

## 2.- ANTECEDENTES.

### 2.1.-GENERALIDADES SOBRE ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA.

Los acopladores de fibra óptica permiten dividir o combinar las señales de luz entre dos o más fibras. Se utilizan típicamente como divisores de potencia para una longitud de onda determinada, aunque pueden también fabricarse dispositivos capaces de separar señales en función de la longitud de onda manteniendo la potencia constante. Actualmente, existen tres técnicas para la fabricación de acopladores de fibra óptica monomodo y multimodo: grabado, pulido y fusión de 2 o más fibras [1]. A pesar de que las primeras dos técnicas permiten obtener dispositivos con alta selectividad, los procesos de fabricación no pueden ser automatizados, pues involucran una elaborada preparación de las fibras ópticas que incluye la remoción de parte del revestimiento por medios químicos o mecánicos. Esto hace que se obtengan dispositivos con características poco repetibles, tiempos de fabricación largos y, por lo tanto, costos elevados de producción. Todos estos inconvenientes se evitan utilizando la técnica de fusión.

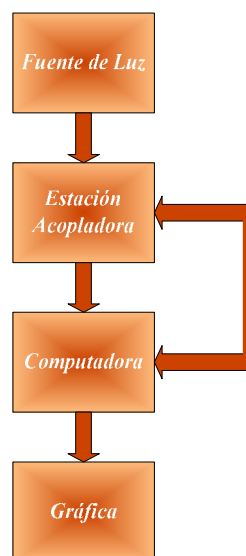


Figura 1. Proceso de fabricación para acopladores fusionados de 3dB.

Los acopladores fabricados por fusión se obtienen al fundir y adelgazar dos o más fibras al mismo tiempo. La idea básica de esta técnica de fabricación es unir longitudinalmente dos fibras ópticas en una pequeña región mediante el calentamiento y jalado de las fibras. Comúnmente, se utiliza un sistema computarizado conocido como estación para acopladores y con él se pueden controlar los parámetros involucrados en todo el proceso de fabricación. El funcionamiento de una estación acopladora puede ilustrarse mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 1. Las dos fibras ópticas que se fusionarán se colocan en la máquina y una de ellas se conecta a una fuente luz. En el extremo opuesto, las dos fibras ópticas se conectan a fotodetectores que miden la potencia óptica durante el proceso de fabricación. El calentamiento, fusión y elongación de ambas fibras se logra mediante una flama de hidrógeno y motores de pasos. El flujo de gas y la velocidad de elongación de ambas fibras se controlan mediante un programa de computadora que registra la transferencia de potencia entre ambas fibras y puede detenerse en cualquier momento.

En los acopladores fusionados las fibras se adelgazan y se funden en una pequeña sección llamada cuello, cuyas dimensiones son reducidas a tal punto que puede funcionar como un nuevo núcleo para transportar la luz. De esta manera, como se puede apreciar en la figura 2, el cuello del acoplador funciona como una nueva guía de onda en la que el medio a su alrededor (usualmente aire) es el nuevo revestimiento. Las características típicas de potencia en función de longitud de elongación para un acoplador de dos fibras ópticas de entrada y salida (2x2) se muestran en la figura 3.

El funcionamiento de los acopladores puede explicarse de manera simple considerando los modos de propagación en una fibra óptica. Cuando la luz que se propaga en una de las fibras llega a la región de acoplamiento, se presentan fenómenos de interferencia y de acoplamiento entre los modos de propagación disponibles en el cuello del acoplador [2]. Esto resulta en un comportamiento oscilatorio de la potencia a la salida del dispositivo, cuyas características dependen de la elongación, longitud de onda e índice de refracción del medio que rodea al acoplador.

