper son simétricos, sin embargo la longitud de la zona de transición más la longitud de la cintura suman exactamente la longitud de acoplamiento para cada acoplador diseñado. El diseño de un taper simétrico permitió un exitoso enrollado del taper sobre la fibra *DC*. No obstante, la fusión se realizó exactamente sobre la zona de acoplamiento delimitada por la primera zona de transición del taper más la longitud de su cintura, lo cual coincidió con la longitud de la sección de la fibra *DC* a la cual se le retiró el segundo revestimiento.

### 4.3 Preparación de la fibra DC

A partir de las longitudes propuestas en la tabla 1, a la fibra *DC* se le removió su segundo revestimiento sobre la longitud correspondiente en cada caso empleando tetrahidrofurano (Ver figura 4.4). Se tomó una fibra *DC* con una longitud de 50 cm de largo, se sumergió la longitud propuesta en cada caso dentro del químico y se dejó pocos minutos en una sala aislada debido a que este químico es tóxico. Posterior a esto, se limpió con acetona y se ubicó en la procesadora Vytran asegurando que quedara bien sujeta por los dos holders. Este procedimiento se repitió con mucha precaución en los tres acopladores fabricados en el laboratorio.



**Figura 4.4** Tetrahidrofurano utilizado para remover el segundo revestimiento en la fibra DC.

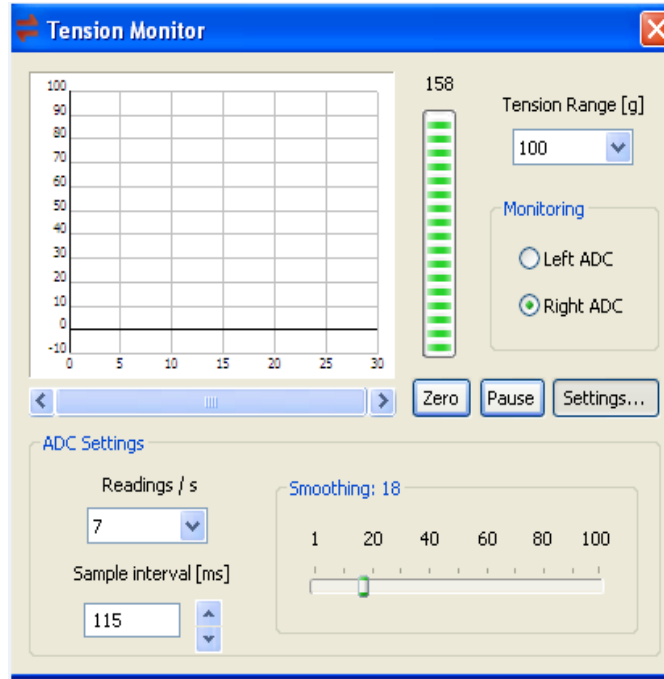
## **4.4 Diseño del Proceso de Enrollado y Fusión.**

Esta etapa del desarrollo experimental del acoplador es muy compleja debido a que la manipulación durante el enrollado del taper sobre la fibra *DC* es totalmente manual. Debe señalarse que para lograr un enrollado exitoso fue necesario un entrenamiento prolongado de varios meses. Esto se debe a que cuando se curva el taper con un diámetro de cintura muy pequeño alrededor de la fibra *DC* existe una alta probabilidad de que este se rompa en la cintura. Por lo tanto, durante este complejo enrollado debe tenerse cierta habilidad para que el taper no se rompa en la cintura.

Para realizar el enrollado, una vez que la fibra *DC* ya está ubicada en la procesadora Vytran debe liberarse con mucha precaución uno de sus extremos y seguidamente el taper fabricado se enrolla con al menos dos vueltas alrededor de la región de la fibra *DC* que no tiene el segundo revestimiento. Luego se aseguran ambas fibras unidas en el holder y se procede exactamente de la misma manera en el otro extremo, asegurando así que el taper quede totalmente enrollado sobre la fibra *DC*. Para determinar la forma de mantener las fibras enrolladas bien unidas en todo el largo de interacción se probó con varios “V-grooves” hasta que se optó por usar el 250-250 $\mu$ m en ambos lados del filamento.

