

Capítulo 1

La Fibra Óptica y sus Aplicaciones: Estado del Arte

1.1 La Fibra Óptica y las Telecomunicaciones

Hoy en día los sistemas de telecomunicaciones forman parte de una red global que brinda múltiples servicios a millones de usuarios en todo el mundo. El desarrollo de múltiples sistemas de comunicaciones basados principalmente en ondas de microondas y tecnología de fibra óptica han permitido un amplio crecimiento en los servicios de telefonía fija, telefonía móvil celular, internet, banda ancha fija y banda ancha móvil principalmente. En esta sección se dará un panorama general de la importancia de la fibra óptica como medio de transmisión en los sistemas actuales de telecomunicaciones así como de las aplicaciones en el área de sensores. También se abordará la situación actual de las telecomunicaciones referentes a los servicios e indicadores establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

1.1.1 La Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión dieléctrico hecha de plástico, vidrio o cuarzo fundido (SiO_2), que emplea el fenómeno de Reflexión Total Interna entre dos medios con diferente índice de refracción para confinar y transmitir la luz como señal portadora de información. Se compone de un núcleo hecho de cuarzo fundido, vidrio o plástico con índice de refracción n_1 y un revestimiento del mismo material que envuelve al núcleo con un índice de refracción n_2 . Para que

exista el fenómeno de Reflexión Total Interna el núcleo debe ser más denso ópticamente que el revestimiento, es decir, $n_1 > n_2$ y el ángulo de incidencia $\theta_i \geq \theta_c$ [1]. Figura 1.1.

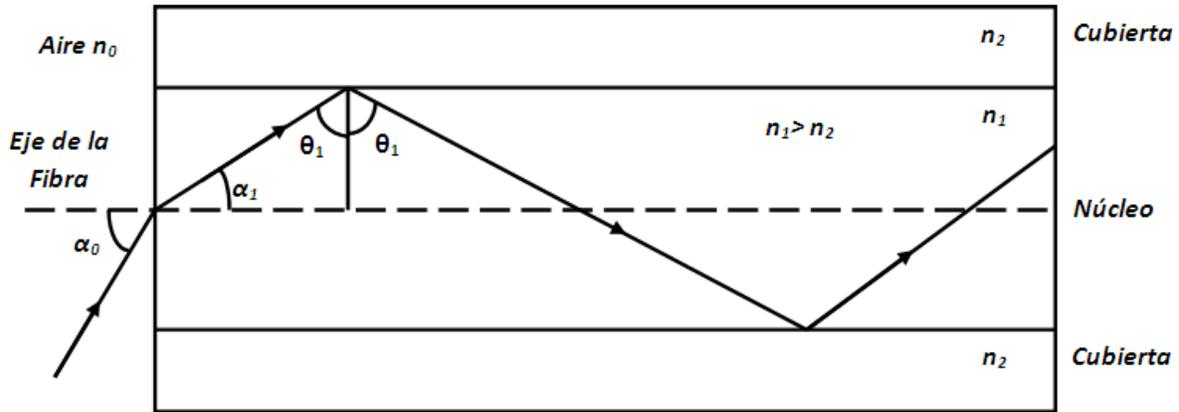


Figura 1.1 Corte longitudinal de la fibra óptica [1]

De manera general existen 3 distintos tipos de fibras ópticas de acuerdo a los modos que se propagan a lo largo del núcleo de la fibra óptica y a la característica del índice de refracción del núcleo: 1.Fibra monomodo de índice escalonado, 2.Fibra multimodo de índice escalonado y 3.Fibra multimodo de índice gradual. [1]

La frecuencia de corte normalizada (V) es un parámetro que agrupa algunos otros parámetros importantes de la fibra óptica como: el radio del núcleo (a), apertura numérica (AN) y la longitud de onda (λ). De acuerdo a la teoría modal aplicada a una fibra de índice escalonado se tiene que una fibra puede ser utilizada en régimen monomodo o multimodo de acuerdo a estos parámetros: [2]

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(AN)$$

$$V \leq 2.405 \text{ régimen monomodo}$$

$$V > 2.405 \text{ régimen multimodo}$$

La importancia de la fibra óptica como medio de transmisión recae en el hecho de que representa una alternativa de mayor potencial respecto a las comunicaciones por cables conductores o microondas. Sus principales características son básicamente que posee un gran ancho de banda de 0.1–1000GHz, bajo coeficiente de atenuación 0.15–5dB/Km, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, peso ligero alrededor de 3Kg/Km, y la capacidad de transmitir datos a longitudes de 40Km con un solo cable. [3]

Además gracias al gran avance tecnológico, se han desarrollado técnicas e instrumentos que permiten explotar de manera eficiente las características de la fibra óptica. Las fuentes de transmisión como los LED's y los láseres principalmente, los sistemas de recepción como los fotodiodos y fototransistores, los amplificadores ópticos, los moduladores, los codificadores, los filtros y las técnicas de multiplexación como TDM, WDM y DWDM han propiciado el desarrollo y explotación del sector de las telecomunicaciones de manera tal que es posible tener una gran capacidad de transmisión por un solo cable de fibra óptica. [4,5]

1.1.2 Situación actual de las telecomunicaciones

Actualmente la utilización de los servicios de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), como la telefonía móvil e internet, han ido aumentando en todo el mundo. Las estimaciones muestran que, a finales de 2009, había 4 600 millones de abonados al servicio móvil celular, lo que corresponde al 67% de la población mundial, figura 1.2. En ese mismo año, la tasa de penetración móvil celular en los países en desarrollo alcanzó un 57%, sin embargo este porcentaje aún está muy por debajo de la media de los países desarrollados, donde la penetración supera el 100% [6]. En el caso de México el número de abonados al servicio móvil celular es superado por países como Perú, Brasil, Chile, Venezuela, Uruguay y Argentina en el área de Latinoamérica. [7]

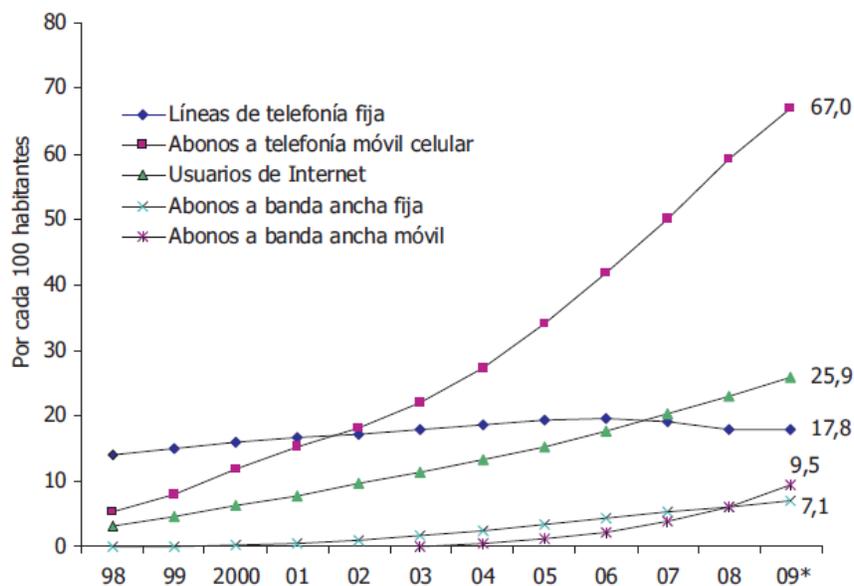


Figura 1.2. Crecimiento de los principales servicios de telecomunicaciones en todo el mundo [6]

Así mismo, la utilización de internet ha seguido creciendo aunque a un ritmo más lento. Se considera que en el 2009 el 26% de la población mundial (es decir, 1 700 millones de personas) utilizaban internet. En los países desarrollados, el porcentaje sigue siendo muy superior al de los países en desarrollo, donde aún cuatro de cada cinco personas carecen de acceso. La tasa de penetración de internet en los países desarrollados llegó al 64% a finales de 2009, mientras que en los países en desarrollo apenas llega al 18%. Así mismo, la tasa de penetración a la banda ancha es del 23% de habitantes en los países desarrollados y sólo del 4% en los países en desarrollo (el dos por ciento, si se excluye a China) [6]. En el caso de México el servicio de internet de banda ancha es superado por Uruguay, Argentina y Chile. [8]

Por otro lado el sector de la banda ancha móvil está evolucionando de manera más prometedora. La introducción del acceso a internet móvil de alta velocidad en cada vez más países aumentará rápidamente el número de usuarios de internet, sobre todo en los países en desarrollo. De hecho, el número de abonados a la banda ancha móvil ha ido creciendo paulatinamente y en 2008 superó a los de banda ancha fija. Se estima que a finales de 2009 había 640 millones de abonados a banda ancha móvil y 490 millones a banda ancha fija. [6]

Dentro de las regiones, Europa es la primera región del mundo en infraestructura y servicios de TIC. La tasa de penetración móvil celular supera el 100% en la mayoría de los países europeos y cerca de dos de cada tres usuarios europeos utiliza internet [6]. En segundo lugar se encuentra la región de América, sin embargo su promedio está dominado únicamente por los Estados Unidos y Canadá. [9]