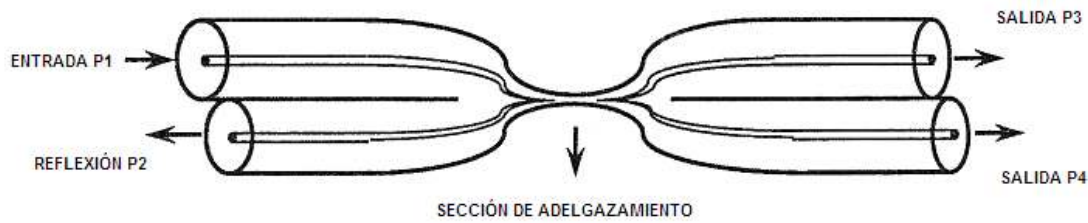


Figura 2. Representación esquemática de un acoplador fusionado de 2x2. La luz se acopla de una fibra a la otra en la sección del cuello, formada al fusionar las dos fibras.

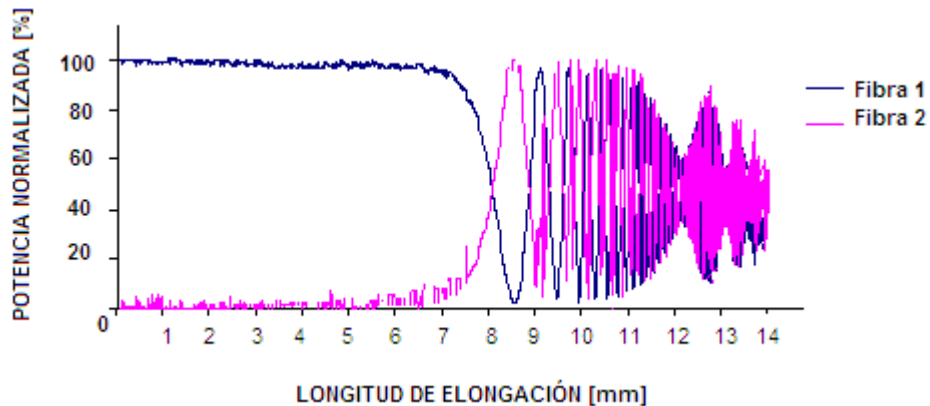


Figura 3 Ciclos de transferencia de energía en un acoplador fusionado. La primera intersección de las curvas representa el punto de 3 dB. Esta curva fue obtenida con la estación de trabajo OC-2010.

Por las características mencionadas anteriormente, los acopladores fabricados por fusión pueden ser utilizados como filtros, multiplexores de longitud de onda, atenuadores, y sensores. El proceso de fabricación es evidentemente muy importante, pues la geometría de la región de acoplamiento dependerá de la velocidad de elongación, la temperatura a la cual se someten las fibras, y la longitud total de elongación alcanzada en todo el proceso. El tipo de acoplador más común es el de 3 dB, en el que el total de la potencia óptica que entra al dispositivo se divide en partes iguales en las fibras de salida. En este caso, el proceso de fabricación se detiene cuando la transferencia de potencia de una fibra a otra es de 50 % (ver figura 3).

## 2.2 ACOPLAMIENTO ENTRE GUÍAS DE ONDA.

Los acopladores de guías de onda son dispositivos fundamentales para un gran número de aplicaciones, pues con ellos se pueden construir divisores de haz, moduladores y

otros dispositivos. En general, el acoplamiento de luz entre guías de onda está basado en aproximar los núcleos de las dos guías lo suficiente como para que exista transferencia de potencia óptica, tal y como se ilustra en la figura 4.

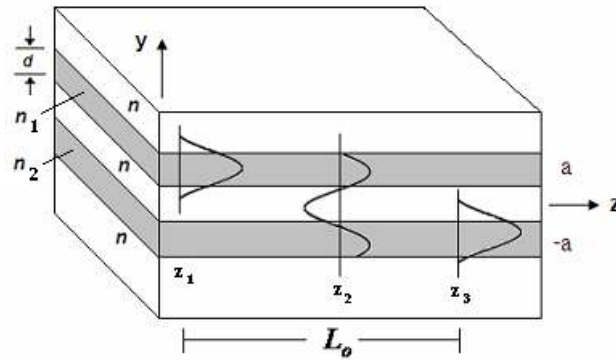


Figura 4 Acoplamiento entre guías de onda [3].

