

## **CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE ACOPLADORES Y EFECTOS DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN**

Las características espectrales de los acopladores de fibra óptica determinan la utilidad de estos dispositivos para alguna aplicación específica. Por ejemplo, en sistemas de comunicaciones ópticos basados en multiplexado por longitud de onda, la selectividad espectral de los acopladores debe ser adecuada para discriminar señales ópticas con separaciones espectrales pequeñas (alrededor de 0.8 nm). Por otro lado, otras aplicaciones requieren que el acoplamiento de luz entre las fibras se presente en un rango espectral mucho más amplio. El medio que rodea la sección de acoplamiento juega un papel determinante en las propiedades espectrales de los acopladores de fibra óptica. En esta región, la luz es guiada gracias a la diferencia de índices de refracción entre el vidrio y el medio que rodea al acoplador, y es por esto que los cambios en el índice de refracción modifican las propiedades espectrales de los acopladores.

En este capítulo observaremos que el coeficiente de acoplamiento de los acopladores de fibra óptica depende también de la longitud de onda. Esto implica que la cantidad de luz que se acopla entre las fibras depende de la longitud de onda, y el espectro de transmisión presentará bandas con anchos espectrales y separaciones que dependerán de los parámetros de fabricación utilizados. Esto es de interés para implementar resonadores de fibra óptica, pues si se utilizan acopladores como elementos de realimentación en un sistema de fibra láser, las propiedades espectrales del acoplador determinarán el espectro de emisión de esta fuente de luz. Estas características, en conjunto con los efectos del índice de refracción, resultan también útiles para fabricar sensores de fibra óptica láser.

### 3.1 Características espectrales: efectos de la longitud de onda.

El análisis teórico de los acopladores de fibra óptica requiere considerar las variaciones geométricas de la guía de onda en la sección de acoplamiento. Esto contrasta con el análisis de dispositivos de guía de onda plana, en los cuales la geometría y separación de los núcleos se mantiene constante a lo largo de todo el acoplador. Para acopladores de fibra óptica, los parámetros que determinan el coeficiente de acoplamiento incluyen la sección del cuello del acoplador ( $a_{\text{cintura}}$ ), la longitud de elongación ( $L$ ), la longitud inicial de la región de acoplamiento ( $L_{\text{inicial}}$ ), la longitud eficaz de barrido de la antorcha ( $\Delta z_{\text{eficaz}}$ ) y el diámetro inicial de la fibra ( $a_0$ ), (ver figura 3.1).

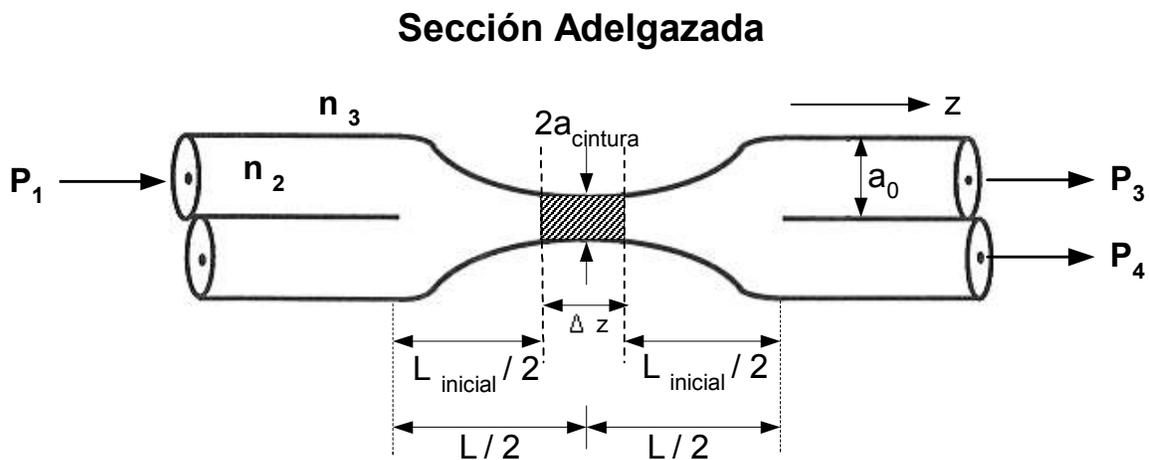


Figura 3.1. Sección del cuello de un acoplador de fibra óptica; el área sombreada representa la zona eficaz de calentamiento.