En cuanto a precios entre 2008 y 2009, el costo de los servicios de las TIC se ha reducido en casi todos los 161 países considerados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Los servicios de banda ancha fija son los que han experimentado una mayor caída alrededor del 42%, en comparación con el 25% de la telefonía móvil celular y el 20% de la telefonía fija. En esta clasificación de precios México ocupa el lugar 48 de entre los 161 países considerados por la UIT y es superado únicamente por Costa Rica y Trinidad y Tobago en relación a países latinoamericanos. Sin embargo el acceso a la banda ancha es el servicio más caro y menos accesible en los países en desarrollo donde su precio supera el ingreso per cápita mensual. [6]

1.2 Aplicación de la Fibra Óptica como sensor en el monitoreo de estructuras

Hoy en día uno de los principales retos de varias disciplinas de la ciencia y la ingeniería es la creación de construcciones y/o estructuras cada vez más complejas capaces de operar en condiciones adecuadas bajo circunstancias adversas tales como los desastres naturales. Estas estructuras, denominadas estructuras inteligentes, deben tener la característica de responder al medio y reacondicionarse de manera tal que se asegure su integridad en caso de algún desastre natural como sismos, tormentas, lluvias torrenciales, tornados, etc., [10]. Para esto la estructura debe poseer la habilidad de sensar el medio interno y externo de manera que se puedan realizar acciones de control de acuerdo a los datos obtenidos. Estas acciones pueden implicar modificar la forma, tamaño, rigidez, posición, etc., de las estructuras para minimizar los daños y prevenir accidentes. El campo de las estructuras inteligentes involucra un amplio rango de disciplinas para ser desarrollada tales como ciencias de los materiales, sensado, instrumentación, actuación, microelectrónica junto con desarrollos en computación, comunicaciones, software y control. Países como Japón, Estados Unidos y la Unión Europea encabezan el estudio e innovación en ésta área. [11]

Para lograr esto se debe contar con un sistema de monitoreo capaz de aportar datos precisos y concretos que permitan realizar un análisis del estado e integridad de la estructura y en dado caso efectuar las acciones de control correspondientes. Este sistema no debe alterar el estado y funcionalidad de la estructura [10] y debe ser tal que opere correctamente bajo circunstancias adversas como cambios bruscos de temperatura, tensiones, vibraciones, desplazamientos, presencia de químicos, entre otros factores, de manera que brinde datos confiables. Además debe permitir la integración y colocación de muchos sensores a lo largo de la estructura [12] y generar las instrucciones correspondientes para producir cambios en el comportamiento de la estructura y adaptarse a las nuevas condiciones. [13]

Con un monitoreo adecuado es posible realizar la detección de fallas, sobrecargas, doblamientos, deformaciones y fracturas que pueden poner en peligro la integridad de la estructura. El monitoreo es una parte fundamental en la ingeniería civil, ya que el contar con un sistema de monitoreo adecuado permite identificar aquellas zonas que realmente necesitan atención y así reducir los costos de mantenimiento y alargar la vida útil de las estructuras [12].

En la actualidad existen distintas técnicas comerciales para el monitoreo de estructuras, tales como, el escaneo ultrasónico, pulsos transitorios, radiografías infrarrojas y radares de tierra enfocadas al monitoreo de la integridad, evaluación y diagnóstico de las estructuras. Sin embargo a pesar de que estas técnicas ya están establecidas y presentan resultados confiables, no son adecuadas para la evaluación y monitoreo en tiempo real. [14]

Otros métodos que existen y son capaces de realizar monitoreo y mediciones en tiempo real están basados en los sensores eléctricos convencionales (strain gauge), las emisiones acústicas y los sensores de fibra óptica [14]. Para el caso de los sistemas basados en los sensores eléctricos convencionales, dispositivos utilizados ampliamente en ingeniería civil para medir la tensión de un objeto en su superficie, éstos presentan ciertas desventajas tales como costos de mantenimiento, vulnerabilidad ante las interferencias electromagnéticas, sensibilidad al ruido eléctrico presente en el ambiente, degradación de los componentes con el paso del tiempo y alteraciones mecánicas en la estructura a monitorear. [15]

Debido a esto los sensores basados en fibras ópticas son una alternativa de gran impacto para reducir o eliminar muchos de estos problemas en las llamadas estructuras inteligentes [10]. La idea es equipar a la estructura de un “sistema nervioso” capaz de evaluar daños ocurridos por sobrecargas, vibraciones excesivas, movimientos de la tierra u otros fenómenos que serían difíciles de evaluar por medio de los sistemas convencionales [16]. Éstos sensores de fibra óptica han demostrado ser adecuados para el monitoreo de estructuras en ingeniería civil, debido a que presentan importantes ventajas sobre los sensores eléctricos convencionales. Algunas de estas ventajas se presentan a continuación [10].

1. Diámetro pequeño, alrededor de $125\mu\text{m}$ o menos, lo que permite integrarlos de manera relativamente sencilla en muchos tipos de estructuras sin afectar sus propiedades mecánicas. [10]
2. Inmunidad a las interferencias electromagnéticas, eliminando así los costos de blindaje para el caso de cables conductores. Además al ser un dieléctrico se elimina el riesgo de presentar un corto circuito, pudiendo extender su uso en estructuras de metal. [10]

3. Compatibilidad con las técnicas de multiplexación y la tecnología empleada en telecomunicaciones, lo cual permite soportar un gran número de sensores a lo largo una sola fibra óptica y así monitorear muchas secciones de alguna estructura. [12]
4. Capacidad de realizar mediciones en un solo punto o sobre toda una región de la fibra óptica, lo que se denomina sensores puntuales y distribuidos respectivamente. [12]
5. Resistencia a condiciones adversas tales como altas temperaturas, corrosión, erosión, vibraciones, voltajes, tensiones, presiones etc. [17]
6. Bajo costo de fabricación y mantenimiento. [10]

Básicamente la aplicación de sensores de fibra óptica se puede clasificar dentro de cuatro grandes categorías: [10]

- 1) **Manufactura inteligente.**– En esta área los sensores de fibra óptica son integrados o añadidos a piezas o partes mecánicas en industrias como la automotriz y la aeronáutica durante el proceso de manufactura de las mismas [18]. Su función es monitorear parámetros como temperatura, presión, viscosidad, grado de pureza del material y tensiones residuales. [10]
- 2) **Aplicación en pruebas no destructivas.**– Las fibras ópticas son utilizadas para medir o estimar parámetros mecánicos como por ejemplo cambios en los perfiles de tensión y en la característica y forma de las partes fabricadas. [10]
- 3) **Sistemas de evaluación para estructuras.**– En esta área se trata de evaluar a las estructuras de manera conjunta, es decir, poder determinar daños presentes en algún edificio, puente, presa o incluso aviones en estado de vuelo. [10]
- 4) **Sistemas de control.**– A diferencia de los sistemas de evaluación, los sistemas de control miden los efectos ambientales que actúan sobre la estructura, de manera tal que ésta pueda responder a ellos. Por ejemplo un edificio que al ser afectado por un temblor o movimiento del suelo, tenga la capacidad de reajustarse de manera automática con el fin de minimizar los daños provocados por dicho movimiento. [10]

Por lo tanto, aunque la aplicación de sensores de fibra óptica ha sido ligeramente introducida en industrias como la automotriz, aeronáutica y manufactura, hoy en día aún existen muchos inconvenientes que limitan el uso de estos sensores en estructuras civiles de gran tamaño construidas básicamente de concreto. En los siguientes temas se abordará la aplicación de sensores en estructuras de concreto y se realizará un análisis de su viabilidad y los problemas que existen actualmente.

1.2.1 Sensores de Fibra Óptica en estructuras de concreto

La aplicación de sensores de fibra óptica en estructuras de concreto presenta distintos inconvenientes y problemas que limitan su amplia implementación en esta área. En su forma básica la fabricación de concreto involucra elementos como cemento, grava y arena que son mezclados junto con el agua para la obtención del mismo. Éste procedimiento puede llegar a dañar la estructura física de la fibra al querer integrarla en los elementos de concreto, es decir, la fibra puede doblarse, moverse, fracturarse e incluso romperse al momento del fabricado de los elementos de concreto. Estos daños pueden modificar las características de la fibra óptica una vez insertada en los elementos de concreto y por consecuencia aportar datos erróneos al sistema de monitoreo. [10]

Otro factor importante que ha limitado la aplicación de sensores de fibra óptica en elementos y estructuras de concreto es el factor temperatura. El proceso de mezclado del concreto involucra una reacción exotérmica¹ que eleva la temperatura de la mezcla [14], esta temperatura inducida produce una tensión aparente ejercida sobre la fibra óptica, ésta tensión aparente es la combinación de muchos factores como la expansión térmica del material y el cambio en el índice de refracción de la fibra debido a la temperatura inducida [19]. Posteriormente, en el proceso de curado del concreto la temperatura del mismo va disminuyendo ocasionando que ésta tensión aparente también lo haga. Estas reacciones químicas presentes en la elaboración del concreto y en el proceso de curado representan un factor que pueden modificar los datos obtenidos por los sensores de fibra óptica si no se analizan con detenimiento para llevar a cabo un proceso de calibración [14]. De manera general la aplicación de sensores de fibra óptica en estructuras de concreto se enfoca principalmente al monitoreo de tensiones y la detección y ubicación de grietas en elementos de concreto.