El análisis teórico de la interacción de las ondas entre guías cercanas puede hacerse con las ecuaciones de modos acoplados [3]. Estas ecuaciones relacionan las amplitudes de los modos que se propagan en las guías de onda y su interacción se describe mediante el coeficiente de acoplamiento. Utilizando esta descripción, la potencia óptica en cada una de las guías puede expresarse como:

$$P_1(z) = P_1(0) \left( \cos^2 \gamma z + \left( \frac{\Delta\beta}{2\gamma} \right)^2 \sin^2 \gamma z \right)$$

$$P_2(z) = P_1(0) \frac{|C_{12}|^2}{\gamma^2} \sin^2 \gamma z$$

Donde  $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$  es la diferencia de fase por unidad de longitud y  $C_{ij}$  son los coeficientes de acoplamiento. De esta forma, podemos ver que la potencia se intercambia de manera periódica entre las guías de onda. El período es  $\frac{2\pi}{\gamma}$ , además, por conservación de energía se requiere que  $C_{21} = C_{12} = C$ .

Los coeficientes de acoplamiento dependen de la geometría y del índice de refracción, explícitamente:

$$C_{21} = \frac{1}{2}(n_2^2 - n^2) \frac{k_0^2}{\beta_1} \int_a^{a+d} u_1(y)u_2(y)dy$$

$$C_{12} = \frac{1}{2}(n_1^2 - n^2) \frac{k_0^2}{\beta_2} \int_{-a-d}^{-a} u_2(y)u_1(y)dy$$

Un caso particular que se usa mucho para propósitos prácticos es cuando las guías de onda son exactamente iguales, esto es:  $n_1 = n_2$ ,  $\beta_1 = \beta_2$  y  $\Delta\beta = 0$ . En este caso, las dos ondas guiadas están igualadas en fase y las soluciones se simplifican a:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2 Cz$$

$$P_2(z) = P_1(0) \sin^2 Cz$$

Nótese que en este caso la transferencia de potencia puede ser total, por ejemplo, toda la potencia óptica guiada en uno de los núcleos puede transferirse a la otra guía de onda. El resultado de esto es que podemos hacer un dispositivo para acoplar una cantidad de potencia cualquiera de una guía de onda a otra: por ejemplo, para una longitud:

$$z = L_0 = \frac{\pi}{2C}$$

se presenta la transferencia total de potencia de una guía a otra. Similarmente, a una distancia  $z = \frac{L_0}{2}$  la transferencia es del 50% (acoplador de 3 dB) [3], como ya se había mencionado anteriormente (ver figura 5).

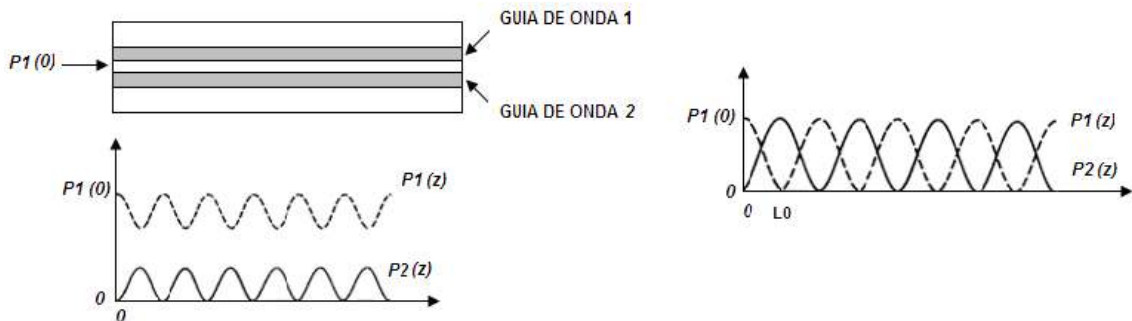


Fig. 5 Acoplamiento entre guías de onda planas: la transferencia de potencia entre ambas guías ocurre de manera periódica [3].

