



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ELEMENTOS DE FIBRA ÓPTICA EN
TELECOMUNICACIONES E INSTRUMENTACIÓN:
MODELADO DE LOS SENSORES
REFRACTOMÉTRICOS**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A:
ARIADNA GARCÍA MORENO

DIRECTOR DE TESIS
DR. SERGEI KHOTIAINTSEV



CIUDAD UNIVERSITARIA

JUNIO, 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mis papás Francisco y Carmen y hermanos Bere y
Cris por que sin ellos sería algo sin fundamento, sin
historia ni trascendencia.

A la locura de vivir y a la pasión de existir

Agradecimientos

A mis Papás por que al estar juntos me dan esa fuerza para seguir, por formar un gran equipo y por darme la oportunidad de elegir.

A mi Mamá por la vida que me regalo, por sus desvelos, por su ayuda incondicional, por adivinarme el pensamiento y por todo lo que has hecho a lo largo de estos 25 años por mí, si me acuerdo... aunque pienses que no. Te quiero mucho.

A mi Papá por que ha guiado mis pasos para llegar a la meta, por cumplir mis sueños, por existir y por labrar mi futuro a base de constancia y esmero. Eres un gran ejemplo a seguir y te quiero mucho.

A mis Hermanos Bere y Cris por que sin su sonrisa, su tolerancia y su compañía no lo hubiera logrado. Solo por existir hacen mi vida mejor. Los quiero mucho!!

A todos mis Abuelitos por que gracias a ustedes tengo una familia maravillosa. Papa Balta gracias!!

A la Familia García Vargas por acogerme entre sus brazos como hija y como hermana.

A Erick Alejandro por todo su apoyo incondicional que me sirvió de aliento para poder concluir este proyecto, por que cada cosa que has hecho ha servido para hacerme una mejor persona. Gracias por todo este tiempo invertido en crecer!!

A Trini, Lore y Sigrid por compartir cada momento, por confiar en mí, por permitirme ser su amiga y entrar en sus vidas y en su corazón. Gracias por siempre estar!!

A mis amigas Lizzette, Susi, Ingrid y mis amigos Jesús, Julio (mi conciencia electrónica), David Alba, Augusto, J. Jorge, Marco, Fabricio, David Durán, Juan, Erick Bañales, Jorge Arévalo, Abraham, y Rodrigo. En diferentes circunstancias y momentos, pero todos han formado parte de mi vida. Gracias por escucharme y ayudarme!!

Al Dr. Sergei Khotiaintsev por su apoyo y por compartir sus valiosos conocimientos en las aulas y a lo largo del desarrollo de este trabajo.

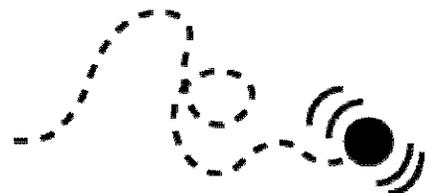
A Katya por su apoyo, por sus consejos y por el trabajo realizado en conjunto para alcanzar nuestras respectivas metas.

A PROBETEL por su aportación para el cumplimiento de este pequeño paso en mi desarrollo profesional.

A la DGAPA-PAPIIT por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto.

A todas las personas que he conocido a lo largo de mi vida, que han dejado una enseñanza en mi persona.

A mi Máxima Casa de Estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme estudiar, trabajar, divertirme, por dejarme tener independencia y libertad de expresión. Por querer mi superación y por hacer posible el desarrollo de mi proyecto de vida.



Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. FIBRAS ÓPTICAS COMO MEDIO DE TRANSMISIÓN	6
2.1. LAS FIBRAS ÓPTICAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	6
2.1.1. <i>Caracterización de fibras ópticas monomodo</i>	6
2.1.2. <i>Caracterización de fibras ópticas multimodo</i>	7
2.1.3. <i>Geometría de las fibras ópticas</i>	8
2.1.4. <i>Características geométricas</i>	10
2.1.5. <i>Características ópticas</i>	10
2.1.6. <i>Características de transmisión</i>	13
2.1.7. <i>Efectos no lineales en la fibra óptica</i>	15
2.1.8. <i>Siguiente generación de fibras ópticas</i>	16
2.2. APLICACIONES DE LAS FIBRAS ÓPTICAS EN TELECOMUNICACIONES.....	21
2.3. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DE DIFERENTES CANTIDADES FÍSICAS	27
3. PRINCIPIOS DE LOS INSTRUMENTOS PARA MEDIR EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN	31
3.1. LAS FIBRAS ÓPTICAS Y EL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL MEDIO EXTERNO.....	31
3.1.1. <i>Índice de refracción</i>	31
3.1.2. <i>Leyes de la refracción</i>	32
3.1.3. <i>Factores que alteran el índice de refracción</i>	35
3.2. EL ORIGEN Y EL DESARROLLO DEL CONCEPTO REFRACCIÓN	35
3.3. REFRACTOMETRÍA ÓPTICA Y SUS APLICACIONES.....	38
3.3.1. <i>Instrumentos para medir el índice de refracción</i>	38
3.4. ESTRUCTURAS DE FIBRA ÓPTICA COMO SENSORES DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL MEDIO EXTERNO	43
4. FUNDAMENTOS DE ANÁLISIS NUMÉRICO DE LOS ELEMENTOS DE FIBRA ÓPTICA.....	46
4.1. CARACTERÍSTICAS DE UN HAZ LUMINOSO.....	46
4.2. MODELADO DE LAS FUENTES DE LUZ Y HACES LUMINOSOS	48
4.2.1. <i>Fuente lambertiana</i>	48
4.2.2. <i>Fuente parcialmente difusa</i>	49
4.2.3. <i>Haz colimado</i>	49
4.3. CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN DE LOS ELEMENTOS DE FIBRA ÓPTICA.....	49
4.3.1. <i>Función de transmisión del sensor de intensidad en fibra óptica</i>	49
4.3.2. <i>Características de transmisión del elemento de prueba refractométrico</i>	50
4.3.3. <i>Cálculo del coeficiente de transmisión del elemento de prueba</i>	52
4.4. CONSIDERACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE FIBRA ÓPTICA.	53
5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE UN SENSOR REFRACTOMÉTRICO.....	55
5.1. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DE PRUEBA	55
5.2. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE SENSOR REFRACTOMÉTRICO DE ELEMENTO DE PRUEBA SEMIESFÉRICO	60

5.2.1. <i>Discusión de los resultados de simulación del sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico</i>	62
5.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE SENSOR REFRACTOMÉTRICO DE ELEMENTO DE PRUEBA SEMIELIPSOIDAL	66
5.3.1. <i>Discusión de los resultados de simulación de sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal</i>	70
5.4. COMPARACIÓN DE ELEMENTOS DE PRUEBA DEL SENSOR REFRACTOMÉTRICO SEMIESFÉRICO Y SEMIELIPSOIDAL	74
5.5. OPTIMIZACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE TRANSMISIÓN PARA SU APLICACIÓN	76
5.6. COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES Y ESTUDIO DEL EFECTO DE VARIACIONES PEQUEÑAS DE ALGUNOS PARÁMETROS SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR	77
5.6.1. <i>Comparación del experimento con los resultados de la simulación numérica</i>	79
5.6.2. <i>Cálculo de la no linealidad $\delta(n)$ de la respuesta de la transmisión relativa T^*</i>	81
5.7. EFECTO DE LA VARIACIÓN DE DIFERENTES PARÁMETROS SOBRE LA RESPUESTA DE LA TRANSMISIÓN RELATIVA $T^*(n)$ DEL SENSOR REFRACTOMÉTRICO DE ELEMENTO DE PRUEBA SEMIESFÉRICO	83
5.7.1. <i>Efecto de la posición relativa de las fibras ópticas x</i>	83
5.7.2. <i>Efecto de la variación del diámetro relativo de las fibras óptica d y la apertura numérica $A.N.$</i>	84
6. CONCLUSIONES GENERALES	87
7. REFERENCIAS	90
8. APÉNDICE	93
8.1. APÉNDICE A.....	94
8.2. APÉNDICE B.....	107

1. Introducción

┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌

Antecedentes.

La tecnología y aplicaciones de las fibras ópticas han ido progresando rápidamente en los últimos años. Pero la fibra óptica es un medio físico sujeto a diversas perturbaciones todo el tiempo, por eso en las aplicaciones de telecomunicaciones se trata de minimizar esos efectos de tal forma que la señal de transmisión y la de recepción sean confiables. Por otra parte en la detección con fibra óptica, la respuesta a la influencia externa se trata de realzar deliberadamente para que el cambio resultante en la radiación óptica pueda ser usado como una medida de la perturbación externa. En las comunicaciones, la señal que pasa a través de la fibra óptica está ya modulada, mientras que en la detección la fibra óptica actúa como modulador. También puede servir como transductor y convertir mediciones como temperatura, tensión, rotación o corrientes eléctricas o magnéticas en un cambio correspondiente a radiación óptica. Puesto que la luz es caracterizada por amplitud (intensidad), fase, frecuencia y polarización, cualquiera de estos parámetros puede experimentar un cambio. La utilidad del sensor de fibra óptica por lo tanto depende de la magnitud de este cambio y de nuestra capacidad de medir y de cuantificar la confiabilidad y exactitud.

