

## **CAPÍTULO 2. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA**

Los acopladores de fibra óptica utilizados en este trabajo fueron fabricados con la técnica de fusión. Ésta se basa en fusionar dos fibras ópticas longitudinalmente de tal manera que la luz que viaja a través de una de ellas, se acople parcial o totalmente a la otra fibra. La ventaja principal de este método de fabricación es que puede realizarse de manera controlada, y pueden obtenerse resultados consistentes. Para obtener acopladores con pérdidas bajas, es necesario realizar la fusión de las fibras calentándolas y jalándolas simultáneamente, tratando siempre de obtener un adelgazamiento adiabático (esto es, un adelgazamiento gradual y suave). Esto se logra utilizando motores de pasos y controladores de flujo de gas accionados por computadora.

El proceso de fabricación de acopladores fusionados comienza con la limpieza de la fibra óptica quitando el recubrimiento polimérico y limpiándola con alcohol etílico. Se utiliza una fuente de luz para alimentar la fibra primaria y la potencia óptica a la salida de ambas fibras se monitorea con dos detectores ópticos. Por medio de la computadora se controlan la velocidad de elongación, el tiempo de exposición ante la flama, el barrido de la antorcha y el flujo de gas. El acoplamiento de luz entre las fibras se monitorea durante el proceso de fabricación y se registra en una gráfica de potencia contra longitud de elongación (figura 2.1).

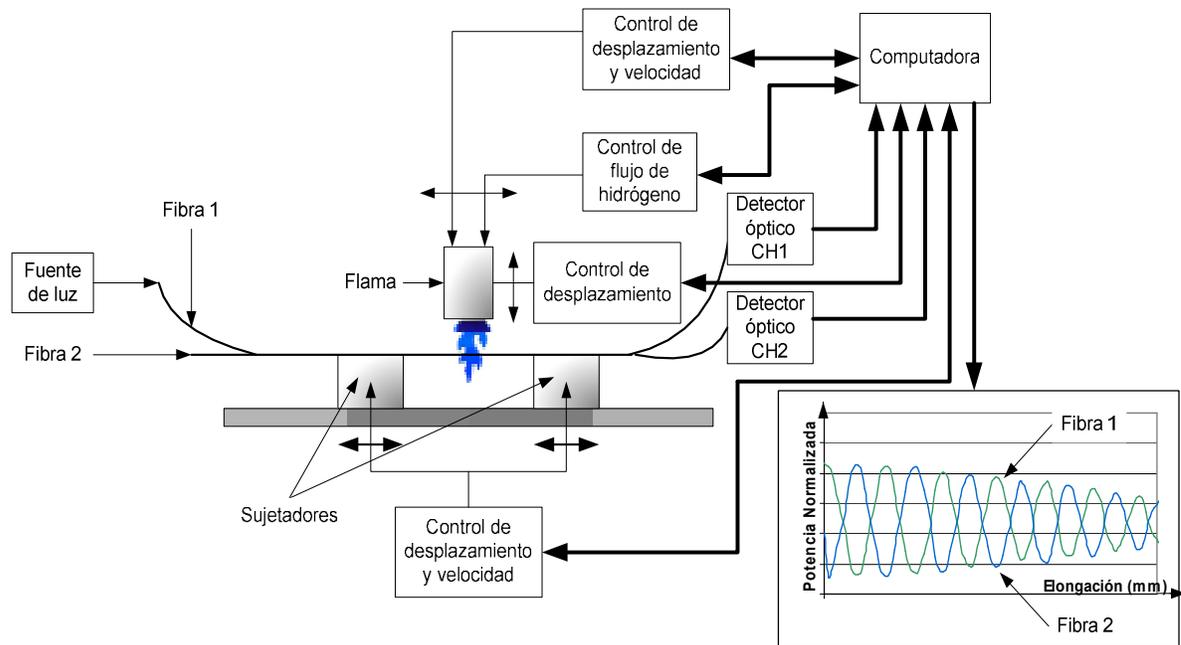


Figura 2.1. Diagrama de bloques del proceso de fabricación de acopladores mediante la técnica de fusión.

La caracterización de acopladores involucra el registro de las características de transferencia de potencia y las pérdidas ópticas generadas durante el proceso de fabricación. Típicamente, se monitorea de manera simultánea la potencia óptica a la salida de ambas fibras en función de la longitud de jalado (longitud de elongación). Con esto pueden calcularse las pérdidas y ajustarse así la velocidad de jalado y la temperatura de la flama utilizada en el proceso de fusión. El control de temperatura se logra mediante la dosificación del flujo de gas (normalmente hidrógeno) que alimenta la flama.

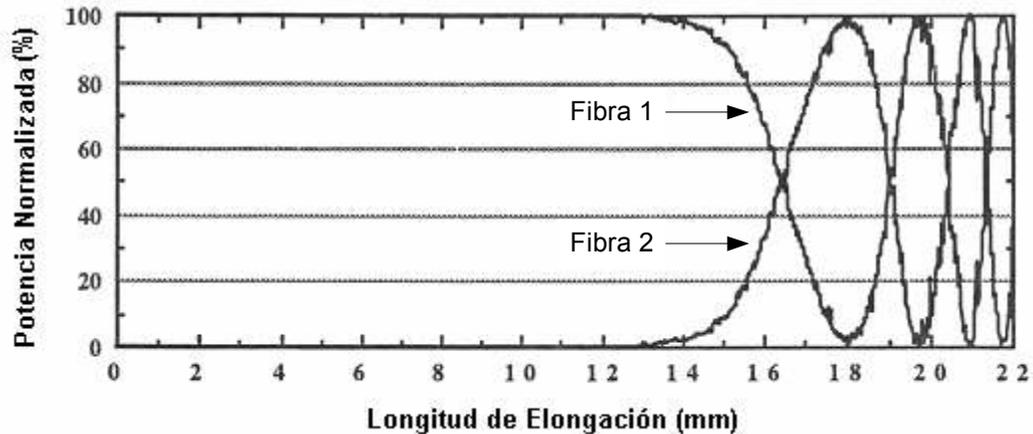


Figura 2.2. Potencia normalizada vs longitud de elongación de los puertos de salida de la fibra 1 y la fibra 2 de un acoplador sobre-acoplado mediante la técnica de fusión.