¹ Cualquier reacción química que desprende energía, en este caso en forma de calor

1.2.2 Sensores de Fibra Óptica para el monitoreo de tensiones

Los sensores de fibra óptica enfocados al monitoreo de tensiones están basados principalmente en técnicas de rejillas, interferométricas y reflectométricas. Estos sensores de fibra óptica requieren de técnicas especializadas en la manipulación de las fibras ópticas para modificar algunas características de las mismas como en el caso de las rejillas de Bragg y la cavidad Fabry-Perot, o bien requieren de costosos equipos de medición como el OTDR (Optical Time Domain Reflectometry).

1.2.2.1 Sensor de Rejillas de Bragg

Una rejilla de Bragg es una variación longitudinal del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica [14]. Para formar esta variación se somete una sección de la fibra óptica a dos rayos UV que al momento de interferirse producen un patrón de interferencia que modulan el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica en esa sección. [20]

La variación del índice de refracción del núcleo de la fibra, denominada rejilla de Bragg, actúa como un espejo selector de longitud de onda que refleja una banda estrecha de un rayo de luz de amplio espectro, es decir, si por la fibra óptica viaja un rayo de luz de amplio espectro, la rejilla de Bragg reflejará una banda estrecha de este rayo y dejará pasar las demás componentes, figura 1.3. La banda estrecha reflejada estará centrada en lo que se denomina longitud de onda de Bragg. [15,22]

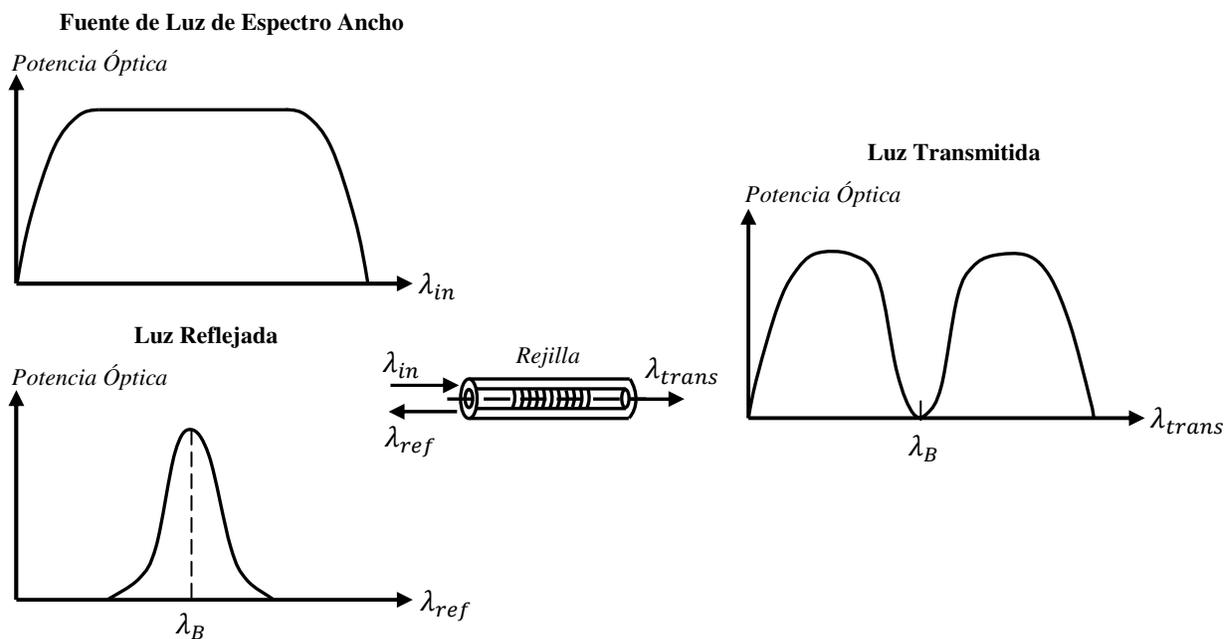


Figura 1.3. Principio de operación de una rejilla de Bragg [21]

La longitud de onda de Bragg está determinada por la siguiente ecuación: [21]

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda$$

Donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, η_{eff} es el índice de refracción efectivo² en el núcleo a lo largo de la fibra y Λ es el periodo de la rejilla de Bragg.

Si se aplica una tensión sobre la rejilla el periodo cambiará debido a la elongación física de la rejilla, así como el índice de refracción del núcleo debido al efecto fotoelástico³. Por su parte la temperatura provocará variaciones en el índice de refracción por el efecto de expansión térmica del material. Estos dos factores ocasionan que la longitud de onda de Bragg sufra un desplazamiento determinado por la tensión y la temperatura que actúan sobre la rejilla [14]. En este caso la variación en la longitud de onda de Bragg $\Delta\lambda_B$ puede ser expresada como: [14]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - \rho_e)\Delta\varepsilon$$

Donde ΔT es la variación de la temperatura, $\Delta\varepsilon$ es la variación de la tensión, α es el coeficiente de expansión térmica de la fibra óptica, ξ es el coeficiente termo-óptico, y ρ_e es el coeficiente de fotoelasticidad y cuyos valores son específicos para el tipo de fibra óptica que se esté utilizando. Basándose en este razonamiento es posible determinar la variación de la tensión presente en la fibra óptica al monitorear las variaciones en el desplazamiento en la longitud de onda de Bragg. [14]

Finalmente es importante mencionar que si el parámetro de interés a monitorear únicamente es la tensión que actúa sobre la rejilla, y si la fuente de luz que se está utilizando en la aplicación esta sobre una banda conocida como por ejemplo la banda C (1527-1567nm), es recomendable escoger una longitud de onda de Bragg cercana al límite inferior de la banda para monitorear fuerzas en tensión y una longitud de onda de Bragg cercana al límite superior si las fuerzas a monitorear son de compresión. [21]

² Índice de refracción que experimenta un modo de propagación en razón a su velocidad de grupo

³ Efecto en el que el tensor de impermeabilidad eléctrica está en función de la tensión ejercida sobre la rejilla [26]

1.2.2.2 Sensor intrínseco de Fabry-Perot

El sensor de fibra óptica intrínseco de Fabry-Perot es un tipo de sensor interferométrico que es implementado en el núcleo de la fibra óptica. Este sensor utiliza la diferencia de fase entre dos rayos de luz propagados a lo largo de una sección de fibra óptica monomodo para medir variaciones de tensión y temperatura. Su funcionamiento se describe en la figura 1.4, donde un rayo de luz de referencia es propagado a lo largo del núcleo de la fibra óptica que al toparse con un primer espejo semireflector o empalme semireflector, éste es reflejado parcialmente separándolo en un rayo reflejado y en un rayo transmitido. El rayo transmitido entra a la cavidad de sensado y recorre dos veces la longitud de la cavidad de sensado formada por el empalme semireflector y un espejo reflector al final de la cavidad ocasionándole una diferencia de fase respecto al rayo reflejado. La longitud de la cavidad de sensado varía con la tensión y la temperatura de modo que al variar la longitud de la cavidad de sensado la diferencia de fase entre el rayo reflejado y transmitido también cambia. [11]

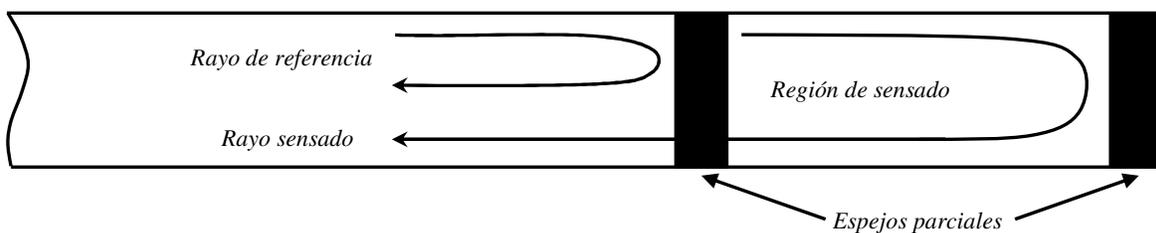


Figura 1.4. Principio de operación del sensor intrínseco de Fabry-Perot [22]

Al igual que el sensor basado en rejillas de Bragg, el sensor de Fabry-Perot es de tipo intrínseco ya que la zona de sensado se encuentra dentro de la misma fibra óptica. Además es extremadamente sensitivo tanto a las variaciones de tensión como de temperatura, y muchas veces el empalme semireflectivo es remplazado por una rejilla de Bragg para disminuir las pérdidas ocasionadas por éste. [11]