Después del proceso de enrollado, se procede con la fusión sobre la zona de acoplamiento donde ya se encuentran totalmente unidos el taper y la fibra *DC*. Durante este proceso se siguen los pasos siguientes.

- 1)** Se controla la tensión de ambas fibras para que no se separen durante el calentamiento. Para esto se emplea el programa FFS3 (Ver figura 4.5).



**Figura 4.5** Programa para controlar la tensión durante la fusión.

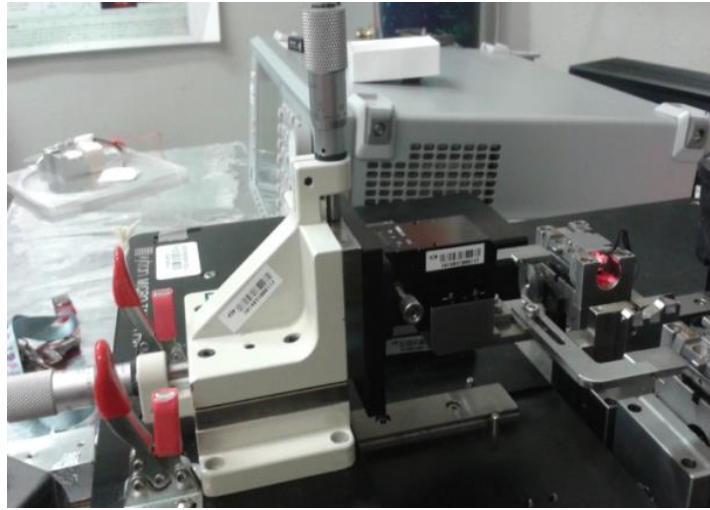
2) Se identifican los valores de los parámetros que permita que se fusionen las fibras correctamente. Mediante prueba y error, empleando filamentos (calentamiento) de diferentes dimensiones, se encontró que el que lleva a resultados más estables y repetibles es el filamento V4 y los parámetros para fusionar el acoplador lateral son los siguientes:

- ❖ Taper settings (Normalization power: 60W):
- ❖ Taper Pull velocity: 0.1mm/s
- ❖ Taper pull delay: 0s
- ❖ Filament start: 80W a 83W
- ❖ Filament delta:-25% a -30%

## 4.5 Proceso de Empaquetado.

La protección del acoplador es una etapa muy importante en el desarrollo experimental, debido a que la integridad de este dispositivo depende en gran medida de que este proceso se realice con éxito. Debido a que la manipulación manual de un acoplador fabricado en el laboratorio resulta extremadamente compleja, se decidió emplear un mecanismo que posibilita manipular el acoplador de forma controlada y precisa.

En la figura 4.6 se muestra este mecanismo.



**Figura 4.6** Mecanismo para la manipulación del acoplador fabricado.

Debe mencionarse que antes de tener este mecanismo, manipular el acoplador resultaba extremadamente difícil y se perdieron varios acopladores durante el empaquetado debido a que se partían muy fácilmente.

Una vez que el acoplador se asegura dentro de la caja protectora cuyo diseño se muestra en la figura 4.1 b), entonces se deben sellar los dos orificios. Precisamente en este último paso del empaquetado se presenta el inconveniente de que el pegamento empleado, en ocasiones llegó a dañar el acoplador y por esa razón se perdieron acopladores con altas eficiencias. Actualmente queda pendiente identificar otra vía que no suponga ningún riesgo para la integridad del acoplador.