Las curvas típicas del proceso de fabricación de acopladores fusionados se muestran en la figura 2.2. Este tipo de gráfica se conoce como curva de transferencia de potencia, y representa el cambio en la potencia óptica guiada en cada una de las fibras en función de la longitud de elongación. Cuando se inicia el proceso de elongación, la potencia óptica es máxima en la fibra primaria (fibra 1), y a medida que las fibras comienzan a fusionarse, comienza la transferencia de energía entre las fibras [1]. Esto puede verse en la figura 2.2 a partir de los 13 mm de elongación, en donde la potencia de la fibra 1 comienza a disminuir, mientras que la potencia en la fibra 2 comienza a ascender. La transferencia del 50% de la potencia ocurre cuando ambas curvas se cruzan (aproximadamente a los 16.5 mm de elongación en la figura 2.2) y este punto se conoce como punto de 3 dB. Puede obtenerse la transferencia completa de potencia (18 mm en la figura 2.2), y cuando la elongación continúa más allá de este punto, la luz acoplada en la segunda fibra regresa a la fibra primaria. Al continuar elongando, el proceso de transferencia se repite de manera cíclica, y cuando esto sucede se dice que el acoplador es sobre-acoplado; es decir, la potencia de la luz oscilará entre las dos fibras.

Las pérdidas que pueden presentarse en los acopladores de fibra óptica láser se determinan usando la potencia de entrada ( $P_{in}$ ) y la potencia a la salida de cada una de las fibras ( $P_{F1}$ ,  $P_{F2}$ ). Éstas se definen de la siguiente manera [6]:

- Pérdidas en exceso: es el cociente de la potencia óptica total de los puertos de salida del acoplador, con respecto a la potencia óptica del puerto de entrada del acoplador, expresado en dB. Estas pérdidas se calculan como:

$$L_E = -10 \text{ Log} \left[ \frac{P_{F1} + P_{F2}}{P_{in}} \right] \quad (1)$$

- Pérdidas de inserción: es el cociente de la potencia óptica de cualquiera de los puertos de salida del acoplador, con respecto a la potencia óptica del puerto de entrada del acoplador, expresado en dB. La pérdida de inserción incluye la razón de acoplamiento del dispositivo y también las pérdidas en exceso. Estas pérdidas son las más útiles para el diseño de acopladores. Las pérdidas de inserción pueden calcularse con:

$$L_I = -10 \text{ Log} \left[ \frac{P_{F1}}{P_{in}} \right] \quad (2)$$

El software que incluye la máquina proporciona información sobre ambos tipos de pérdidas, aunque la extracción de estos datos para procesamiento posterior no es confiable. De esta manera, las pérdidas que se presentarán en este trabajo se han calculado directamente utilizando los datos de las curvas de transferencia de potencia.

Contar con una máquina acopladora para fabricar acopladores sobre-acoplados por el método de fusión permite manipular y controlar el proceso de fabricación. Con estos acopladores se pueden realizar dispositivos de fibra óptica como filtros, acopladores de 3 dB, multiplexores por longitud de onda (WDM),

atenuadores y sensores. Dado que el proceso de fabricación puede adecuarse para fabricar dispositivos con las características convenientes para una aplicación en particular, la máquina para fabricar acopladores es un equipo de gran importancia para desarrollar trabajo de investigación con acopladores de fibra óptica.

### **2.1 Descripción de la máquina utilizada.**

La máquina para fabricar acopladores de fibra óptica es de disponibilidad comercial, fabricada en China por la compañía DOWSON, y el modelo es el OC2010 (figura 2.3). Este tipo de máquinas se conocen también como estaciones de trabajo, y son utilizadas para fabricar dispositivos comerciales como acopladores de 3 dB y multiplexores por longitud de onda (WDM). Los elementos que componen la estación de trabajo son los siguientes:

- a. Un quemador de gas (flama).
- b. Rieles para colocar y tirar de las fibras (sujetadores).
- c. Encapsulador para recubrir los acopladores.
- d. Entradas para detección de potencia óptica de la fibra uno y dos, CH1 y CH2 respectivamente.
- e. Software OC-2010 para el manejo y control de la máquina.
- f. Un tanque de hidrógeno que alimenta al sistema, específicamente al quemador.
- g. Una bomba de vacío para sujetar las fibras una vez colocadas en los rieles.

Los pasos que se siguen para fabricar acopladores con esta máquina son los siguientes:

1. Remover el recubrimiento polimérico que tiene la fibra óptica en los extremos de las fibras y en el área donde se fusionarán.

2. Limpiar con alcohol etílico las áreas expuestas de la fibra óptica. Con esto se trata de eliminar cualquier residuo de recubrimiento o polvo que pueda contaminar el material de las fibras y causar pérdidas en exceso.
3. Colocar las fibras limpias en los rieles y sujetarlas utilizando la succión generada con la bomba de vacío.
4. Utilizar una fuente de luz para alimentar la fibra primaria (fibra 1) y registrar la potencia a la salida de la misma con el detector de potencia óptica (CH1).
5. En el segundo detector óptico (CH2) se debe colocar el extremo de la segunda fibra.
6. Asegurarse que ambas fibras se encuentren totalmente en contacto en la región donde se realizará la fusión. Esto es muy importante para que ambas puedan elongarse y fundirse simultáneamente.
7. Una vez seleccionados los parámetros para el flujo de gas y velocidad de elongación se inicia el proceso de fabricación.
8. Al mismo tiempo que se lleva a cabo la elongación y el calentamiento de las fibras, con ayuda del software, son monitoreadas la potencia de salida y las pérdidas de ambas fibras. Estos parámetros son visualizados en una gráfica de potencia vs longitud de elongación.