Las ventajas de los sensores de fibra óptica es que están libres de interferencia electromagnética, tienen un ancho de banda grande, ocupan poco lugar por lo tanto son compactos, tienen versatilidad geométrica y son económicos. En general los sensores de

fibra óptica, son caracterizados por su alta sensibilidad comparados con otros tipos de sensores. Son de naturaleza pasiva debido a su construcción dieléctrica. Fibras ópticas especiales pueden soportar temperaturas altas y ambientes ruidosos. En aplicaciones de telemetría y de medición remota es posible utilizar un segmento de fibra óptica como elemento de prueba mientras que una longitud grande de otra o de esa misma fibra óptica puede enviar la información a una estación remota. Muchos de los dispositivos (divisores, combinadores, multiplexores, filtros, etc.) pueden ser fabricados de elementos de fibra óptica, de esta forma se puede realizar todo el sistema de medición con fibra óptica.

En la presente tesis se estudia las propiedades de un sensor refractométrico de fibras ópticas; una fibra óptica actúa como emisora de un haz luz y la otra como fibra receptora. Este sensor determina el índice de refracción del medio externo por medio de la medición de la intensidad de la luz que pasa a través de una estructura (elemento de prueba o transductor óptico), la transmisión óptica del transductor debe ser una función del índice de refracción. Utilizando este tipo de sensores se obtiene una alta sensibilidad en la medición del índice de refracción. Como todos los sensores ópticos, los sensores refractométricos de fibra óptica están libres de interferencia electromagnética, se pueden utilizar estos sensores a altas o bajas temperaturas, por lo tanto son convenientes para diferentes aplicaciones en la industria en general. En particular en la industria química en la cual se puede determinar el índice de refracción y su concentración de una muestra específica.

La necesidad de determinar una forma del elemento de prueba del sensor refractométrico que sea confiable, duradero y estable nos lleva al desarrollo de este trabajo ya que los problemas vienen al momento de realizar la implementación del sensor para una tipo de líquido y requerimientos de una aplicación específica.

Este tipo de sensores no están actualmente en el mercado debido a su alto costo en el diseño de un sensor para cada tipo de aplicación. Por lo tanto el reto en el diseño está en encontrar la forma del elemento de prueba del sensor refractométrico para el cual se tenga el mejor desempeño, con las mejores características para sobrepasar la respuesta que hasta ahora se ha tenido en estudios anteriores del sensor refractométrico.

Objetivos del trabajo

El objetivo principal consiste en investigar teóricamente el efecto de varias formas geométricas de superficie de trabajo de un sensor refractométrico sobre su respuesta al índice de refracción del medio externo.

Como objetivos secundarios se tiene:

- Analizar la influencia de los parámetros de las fibras ópticas (diámetro, apertura numérica, posición de las fibras ópticas) sobre las características de los sensores refractométricos con superficies de trabajo de diferentes formas geométricas.
- Determinar la mejor forma para ser utilizada en un sensor refractométrico, en función de una aplicación.

- Evaluar el funcionamiento del programa de simulación, realizando la comparación entre los resultados teóricos y los experimentales.

Metodología

La metodología a seguir:

- a) Identificar las fuentes de información sobre los sensores refractométricos en fibras ópticas.
- b) Analizar las características de fibras ópticas incluyendo los nuevos desarrollos en este campo.
- c) Analizar los diferentes sensores existentes en el área de sensores basados en fibras ópticas.
- d) Investigar sobre los nuevos métodos utilizados en refractometría.
- e) Determinar características importantes de los sensores refractométricos de intensidad.
- f) Realizar la simulación numérica de la propagación de la luz en un sensor refractométrico y obtener la característica de transmisión en los sensores refractométricos de diferentes formas de superficie de trabajo.
- g) Comparar las características de los sensores refractométricos con diferentes tipos de superficie de trabajo.
- h) Comparar los resultados teóricos obtenidos de la simulación numérica con los resultados experimentales.