1.2.2.3 Sensor basado en la Dispersión de Brillouin

El sensor de Brillouin es un sensor de tensión distribuido cuya operación se basa en un efecto no lineal denominado dispersión de Brillouin de la luz, cuya frecuencia depende de la tensión longitudinal presente en la fibra óptica. Éste sensor puede ser dividido en dos tipos. El primer tipo consiste en un bombeo de luz pulsada lanzada en un extremo de la fibra óptica y otro pulso de

prueba lanzado desde el otro extremo de la fibra óptica en propagación contraria al primero. El pulso de prueba es amplificado por el bombeo de luz pulsada por el efecto de dispersión de Brillouin, permitiendo medir la tensión distribuida a lo largo de la fibra óptica a partir de un análisis en el dominio del tiempo del pulso de prueba. En el segundo tipo, un rayo de luz pulsado es lanzado hacia un extremo de la fibra óptica donde la retrodispersión de Brillouin de la luz causada por el rayo de luz pulsado es observada en ese mismo extremo, es decir, debido a la dispersión del rayo es posible determinar la posición de un punto de tensión en la fibra usando el intervalo de tiempo entre el lanzamiento del rayo de luz pulsado y la dispersión de Brillouin observada en ese punto. Para el primer tipo se tiene un sensor denominado Brillouin Optical Time Domain Analyzer (BOTDA) y Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) para el segundo tipo. [23]

Básicamente el tipo más utilizado es el BOTDR, ya que solo requiere de una fuente de luz y acceso a un solo extremo de la fibra óptica a diferencia del BOTDA. Con estas características el BOTDR es un sensor utilizado en el área de ingeniería civil para el monitoreo y diagnóstico de estructuras de gran escala ya que es capaz de medir tensiones distribuidas a lo largo de la fibra óptica en distancias de hasta 10Km, sin embargo su costo es elevado debido al equipo que se requiere, por lo que su aplicación no está ampliamente esparcida en el área. [23]

1.2.3 Sensores de Fibra Óptica para la detección de grietas

Generalmente la degradación de las estructuras de concreto viene acompañada con la formación de grietas en los elementos de concreto. Aunque la presencia de grietas no representa un severo daño estructural, es importante conocer la evolución de éstas una vez que aparecen [27]. La temprana detección de grietas puede extender la vida útil de la estructura y disminuir los costos de mantenimiento de la misma, así como dar un panorama más completo de su integridad [28]. Actualmente existen sensores eléctricos enfocados al monitoreo y detección de grietas basado principalmente en potenciómetros, transformadores diferenciales de voltaje (LVDT) y corriente de Foucault⁴. Sin embargo, estos sensores presentan ciertas desventajas tales como ausencia de buena sensibilidad para mediciones en tiempos cortos, precio elevado y poca resolución respectivamente

⁴ Corriente inducida en un conductor en presencia de un campo magnético que genera otro campo magnético opuesto al campo que la produce

[27]. En el caso de los sensores de fibra óptica la mayoría recaen en la utilización de técnicas interferométricas, sin embargo, estos resultan costosos al utilizar equipos como los interrogadores [29]. En esta sección se abordarán algunos de los sensores de fibra óptica utilizados para la detección y monitoreo de grietas. Los sensores mostrados están basados en medir las variaciones de la intensidad de luz transmitida de una fibra óptica a otra [29], pérdidas por microcurvaturas, técnicas de OTDR y variaciones en patrones de moteado.

1.2.3.1 Sensor basado en variaciones de la intensidad de la luz transmitida

Se trata de un sensor superficial del tipo de modulación de intensidad hecho con fibras ópticas de plástico basado en la variación de la potencia transmitida de una fibra óptica de plástico a otra. Como se sabe las fibras ópticas de plástico se caracterizan por tener un tamaño de diámetro grande y alta capacidad de recolectar la luz, lo que se traduce en bajos costos ya que se pueden utilizar fuentes de luz como los LED's. [29]

El sensor está compuesto de dos fibras ópticas de plástico de índice escalonado separadas una distancia d_0 (determinada por el tamaño inicial de la grieta) y fijadas a los bordes de la grieta. De manera que el desplazamiento en los bordes de la grieta sea medida como una variación en la intensidad de la luz transmitida de una fibra óptica a otra, figura 1.5 a) [29]. La relación entre el desplazamiento y la intensidad de la señal recibida tiene un comportamiento no lineal que puede aproximarse a $1/d^2$ para distancias de un par de milímetros, figura 1.5 b). [27]

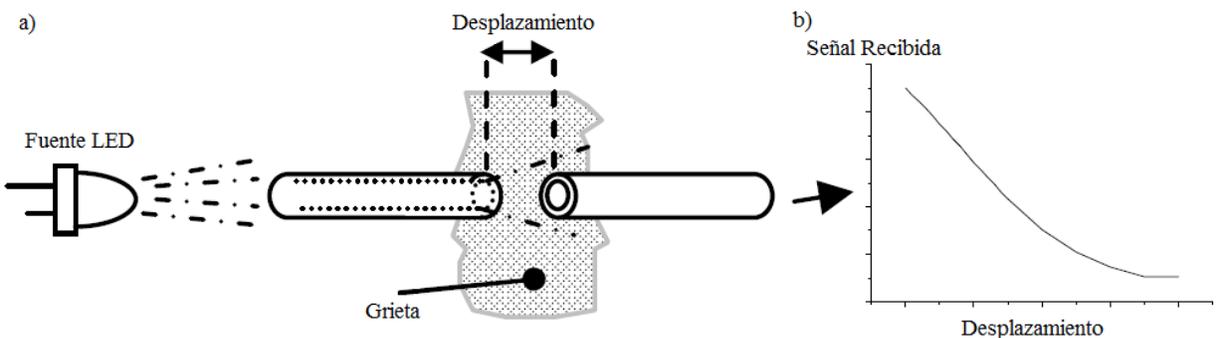


Figura 1.5. a) Principio de operación del sensor basado en variaciones de la intensidad de luz transmitida de una fibra óptica a otra. b) Relación entre la intensidad de la señal recibida y desplazamiento de la grieta [29]

La fibra óptica transmisora es alimentada por un LED estándar y la receptora es conectada a un fotodetector donde la corriente detectada es convertida a voltaje usando un amplificador de

transimpedancia [27]. Las fibras ópticas son del tipo de índice escalonado con un núcleo de PMMA (Polimetilmetacrilato) de diámetros de 250 a 980 μm con un revestimiento de fluoropolímero y con una apertura numérica aproximada a AN=0.5. [27]

Básicamente el sensor es montado en la grieta de dos formas: con cinta adhesiva alineando las fibras cuidadosamente, figura 1.6 a) [29] y/o utilizando un tubo metálico cuya función es mantener alineadas las fibras ópticas protegiéndolas del polvo y la luz ambiental, figura 1.6 b). [27]

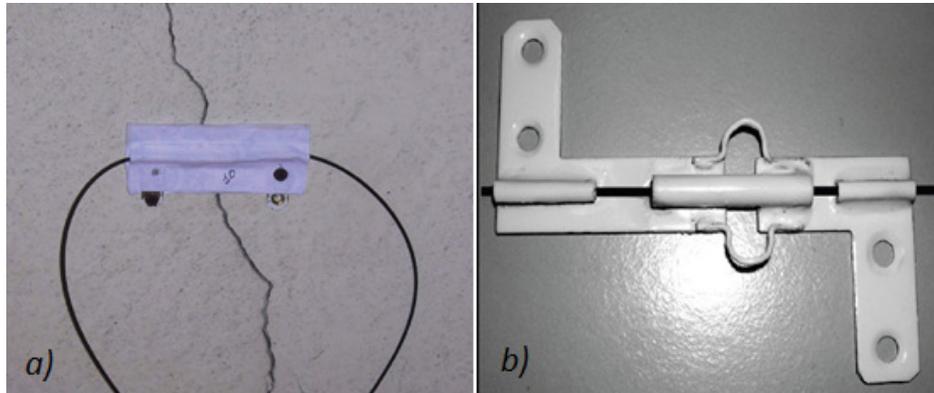


Figura 1.6. a) Sensor fijado con cinta tape [29]. b) Sensor fijado con un tubo metálico [27]

Resultados obtenidos con este tipo de sensor muestran que los movimientos de la grieta están relacionados con las variaciones de la temperatura, es decir, a mayor temperatura (día) la grieta tiende a cerrarse y a menor temperatura (noche) ésta tiende a abrirse, con una razón desplazamiento/temperatura de 60 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ [29]. Para evitar esta alteración, se utiliza un sensor fijo e idéntico de referencia que no está sometido a ningún desplazamiento de la grieta, la idea es discriminar el efecto de la temperatura y obtener solo las variaciones provocadas por el desplazamiento de la grieta [30, 32]. Figura 1.7.

