

2 Estado del arte de los sensores refractométricos de fibra óptica (revisión bibliográfica)

2.1 Introducción

En el presente capítulo se discuten el concepto de la refractometría. El índice de refracción es una de las características ópticas importantes de la materia por lo tanto es importante cuantificar dicha cantidad, de tal manera que se exploran diferentes métodos para cuantificar el índice de refracción de los materiales.

Una de las implementaciones de la refractometría son los sensores de fibra óptica, se han desarrollado varios tipos de sensores dentro de los cuales los sensores que modulan la intensidad de la luz hacen uso de la refractometría para así lograr su funcionamiento. En este capítulo se describirán algunos de los sensores mas significativos y aquellos que tienen una mayor relación con el presente trabajo.

2.2 Refractometría

El índice o los índices de refracción de una sustancia describe una parte importante de la interacción de la sustancia con la radiación electromagnética. El índice de refracción es una cantidad adimensional, real para los materiales transparentes y complejos si hay absorción.

Por lo general, depende de la dirección de la luz en relación al material con el cual tiene interacción, por ejemplo, muchos vidrios son anisotrópicos, esto es, que poseen más de un índice de refracción. En general, el índice es un tensor con un máximo de 9 componentes. Muchas sustancias son isotrópicas, esto significa que sólo poseen un índice de refracción, por ejemplo, los líquidos, vidrios, y otros materiales no cristalinos.

El índice de refracción presenta un interés práctico. Es evidente que es importante conocer el índice de refracción de los materiales, como vidrios y plásticos rígidos. En los fluidos complejos, tales como bebidas o alimentos, el índice de refracción es una medida de disolución. Las aplicaciones más comunes en la industria son para microemulsiones para medir la relación aceite/agua, el anticongelante para comprobar la relación glicol/agua, y para líquidos inaccesibles, como el electrólito que se encuentra dentro de las pilas recargables [1]. Las aplicaciones clínicas de la luz han estimulado el interés en refractometría de los bio tejidos [2], además la refractometría es útil para el análisis de muestras de bio-fluidos.

El fenómeno de la refracción está basado en el cambio de velocidad que experimenta la radiación electromagnética al pasar de un medio a otro, como consecuencia de su interacción con los átomos y moléculas de otro medio. Dicho cambio de velocidad de propagación se manifiesta en una variación en la dirección de propagación.

La refractometría es un proceso de medición, por medio del cual se determina un valor específico del índice de refracción (mejor dicho, el índice de refracción para una determinada longitud de onda de luz) de una sustancia.

La medida relativa de la variación de la velocidad de propagación de una onda entre dos medios tomando un medio fijo como referencia se le conoce como índice de refracción n y en general esta expresado con respecto al vacío. Cuando la radiación electromagnética atraviesa de un medio con índice de refracción n_1 a otro con índice de refracción n_2 , cambia su velocidad de propagación. Si la radiación que incide no es perpendicular al límite entre los dos medios, también cambia su dirección de propagación. El cociente entre la velocidad de propagación en el espacio libre, c y la velocidad de propagación dentro de un medio, v se llama índice de refracción del medio, n .

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

Cuando la luz pasa de un medio a otro ocurren varios fenómenos, de los cuales puede usarse cualquiera como base de la medición del índice de refracción del medio. Entre estos cambios se encuentra:

- La velocidad de propagación;
- Cierta cantidad de luz se pierde por reflexión;
- Si la luz incidente no es perpendicular a la superficie entre los dos medios, cambia la dirección de propagación y aparecen ciertos efectos de polarización;
- En determinados ángulos de incidencia puede ocurrir reflexión total.

Para todos los medios ópticos el índice de refracción varía con la longitud de onda. En general el índice es mayor para longitudes de onda cortas en comparación con las largas. La Figura 2.1 muestra un rayo de luz blanca descompuesto en sus componentes de longitudes de onda por una refracción en una superficie. Se puede ver

que el rayo de luz azul es refractado a través de un ángulo menor en comparación con el rayo de luz roja. Debido a que $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 = a$ una constante en este caso, aparentemente si es n_2 mayor para la luz azul en comparación con la luz roja, entonces θ_2 debe ser menor para la luz azul que para la roja. La variación en el índice de refracción con la longitud de onda es llamada dispersión cromática. La dispersión cromática es dada por la expresión $\Delta n = n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$.