## **4.6 Medición del Acoplador Lateral.**

Antes de realizar las mediciones de los tres acopladores fabricados, se midió primeramente el diodo láser. Para realizar esta medición se empleó una fuente de corriente eléctrica y un medidor de potencia. En la figura 4.7 se muestran los equipos e instrumentos utilizados para la medición del diodo.



a)



b)



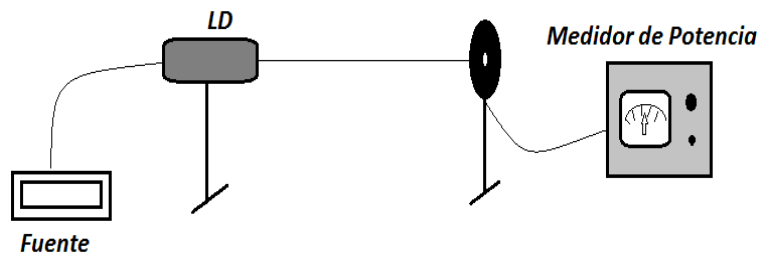
c)



d)

**Figura 4.7** Los elementos utilizados en la medición del diodo láser fueron: a) Fuente de corriente eléctrica, b) diodo láser, c) Medidor de potencia y c) Pinzas.

Para la realizar la medición se utilizó el arreglo de la figura 4.8, donde se muestra que la fibra del diodo se ubicó frente al medidor de potencia y además en su extremo se realizó un corte que se limpió adecuadamente con acetona para no tener alteraciones en las mediciones por suciedad.

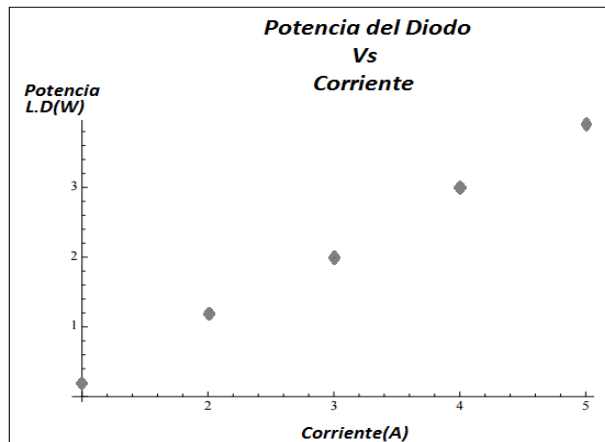


**Figura 4.8** Arreglo para la medición de potencia de salida del diodo contra corriente.

Los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla 6.

Corriente(A)	Potencia Medida(W)
1	0.2
2	1.2
3	2
4	3
5	3.9

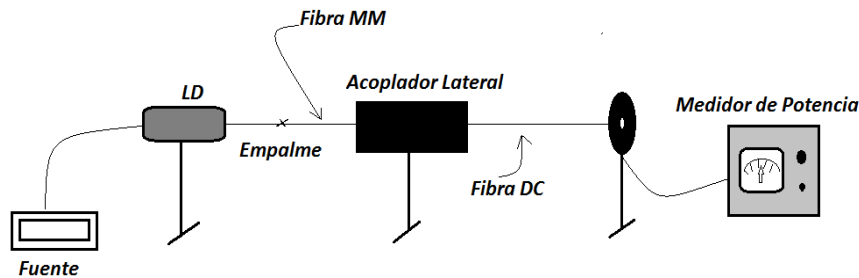
**Tabla 6.** Potencia del diodo láser.



**Figura 4.9** Potencia de salida del diodo Vs Corriente.



En la figura 4.9 se muestra que la potencia de salida del diodo al variar la corriente se comporta de forma cuasi-lineal. Después de conocer el comportamiento del diodo, se empleó el arreglo de la figura 4.10 para realizar la medición de la potencia acoplada en cada dispositivo desarrollado en el laboratorio contra la potencia de bombeo lanzada desde el diodo láser.



**Figura 4.10** Arreglo para la medición de la potencia acoplada en cada dispositivo.

Como se muestra en la figura, primeramente se empalmó la fibra *MM* del acoplador fabricado a la fibra del diodo láser empleando la procesadora Vytran. Luego se ubicó la fibra *DC* frente al medidor de potencia. A esta última se le realizó un corte en su extremo y se limpió adecuadamente con el objetivo de no afectar la medición por suciedad. Se encendió la fuente conectada al diodo láser y se realizaron las mediciones individuales de potencia de salida contra potencia de entrada del diodo láser. Este arreglo se utilizó de igual manera para medir los tres acopladores desarrollados con diferentes longitudes de acoplamiento (longitudes de fusión).