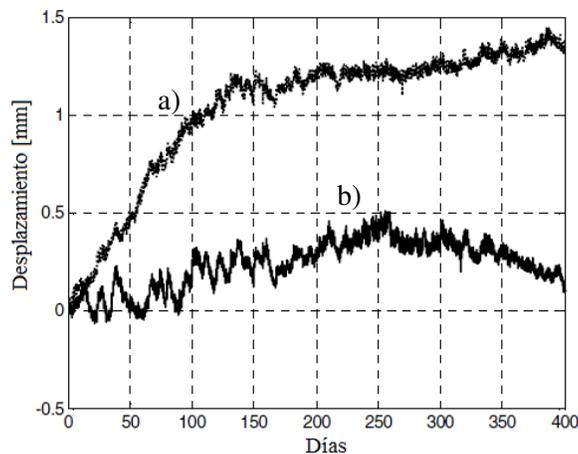


Figura 1.7. Resultados a) sin compensación de la temperatura y b) con compensación [29]

1.2.3.2 Sensor basado en pérdidas por microcurvaturas periódicas

Este sensor se basa en el fenómeno de pérdidas por microcurvaturas periódicas en una fibra óptica del tipo PCS600 (Plastic Clad Silica), núcleo de vidrio de 600µm de diámetro y revestimiento de plástico. La periodicidad de las microcurvaturas Λ es formada creando variaciones espaciales en la forma de la fibra óptica al integrarla en una muestra de material epóxico. Esto induce un acoplamiento entre los modos de la fibra óptica incluyendo algunos modos de radiación por lo que la potencia de la luz es acoplada entre los modos con constantes de propagación β_p y β_q satisfaciendo la siguiente expresión. [30]

$$\beta_p - \beta_q = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

Es decir, la potencia transmitida por la fibra óptica tendrá lugar del modo p_{th} al q_{th} . En presencia de presión algunos modos pasarán a ser modos de radiación debido al cambio en la amplitud de las microcurvaturas en la fibra óptica, por lo que la potencia de la señal en el núcleo estará en función del cambio de amplitud de las microcurvaturas [30]. Figura 1.8.

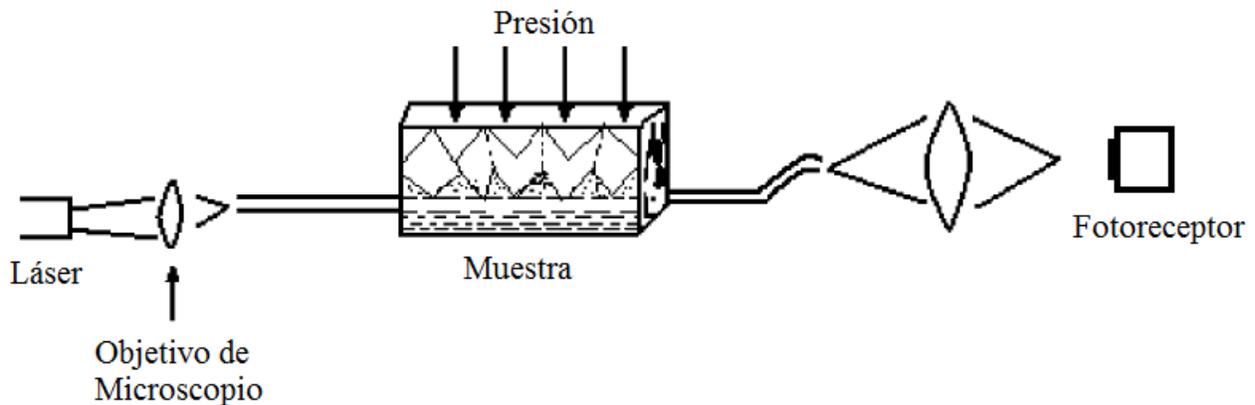


Figura 1.8. Esquema del sensor de fibra óptica de pérdidas por microcurvaturas periódicas [30]

El sistema consiste en un láser He-Ne seguido de una lente de microscopio de 10x, una muestra de araldita (adhesivo epóxico) y anilina (compuesto orgánico utilizado en muchas industrias para hacer químicos, antioxidantes, herbicidas, etc.) con una fibra óptica integrada con una periodicidad en las microcurvaturas de 5mm, otra lente y un fotodetector 88xLA de la empresa Photodine Inc. Algunos resultados obtenidos muestran que la potencia de salida aumenta al disminuir la presión sobre la muestra y viceversa, mostrando una relación lineal entre la presión aplicada y la potencia de salida [30]. Figura 1.9.

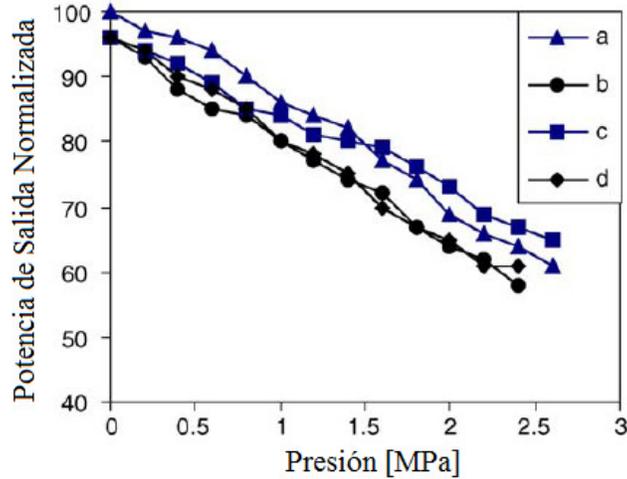


Figura 1.9. Respuesta del sensor entre la presión aplicada a la muestra y la potencia de salida normalizada [30]

1.2.3.3 Sensor basado en equipo OTDR

Consiste en un sensor de fibra óptica distribuido para la detección de grietas mediante mediciones de las pérdidas ocasionadas por dobleces resultado de la aparición de una grieta utilizando la técnica de OTDR. La fibra óptica es integrada y colocada en forma de zigzag en el fondo de una viga de concreto de 150mm x 200mm x 200mm de manera que se encuentre inclinada a las grietas que aparezcan. Figura 1.10 a). [28]

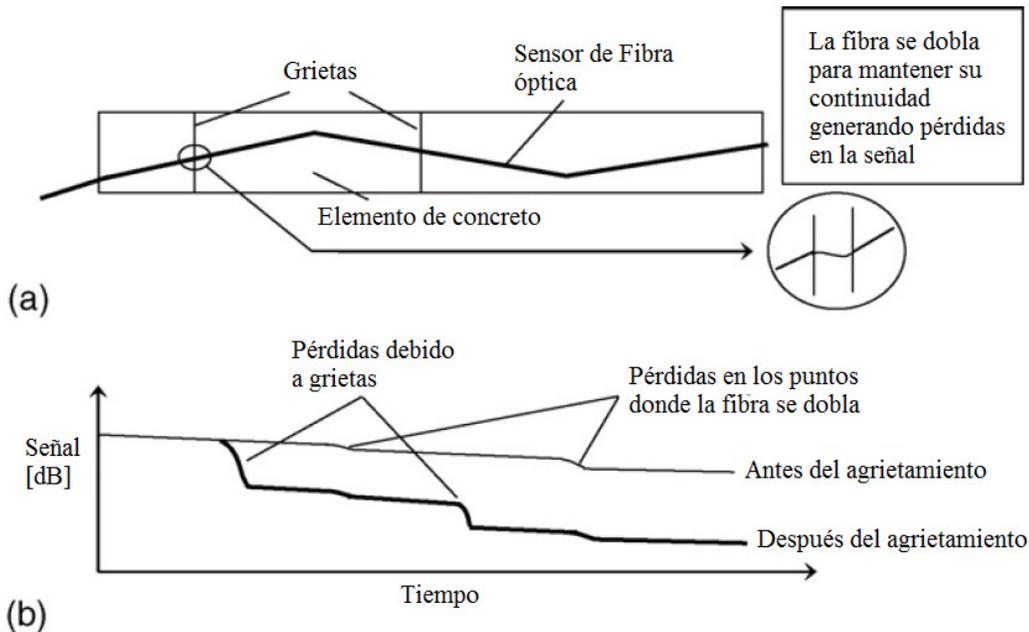


Figura 1.10. a) Esquema de la configuración del sensor y el fenómeno de doblez producido por una grieta. b) Análisis de la señal en el dominio del tiempo con el OTDR [28]

Una vez que se presente una grieta, ésta se abre provocando que la fibra óptica se doble y se induzcan pérdidas en la potencia de la señal debido a que parte de ésta sale del núcleo hacia el revestimiento, figura 1.10 a). Como resultado, la potencia de la señal transmitida presenta una caída debido a la grieta. Utilizando el OTDR es posible determinar la posición de la grieta y su abertura mediante la magnitud en la caída de potencia de la señal. En la figura 1.10 b) se tiene que antes de que la grieta aparezca, hay una caída gradual de la señal retrodispersada detectada por el OTDR ocasionada por la atenuación misma de la fibra óptica, además de unos puntos correspondientes a los dobleces que le dan la forma de zigzag a la fibra. En el momento que aparece una grieta se presenta una caída clara de la potencia de la señal detectada por el OTDR, figura 1.10 b). [28]