Tomando como base el funcionamiento de los acopladores de guías de ondas planas (figura 5), podemos observar que el acoplador de fibra óptica presenta características diferentes (figura 3). Si bien es cierto que ambas gráficas tienen el mismo comportamiento inicial, la transferencia de potencia en el acoplador de fibra óptica cambia su periodicidad a medida que transcurre el proceso de elongación. Esto se debe a que las fibras se siguen jalando y por lo tanto haciéndose más delgadas, lo cual trae como consecuencia que la periodicidad de la transferencia de potencia no se mantenga constante. El modelado matemático de acopladores de fibra óptica, es mucho más complicado, pues involucra considerar el cambio de geometría durante el proceso de fabricación [2]. Sin embargo, el comportamiento general y el principio de operación de los acopladores puede entenderse bien utilizando el análisis de acoplamiento de energía entre guías de onda planas.

### **2.3.-ADELGAZAMIENTO DE FIBRAS ÓPTICAS.**

Cuando una pequeña sección de una fibra óptica se calienta y se elonga de manera controlada, es posible adelgazar la fibra y que ésta conserve sus propiedades de guía de ondas. El adelgazamiento de la fibra óptica se lleva a cabo mediante una serie de procesos que comprenden desde la introducción de la luz a la fibra y la fijación a la estación del trabajo, hasta el monitoreo de la potencia de salida de la fibra adelgazada y el encapsulado del producto final. La fibra también es sometida a un calentamiento gradual, a un estirado controlado a velocidad de elongación constante y a temperatura controlada.

En la práctica, las fibras adelgazadas pueden ser utilizadas en dispositivos tales como filtros y sensores. Son útiles también para ayudarnos en la comprensión del adelgazamiento por fusión utilizado para fabricar los acopladores, pues los procesos que se siguen en ambos casos son casi idénticos. Cuando la fibra óptica es adelgazada, el núcleo en la región del cuello no juega más un papel significativo en la conducción de la luz. Al igual que en los acopladores fusionados, el vidrio que queda después de adelgazar la fibra desempeña el papel de núcleo y el medio que lo rodea el de revestimiento (ver figura 6). En algunos casos, para elongaciones lo suficientemente grandes, es posible obtener comportamientos oscilatorios de potencia similares a los que se observan en acopladores.

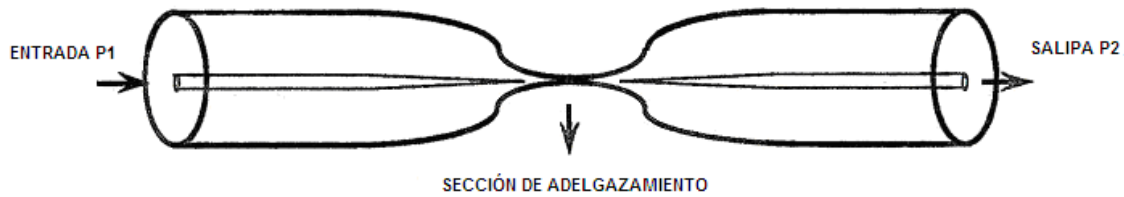


Figura 6. Representación esquemática de una sola fibra óptica adelgazada.