Como la velocidad de propagación de una onda es difícil de determinar directamente, se recurre a métodos indirectos, con los cuales se mide el cambio en la trayectoria óptica debido al retardo en la propagación de la luz.

Aplicando leyes a los rayos incidente, reflejado y transmitido en una interfaz plana entre dos medios transparentes y considerando por simplicidad un medio isotrópico, un rayo de luz incidente colimada, esto es, que sus rayos son paralelos entre sí, produce un rayo transmitido y uno reflejado, ambos colimados. Todos los rayos son coplanares y definen un plano de incidencia, que es ortogonal a la interfaz plana. La Figura 2.2 muestra los rayos incidente, reflejado y transmitido en el plano de incidencia. En el primer medio con índice de refracción n_1 , los ángulos de incidencia y reflexión son iguales; θ_1 . El ángulo de transmisión θ_2 en el segundo medio con índice de refracción n_2 está determinado por la ley de Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \tag{2.2}$$

2.3 Técnicas de medición del índice de refracción

2.3.1 Método de desviación

A. Método de desviación lateral

Los métodos de desviación lateral y angular hacen uso de la ley de Snell. El rayo incidente se encuentra en el medio 1, comúnmente es aire con un índice de refracción n_{aire} . La desviación lateral l ocurre para un rayo de luz transmitido a través de una muestra de caras paralelas de espesor L (Figura 2.3). Si el ángulo de incidencia es θ_{aire} , por medio de la ley de Snell se tiene que

$$\frac{n}{n_{\text{aire}}} = \left[1 + \left(\frac{\cos \theta_{\text{aire}}}{\sin \theta_{\text{aire}} - \frac{l}{L}} \right)^2 \right]^{1/2} \sin \theta_{\text{aire}} \quad (2.3)$$

Si θ_{aire} y L pueden ser medidas el resultado es más preciso. La precisión del método depende en la precisión al momento de medir l . El método de la desviación lateral es adecuado para muestras en forma de hojas suficientemente gruesa [3].

B. Método de desviación angular

En el método de desviación angular se hace incidir un haz sobre una de las caras de una muestra en forma de prisma, el cual cuenta con un índice de refracción n . Entonces, el haz de salida es desviado en forma angular y su desviación depende del índice de refracción de la muestra (Figura 2.4), obteniendo la ecuación 2.4 [3].

$$\frac{n}{n_{\text{aire}}} = \frac{\sin\left(\frac{A+D}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)} \quad (2.4)$$

Donde A es el ángulo formado por las caras de entrada y salida del haz en el prisma, y D es el ángulo entre el haz incidente y el haz de salida

C. Método de prisma diferencial

El método de prisma diferencial tiene particular interés para hacer un gran número de mediciones de rutina o para el control continuo de un proceso. Un par de prismas huecos, de ángulos conocidos, se colocan de modo que un haz colimado pase por uno y luego por el otro y se enfoque sobre una escala. Uno de los prismas se llena con un líquido patrón, esto es, una solución de concentración conocida y en la otra celda se introduce la muestra. Si se conoce el índice de refracción del líquido patrón, se calcula fácilmente el de la muestra por la medición de la desviación angular producida por el par de prismas con líquido. En un intervalo moderado, la desviación es directamente proporcional a la diferencia entre los índices de refracción de los dos líquidos [3].

D. Método de bloque V

El método de bloque V es una variante del método de prisma diferencial, en el cual la luz pasa por tres prismas, el primero y el tercero de vidrio de índice de refracción conocido y de ángulos medidos cuidadosamente, y el segundo en el prisma desconocido, se coloca la muestra que puede ser sólida o líquida. Los sólidos se esmerilan, sin pulirlos y se colocan en contacto óptico con las caras pulimentadas del primer y tercer prisma [3].