El análisis de acoplamiento se ha realizado en trabajos previos, y en éstos se considera que las fibras sufren un adelgazamiento adiabático. Con estas consideraciones y utilizando los parámetros antes descritos el coeficiente de acoplamiento queda expresado como:

$$C = \frac{3 \pi \lambda}{32 n_2 a_{\text{cintura}}^2} \frac{(L - L_{\text{inicial}})}{\left(1 + \frac{1}{V}\right)^2} \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda y  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento. El diámetro de la sección de acoplamiento ( $a_{\text{cintura}}$ ) y el número  $V$  se obtienen de la siguiente manera:

$$a_{\text{cintura}} = a_{\text{revestimiento}} \exp\left(\frac{-L}{2} \Delta z_{\text{eficaz}}\right) \quad (2)$$

$$V = \frac{2 \pi a_{\text{cintura}} \sqrt{n_2^2 - n_3^2}}{\lambda}$$

donde  $n_3$  es el índice de refracción del medio externo, que es usualmente aire. De las ecuaciones anteriores podemos observar que el coeficiente de acoplamiento dependerá no sólo del índice de refracción del medio, sino también de la longitud de onda. La potencia óptica a la salida de la región de acoplamiento está dada por:

$$\begin{aligned} P_3 &= P_1 \cos^2 C \\ P_4 &= P_1 \sin^2 C \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $P_1$  es la potencia a la entrada de la fibra 1,  $P_3$  es la potencia a la salida de la fibra 1 y  $P_4$  es la potencia a la salida de la fibra 2.

Para ilustrar la dependencia del acoplamiento con la longitud de onda, la figura 3.2 muestra una gráfica de la potencia contra la longitud de elongación para longitudes de onda de 1.3  $\mu\text{m}$  y 1.55  $\mu\text{m}$  respectivamente, considerando una misma fibra óptica con  $a_{\text{cintura}}=7.9 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.461$ ,  $n_2=1.458$ . Si se observan las flechas de la figura, podemos ver que si detenemos la elongación alrededor de los 25.5 mm, la transferencia de potencia de la fibra 1 a la fibra 2 será del 100% para una longitud de onda de 1.3  $\mu\text{m}$ , mientras que para una longitud de onda de 1.5  $\mu\text{m}$  será de cero. Nótese que esto implica que para longitudes de onda de 1.5  $\mu\text{m}$ , el acoplador tiene más de un ciclo de transferencia de potencia, pero para

esta longitud de elongación, la luz no será acoplada. Por lo tanto, si utilizamos una fuente de luz con ambas longitudes de onda, toda la luz de  $\lambda=1.30 \mu\text{m}$  se irá a la fibra primaria y la luz de  $1.55 \mu\text{m}$  será propagada por la fibra secundaria. Los acopladores que operan de esta manera se conocen como multiplexores por longitud de onda (WDM).

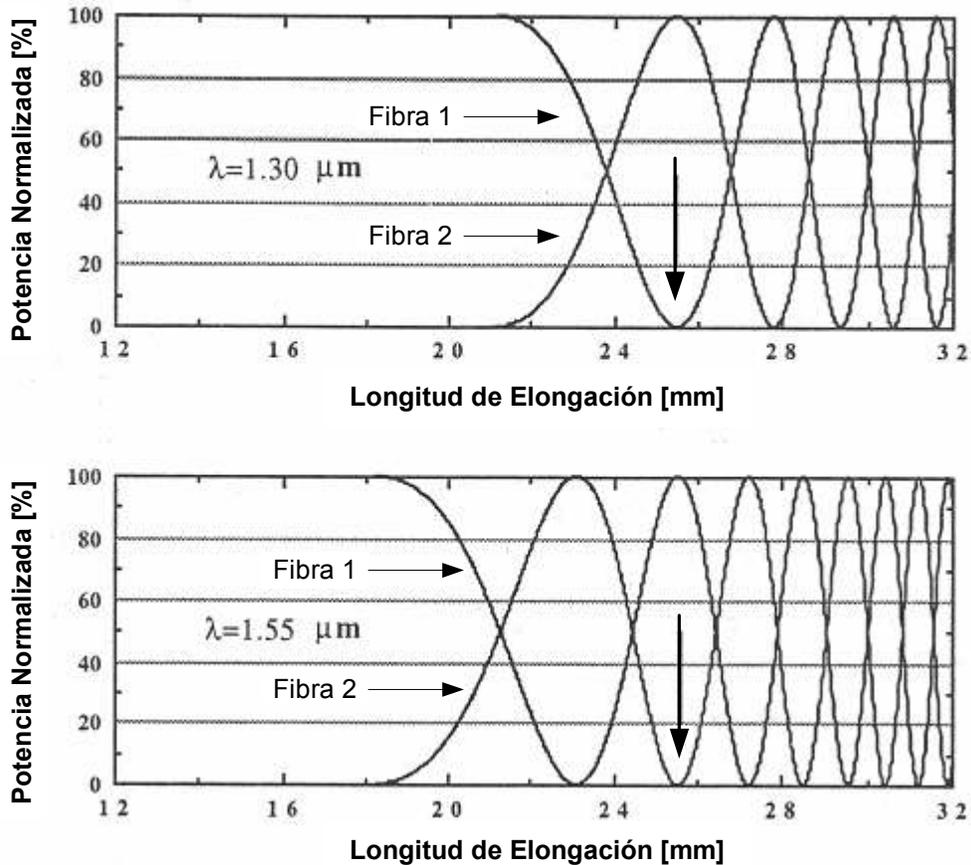


Figura 3.2. Gráfica de potencia normalizada vs. longitud de elongación para  $\lambda=1.30 \mu\text{m}$ ,  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ .

Utilizando estas mismas longitudes de onda en la ecuación (1), y con los mismos parámetros geométricos para la fibra óptica, se puede obtener la gráfica de la figura 3.3, en la que se muestra el coeficiente de acoplamiento contra la longitud de elongación. Se puede observar que el coeficiente de acoplamiento para  $\lambda=1550 \text{ nm}$  siempre es mayor que para  $1300 \text{ nm}$ , lo cual indica que el coeficiente de acoplamiento en estos dispositivos siempre es mayor para longitudes de onda más grandes. Esto también indica que durante el proceso de

fabricación, el acoplamiento de luz comenzará a longitudes de elongación menores para longitudes de onda mayores. Estas variaciones en el coeficiente de acoplamiento generan cambios en la frecuencia de las funciones sinusoidales que describen la potencia de salida en ambas fibras (ver ecuación 3), y es por esto que los detectores registran variaciones sinusoidales de potencia durante el proceso de fabricación [1].

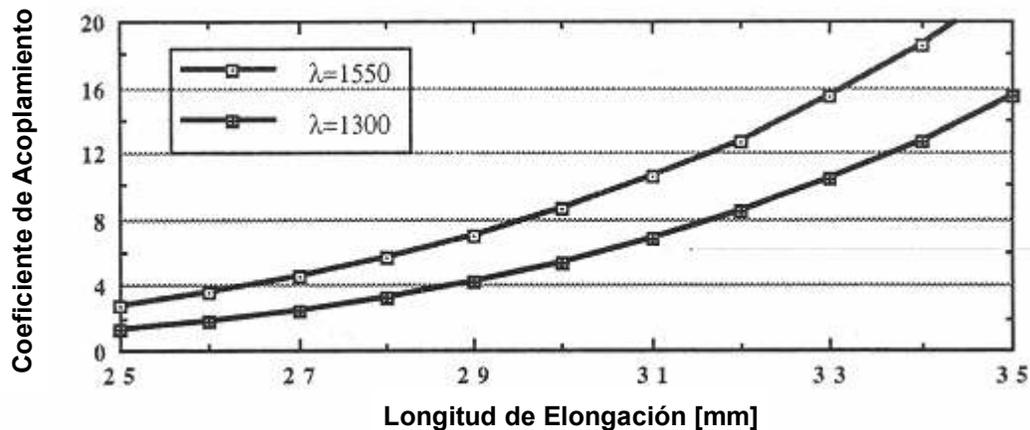


Figura 3.3. Gráfica del coeficiente de acoplamiento vs. longitud de elongación para  $\lambda=1300$  nm y  $\lambda=1550$  nm.

### 3.2 Investigación sobre los efectos del índice de refracción.

Para observar como varía la potencia de salida con respecto al índice de refracción del medio externo en un acoplador, podemos dibujarla de la ecuación 1 variando este parámetro. Utilizando valores de  $L=40$  mm,  $\Delta z_{\text{eficaz}}=6.35$  mm,  $a_{\text{cintura}}=7.9$   $\mu\text{m}$ ,  $n_1=1.461$ ,  $n_2=1.458$ ,  $\lambda=1300$  nm, se obtiene la gráfica de la figura 3.4. Podemos ver que si se utiliza aire como medio externo en el acoplador, la potencia a la salida es baja, en cambio si se trabaja con índices de refracción mayores la potencia de salida aumentará. Este cambio en potencia es debido a la diferencia de índices de refracción entre el medio externo y la región de acoplamiento. La cantidad de luz que sale del dispositivo dependerá de las propiedades del medio externo y, como puede verse en la gráfica, el acoplador

dejará de guiar la luz para índices de refracción cercanos al valor del índice de la fibra óptica (1.458 para una fibra óptica de  $\text{SiO}_2$ ).