# Capítulo 5. Resultados y Discusión.

## Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con los tres acopladores laterales fabricados con diferentes longitudes de acoplamiento. A partir de los resultados se analiza la influencia de la longitud de acoplamiento en la eficiencia del dispositivo. Finalmente se discuten los resultados y se mencionan algunos aspectos que deben tenerse en cuenta para optimizar la eficiencia del acoplador.

## 5.1 Potencia Acoplada contra Longitud de Acoplamiento.

Los resultados de las mediciones de cada uno de los acopladores empleando el arreglo de la figura 4.10 del capítulo 4 se muestran en las tabla 7, 8 y 9.

Potencia LD(W)	Potencia Salida(W)
0.2	0.04
1.2	1.02
2	1.61
3	2.1
3.9	2.73

**Tabla 7.** Potencia de salida en el acoplador con longitud de fusión de 3 cm.

Potencia LD(W)	Potencia Salida(W)
0.2	0.08
1.2	1.1
2	1.69
3	2.43
3.9	3.32

**Tabla 8.** Potencia de salida en el acoplador con longitud de fusión de 4 cm.

Potencia LD(W)	Potencia Salida(W)
0.2	0.16
1.2	1.15
2	1.83
3	2.76
3.9	3.6

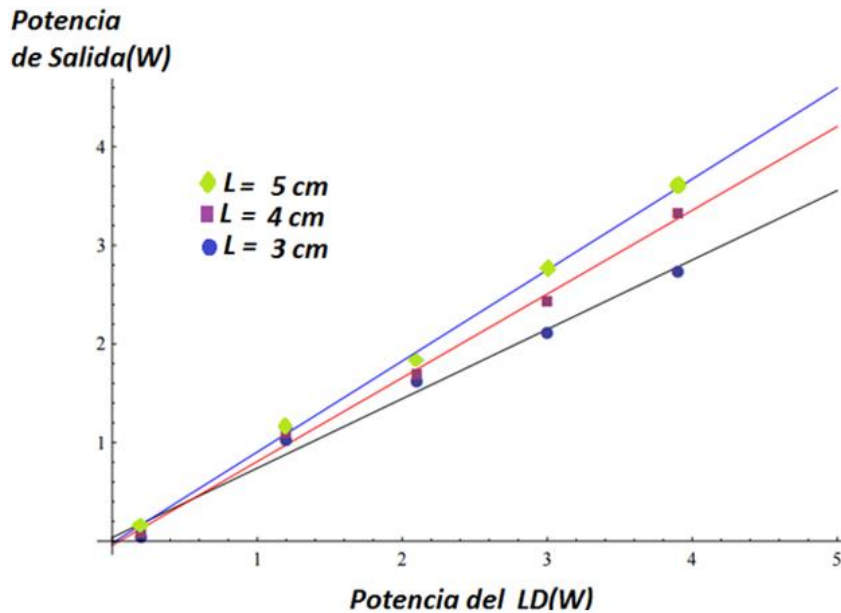
**Tabla 9.** Potencia de salida en el acoplador con longitud de fusión de 5 cm.

En la figura 5.1 se muestran los comportamientos de los tres acopladores laterales con diferentes longitudes de acoplamiento. Mediante el análisis de la gráfica de esta figura se puede comprender cómo se comporta cada acoplador cuando se inserta el mismo bombeo. Las líneas continuas delgadas son los ajustes realizados en cada caso empleando el método de mínimos cuadrados. La línea azul es el ajuste para el acoplador de 5 cm, la línea roja pertenece al acoplador de 4 cm y la línea negra corresponde al acoplador de 3 cm. Estos ajustes están dados por:

$$\text{Azul} = -0.0196032 + 0.922886 x$$

$$\text{Rojo} = -0.0429192 + 0.84948 x$$

$$\text{Negro} = -0.0360416 + 0.703826 x$$



**Figura 5.1** Potencias Acopladas contra potencia del diodo láser para cada dispositivo.

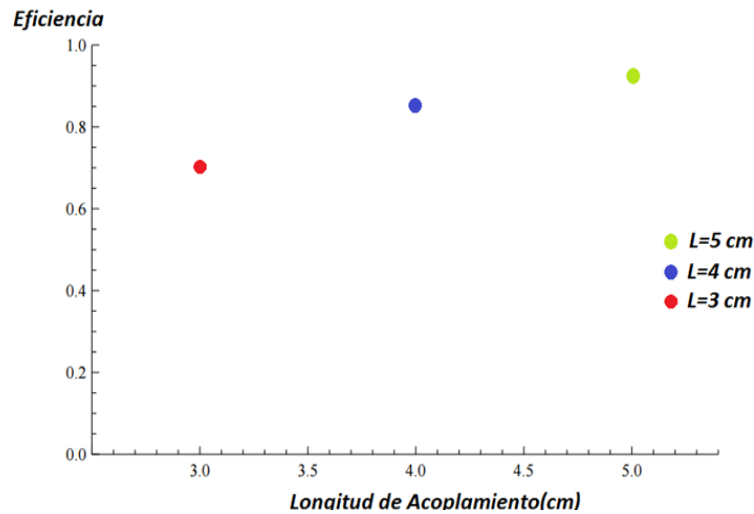
En la gráfica de la figura 5.1 se puede constatar que el acoplador con mayor longitud de fusión (5 cm) entre el taper de bombeo y la fibra DC tiene mayor potencia de salida que los demás. Además también se puede ver que el acoplador con menor longitud de fusión tiene la menor potencia de salida, de modo que existe una fuerte dependencia entre la longitud de la zona de acoplamiento y la potencia acoplada. Este resultado es muy importante pues brinda información relevante para el análisis y optimización de estos dispositivos.

## 5.2 Eficiencia de Acoplamiento.

La eficiencia de acoplamiento del acoplador lateral relaciona la potencia de salida (acoplada) con la potencia de entrada y se puede entonces conocer si el acoplamiento es eficiente o no. A continuación se analizan las diferentes eficiencias de acoplamiento de cada uno de los acopladores fabricados en el laboratorio. Debido a que esta eficiencia está dada definida como:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}},$$

donde  $P_{in}$ , es la potencia de entrada del diodo y  $P_{out}$  es la potencia de salida de la fibra DC y ya conocemos que las mayores potencias de acoplamiento se alcanzan para longitudes mayores, entonces es de esperar que la mayor eficiencia de acoplamiento pertenezca al acoplador de 5 cm de longitud de fusión.



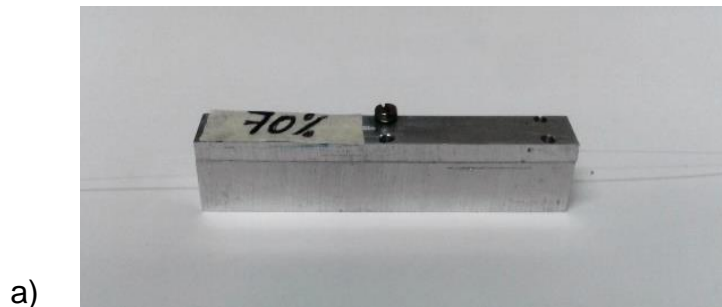
**Figura 5.2** Potencias Acopladas contra potencia del diodo láser para cada dispositivo.

En la gráfica de la figura 5.2 se puede fácilmente corroborar el resultado esperado, pues para el acoplador con longitud de acoplamiento de 5 cm, la eficiencia es del 92%, mientras que para el más corto que tiene 3 cm, la eficiencia es del 70 % solamente.