2.3.2 Método de coincidencia de índices

El método de coincidencia de índices de refracción no requiere que la muestra se encuentre en una forma geométrica en particular. Por lo tanto, podría ser finamente dividida, es decir, un polvo. Suponiendo que la muestra sea isotrópica y homogénea, entonces la radiación reflejada, la desviación lateral o angular, y el cambio de fase relativa de la luz transmitida llegan a tener un valor de cero cuando hay una coincidencia

de índices. Si la muestra absorbe la luz, el índice de refracción del líquido que rodea la muestra que da la mínima visibilidad todavía arroja la parte real del índice de refracción de la muestra. Del mismo modo, si la muestra es heterogénea o anisotrópica, el método obtiene el índice de refracción promedio de la muestra. El líquido no debe disolverse, impregnar, o reaccionar de ninguna manera con la muestra sólida.

Para muestras macroscópicas se estima una precisión de 0.005 en la obtención del índice de refracción n [4] por medio del método de coincidencia de índices, donde una simple estimación ocular es empleada. Para un líquido de índice de refracción n_{liq} , la reflectancia de la interfaz varía aproximadamente con la siguiente relación.

$$(n - n_{liq})^2 \quad (2.5)$$

Esta expresión cuadrática hace difícil en la práctica juzgar si n_{liq} debe ser incrementada o disminuida para mejorar la concordancia.

2.3.3 Método del ángulo de Brewster

El ángulo de reflexión θ_B es medido para el cual no hay reflexión de luz linealmente polarizada de la superficie de la muestra. La ecuación 2.6 da el índice de refracción de la muestra, donde n_1 es el índice de refracción del medio que contiene la luz incidente y reflejada, usualmente es aire.

$$n_2 = n_1 \tan(\theta_B) \quad (2.6)$$

La luz es polarizada de tal forma que su vector de campo eléctrico vibra paralelamente al plano de incidencia (ver Figura 2.5)

Un láser linealmente polarizado es una fuente adecuada de luz monocromática. Las fuentes no polarizadas requieren ser polarizadas con un prisma Glan-Thomson. Con

un láser de HeNe con potencia de 1mW y con un juicio ocular mínimo de reflectancia, una precisión de θ_B cerca de 0.1° puede ser obtenida, dando una precisión en la obtención del índice de refracción de la muestra cerca de 0.005. Una mejoría en la precisión se puede obtener en factores de 10 a 100 si se reemplaza el ojo por un análisis fotométrico. El método del ángulo de Brewster es comparable con la precisión del método del ángulo crítico. A diferencia del método del ángulo crítico, no se requiere un material de referencia con índice de refracción mayor al de la muestra. Si la muestra presenta absorción produce menos error en el método del ángulo de Brewster que en el método del ángulo crítico [5, 8].

2.3.4 Método del ángulo crítico

Las muestras líquidas son colocadas directamente sobre una cara del prisma de índice de refracción conocido. Las muestras sólidas necesitan que solo una cara sea plana y ópticamente pulida, que esta acoplada a la cara del prisma refractómetro usando una capa de líquido con índice de refracción intermedio. Para una muestra transparente pueden ser usados los modos de transmisión o reflexión, debido a que θ_c es el mismo para ambos (ver Figuras 2.6 y 2.7).

En el modo de transmisión, la interfaz prisma-muestra es iluminada difusamente a través de la muestra, el ángulo crítico entonces es el ángulo mas grande en la transmisión del prisma. El modo de reflexión, es útil para muestras con gran esparcimiento o absorción. El ángulo crítico es donde la reflectancia cambia discontinuamente con el ángulo de reflexión dentro del prisma, siendo total para $\theta \geq \theta_c$. En el modo de transmisión, la transmitancia de la muestra dentro del prisma es cero para $\theta \geq \theta_c$ y finita para $\theta \leq \theta_c$ mientras que, en el modo de reflexión una proporción baja de la luz es reflejada para $\theta \leq \theta_c$, y el 100% es reflejado para $\theta \geq \theta_c$.