Figura 2.3. Estación de trabajo DOWSON OC2010.

## 2.2 Experimentación con acopladores de fibra óptica.

Para fabricar acopladores con bajas pérdidas es necesario optimar los diferentes parámetros de fabricación que pueden ajustarse con la máquina. Los ajustes realizados para obtener resultados adecuados fueron los siguientes:

1. Variación del flujo de hidrógeno.
2. Variación de la velocidad de desplazamiento de los rieles que tiran de la fibra óptica.
3. Variación del desplazamiento (barrido transversal) de la antorcha.
4. Variación de la altura de la antorcha.

Todos los ajustes anteriores permiten variar la región de calentamiento de las fibras (en dimensión y temperatura) que es en donde se genera la región de acoplamiento. Esto permite controlar parámetros fundamentales del acoplador tales como la geometría de la región de acoplamiento, la variación del radio de la sección de acoplamiento (sección del cuello del acoplador) y la longitud del acoplador. Los parámetros de fabricación utilizados se determinaron de manera experimental. Para llevar a cabo este proceso de calibración se realizaron varios experimentos con el fin de determinar los parámetros adecuados que permitieran obtener un adelgazamiento bicónico y adiabático en las fibras. Los parámetros encontrados para obtener acopladores con pérdidas bajas y con alta repetibilidad son:

- Flujo de hidrógeno:  $H_2 = 250.0$  sccm
- Altura de la antorcha:  $TH = 3.0$  mm
- Elongación inicial de las fibras:  $PT = 1.0$  mm
- Velocidad de jalado:  $PS = 0.020$  mm/s
- Desplazamiento de la antorcha:  $SL = 6.0$  mm
- Velocidad de desplazamiento de la antorcha:  $SS = 5.0$  mm/s

Nótese que todos estos parámetros fueron optimizados utilizando el mismo tipo de fibra óptica para todos los acopladores. En particular, la fibra utilizada para el desarrollo de este trabajo fue fibra óptica monomodo estándar SMF-28, fabricada por Corning. Esta fibra óptica tiene una longitud de onda de corte cercana a los 1200 nm y es monomodal para las longitudes de onda con las que se trabajó. Otras características relevantes de esta fibra pueden consultarse en los anexos de la tesis. El uso de otras fibras ópticas con distintas características requiere modificar los parámetros de fabricación.

La fabricación de acopladores con estos parámetros se realizó utilizando dos tipos distintos de fuente de luz: un LED con salida acoplada a fibra óptica (ancho espectral  $>100$  nm) y una fibra láser sintonizable (ancho espectral  $<0.5$  nm). Las diferencias encontradas en cada caso se describen a continuación. El espectro de transmisión de cada acoplador se obtiene utilizando el LED y un analizador de espectros ópticos como se muestra esquemáticamente en la figura 2.4. Las propiedades espectrales de los acopladores se determinan enviando la luz del LED a través de la fibra 1 y registrando su transmisión a la salida de ambas fibras en los extremos opuestos del acoplador (esto es, se registra un espectro para cada una de las fibras a la salida del dispositivo).

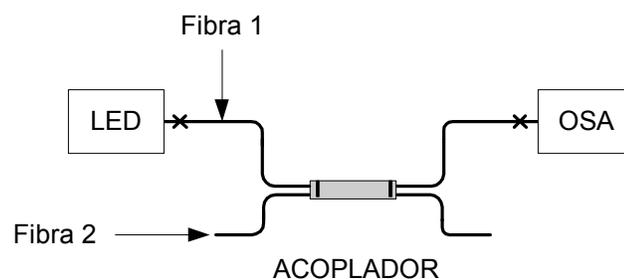


Figura 2.4. Esquema del arreglo utilizado para obtener el espectro de transmisión de los acopladores (OSA: analizador de espectros ópticos).

### 2.2.1 Acopladores fabricados utilizando un LED.

Los detectores ópticos utilizados en la estación de trabajo no discriminan la longitud de onda de la potencia óptica recibida. Cuando se utiliza un LED como fuente de luz, el detector de la fibra primaria recibe longitudes de onda en un rango espectral mayor a los 100 nm, y cualquier variación en potencia en las fibras ocurre dentro de este rango. El punto de 3 dB indica entonces que el acoplamiento se presenta a todas las longitudes, y se obtiene así un acoplador de banda ancha. Al continuar elongando las fibras, se obtiene un acoplador sobreacoplado pero selectivo en longitud de onda. En la figura 2.5 se muestra la curva de transferencia de potencia para un acoplador de este tipo. Nótese que la transferencia de potencia entre las fibras se detiene a partir de aproximadamente 7.0 mm de elongación. Esto se debe a que las fibras han sido adelgazadas hasta el punto de ruptura, y la luz deja de ser guiada en la estructura.