2. Fibras ópticas como medio de transmisión

┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌

2.1. Las fibras ópticas y sus características

Una fibra óptica son conductos, rígidos o flexibles, de plástico o de vidrio (sílice), que son capaces de conducir un haz de luz inyectado en uno de sus extremos, mediante sucesivas reflexiones que lo mantienen dentro de sí para salir por el otro extremo.

Para analizar las características de las fibras ópticas se puede hacer una clasificación del siguiente tipo:

- Características dimensionales y geométricas.
- Características ópticas.
- Características de transmisión.

A continuación se enumeran las características en función del comportamiento de la fibra óptica que se vaya a caracterizar: monomodo o multimodo.

2.1.1. Caracterización de fibras ópticas monomodo

Una fibra óptica monomodo [1], es la fibra en la cual solo se propaga por el núcleo de la fibra el modo fundamental. Las características para una fibra monomodo se separan a continuación en función de su tipo:

Características geométricas

- Diámetro del núcleo.
- No circularidad del núcleo.
- Error de concentricidad núcleo-revestimiento.
- Diámetro del revestimiento.
- No circularidad del revestimiento.
- Diámetro del recubrimiento primario.
- No circularidad del recubrimiento primario.
- Error de concentricidad revestimiento-recubrimiento primario.

Características ópticas

- Apertura numérica.
- Perfil de la fibra óptica. Distribución del índice de refracción de una fibra óptica en núcleo-revestimiento.
- Longitud de onda de corte.
- Diámetro del campo modal.
- Error de concentricidad del campo modal.

Características de transmisión

- Coeficiente de atenuación.
- Dispersión total/ancho de banda. Para las fibras ópticas monomodo, la dispersión cromática será la que determinará fundamentalmente el ancho de banda de ésta.

2.1.2. Caracterización de fibras ópticas multimodo

Una fibra óptica multimodo [1], es la fibra en la cual se propaga el modo fundamental y los modos de orden superior como se muestra en la figura 2.1 Las características para una fibra multimodo se separan a continuación en función de su tipo:

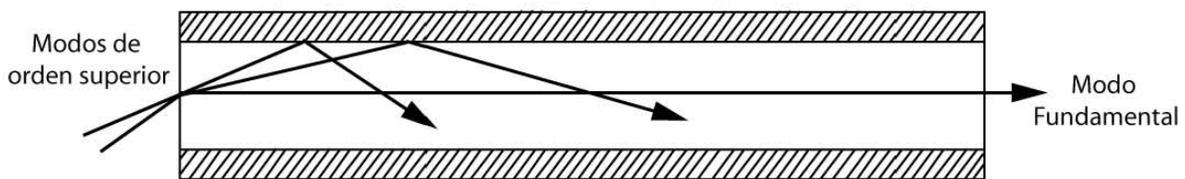


Fig. 2.1 Modelo de óptica geométrica de propagación en una fibra óptica de modo fundamental y modos de orden superior.

Características geométricas

- Diámetro del núcleo.
- No circularidad del núcleo.
- Error de concentricidad núcleo-revestimiento.
- Diámetro del revestimiento.
- No circularidad del revestimiento.
- Diámetro del recubrimiento primario.
- No circularidad del recubrimiento primario.
- Error de concentricidad revestimiento-recubrimiento primario.

Características ópticas

- Apertura numérica.
- Perfil de la fibra óptica. Distribución del índice de refracción de una fibra óptica en núcleo revestimiento.

Características de transmisión

- Coeficiente de atenuación.
- Dispersión total/ancho de banda. La dispersión modal será la que determinará fundamentalmente el ancho de banda de una fibra óptica multimodo.

2.1.3. Geometría de las fibras ópticas

La fibra óptica se encuentra compuesta de 3 capas principales de material como se muestra en la figura 2.2:

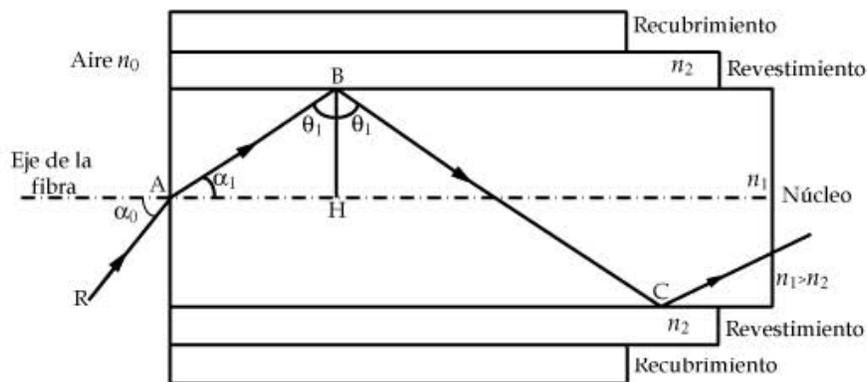


Fig. 2.2 Corte longitudinal de una fibra óptica.