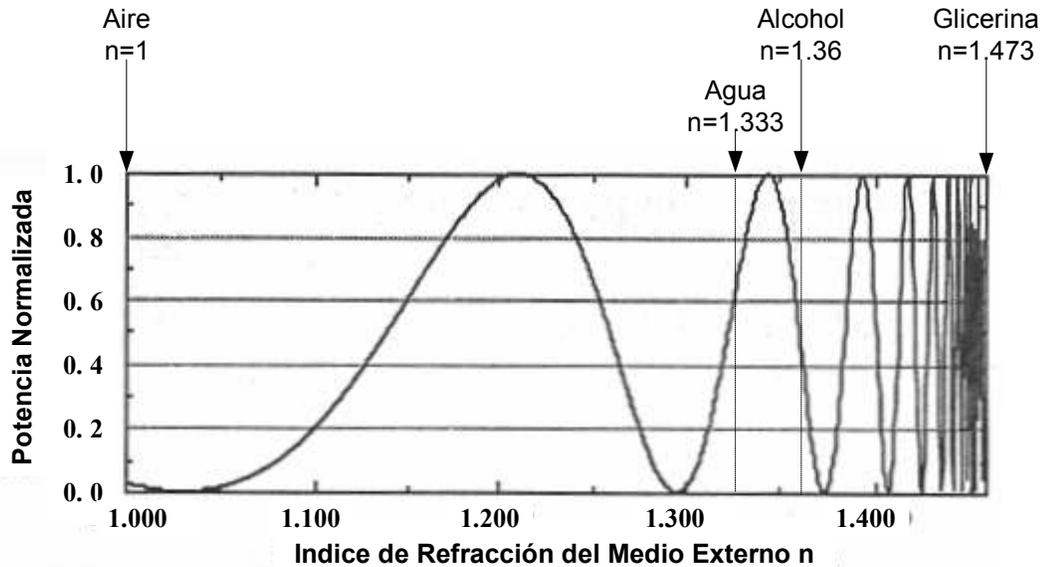


Figura 3.4. Gráfica de potencia contra índice de refracción del medio externo.

Desde punto de vista de aplicaciones de los acopladores, la variación del coeficiente de acoplamiento en función del índice de refracción proporciona también información importante. Por ejemplo, para aplicaciones en sensores, estos dispositivos pueden funcionar para determinar cambios en índice de refracción hasta valores cercanos a 1.458. Como referencia, en la figura se indican los índices de refracción del agua, alcohol y glicerina. Para líquidos como el agua y el alcohol, los acopladores pueden funcionar como sensores con una sensibilidad menor a la que se obtendría si se utilizaran líquidos con índices de refracción cercanos al del  $\text{SiO}_2$ . Sin embargo, esto no considera procesos posteriores de fabricación en donde pueden utilizarse materiales para recubrir el acoplador y aumentar el índice del medio externo. Nótese también que cuando el acoplador se coloca en un medio con índice diferente al del aire, la potencia de salida puede también depender del volumen del medio en el que se encuentre sumergido, pues puede también formarse otra guía de onda por la interfaz medio externo-aire [1].

Para investigar la sensibilidad a los cambios en el medio externo de los distintos acopladores que se fabricaron, se depositó una gota de alcohol etílico en la región de acoplamiento. Las variaciones en los espectros de transmisión durante la evaporación del alcohol se observaron con el analizador de espectros ópticos (OSA) como se muestra en la figura 3.5. Estas mediciones permiten observar de manera dinámica como cambia el espectro de transmisión a medida que el alcohol se evapora. Las figuras 3.6 y 3.7 son los espectros más representativos para acopladores de dos y tres lóbulos durante el proceso de evaporación de la gota de alcohol etílico.

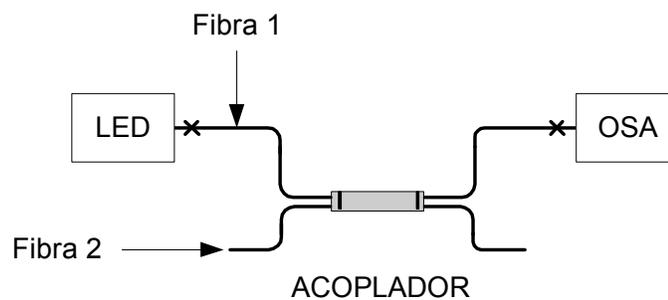
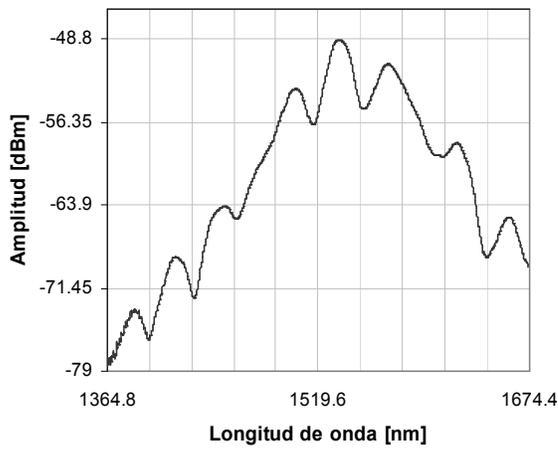
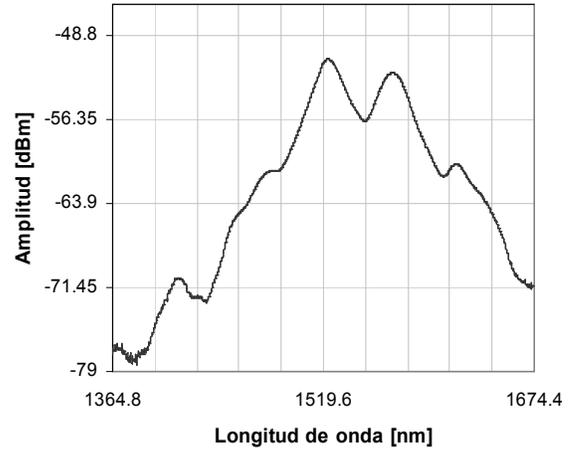


Figura 3.5. Configuración para obtener cambios en los espectros de transmisión.