2.3.5 Método Interferométrico

En las mediciones interferométricas del índice de refracción, se divide un haz de luz en dos partes, una de las cuales sigue una trayectoria de índice de refracción conocida y la otra pasa por la sustancia cuyo índice de refracción desea conocerse. Los dos haces se recombinan de tal forma que se formen franjas de interferencia. El desplazamiento de las franjas, debido al medio de índice de refracción desconocido, es una medida de este índice. Si N es el número de franjas desplazadas con respecto a una línea de referencia, λ es la longitud de onda de la luz usada y d la longitud del camino recorrido en el medio, el índice de refracción, n , esta dado por la siguiente expresión:

$$n = n_0 + \frac{N\lambda}{d} \quad (2.7)$$

Donde n_0 es el índice de refracción del medio conocido. Como el desplazamiento de las franjas es muy sensible a pequeños cambios de índice, el método ofrece gran precisión. Aunque es posible usar métodos interferométricos para sólidos y líquidos, se usa mas para gases y vapores. El índice de refracción de los gases y vapores difiere poco de la unidad, y para hallar diferencias significativas entre los diversos gases se necesitan métodos de gran sensibilidad.

2.4 Implementación de la refractometría (sensores de fibra óptica)

2.4.1 Clasificación de los sensores

La industria de la fibra óptica de comunicación revolucionó la industria de las telecomunicaciones, proporcionando un mayor rendimiento y enlaces de telecomunicaciones más fiables con una disminución constante del costo de ancho de banda.

Paralelamente a estos desarrollos la tecnología de sensores de fibra óptica ha sido un usuario importante de la tecnología asociada a la industria de la optoelectrónica y comunicaciones de fibra óptica. Muchos de los componentes asociados a la industria de las telecomunicaciones eran a menudo desarrollados para aplicaciones de los sensores de fibra óptica. Como los precios de los componentes se han reducido y las mejoras de calidad se han hecho, la capacidad de los sensores de fibra óptica para desplazar a los sensores tradicionales para medir la rotación, la aceleración, el campo eléctrico y magnético, temperatura, presión, amplitud de ondas acústicas, vibración, posición lineal y angular, tensión, humedad, viscosidad, las mediciones químicas y una variedad de aplicaciones de sensores, ha sido mejorada. En los primeros días de la tecnología de sensores de fibra óptica varios sensores de fibra óptica de éxito fueron blanco de lleno en los mercados donde la tecnología de sensor existente era marginal o en muchos casos inexistente.

Un sensor es un dispositivo que recibe un estímulo y responde con una señal. El estímulo es una cantidad, propiedad o condición que es sensada y convertido a un tipo de señal. El propósito de un sensor es responder a un cierto tipo de propiedades físicas de entrada (estímulos) y convertirlos en una señal que es compatible con los dispositivos con los cuales trabaja, por ejemplo, señales eléctricas las cuales pueden ser canalizadas, amplificadas, y modificadas por medio de dispositivos eléctricos. La señal de salida del sensor puede estar en términos de la amplitud, frecuencia, fase, o un código digital.

Todos los sensores pueden ser de dos tipos: pasivos y activos. Un sensor pasivo no requiere alguna fuente de energía adicional y genera directamente una señal eléctrica en respuesta a un estímulo externo, esto es, la energía de estímulo de entrada es convertida por el sensor en una señal de salida. Algunos ejemplos son el termopar, fotodiodo y un sensor piezoeléctrico. Muchos de estos sensores pasivos son sensores directos, esto es, que realizan conversión de energía directa para generar señales eléctricas.

Los sensores activos requieren potencia externa para su operación, que es llamada señal de excitación. Dicha señal es modificada por el sensor y el elemento medido para producir la señal de salida. Los sensores activos comúnmente son llamados paramétricos debido a que sus propiedades cambian en respuesta a un efecto externo y dichas propiedades pueden ser subsecuentemente convertidas a señales eléctricas.

Al mismo tiempo los sensores pueden ser clasificados en absolutos y relativos. Un sensor absoluto es independiente a las condiciones de medición, mientras un sensor relativo produce una señal con respecto a un caso en particular. Un ejemplo de sensor absoluto es un termistor: un resistor sensible a la temperatura, su resistencia eléctrica está directamente relacionada con la escala de temperatura absoluta Kelvin. Un termopar es un tipo de sensor relativo; el termopar produce un voltaje eléctrico que es función de un gradiente de temperatura a través de los alambres del termopar. Por lo tanto no se puede relacionar la señal de salida con una temperatura en particular sin antes hacer referencia a un voltaje.