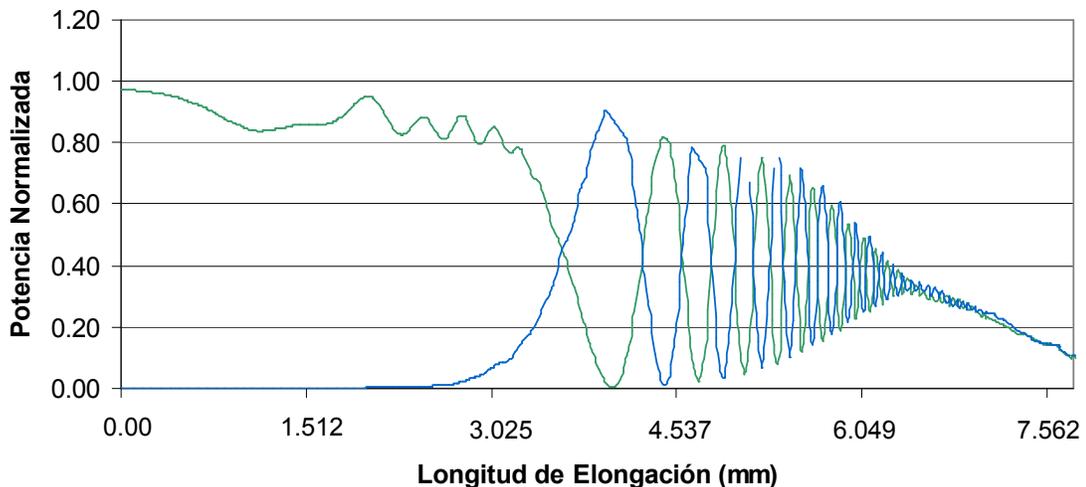


Figura 2.5. Gráfica obtenida en el monitoreo de la potencia óptica normalizada vs longitud de elongación utilizando como fuente de luz un LED.

Posteriormente, utilizando el analizador de espectros ópticos se observaron las características de transmisión de los acopladores. Un ejemplo típico de la transmisión a través de uno de estos dispositivos se muestra en la figura 2.6. En

la figura se observa en color gris el espectro del LED, y en color verde y azul el espectro de la luz acoplada de la fibra uno y dos, respectivamente. Nótese que a pesar de ser un acoplador sobre-acoplado, los puntos de cruce ocurren únicamente en dos longitudes de onda. Esto se debe al ancho espectral del LED, que al ser muy amplio, limita la selectividad en longitud de onda del acoplador fabricado, pues los detectores no pueden discriminar a qué longitudes de onda ocurre el acoplamiento de luz. De esta manera, el ancho espectral de la fuente utilizada durante el proceso de fabricación es muy importante para obtener las propiedades deseadas en un acoplador. Esto podrá observarse con mayor claridad en las siguientes secciones, en donde se reportan las características de los acopladores fabricados utilizando la fibra láser sintonizable.

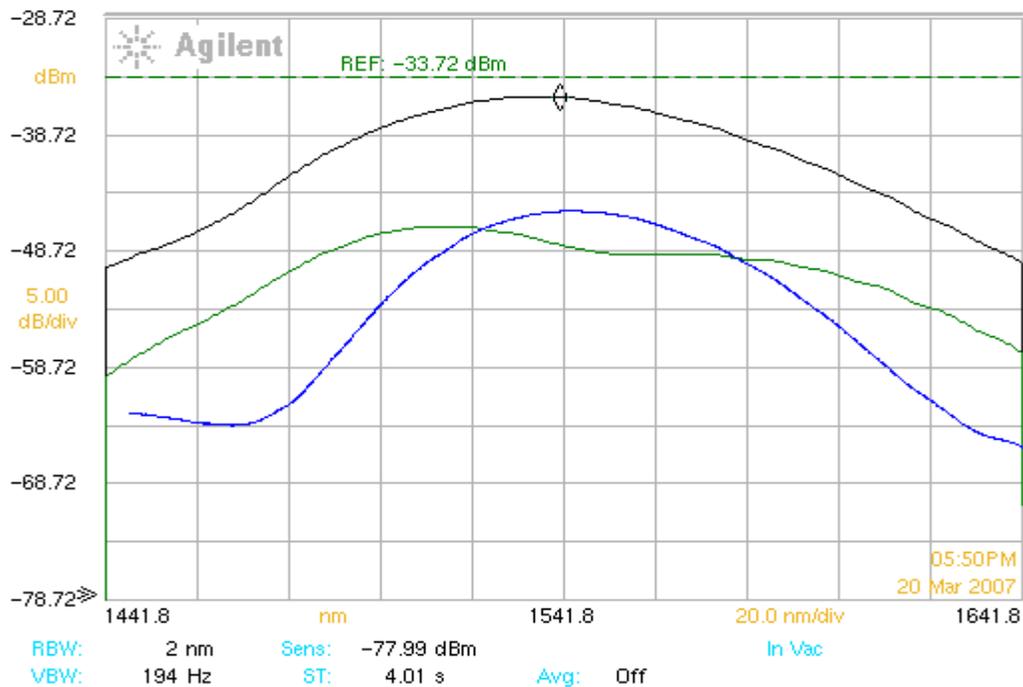


Figura 2.6. Espectro óptico del acoplador utilizando como fuente de luz un LED. En color gris el espectro del LED, en color verde y azul el espectro de la luz acoplada de la fibra uno y dos, respectivamente.

### 2.2.2 Acopladores fabricados utilizando la fibra láser sintonizable.

La fibra láser utilizada en el proceso de fabricación de acopladores se muestra en la figura 2.7. La fuente de corriente alimenta al diodo láser, el cual será la fuente de bombeo para la fibra láser; el acoplador tipo WDM servirá para separar las longitudes de onda de la fibra láser y del diodo láser (bombeo residual). La función del aislador (ISO) es permitir la salida de la longitud de onda solo en un sentido y que ésta no pueda retornar al resonador. La fibra de Erblio ( $\text{Er}^{3+}$ ) es el material láser del sistema y proporciona la ganancia necesaria para que el láser funcione. El controlador de polarización (PC) ayudará para fijar y ajustar la polarización del sistema láser de fibra, mientras que el filtro Fabry Perot determina la longitud de onda de operación (alrededor de 1560 nm).