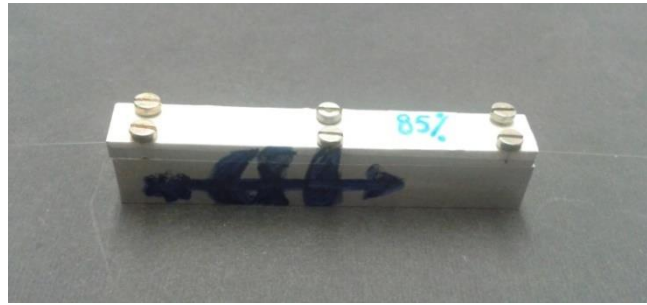
### 5.3 Acopladores Fabricados.

Debido a que durante la fabricación y posterior medición de los acopladores, se tuvo la precaución de realizar exactamente el procedimiento de igual forma en cada caso, entonces sus resultados se consideran confiables.

En la figura 5.3 se muestran los tres acopladores fabricados en el laboratorio.



b)



c)



**Figura 5.3** Acopladores desarrollados en el laboratorio.

En la figura 5.3 a) se muestra la imagen del acoplador desarrollado con una zona de fusión entre el taper de bombeo y la fibra *DC* de 3 cm de longitud. Por otro lado, en la figura 5.3 b) se muestra el acoplador con 4 cm de longitud de acoplamiento. Finalmente, en la figura 5.3 c) se muestra el acoplador con el mejor resultado, el cual que tiene una longitud de acoplamiento de 5 cm de longitud.

Debe señalarse que se desarrollaron otros acopladores con diferentes longitudes de acoplamiento para tener una comparación más precisa, sin embargo debido a inconvenientes que se explican en la siguiente sección solamente se logró establecer la comparación entre estos tres acopladores.

## **5.4 Discusión de los Resultados.**

Los resultados obtenidos experimentalmente corroboran la teoría analizada en el capítulo 3 sobre acopladores laterales y validan la información extraída de la bibliografía consultada. Con uno de los acopladores fabricados en el laboratorio se alcanzó un 92% de eficiencia de acoplamiento, lo cual llega a superar la eficiencia del 90 % que brindan algunos acopladores comerciales. Por lo tanto, el

acoplador desarrollado es altamente eficiente y muestra que profundizando en el estudio teórico de los acopladores laterales de bombeo de revestimiento se pueden alcanzar resultados muy desafiantes.

Se comprobó que una zona de fusión considerablemente larga incrementa las posibilidades para el acoplamiento en la fibra *DC* debido a que el taper de bombeo y la fibra tienen mayor longitud de interacción. Por lo tanto, un taper con longitud de transición considerablemente larga incrementa la eficiencia de acoplamiento.

Se debe mencionar que en nuestro desarrollo experimental no se utilizaron distancias de taper más largas debido a que mecánicamente resultan más complejas de manipular durante el enrollado sobre la fibra *DC* y aún no disponemos de ninguna pieza mecánica que permita esta manipulación eficientemente. Sin embargo, a partir de los análisis teóricos realizados en el capítulo 3, se comprendió la necesidad de diseñar y fabricar acopladores con longitudes de acoplamiento superiores.

Otro inconveniente que debe considerarse es que debe optimizarse el proceso de empaquetado del acoplador, pues durante este proceso se perdieron varios acopladores. Particularmente, se debe señalar que el pegamento que se empleó para sellar los orificios en los extremos de la caja protectora debe remplazarse por otro que no provoque daño en los extremos del acoplador, pues eso puede llegar a afectar la integridad del dispositivo. En la figura 5.4 se muestra la caja protectora diseñada y fabricada para proteger el acoplador lateral.



**Figura 5.4** Caja protectora.

También debe mencionarse que la limpieza en la zona de desarrollo es otro aspecto al que debe prestarse atención, porque las partículas de polvo influyen negativamente durante el proceso de fabricación del taper y posteriormente durante la fusión del taper de bombeo y la fibra *DC*. Además durante el empaquetado del acoplador, la presencia de partículas de polvo tiene efectos muy negativos.

Se considera que el resultado alcanzado en el laboratorio se puede superar si se tienen en cuenta todos estos aspectos y se profundiza aún más en la teoría de estos componentes. Además resulta positivo el hecho de que la metodología diseñada para la fabricación del acoplador lateral permite reproducir los resultados alcanzados, lo cual se constató en el desarrollo de esta tesis.