Los sensores de fibra óptica son a menudo agrupados en dos clases básicas: extrínseco o sensores de fibra óptica híbridos, e intrínseco.

La Figura 2.8 ilustra el caso de un sensor de fibra óptica extrínseco o híbrido. En este caso, una fibra óptica llega a una "caja negra" que introduce la información en el haz de luz en respuesta a un efecto ambiental. La información puede ser introducida en términos de intensidad, fase, polarización, contenido espectral u otros métodos. Enseguida una fibra óptica lleva la luz con la información ambiental de nuevo a un procesador óptico y/o electrónico. En algunos casos la fibra óptica de entrada actúa también como fibra óptica de salida.

Un ejemplo de sensor de fibra óptica intrínseco es mostrado en la Figura 2.9; se utiliza una fibra óptica para llevar el haz de luz y el efecto del medio ambiente introduce la información en el haz de luz mientras la luz viaja en la fibra.

2.4.2 Estado del arte de los sensores refractométricos de fibra óptica

Como se mencionó anteriormente, la información sobre una cantidad física que se quiera medir puede estar en términos de la intensidad. Este tipo de sensores son uno de los más elementales, ya que para su configuración más simple basta con tener un transmisor y un receptor para su funcionamiento. Una clase de sensor de fibra óptica basado en su intensidad son aquellos que están basados en la reflexión total interna.

Un caso de este tipo de sensores se observa en la Figura 2.10, la luz se propaga por el núcleo de la fibra y pega en el extremo de la fibra con forma de ángulo. Si el medio en que se coloca el extremo con fin angular de la fibra tiene un índice de refracción suficientemente bajo entonces prácticamente toda la luz que se refleja cuando llega a la superficie reflectante se devuelve a través de la fibra. Sin embargo, si el índice de refracción del medio comienza a acercarse a la del cristal parte de la luz se propaga fuera de la fibra óptica y se pierde.

Este tipo de sensor de baja resolución puede ser utilizado para la medición de la presión o de los cambios del índice de refracción en un líquido o gel con una precisión de uno a diez por ciento. Las variaciones sobre este método también se han utilizado para medir el nivel de líquido [9] como se muestra en el diagrama de la sonda de la Figura 2.11. Cuando el nivel de líquido llega al prisma que refleja la luz en gran medida atenúa la señal que entra a la superficie.

Otra aplicación de los sensores refractométricos es para la determinación de los índices de refracción de los compuestos absorbentes y volátiles como el combustible y la gasolina, esto con el fin de explorar una nueva alternativa diferente a los métodos convencionales.

Otro sensor de fibra óptica en término de la intensidad recibida, adecuado para medios líquidos y en fase de gas se basa en la excitación de una onda evanescente en la interfaz núcleo/revestimiento. La detección es basada en los cambios del índice de

refracción (entre 1,41 y 1,45)¹ del medio dieléctrico depositado en la parte sin revestimiento de la fibra. La sensibilidad observada es lineal y el límite de detección es de 1% (en volumen) de tolueno en el agua [10]. La Figura 2.12 muestra la configuración del sensor.

Por otra parte se han realizado sensores de fibra óptica intrínsecos para medir el nivel de líquidos, en la Figura 2.13 se puede observar cómo fue diseñado dicho sensor.

La luz procedente de un LED se dirige en una fibra óptica sin revestimiento sumergida en el líquido cuyo nivel se quiere medir. La luz viaja a través de la fibra y cuando la fibra está completamente rodeada por líquido, el líquido actúa como un revestimiento. Por lo tanto, la reflexión total interna se produce en la interfaz núcleo-revestimiento, y la luz alcanza el receptor prácticamente sin pérdidas, excepto por absorción. Cuando el tanque no está completamente lleno de líquido, una parte de la fibra está rodeada por el líquido y la otra parte está rodeada de aire. En la parte sumergida, la reflexión total interna se produce porque la fibra tiene un revestimiento (revestimiento de la fibra y el líquido), y las pérdidas de luz son muy pequeñas. En la porción expuesta de la fibra, la reflexión total interna es menor, se produce porque la fibra sólo tiene el revestimiento y hay más fugas de rayos. Si se calibra para las diferentes alturas de líquido en el recipiente, simplemente mediante la lectura de la señal de salida del detector se puede determinar la altura del líquido. Cuanto mayor sea el nivel, mayor será la lectura de los fotodiodos [11].