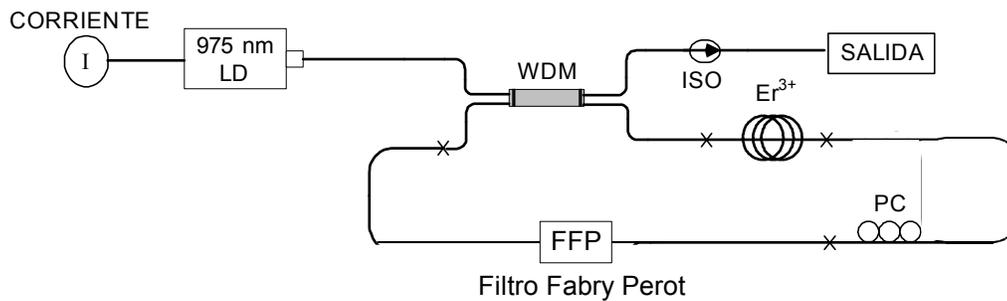


Figura 2.7. Esquema de la fibra láser sintonizable utilizada para obtener los acopladores sobre-acoplados.

Cuando se utiliza una fuente de luz con espectro angosto, los detectores de la máquina pueden registrar únicamente las variaciones de potencia sobre este ancho espectral limitado. Esto permite detectar con mayor sensibilidad los cambios en la potencia óptica debidos al cambio en la geometría de la región de acoplamiento. Para las longitudes de onda de la fibra láser (1530 nm a 1565 nm), la distribución de luz en la región de acoplamiento cambia más drásticamente al reducir la sección transversal de la guía de onda. De esta manera, los detectores

registran únicamente el acoplamiento a la longitud de onda del láser sin que otras longitudes de onda contribuyan a la cantidad de luz registrada a la salida del acoplador. Como puede verse en la figura 2.8, el uso de esta fuente de luz en el proceso de fabricación permite obtener acopladores con más de 100 ciclos de transferencia de potencia. Las pérdidas en exceso iniciales para este tipo de dispositivo fueron de 0.291 dB, y conforme aumenta el número de ciclos de transferencia de potencia pueden llegar hasta 2.99 dB. Esto se debe a la gran reducción en el diámetro de las fibras cuando se alcanza una elongación cercana a los 13 mm. En principio, las pérdidas para longitudes de elongación de esta magnitud pueden reducirse reajustando los parámetros de fabricación. Esto implica detener el proceso a una cierta longitud de elongación y ajustar nuevamente la velocidad de elongación y el barrido de la antorcha.

Para manipular los acopladores se utilizaron portaobjetos para microscopio (dimensiones de 5x3 cm). Para que pudieran alojar a los acopladores, los portaobjetos se indentaron en la región central (sobre la superficie del vidrio se deja una impresión o huella en forma tubular); el tamaño de la indentación es aproximadamente del ancho de la fibra óptica (figura 2.9), aunque la tolerancia con esta dimensión no fue muy estricta pues no es relevante para los objetivos de este trabajo. Una vez que el acoplador se coloca en esta montura, éste puede extraerse de la máquina y obtenerse el espectro de transmisión.

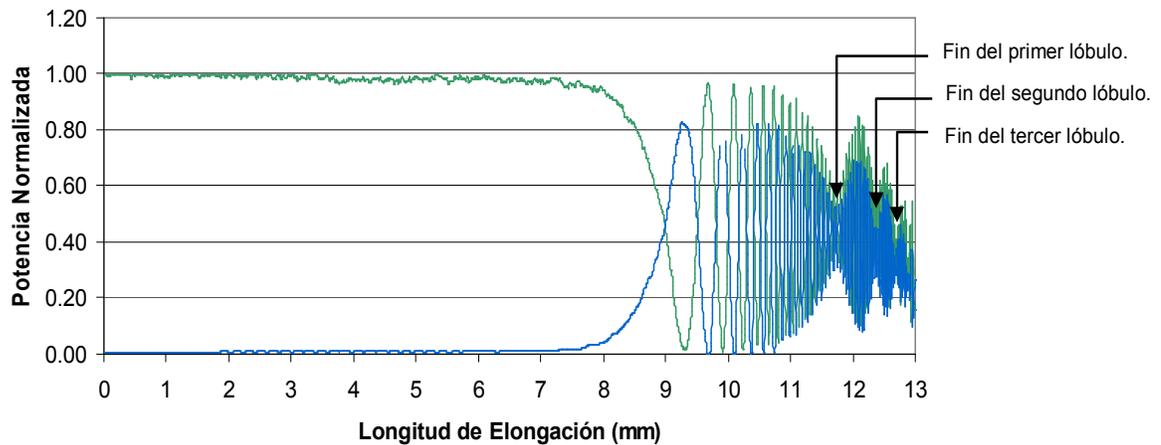


Figura 2.8. Potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobre-acoplado con más de 100 ciclos de transferencia de potencia presentando 3 lóbulos completos.

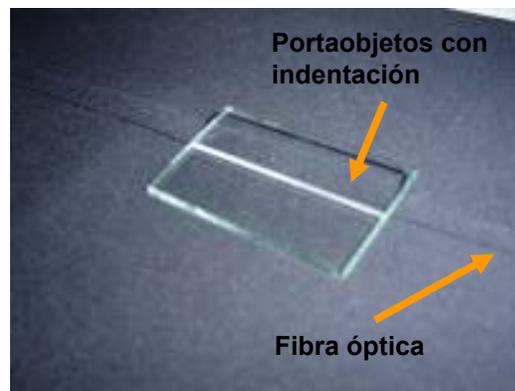


Figura 2.9. Portaobjetos con indentación para colocar la fibra óptica.