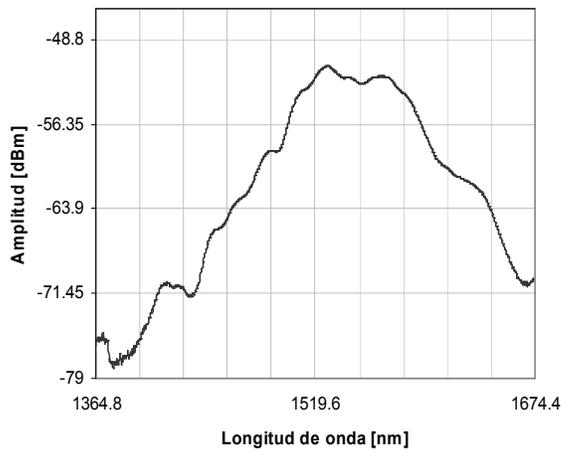
De las gráficas del acoplador de dos lóbulos (figura 3.6) podemos observar que el espectro original antes de colocar una gota de alcohol etílico (a) presenta 8 bandas espectrales dentro de todo el espectro que abarca de los 1364.8 nm a los 1674.2 nm, teniendo una longitud de onda central en 1534.9 nm. Al colocar la gota de alcohol (b) se observan dentro del mismo rango espectral las variaciones de potencia de las bandas espectrales; las bandas espectrales centrales se conservan aunque se desplazan hacia longitudes de onda menores. Durante el proceso de evaporación se logra observar que desaparecen algunas de las longitudes de onda (c), para reaparecer posteriormente hasta llegar a obtener nuevamente el espectro original (d, e, f). Nótese que el último espectro (f) está recorrido ligeramente hacia la derecha (aproximadamente 15.4 nm), indicando que la región de acoplamiento retiene residuos de alcohol que contaminan la guía de onda.



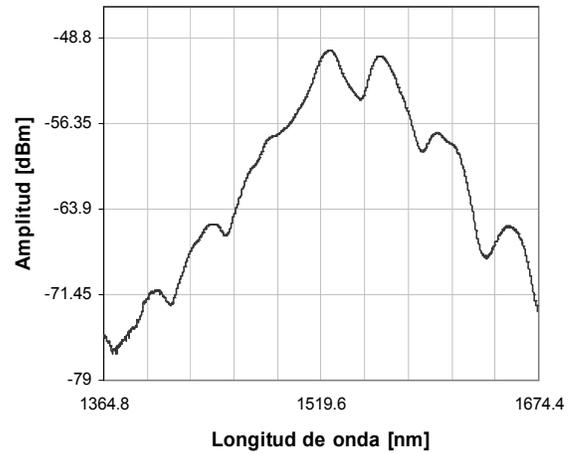
(a)



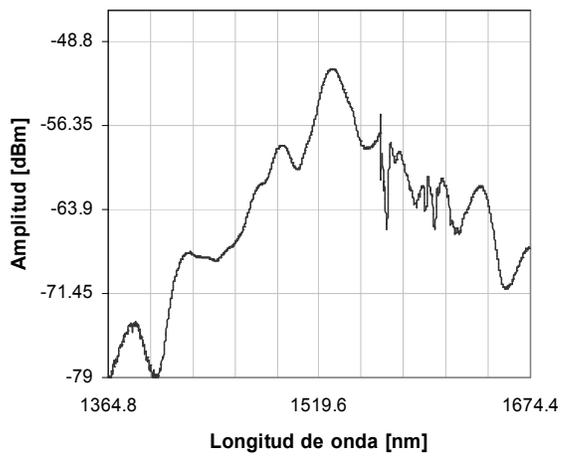
(b)



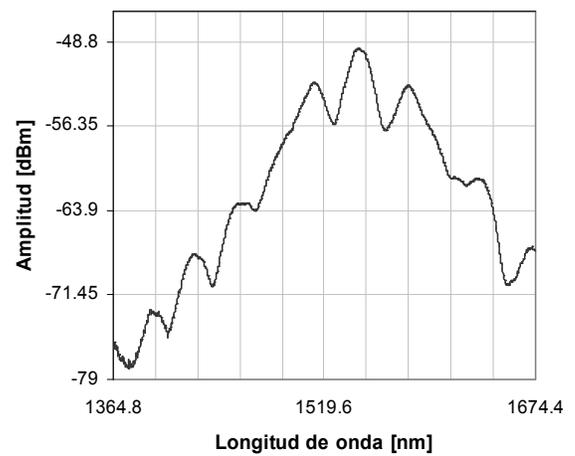
(c)



(d)