El estudio experimental y teórico sobre fibras elongadas ha permitido determinar que si el declive del adelgazamiento es suave (llamado también proceso adiabático), entonces, después de que la luz viaja por la sección adelgazada, ésta es casi totalmente recapturada por el núcleo original de la fibra [2]. Esto implica que, a pesar de la elongación y del cambio en la estructura de la guía de onda, las pérdidas que experimentará la luz al pasar por estos dispositivos pueden llegar a ser casi nulas. La elongación adiabática en los acopladores permite obtener dispositivos con pérdidas mínimas, garantizando que la única transferencia de potencia se lleve a cabo entre las fibras ópticas y no hacia el medio exterior. Como veremos más adelante, la obtención de un proceso adiabático requiere de ajustes en los parámetros de elongación de las fibras ópticas.

#### **2.4.-ACOPLADORES FUSIONADOS SOBRE-ACOPLADOS.**

Como se mencionó anteriormente, los acopladores fusionados son fabricados colocando dos fibras en contacto, calentándolas y estirándolas hasta que ambas forman una sola estructura en la región de acoplamiento. El monitoreo de la potencia en cada una de las fibras permite determinar el momento en el que se llega al punto de 3 dB, o bien, el punto de transferencia completa de potencia entre una fibra y otra. Si el proceso continúa más allá de este punto, la potencia óptica que viaja ahora en la segunda fibra vuelve a acoplarse a la primera fibra óptica hasta llegar a las condiciones bajo las cuales se inició el proceso. Esto ocurre de manera periódica, de forma muy similar a como se observa en guías de onda planas. Sin embargo, la sección transversal de las fibras no se mantiene constante durante este proceso de elongación, lo que afecta la periodicidad del fenómeno de transferencia de potencia.

Los acopladores que presentan varios ciclos de transferencia de potencia entre las fibras se conocen como acopladores sobre-acoplados. Si el control del proceso de fabricación es adecuado, es relativamente sencillo jalar las fibras más allá del punto de los 3 dB manteniendo las pérdidas lo suficientemente bajas durante muchos ciclos de acoplamiento. Estos acopladores sobre-acoplados pueden fabricarse utilizando una técnica de barrido de flama, en la que como su nombre lo indica, se requiere barrer la flama de manera simultánea al proceso de elongación [2].

Las características de transferencia de potencia en función de la elongación para un acoplador sobre-acoplado se muestran en la figura 3. En ésta pueden verse claramente los diferentes ciclos de transferencia alcanzados al continuar jalando las fibras ópticas más allá del punto de 3 dB. Como puede verse, la transferencia de potencia se alcanza más rápidamente a medida que la región de acoplamiento se hace más delgada. Esto se debe a la mayor interacción entre los modos de la estructura, sobre todo por la reducción en la sección transversal de la región de acoplamiento. Otro punto importante puede notarse si consideramos que, en los dispositivos con sobre-acoplamiento, la transferencia de potencia completa puede lograrse con elongaciones extremadamente pequeñas. Si recordamos que estas características de transferencia de potencia dependen del medio que rodea a la región de acoplamiento, es fácil entender que cualquier cambio en el medio generará también un cambio en las características del acoplador. Estas características hacen a los acopladores sobre-acoplados muy atractivos para el desarrollo de sensores de índice de refracción: la parte sensora es justamente la región de acoplamiento, en donde puede observarse el cambio de índice en el medio. La sensibilidad de estos dispositivos puede ajustarse, pues mientras más ciclos de transferencia se alcancen, será más fácil detectar cambios pequeños en el índice del medio.

Las propiedades espectrales del acoplador sobre-acoplado son también interesantes para varias aplicaciones [4]. Como se mencionó anteriormente, la transferencia de potencia en los acopladores comunes puede alcanzarse tanto a una longitud de onda determinada como para anchos espectrales amplios. En contraste, los acopladores sobre-acoplados pueden generar espectros de transmisión similares a los de filtros con múltiples bandas de pasos. El incremento en el número de ciclos aumenta el número de longitudes de onda que



pueden separarse entre ambas fibras ópticas, permitiendo así implementar multiplexores por longitud de onda. Estas características se ilustrarán en secciones posteriores, en donde se analiza el desempeño de la máquina utilizada y los acopladores fabricados con ella.