### 2.3 Características espectrales de los acopladores.

Los acopladores fabricados se clasificaron de acuerdo con el número de lóbulos obtenidos durante el proceso de fabricación. Tomando como referencia la figura 2.8, el lóbulo se define utilizando la envolvente de la curva de transferencia de potencia. El número de veces que esta curva se hace más angosta define el número de lóbulos del acoplador. Se trabajó con tres tipos de acopladores:

- a) 1 Lóbulo...(figura 2.10).

- b) 2 Lóbulos...(figura 2.11).
- c) 3 Lóbulos...(figura 2.12).

La diferencia que existe entre éstos, además del número de lóbulos, es el tiempo de fabricación, pues para obtener un mayor número de lóbulos es necesaria una longitud de elongación mayor. Nótese que esto dependerá también de la colocación de las fibras ópticas en los rieles de jalado y la cercanía de ambas en la zona de calentamiento. En la práctica, la colocación de las fibras en la máquina es muy importante, pues debe tratarse siempre de que ambas fibras queden lo más juntas posible en la zona de elongación. Éste es el único paso dentro del procedimiento de fabricación de los acopladores para el cual no existe una forma automática de ajuste. De esta manera, es necesario adquirir experiencia en la colocación de las fibras antes de comenzar el proceso de fabricación. La influencia de la colocación de las fibras en los dispositivos fabricados puede observarse en las figuras 2.10, 2.11 y 2.12, pues puede verse que el primer punto de 3 dB para los tres casos ocurre para elongaciones distintas. Es por esto que en las figuras antes mencionadas, la elongación final requerida para obtener un acoplador con un mayor número de lóbulos, no es necesariamente mayor que la requerida para obtener un dispositivo de un lóbulo.

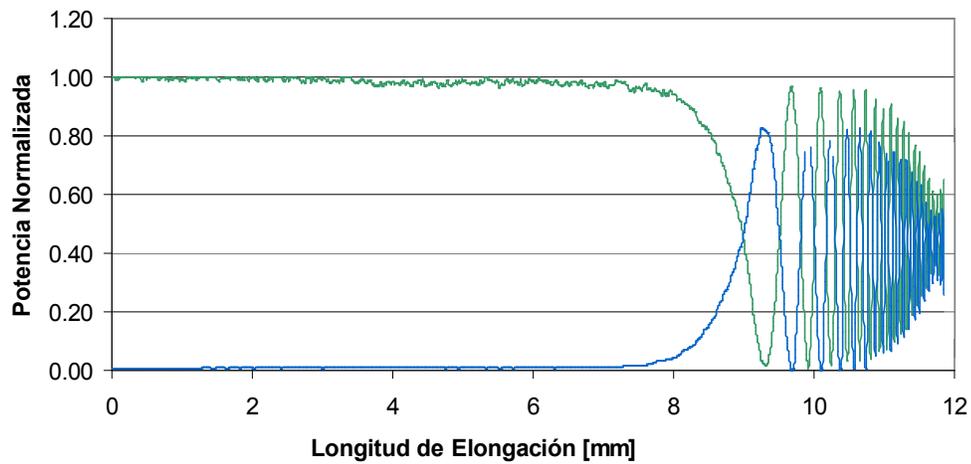


Figura 2.10. Gráfica de la potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobreacoplado de 1 Lóbulo.

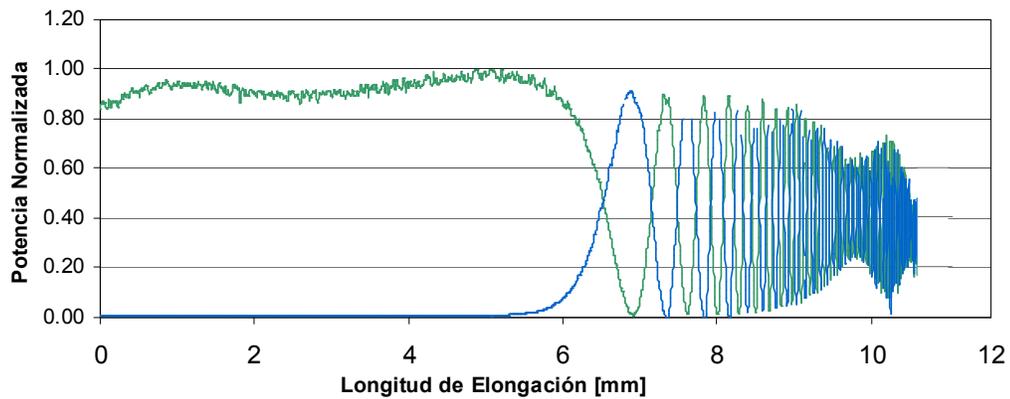


Figura 2.11. Gráfica de la potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobreacoplado de 2 Lóbulos.