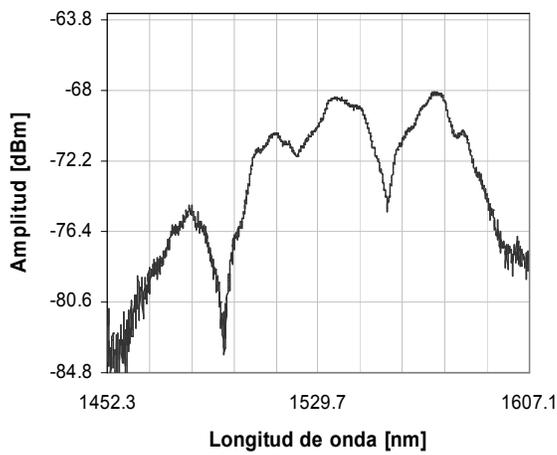
(e)



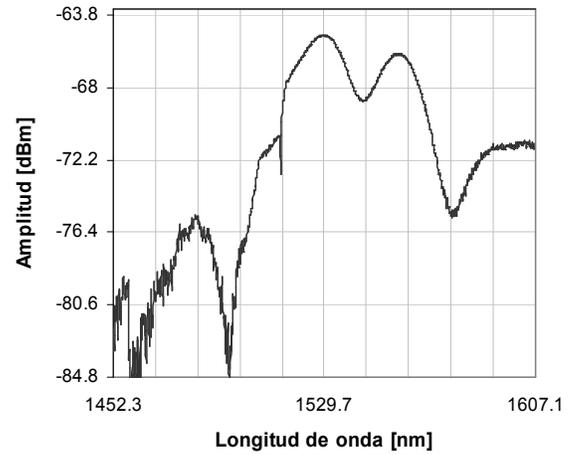
(f)

Figura 3.6. Espectros obtenidos para un acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos descrito en la figura 2.11 durante el proceso de evaporación del medio externo (alcohol etílico).

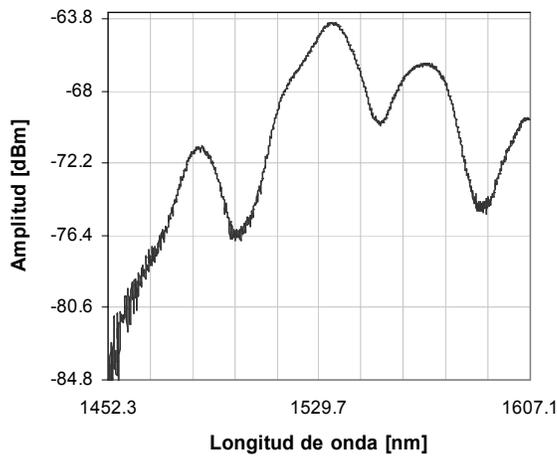
De las gráficas del acoplador de tres lóbulos (figura 3.7) podemos observar el espectro original antes de colocar una gota de alcohol etílico (a): éste presenta cuatro bandas espectrales dentro de todo el espectro que abarca de los 1452.3 nm a los 1607.0 nm, teniendo una longitud de onda central en 1529.7 nm. Comparando este rango espectral con el acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos podemos observar que ahora se obtiene un rango de transmisión más pequeño debido a la mayor selectividad espectral para dispositivos con más ciclos de transferencia de potencia. Al colocar la gota de alcohol (b) se observan dentro del rango espectral de transmisión del acoplador las variaciones de potencia para las distintas longitudes de onda del espectro original. Puede observarse una mejor definición en las longitudes de onda centrales, pues el cambio en el índice de 1 a 1.36 (alcohol) disminuye la apertura numérica de la guía de onda y la luz queda mejor confinada. Durante el proceso de evaporación (c, d) se sigue observando mayor definición de las longitudes de onda centrales y a la mitad del proceso de evaporación (e) aparecen más bandas de transmisión en las longitudes de onda centrales. Al final del proceso (f) se observan cuatro bandas espectrales bien definidas. Al igual que en el caso anterior, el espectro de transmisión obtenido al final del experimento no es el mismo registrado en el inicio, y se debe también a los cambios que la guía de onda sufre durante este proceso. Nótese que los cambios espectrales son más marcados en este acoplador, lo cual es indicativo de una mayor sensibilidad a cambios en el índice del medio externo.



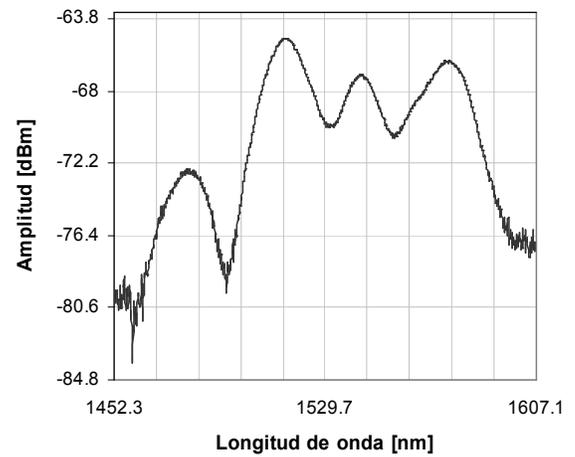
(a)