Con el fin de proteger a la fibra óptica de las condiciones de fabricación de la viga y el medio alcalino del concreto, la fibra óptica es integrada en forma de zigzag dentro de una placa de polyester de 1mm de espesor, que posteriormente es colocada en el fondo de la viga de concreto y que de acuerdo a la experiencia de las pruebas dicha placa se rompe cuando la abertura de la grieta en el concreto es de aproximadamente 0.08–0.1mm. En los extremos de la fibra se colocan unos tubos metálicos a manera de protección en estos puntos. [28]

Debido a que el sensor de fibra óptica es colocado a una cierta altura del fondo de la viga, la prueba que se tiene es de tensión. Para evitar que la viga de concreto se quiebre rápidamente, se colocan 2 varillas de 6mm de diámetro a la misma altura que la fibra óptica. La figura 1.11 muestra la configuración del experimento. [28]

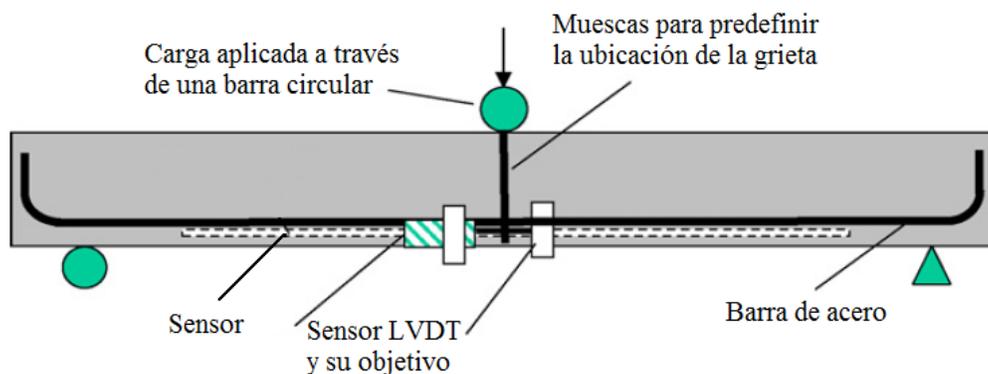


Figura 1.11. Configuración de la prueba de tensión en la viga de concreto con la fibra óptica integrada en forma de zigzag en el fondo de la viga [28]

Con el fin de prever la localización de la grieta, un par de muescas fueron hechas en el centro de la viga con el fin de inducir la formación de grietas en esa área, además se colocó un LVDT para medir la abertura de la grieta y comparar resultados. Utilizando una fibra SMF-28 a 1550nm, algunos resultados se muestran en la figura 1.12. [28]

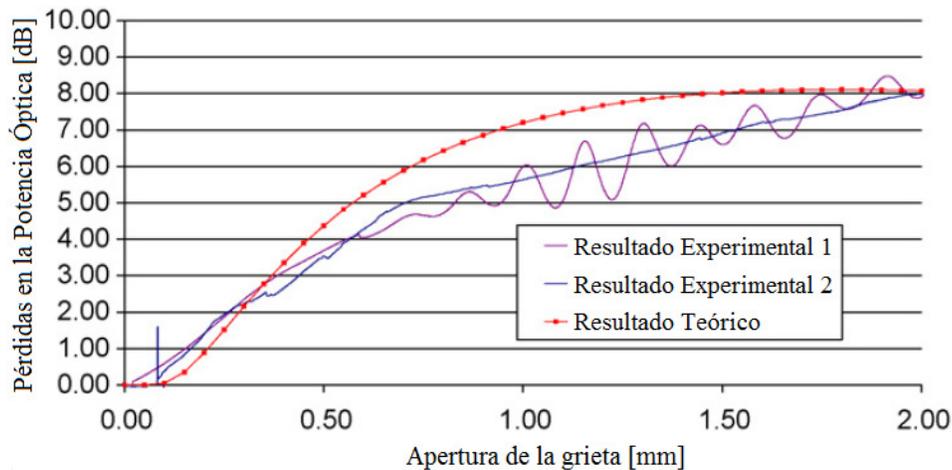


Figura 1.12. Relación entre la abertura de la grieta y las pérdidas en la potencia de la señal en la prueba de flexión en la viga de concreto [28]

Los resultados muestran que para aberturas pequeñas de la grieta, las pérdidas crecen lentamente, pero después de un cierto punto éstas se incrementan en una proporción mayor. Sin embargo para aberturas mayores de la grieta las pérdidas vuelven a tener un crecimiento lento y pareciera que se aproximan a un valor asintótico. Este límite superior se atribuye a la presencia de grietas de gran magnitud que simplemente la fibra ya no logra soportar. Por otro lado, las oscilaciones en la respuesta se creen debidas al efecto de deslizamiento de la fibra óptica causado por la fricción en el revestimiento de la fibra óptica y el concreto. [28]

1.2.3.4 Sensor basado en variaciones en patrones de moteado

Este sensor consiste en determinar el desplazamiento en la abertura de grietas mediante un sensor de fibra óptica integrada en estructuras de concreto. El mecanismo se basa en la correlación entre la tensión aplicada a la fibra óptica y la variación en la intensidad de la luz de los patrones de moteado generados en una fibra óptica multimodo debido a la redistribución de los modos.

Como se sabe la propagación de la luz en la fibra óptica está gobernada por la propagación de los modos que viajan dentro del núcleo de la fibra óptica. Para el caso de fibras monomodo cuyos diámetros de núcleo están entre 5 y $9\mu\text{m}$, la propagación de la luz se lleva a cabo a través del primer modo, figura 1.13 a), mientras que en las fibras ópticas multimodo, la propagación de la luz se reparte en múltiples modos de propagación debido a que el diámetro del núcleo es mayor que en las fibras ópticas monomodo. Figura 1.13 b). [31]

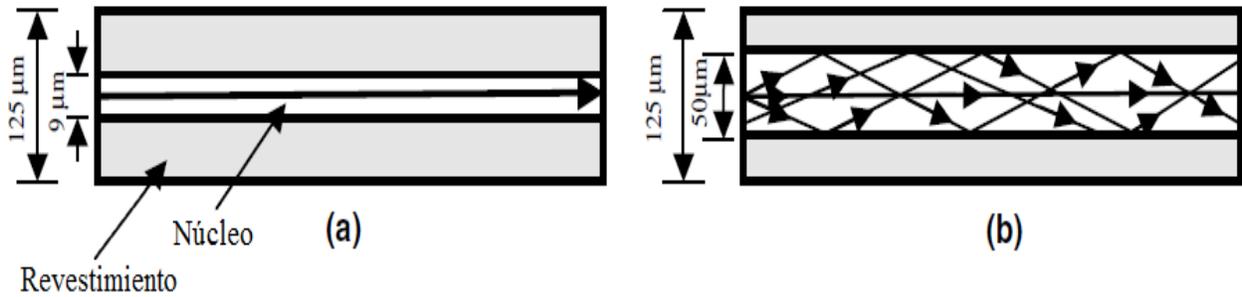


Figura 1.13. Propagación de los modos dentro de una a) fibra monomodo y b) fibra multimodo [31]

El efecto de los múltiples modos de propagación en la intensidad de la luz se ve reflejado en la formación de los patrones de moteado al final de la fibra óptica. La presencia de tensiones o deformaciones sobre la fibra perturba la propagación de los modos y por consecuencia la forma del patrón de moteado, ocasionando una redistribución de los modos y un cambio general en la intensidad de la señal, figura 1.14. Esta característica puede ser utilizada para construir un sensor, siempre y cuando el patrón de moteado varíe linealmente con la tensión sobre la fibra. [31]

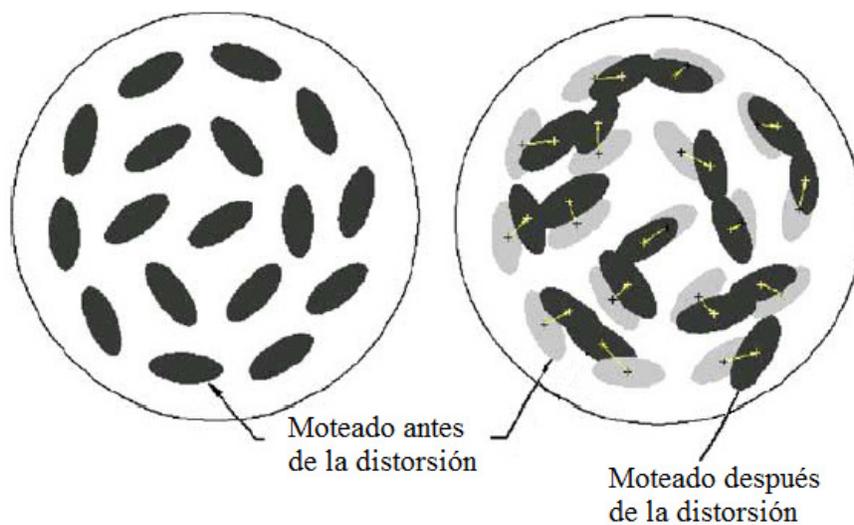


Figura 1.14. Representación esquemática de la redistribución de los modos en la fibra óptica debido a tensiones y/o deformaciones sobre la fibra [31]

La variación en la propagación de los modos dentro de los patrones de moteado se encuentra descrita por lo que se denomina como variaciones normalizadas de la intensidad del moteado (SIV normalized speckle intensity variations ψ_n).