## Capítulo 6. Conclusiones.

En el desarrollo de esta tesis se realizó una revisión del estado del arte de los acopladores laterales para bombeos de revestimiento en láseres de fibra de alta potencia. También fue necesario estudiar las propiedades ópticas de la fibra *DC* y los principios geométricos fundamentales que deben tenerse en cuenta para la fabricación de estos dispositivos. Se realizó la simulación de un acoplador lateral en la herramienta PhotoDesign, con lo cual se pudo observar el comportamiento de los diferentes modos de propagación soportados por el acoplador simulado, que se entendió como una guía de onda compuesta. A partir de la simulación obtenida se pudo observar que los modos de mayor orden se acoplaron más rápido que los de menor orden y por lo tanto requieren menor longitud de acoplamiento, lo cual coincide totalmente con la bibliografía consultada.

Se diseñó una metodología de fabricación y empaquetamiento que permitió repetir adecuadamente el proceso de fabricación de los acopladores laterales. Finalmente, los acopladores desarrollados en el laboratorio fueron analizados y comparados, a partir de lo cual se logró extraer información relevante para la futura optimización del proceso de fabricación. La mayor eficiencia de acoplamiento fue del 92% y se alcanzó con el acoplador de mayor longitud de acoplamiento, lo cual coincidió con la bibliografía consultada y confirma que una mayor longitud de acoplamiento favorece el incremento de la eficiencia de acoplamiento.

Cabe mencionar que durante el análisis de los resultados obtenidos, se comprendió la necesidad de superar algunos problemas que se presentaron durante el proceso de fabricación. Entre ellos, se debe destacar que se requiere optimizar el proceso de sellado de la caja protectora del acoplador, pues al igual que la fabricación, la protección del dispositivo resulta fundamental para mantener la integridad del dispositivo.

Para finalizar, debe decirse que los resultados alcanzados cumplieron con las expectativas trazadas, pues a pesar de que todo el proceso de fabricación se realizó de forma manual, se obtuvieron buenos resultados con los acopladores desarrollados. De hecho, el 92% de eficiencia de acoplamiento alcanzado con uno de los dispositivos desarrollados, supera a algunos dispositivos comerciales que aseguran una eficiencia de acoplamiento del 90%. Además, del análisis geométrico realizado, se conoció que se pueden emplear hasta 6 bombeos simultáneos en un acoplador lateral fabricado con las fibras *MM*(105/125 $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.22$ ) y la fibra *DC*(10/125 $\mu\text{m}$ ,  $NA = 0.46$ ). Por lo tanto, actualmente se tiene la proyección de lograr desarrollar acopladores laterales que empleen hasta 6 bombeos.

# Referencias

- [1] E. Snitzer, "Optical maser action of Nd in a barium Crown Glass". Phys Rev. Lett., 1961. 7: p. 444.
- [2] Mears, W.J., Neodymium-doped silica single mode fiber lasers. Electronics Letters, 1985. 21: p. 738.
- [3] R. Paschotta, "High-power Fiber Amplifiers with Double-clad Fibers". RP Photonics. RP Photonics Consulting GmbH. [https://www.rp-photonics.com/tutorial\\_fiber\\_amplifiers6.html](https://www.rp-photonics.com/tutorial_fiber_amplifiers6.html)
- [4] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, "Double-clad, offset core Nd fiber laser," presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., New Orleans, LA, 1988, Paper PD5.
- [5] H. Po, E. Snitzer, R. Tuminelli, L. Zenteno, F. Hakimi, N. M. Cho, and T. Haw, "Double clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array," presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., Houston, TX, 1989, Paper PD7.
- [6] D. J. Richardson, J. Nilsson and W. A. Clarkson, "High power fiber laser: current status and future perspectives", Opt. Soc. Am, vol. 27, no. 11, 2010.
- [7] Q. Tan, T. Ge, X. Zhang and Z. Wang, "Cascaded combiners for a high power CW fiber laser", IOPscience, Laser Physics, 26.2 (2015): 025102.
- [8] M. N. Zervas and C. A. Codemard, "High Power Fiber Lasers: A Review," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 20, no. 5, September/October, 2014
- [9] E. Snitzer, "Proposed fiber cavities for optical lasers," J. Appl. Phys. 32, 36–39 (1961).
- [10] C. J. Koester and E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser," Appl. Opt. 3, 1182–1186 (1964).
- [11] J. Stone and C. A. Burrus, "Neodymium-doped silica lasers in end-pumped fiber geometry," Appl. Phys. Lett. 23, 388–389 (1973).
- [12] S. B. Poole, D. N. Payne, and M. E. Fermann, "Fabrication of low loss optical fibers containing rare-earth ions," Electron. Lett. 21, 737–738 (1985).
- [13] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, and D. N. Payne, "Neodymium-doped silica single-mode fiber laser," Electron. Lett. 21, 738–740 (1985).