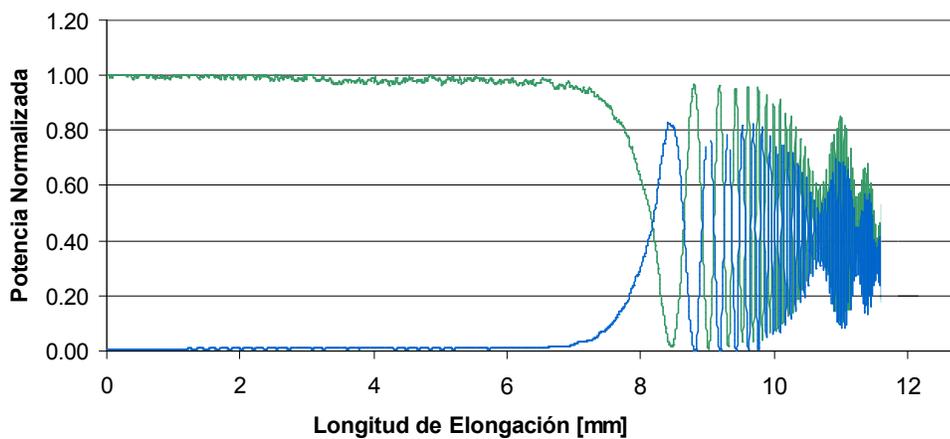


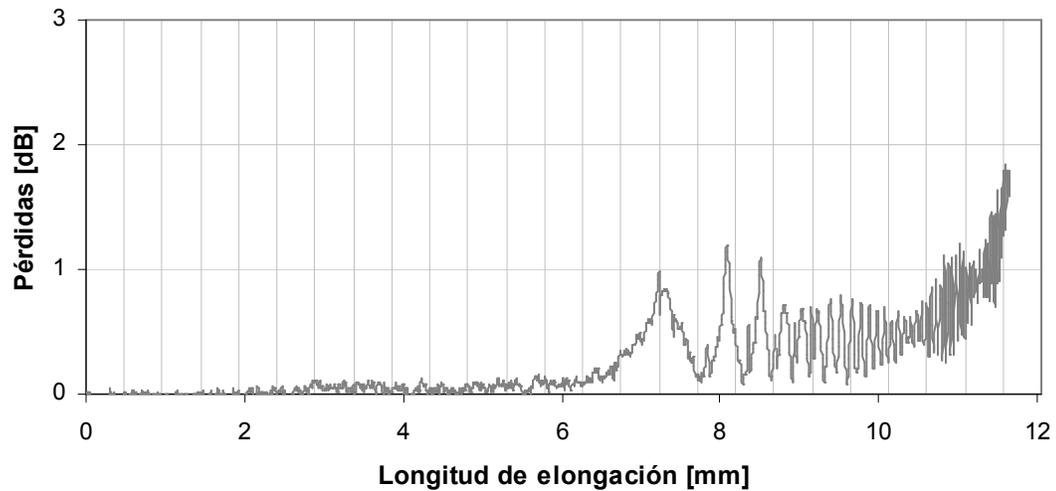
Figura 2.12. Gráfica de la potencia normalizada vs longitud de elongación de un acoplador sobreacoplado de 3 Lóbulos.

Como puede verse en las figuras, las características de transferencia de potencia en función de longitud de elongación son acordes a lo esperado. En primer lugar, al continuar el proceso de elongación, las fibras continúan adelgazándose y la luz se transfiere de una fibra a la otra un mayor número de veces. Esto puede verse claramente en las gráficas de acopladores de dos y tres lóbulos, pues la transferencia de potencia se presenta con longitudes de elongación más pequeñas. Es por esta razón que para el segundo y tercer lóbulo siempre hay un mayor número de ciclos de transferencia de potencia.

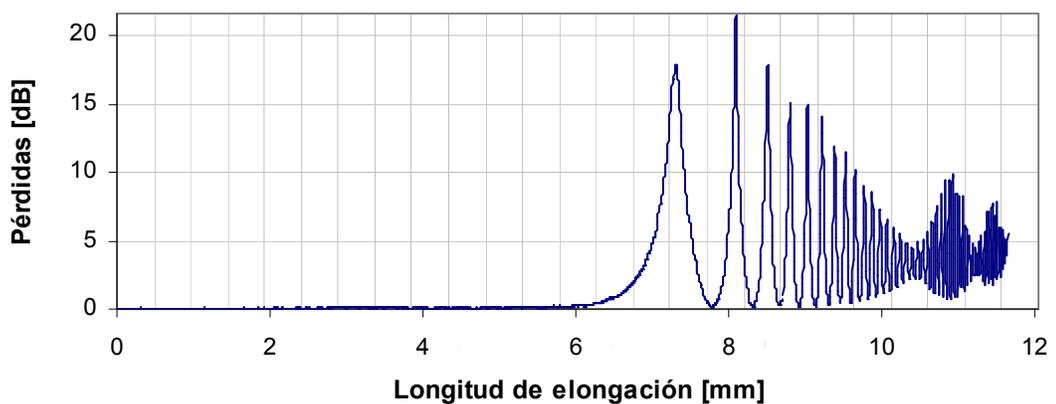
La figura 2.13 muestra las pérdidas en exceso (a) y de inserción (b) para el acoplador de 3 lóbulos cuyas características de transferencia de potencia se mostraron en la figura 2.12. Como puede verse, las pérdidas en exceso aumentan rápidamente cuando comienza la etapa de acoplamiento entre las fibras, debido a la deformación geométrica que sufren. Las pérdidas fueron calculadas mediante la ecuación 1 utilizando los datos de la curva de transferencia de potencia del acoplador. Asimismo, las pérdidas de inserción fueron calculadas con la ecuación 2. En esta gráfica podemos ver que la curva se parece a la de transferencia de potencia entre las fibras, lo cual concuerda con la definición de este tipo de pérdidas. Para acopladores de 1 y 2 lóbulos se obtuvieron curvas con tendencias similares a las de las figuras mostradas.

Al final del proceso de fabricación, las pérdidas en exceso típicas que presentan los acopladores son: para un lóbulo 1.47 dB, para dos lóbulos 3.7 dB y para tres lóbulos 3.76 dB. Con estos valores se observa que al aumentar el número de ciclos de transferencia de potencia de un lóbulo a dos, las pérdidas aumentan considerablemente; sin embargo, podemos notar que la diferencia de pérdidas entre un acoplador de dos lóbulos a tres es muy pequeña. Esto indica que las mayores pérdidas se obtienen cuando se realiza la primera etapa de sobre-acoplamiento (primer lóbulo); esta información es importante, pues indica que para obtener acopladores con menores pérdidas, es necesario un reajuste de los parámetros de fabricación una vez que se pase el punto de 3 dB. Para los

objetivos planteados en este trabajo, las pérdidas de los dispositivos fabricados fueron adecuadas, pero es importante notar que la fabricación de acopladores con alto grado de sobre-acoplamiento (200 ó 300 ciclos de transferencia de potencia) y con pérdidas bajas, requerirá un reajuste de parámetros después de alcanzar el punto de 3 dB.