Debido a que el objetivo es lograr un cambio en la distribución de los modos en la fibra óptica a causa de una tensión aplicada sobre ésta, es necesario eliminar la redistribución que se dé en otra parte de la fibra óptica que no sea la que está expuesta directamente a la grieta. Para lograr esto se utiliza una fibra óptica monomodo para transmitir la luz y alimentar a la fibra óptica multimodo de 25mm de largo correspondientes a la región donde se quiere sensar. El arreglo del sistema se muestra en la figura 1.15.

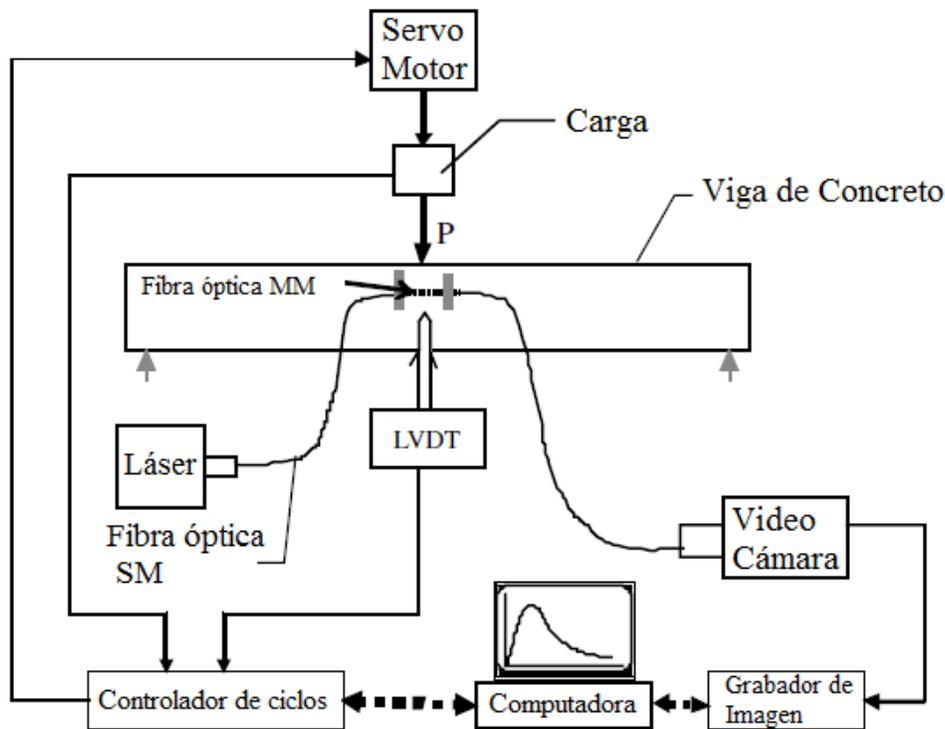


Figura 1.15. Componentes de la prueba realizada a la viga de concreto con el sensor integrado de fibra óptica basado en variaciones del patrón de moteado [31]

El sistema consiste en un láser He-Ne de $\lambda = 630nm$, una viga de concreto de 100mm x 100mm x 860mm, una cámara de video digital y posteriormente una sección de procesado de la imagen del patrón de moteado. Los resultados muestran que el sensor es altamente sensible al desplazamiento en el orden de micrómetros y su aplicación puede ser extendida al montar un sistema de multiplexación que involucre más fibras y por lo tanto monitorear más zonas en la viga de concreto.

[31]

1.2.4 Sensores de Fibra Óptica en otras estructuras

Debido a las ventajas que ofrecen los sensores de fibra óptica, su uso ha sido extendido a estructuras diferentes a las construidas con concreto. Actualmente existen distintas aplicaciones en áreas como en el monitoreo de barcos, integración de sensores de fibra óptica en textiles para supervisión médica, automotriz, etc. En esta sección se darán algunos ejemplos actuales referentes a estas áreas.

Basándose en la técnica de BOTDR la empresa International America's Cup Class construye yates con un material plástico reforzado de fibra de carbono y aluminio lo cual les provee de altos niveles de rigidez y fortaleza minimizando su peso. Sin embargo estos materiales tienden a sufrir dobleces debido al deterioro común del yate lo que ocasiona que se presenten daños en él. Debido a la forma en la que se fija el mástil por medio de cables con la proa y la popa, la tensión entre estos cables hace que el momento de flexión y la carga alcance un máximo en la región aledaña al mástil. Para monitorear esto, la empresa colocó un sistema basado en fibras ópticas simples instaladas de manera transversal en el casco del yate. Se observó que en algunas zonas específicas del yate se tienen fuerzas de compresión y en otras zonas fuerzas de tensión debido a los momentos producidos por los cables. Este sistema hizo posible también el monitoreo del yate en movimiento determinándose que el yate no sufría de daños importantes en su estructura ocasionados por el movimiento. [24]

En el área médica los sensores de fibra óptica han sido integrados en textiles especiales para la continua supervisión de pacientes anestesiados durante la realización de la prueba de resonancia magnética. Los parámetros a monitorear por el sensor son los movimientos de la respiración, para lo cual el sensor se basa en dos configuraciones: un sensor de macrocurvaturas y otro con rejillas de Bragg, los cuales están diseñados para medir la elongación de la circunferencia torácica y abdominal durante la respiración. Las ventajas que se tienen con estos sensores son que la fibra óptica no representa ninguna alteración a la prueba de resonancia magnética al ser un dieléctrico y además ésta puede ser manejada de manera sencilla por la industria textil para su integración en ropa debido a que puede ser manejada como un hilo más. A pesar de que este método no ha sido aplicado extensamente en pacientes, se prevé que en un futuro la fabricación de ropa incluya sensores de fibra óptica que puedan monitorear parámetros cardiovasculares, respiratorios, oximétricos, entre otros. [25]

1.3 Discusión de los métodos existentes

En las secciones anteriores se enunciaron de manera general distintos sensores actuales para el monitoreo de tensiones y la detección de grietas con base en la fibra óptica. Primordialmente éstos sensores se basan en técnicas interferométricas (Fabry-Perot), reflectométricas (OTDR), variaciones de la intensidad de la luz, variaciones en los patrones de moteado y rejillas de Bragg. De acuerdo a su aplicación, configuración, características y costo, cada uno de los sensores presenta ciertas ventajas y desventajas respecto a los demás. En esta sección se hará una comparación de los distintos métodos presentados y se resaltarán algunas de sus características principales.

1.3.1 Comparación de los métodos existentes

La tabla 1.1 muestra una comparación los sensores expuestos en las secciones anteriores.

Tabla 1.1. Comparación de los sensores de fibra óptica para el monitoreo de tensión y detección de grietas

Sensor	Parámetro que sensa	Fenómeno físico producido	Fenómeno físico que permite el sensado	Tipo de sensado	Manipulación características físicas de la FO	Costo
Rejillas de Bragg	Tensión y Temperatura	Elongación física de la rejilla, variaciones del índice de refracción	Reflexión de una banda estrecha (λ_B)	Puntual y/o Cuasi-distribuido	Modulación del índice de refracción del núcleo	Alto
Fabry-Perot	Tensión y Temperatura	Variación en la longitud de la cavidad de sensado	Diferencia de fase entre dos rayos de luz	Cuasi-distribuido	Formación de la cavidad de sensado	Medio
Brillouin	Tensión y Temperatura	Dispersión de Brillouin	Amplificación del pulso de prueba	Distribuido	No	Alto
Intensidad de la luz	Desplazamiento	Separación o acercamiento entre las caras de las fibras	Variaciones en la intensidad de luz transmitida	Puntual	No	Bajo
Micro-curvaturas	Tensión y/o Presión	Cambio en la amplitud de las microcurvaturas, radiación de la luz	Pérdidas en la potencia de la luz transmitida	Cuasi-distribuido	Formación de las microcurvaturas	Bajo
Reflectométrico	Abertura de la grieta	Dobles, fracturas, radiación de la luz	Pérdidas en la potencia de la luz	Distribuido	No	Alto
Patrones de moteado	Desplazamiento	Redistribución de los modos debido a la tensión	Variaciones en los patrones de moteado	Cuasi-distribuido	No	Medio

De la tabla 1.1 se puede observar que los sensores expuestos presentan distintas características que los hacen adecuados para ciertas aplicaciones. Por ejemplo para aplicaciones en estructuras de gran tamaño, como puentes y edificios, es preferible utilizar un sensor distribuido como el Brillouin u OTDR. Mientras que para aplicaciones más concretas como el monitoreo de una grieta, los sensores de variaciones de intensidad de la luz transmitida resultan ser la mejor opción tanto en simplicidad como en costo. Cabe resaltar también, que el costo depende principalmente del equipo que utilicen los sensores para llevar a cabo el sensado, es decir, los sensores considerados con un costo alto (rejillas de Bragg, Brillouin y Reflectométrico), son aquellos que utilizan equipos como acopladores ópticos, analizadores de espectro óptico y OTDR's. Mientras que los de bajo costo, utilizan fibras ópticas de plástico, LED's como fuentes de luz y circuitos de adquisición de datos más simples.