- [14] R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey, and D. N. Payne, "Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.* 23, 1026–1028 (1987).
- [15] V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts, S. Sanders, S. Bicknese, R. Dohle, E. Wolak, P. S. Yeh, and E. Zucker, "110 W fibre laser," *Electron. Lett.* 35, 1158–1160 (1999).
- [16] T. Theeg, H. Sayinc, J. Neumann, L. Overmeyer, D. Kracht, "Side Pumping Scheme for All-Fiber Counter-Pumping of High Power Single-Frequency Fiber Amplifiers", IEEE, Laser Zentrum Hannover, Germany, 2013.
- [17] C. C. Renaud, "High Power Diode Pumped Fibre Laser", University of Southampton, Faculty of Engineering and Applied Science, 2001.
- [18] M. F. Digonnet, "Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers", ed. Marcel Dekker, Inc, 2001.
- [19] Q. Hao, W. Li, and H. Zeng, "Double-clad fiber amplifier for broadband tunable ytterbium-doped oxyorthosilicates lasers" *Optical Society of America*, Vol. 15, No. 25, 2007.
- [20] L. Huang, H. Zhang, X. Wang, and P. Zhou, "Diode-Pumped 1178-nm High-Power Yb-Doped Fiber Laser Operating at 125  $^{\circ}\text{C}$ ", *IEEE Photonics Journal*, 2016.
- [21] H. Xia, Z. Jin, H. Li, F. Gao, H. Tang, B. Shi, and Y. Qu, "The Wavelength-Locking of High-Power 808 nm Semiconductor Laser", *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 450324, 2005.
- [22] Starodoumov, A. OPTICAL FIBER COUPLING ARRANGEMENT. United States Patent Application Publication, US, no. 20040196537 A1, (2004).
- [23] A. Ghatak, K. Thyagarajan, "Introduction to Fiber Optics", Cambridge University Press, 1998.
- [24] C. Lin Chen, "Foundations for guided-wave optics", John Wiley & Sons, 2006.
- [25] "Fundamentals of Optical Fiber Transmission", Technical University of Lodz, Laboratory of Laser Molecular Spectroscopy, 93- 590 Lodz, Wroblewskiego 15 str, Poland.
- [26] E. Hecht and A. Zajac, "Optics", Addison-Wesley, 2001.
- [27] P. K. Choudhury, "Tapered Optical Fibers", Institute of Microengineering & Nanoelectronics (IMEN) Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor, Malaysia.

[28] G .P. Valentin, S. Igor,” COUPLING ARRANGEMENT BETWEEN A MULTLMODE LIGHT SOURCE AND AN OPTICAL FIBER THROUGH AN INTERMEDIATE OPTICAL FIBER LENGTH”, United States Patent, 5,999,673, 1999.

[29] T. Theeg, H. Sayinc, J. Neumann, L. Overmeyer, and D. Kracht,”Pump and signal combiner for bi-directional pumping of all-fiber lasers and amplifiers”, OSA. Optics Express, Vol. 20, No. 27, 28125, 2012.