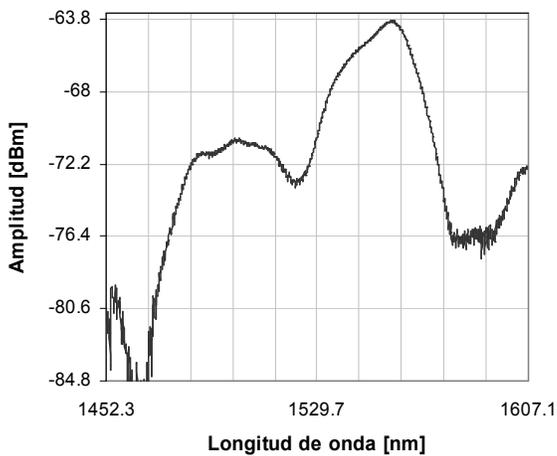
(b)



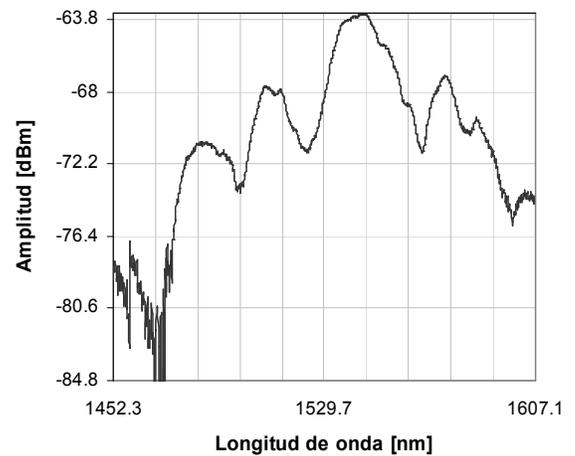
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.7. Espectros obtenidos para un acoplador sobre-acoplado de tres lóbulos descrito en la figura 2.12 utilizando un LED como fuente de luz y colocando una gota de alcohol.

El cambio en las características espectrales de los acopladores concuerda con el comportamiento descrito por las ecuaciones mostradas al inicio del capítulo. La potencia de salida de un acoplador es función del índice de refracción, del revestimiento de las fibras ópticas y del medio a su alrededor. Podemos hacer notar también que la sección adelgazada del acoplador, al quedar expuesta al medio exterior, está desprotegida de vibraciones, temperatura y otros parámetros externos. Como se mencionó anteriormente, ésta es una característica importante para aplicaciones en sensores de fibra óptica.

En la figura 3.8 se ilustra el cambio en la potencia con respecto al tiempo normalizado a la salida de la fibra 1 utilizando los acopladores de dos y tres lóbulos para un mismo cambio en índice de refracción (de 1 a 1.36). La potencia a la salida de la fibra se registró en los tiempos indicados en la gráfica y corresponde a la potencia registrada en los espectros mostrados en las figuras 3.6 y 3.7. Se puede observar claramente que la potencia a la salida del acoplador sufre mayores cambios en el dispositivo de tres lóbulos (de 1 a 2.031). Durante todo el proceso de evaporación la potencia a la salida del acoplador de tres lóbulos presenta menores cambios después del tiempo 1 y en el tiempo 5 no se acerca a la potencia de salida original (sin alcohol). En cambio en el acoplador de dos lóbulos, la potencia a la salida de la fibra sufre menores cambios (de 1 a 0.855). Durante todo el proceso de evaporación la potencia a la salida del acoplador presenta mayores cambios después de haber pasado el tiempo 1 y al tiempo 5 se acerca a la potencia de salida original (sin alcohol). Estas observaciones indican que el acoplador de tres lóbulos es más sensible a los cambios en el medio externo que el de dos lóbulos, pues no se logra obtener la potencia registrada al inicio de los experimentos. El incremento en la potencia normalizada al concluir el proceso de evaporación indica que el acoplador de tres lóbulos ha sufrido cambios más drásticos en la región de acoplamiento. Esto significa que los residuos de alcohol afectan más notoriamente el coeficiente de acoplamiento y las condiciones de confinamiento de luz de la guía de onda que se forma en la región de acoplamiento.