1.3.2 Identificación de problemas y limitantes

A pesar de que hoy en día se han desarrollado múltiples técnicas basadas en sensores de fibra óptica para el monitoreo de tensiones y detección de grietas en estructuras de concreto, todavía existen ciertas limitantes que restringen su amplia aplicación.

Uno de los principales limitantes es el costo de los equipos que se utilizan en los sistemas de monitoreo. Los acopladores ópticos, analizadores de espectro óptico y OTDR's principalmente, representan una fuerte inversión si se quiere implementar un sistema de monitoreo distribuido o cuasi-distribuido.

Otro factor es la implementación en el campo. Muchas de las técnicas expuestas en las secciones anteriores han sido implementadas exitosamente bajo condiciones de laboratorio más no en condiciones de campo. Las dificultades de instalación, protección y ubicación de las fibras ópticas y los equipos de medición pueden resultar ser muy adversas de acuerdo a la aplicación que se requiera.

El factor temperatura. Como se mencionó en temas anteriores, la temperatura es el principal factor que afecta las mediciones de los sensores de fibra óptica debido al efecto que tiene sobre ellos. Si bien se han desarrollado métodos para discriminar dichos efectos indeseables, éstos representan incrementar el sistema de sensado y por lo tanto el costo. [29]

El número de sensores o fibras ópticas. En muchas aplicaciones es necesario implementar más de un sensor o fibra óptica para lograr resultados más precisos. La utilización de un gran número de fibras ópticas representa tener equipos de adquisición de datos más complejos y de multiplexación.

La protección de la fibra óptica. Dependiendo de la aplicación y el medio en el que estará la o las fibras ópticas, el sistema de protección puede resultar complicado en su fabricación o simplemente no sea necesario implementar alguno. Básicamente el diseñar un sistema de protección específico para cada situación limita que un mismo sistema de protección pueda funcionar para distintas circunstancias.

1.4 Conclusiones

1. La literatura muestra un gran número de investigaciones a cerca de sensores de fibra óptica basados principalmente en rejillas de Bragg y cavidades intrínsecas de Fabry-Perot. Sin embargo el uso de la fibra óptica simple como sensor no ha sido ampliamente estudiado.
2. Los sensores de fibra óptica enfocados al monitoreo de tensiones en estructuras están basados principalmente en rejillas de Bragg, cavidad de Fabry-Perot y equipo OTDR. En su mayoría, estos sensores son costosos debido a que utilizan dispositivos como los acopladores ópticos, y equipo de medición como analizadores de espectro óptico y OTDR's.
3. Los sensores de fibra óptica enfocados al monitoreo y/o detección de grietas utilizan a la fibra óptica simple como sensor. Éstos se basan principalmente en variaciones de la potencia transmitida y en técnicas de OTDR.
4. Las variaciones en la potencia de la luz por la fibra óptica es un fenómeno utilizado por algunos sensores de fibra óptica para monitorear la apertura de grietas existentes y/o para el monitoreo de presiones. Con base en el análisis realizado a estos sensores es posible estudiar la viabilidad de utilizar a la fibra óptica como sensor en elementos de concreto para la detección de grietas.

1.5 Referencias

- [1] Wayne Tomásí, *Sistemás de Comunicaciones Electrónicas*, 4ª edición, Pearson Prentice Hall, México 2003.
- [2] *Sistemás de Comunicaciones Ópticas. Prácticas de Laboratorio Parte I. Practica 3 Medición del Diámetro de una Fibra Óptica*, Facultad de Ingeniería UNAM.
- [3] Chai Yeh, *Handbook of Fiber Optics Theory and Applications*, 1ª edición, Academic Press, United Kingdom, 1989.
- [4] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 1ª edición, John Wiley & Sons, Estados Unidos 1992.
- [5] Henry y Cynthia Zanger, *Fiber Optics Communication and Other Applications*, 1a edición, Macmillan Publishing Company, Estados Unidos, 1991.
- [6] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Medición de la Sociedad de la Información 2010*, Place des Nations CH-1211 Ginebra, Suiza.
- [7] Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL), *Estadísticas e Información de Mercados, Comparativo Internacional de Densidad de Usuarios de Telefonía Móvil 2008*, <http://www.cofetel.gob.mx/wb/Cofetel_2008/comparativo_internacional_de_densidad_de_telefonia>
- [8] Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL), *Estadísticas e Información de Mercados, Comparativo Internacional de Penetración de Suscriptores de Internet de Banda Ancha 2007*, <http://www.cofetel.gob.mx/wb/Cofetel_2008/comparativo_internacional_de_penetracion_de_susc07>
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Perfiles Estadísticos de la Sociedad de la Información 2009 Región de América*, Place des Nations CH-1211 Ginebra, Suiza.
- [10] Udd E., *Fiber optic smart structures*, *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, August 2002.
- [11] Uttamchandani D., *Fibre-optic sensors and smart structures: Developments and prospects*, *Electronics and Communication Engineering Journal*, vol. 6, October 1994.
- [12] Rivera, E., Thomson, D.J., Polyzois, D., *Structural health monitoring of composite poles using fiber optic sensors*, *Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference On Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, 2002.
- [13] Fan, Y., Kahrizi, M., *Applicability of an optimized fiber optic smart structure*, *Proceedings 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, ICMENS 2004*.
- [14] Kister, G., Winter, D., Gebremichael, Y.M., Leighton, J., Badcock, R.A., Tester, P.D., Krishnamurthy, S., Fernando, G.F., *Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors*, *Engineering Structures*, 2007.
- [15] Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P., Sridhar, S., *Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete*, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2010.
- [16] Leng, J.S., Barnes, R.A., Hameed, A., Winter, D., Tetlow, J., Mays, G.C., Fernando, G.F., *Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors*, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2006.
- [17] Kung-Li Deng, *Next generation fiber optic sensing and its applications*, *14th Annual Wireless and Optical Communications Conference*, USA April 2005.
- [18] Silva, A.F., Goncalves, F., Ferreira, L.A., Araujo, F.M., Dias, N.S., Carmo, J.P., Mendes, P.M., Correia, J.H., *Manufacturing technology for flexible optical sensing foils*, *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2009.
- [19] Liu, K., *Development of commercial fibre optic strain sensors*, *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, Canada May, 1997.
- [20] Yung Bin Lin, Kuo Chun Chang, Jenn Chuan Chern, Wang, L.A., *Packaging methods of fiber-Bragg grating sensors in civil structures applications*, *Sensors Journal, IEEE*, vol. 5, 2005.

- [21] De Baere, I., Luyckx, G., Voet, E., Van Paepegem, W., Degrieck, J., On the feasibility of optical fibre sensors for strain monitoring in thermoplastic composites under fatigue loading conditions, *Optics and Lasers in Engineering*, 2009.
- [22] Dorigi, J.F., Krishnaswamy, S., Achenbach, J.D., Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 42, September 1995.
- [23] Ohno, H., Naruse, H., Kihara, M., Shimada, A., Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor, *Optical Fiber Technology*, 2001.
- [24] Naruse, H., Applications of distributed fiber strain sensing for smart structures The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2001.
- [25] De jonckheere, J., Narbonneau, F., Kinet, D., Zinke, J., Paquet, B., Depre, A., Jeanne, M., Logier, R., Optical fibre sensors embedded into technical textile for a continuous monitoring of patients under Magnetic Resonance Imaging 30th Annual International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society, 2008.
- [26] Bahaa E., Malvin Carl, *Fundamentals of Photonics*, 1ª edición, John Wiley & Sons, 1991.
- [27] Casalicchio, M.L., Penna, A., Perrone, G., Vallan, A., Optical fiber sensors for long-and short-term crack monitoring, *Proceedings 2009 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2009*, pp. 87-92.
- [28] Wan, K.T., Leung, C.K.Y., Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures, *Sensors and Actuators*, 2007.
- [29] Perrone, G., Olivero, M., Vallan, A., Carullo, A., Neri, A., Long term in-situ test of a low-cost fiber-based crack monitoring system, *Proceedings of IEEE Sensors*, pp. 325-328, 2008.
- [30] Pandey, N.K., Yadav, B.C., Embedded fibre optic microbend sensor for measurement of high pressure and crack detection, *Sensors and Actuators, A: Physical* 128 (1), pp. 33-36, 2006.
- [31] Zhang, Z., Ansari, F., Crack tip opening displacement in micro-cracked concrete by an embedded optical fiber sensor, *Engineering Fracture Mechanics* 72 (16), pp. 2505-2518, 2005.