2.4.3 Sensor de fibra óptica refractométrico con elemento de detección semiesférico

Es un sensor de fibra óptica extrínseco que mide la modulación de la intensidad, por medio de la reflexión parcial o total de la luz en la frontera existente entre la superficie del elemento de detección y el medio que lo rodea, la potencia óptica de la señal de salida es una medición indirecta del índice de refracción del medio circundante.

¹ Índices utilizados en el artículo descrito

El sensor refractométrico se muestra en la Figura 2.14, el elemento de detección es de un material dieléctrico y transparente con un índice de refracción n_e igual al del núcleo de las fibras ópticas. Las dos fibras multimodo tienen parámetros idénticos: un núcleo de diámetro D y una apertura numérica (AN) en aire. Las fibras se encuentran colocadas simétricamente con respecto al eje z del sistema de coordenadas en común a una distancia L del eje de simetría.

El sensor refractométrico de fibra óptica con elemento de detección semiesférico fue diseñado y analizado teóricamente [12], se desarrolló un modelo y por medio de simulaciones, se obtuvieron las características de transmisión. Por medio de un modelo en tres dimensiones y los parámetros que definen al sensor, se realizó su modelado por medio del trazado de rayos, tomando en cuenta la descripción de la superficie de trabajo, así como el posicionamiento de las fibras para obtener las posiciones de los rayos y asimismo los puntos de intersección con el elemento de detección. Se calculó el ángulo de incidencia de los rayos, la potencia reflejada, el coeficiente de reflexión y por último el alcance los rayos reflejados. Se consideró una distribución de luz uniforme del haz, utilizando una luz monocromática, no polarizada y no coherente, utilizando 100 000 rayos.

La Figura 2.15 muestra la respuesta del sensor obtenida suponiendo que la superficie de la semiesfera es totalmente reflejante. Se puede ver que existen zonas en las que existe una mayor transmisión, esto se debe a que existe un acoplamiento óptico entre las fibras.

Como se puede observar, el número de reflexiones determina el número de zonas de transmisión que se presentan, cabe mencionar que el ancho de las zonas de transmisión depende de la apertura numérica AN y el diámetro relativo del núcleo. La Tabla 2.1 muestra una relación con las zonas de transmisión (área en la cual existe transmisión con respecto a la distancia relativa) y la distancia relativa (es la distancia

variable de las fibras partiendo del eje de simetría al borde del transductor referido al radio del elemento de transductor) a las que se encuentran.

Tabla 2.1 Zonas de transmisión donde se presenta un acoplamiento óptico entre las fibras a una distancia relativa Λ

#Zona de transmisión	Distancia relativa Λ
1	0
2	0.707
3	0.866
4	0.924
5	0.951
6	0.966

Cabe destacar que la primera zona de transmisión es algo físicamente imposible ya que se requiere que las dos fibras ópticas ocupen el mismo espacio físico, pero a partir de la segunda zona de transmisión existen las condiciones necesarias para que haya reflexión total interna. Como se puede ver en la Figura 2.16 en el artículo se realizó un análisis de la transmisión variando el índice de refracción con el cual se observa la sensibilidad del sensor al cambio del índice de refracción.

Es posible cambiar el número de reflexiones internas en la superficie del elemento óptico modificando la distancia relativa Λ de las fibras ópticas, gracias a esto se pueden obtener niveles de transmisión adecuados para la medición del índice de refracción n . La transmisión la cual es función del índice de refracción, es distinto para diferentes valores de Λ . Las posiciones relativas de las fibras son un factor para definir el rango de índices de refracción que pueden ser medidos, es decir, la transmisión que presente el sensor va a variar con respecto a la sustancia que se esté midiendo y a la posición en la que se encuentren las fibras.