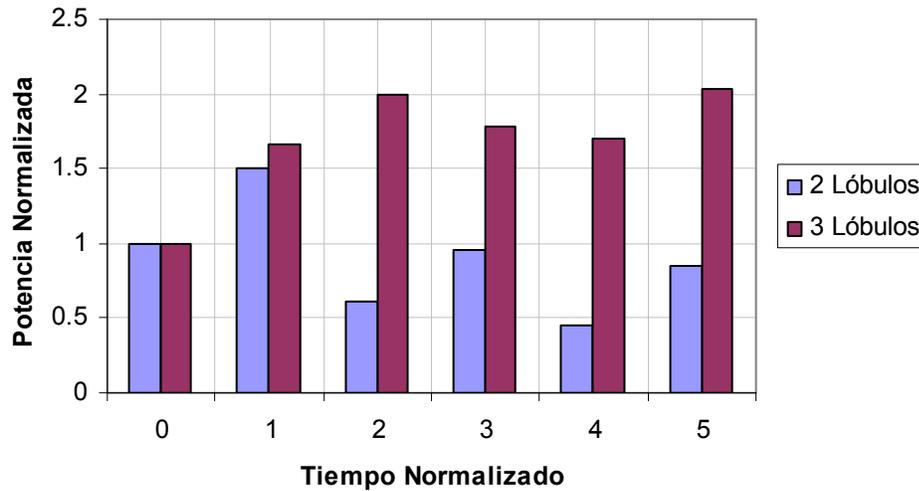


Figura 3.8. Potencia normalizada a la salida de una de las fibras de dos acopladores con diferente número de lóbulos, durante el proceso de evaporación del alcohol.

### 3.3 Acopladores en resonadores de anillo y resonadores Fabry-Perot.

El estudio de resonadores de fibra óptica es muy importante para determinar las características fundamentales de la luz láser que se puede generar con estos dispositivos. El desarrollo de sistemas láser basados en fibras se enfoca al uso de resonadores de fibra óptica, sobre todo por su tamaño compacto. Un resonador óptico es un dispositivo que almacena energía y confina luz a ciertas frecuencias de resonancia. En la figura 3.9 se ilustra un resonador de anillo de fibra óptica junto con su equivalente implementado con dispositivos ópticos convencionales. Como puede verse en la figura, el resonador en anillo se obtiene al unir dos de los brazos de un acoplador: la luz se propaga siguiendo una trayectoria cerrada entrando por uno de los brazos pasando por la sección de acoplamiento y saliendo por el otro brazo. Los dos brazos (fibras) del acoplador pueden acoplarse a una o más guías de onda. Las propiedades espectrales del resonador están determinadas por el coeficiente de acoplamiento del acoplador, ya que éste establece las longitudes de onda que podrán propagarse dentro del anillo.

La configuración de anillo de fibras ópticas láser permite que el haz de luz se transmita en dos direcciones dentro del anillo, con lo que se genera oscilación de varios modos y distorsión en la ganancia de la fibra. Generalmente, estas características pueden modificarse introduciendo un aislador óptico dentro del anillo, el cual obliga a una operación unidireccional. Los resonadores en anillo fabricados con dispositivos de fibra óptica han sido de gran interés sobre todo para el desarrollo de giroscopios de tamaño compacto. Asimismo, se ha comenzado a estudiar su empleo para el desarrollo de sensores polarimétricos. Las características de los acopladores utilizados en estos sistemas láser son entonces fundamentales para diversas aplicaciones [3][5].

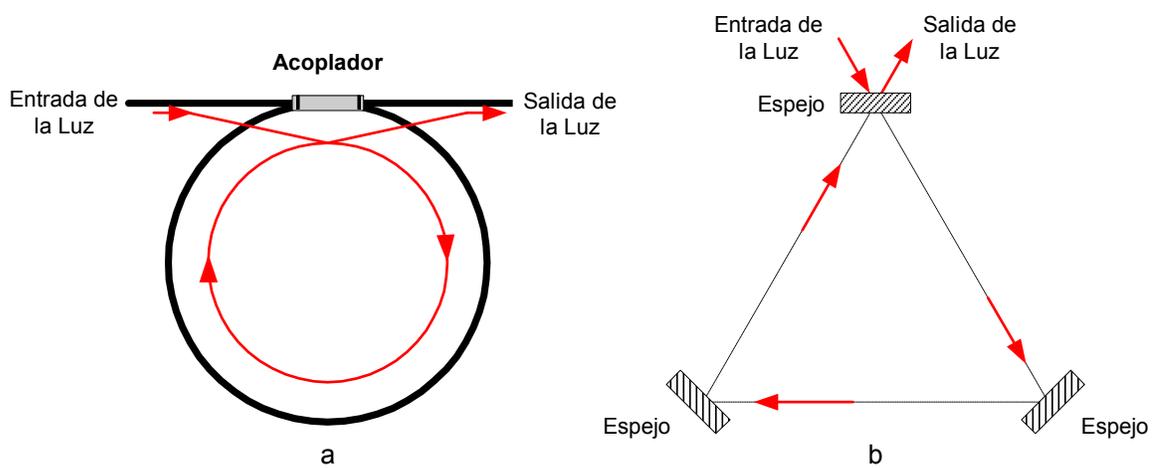


Figura 3.9. a) Resonador en anillo de fibra óptica; b) dispositivo equivalente utilizando elementos de óptica convencionales.

En el siguiente capítulo se mostrará como las propiedades espectrales de los acopladores fabricados determinan las longitudes de onda de operación de una fibra láser en una configuración de anillo. Veremos también como los cambios en el índice de refracción del medio externo modifican las características espectrales de la emisión láser generada con estos arreglos.