(a)



(b)

Figura 2.13. (a) Pérdidas en exceso (b) Pérdidas de inserción vs longitud de elongación.

En la figura 2.14 se muestra el espectro de emisión del LED utilizado para caracterizar los acopladores. Los espectros obtenidos para dispositivos de dos y tres lóbulos fabricados en el laboratorio se muestran en la figura 2.15. La diferencia en la amplitud de los espectros mostrados se debe a que éstos fueron obtenidos bajo distintas condiciones experimentales; sin embargo, las figuras son útiles para mostrar las características espectrales de los acopladores. De la figura 2.15 se observa que mientras mayor sea el número de ciclos de transferencia de potencia, se presentan más bandas espectrales dentro del espectro de transmisión. Se puede notar también que hay mayor selectividad en longitud de onda en los acopladores con mayor número de ciclos de transferencia de potencia, pues las bandas de transmisión son más angostas. Adicionalmente, al ser más selectivo, el rango espectral de operación del acoplador se va haciendo también más angosto. Esto se debe a que la región de acoplamiento se hace más delgada y las longitudes de onda mayores se vuelven más susceptibles al salir del confinamiento en la guía de onda. La figura 2.15 muestra una de las características que distinguen a los acopladores sobre-acoplados: el acoplamiento de 3 dB se presenta a más de una longitud de onda. Como puede verse, a mayor número de lóbulos, mayor será el número de longitudes de onda a las cuales se presenta un acoplamiento de 3 dB.

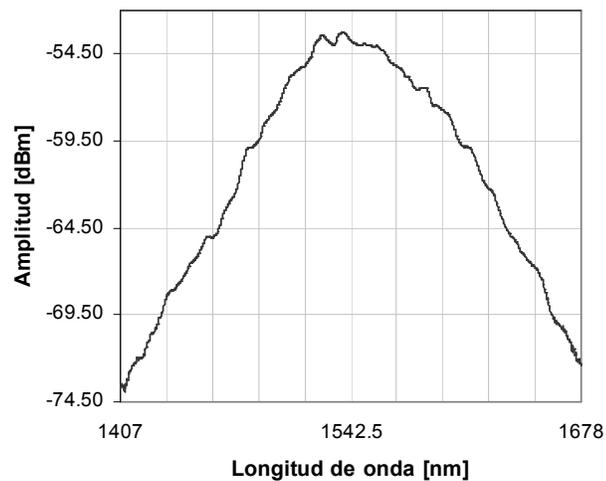


Figura 2.14. Espectro de transmisión de la fuente de luz utilizada, LED.

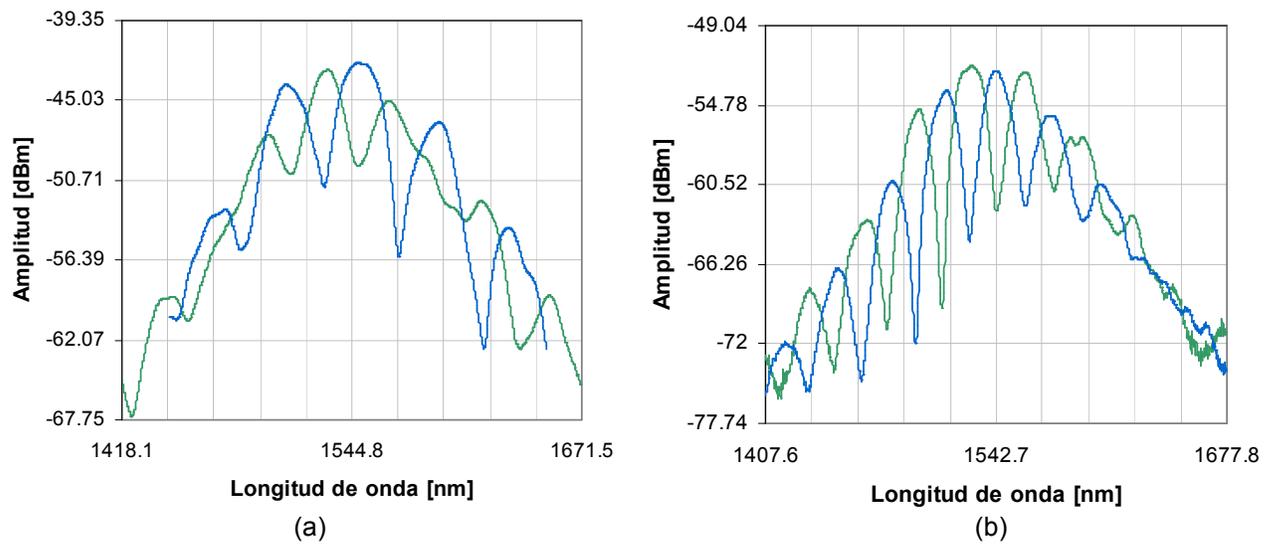


Figura 2.15. Espectros de transmisión del acoplador sobre-acoplado (a) 2 Lóbulos y (b) 3 Lóbulos.

Para todas las gráficas, la curva verde es la potencia de salida en la fibra 1 y la curva azul es la potencia de salida en la fibra 2. La fuente se acopla a la entrada de la fibra 1.

En el siguiente capítulo se explicará la importancia que tienen las características espectrales de los acopladores cuando son utilizados en resonadores de fibra óptica, y como se ve afectado el espectro al cambiar el índice de refracción del medio.