Debido a que es un sensor refractométrico que se basa en la modulación de la intensidad de la luz debido a cambios en el índice de refracción del medio circundante, es importante definir ciertos parámetros referentes a la intensidad óptica recibida.

En [12] se conoce como transmisión a la relación entre la intensidad óptica de salida y la intensidad óptica de entrada del sensor, y al ser es una función del índice de refracción del medio externo se define de la siguiente manera.

$$T(n) = \frac{I_2(n)}{I_1} \quad (2.8)$$

Donde I_1 es la intensidad óptica de entrada al elemento óptico por medio de la fibra óptica transmisora, e $I_2(n)$ la intensidad óptica de salida, es decir, la que llega a la fibra óptica receptora. Dicho parámetro puede ser representado en decibeles de la siguiente manera.

$$T(n)[dB] = 10 \log_{10} T(n) \quad (2.9)$$

Dicha función de transferencia (ecuación 2.8) define el comportamiento del sensor, sin embargo es imposible medir de una forma práctica y no intrusiva la intensidad óptica de salida. La única potencia que puede ser medida es aquella que llega al Fotodetector. Con el fin de establecer una cantidad práctica dadas dichas limitaciones, se considera una transmisión en el aire, esto se expresa de la siguiente forma.

$$T_{aire}(n) = \frac{I_{2aire}}{I_1} \quad (2.10)$$

Donde I_2 aire y T_{aire} son la intensidad óptica de salida y la transmisión del transductor, respectivamente, cuando el medio circundante es el aire. Esto ofrece la posibilidad de definir una nueva cantidad llamada transmisión relativa (con respecto al aire) que es definida por la siguiente expresión.

$$T^* = \frac{T(n)}{T_{aire}} = \frac{\frac{I_2(n)}{I_1}}{\frac{I_{2aire}}{I_1}} = \frac{I_2(n)}{I_{2aire}} \quad (2.11)$$

En el momento en el que se hace relativa la transmisión de un medio con respecto a otro, en este caso al aire, ayuda a excluir las pérdidas intrínsecas al funcionamiento del sistema y no dependen del fluido que se esté midiendo como medio externo. Esto es debido a que las fibras ópticas transmisora y receptora y los acoplamientos entre elementos contribuyen a la degradación de la señal y por lo tanto a la atenuación en ambos casos, de tal forma que la transmisión relativa $T^*(n)$ muestra solamente los efectos de atenuación de la señal óptica asociados al medio externo y directamente relacionados a su índice de refracción. Por dichos motivos es conveniente usar la transmisión relativa para estudiar experimentalmente las características del elemento óptica. Además de igual manera dicha cantidad se puede expresar en decibelios como se presenta a continuación.

$$T^*(n) = 10 \log_{10} T^*(n) \quad (2.12)$$

2.5 Resumen.

En el presente capítulo se definió el concepto de índice de refracción y la importancia que tiene para la óptica, en particular para el diseño de sensores. Además se observaron diferentes métodos para obtener dicha cantidad, que se pueden resumir en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Técnicas de medición del índice de refracción

Nombre del método	Estado de la sustancia que se desea conocer su índice de refracción	Cantidad a medir
Desviación Lateral	Muestras en forma de hojas	Distancia l entre el rayo transmitido y el rayo refractado
Desviación Angular	Muestras en estado sólido	Angulo de desviación D
Prisma diferencial	Muestras solidas o líquidas	Distancia l entre el rayo transmitido y el rayo refractado
Bloque V	Muestras solidas o líquidas	Distancia l entre el rayo transmitido y el rayo refractado
Coincidencia de índices	Muestras solidas o líquidas	Distancia l entre el rayo transmitido y el rayo refractado
Ángulo de Brewster	Muestras solidas o líquidas	Ángulo θ_B
Angulo Crítico	Muestras solidas	Ángulo θ_c

Se presentó el concepto de sensor y sus diferentes clasificaciones y se exploraron algunos ejemplos de sensores refractométricos intrínsecos y extrínsecos basados en la medición de la intensidad de la luz.