1) Núcleo

El núcleo, cuya estructura y dimensiones dependen del tipo de fibra óptica, es la zona interior de la fibra óptica donde se produce la propagación de la luz, la cual se debe a que el valor del índice del núcleo es mayor que el del revestimiento. La propagación se lleva a cabo de dos diferentes formas:

La primera forma consiste en una serie de reflexiones sucesivas en la frontera entre el núcleo y el revestimiento, debido a la diferencia entre el índice de refracción del núcleo y el del revestimiento.

La segunda forma consiste en una serie de continuas refracciones en el interior del núcleo de la fibra, debido a la distribución del índice de refracción del núcleo.

2) Revestimiento

El revestimiento es la capa central concéntrica con el núcleo y el recubrimiento, éste produce la reflexión de la onda luminosa.

3) Recubrimiento

El recubrimiento es la capa exterior de la fibra óptica concéntrica al revestimiento y al núcleo. Cumple una función de protección mecánica del conductor de fibra óptica, dándole una mayor solidez y evita la formación de microcurvaturas en el núcleo de la fibra óptica. Se aplica en dos capas, la capa inferior (primaria) es elástica y flexible mientras que el exterior (secundaria) presenta una mayor dureza y rigidez.

Perfil de índice de una fibra

El perfil de índice de una fibra óptica se define como la distribución de los índices de refracción de núcleo y revestimiento a lo largo del diámetro de una fibra óptica. Ya que el índice de refracción del revestimiento permanece constante, se clasifica en dos grupos principalmente: perfil de índice gradual y perfil de índice escalonado.

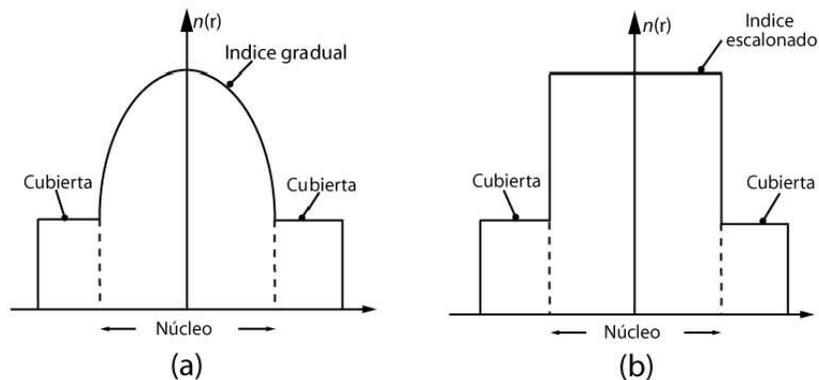


Fig. 2.3 Perfil de índice de una fibra óptica: a) índice gradual, b) índice escalonado.

-*Perfil de índice gradual.* El índice de refracción no permanece constante, presentando una sección cóncava con una forma acampanada, de manera que el índice de refracción en el centro del núcleo es máximo y decrece a medida que se va alejando de éste. En la frontera entre núcleo y revestimiento se igualan los valores de ambos índices de refracción.

-*Perfil de índice escalonado.* El valor del índice de refracción del núcleo permanece constante, presenta una sección recta, de manera que el índice de refracción a lo largo de toda la sección del núcleo de la fibra óptica es máximo. En la frontera entre el núcleo y revestimiento decrece bruscamente el valor del índice de refracción del revestimiento y la fibra óptica presenta una sección en escalón con dos secciones rectas.

Existen dos tipos fundamentales de comportamiento en las fibras ópticas de perfil escalonado: monomodo y multimodo. La diferencia es que las fibras ópticas monomodo se propaga únicamente el modo fundamental mientras que para las multimodo se propagan varios modos: el modo fundamental y modos de orden superior.

2.1.4. Características geométricas

A continuación se definen las características geométricas:

-Diámetro del núcleo.- diámetro del círculo definido por el centro del núcleo y su circunferencia circunscrita se expresa en micras.

-No circularidad del núcleo.- es el cociente entre la diferencia de los dos diámetros que determinan el campo de tolerancia del núcleo. Es adimensional, se expresa de manera porcentual.

-Error de concentricidad núcleo-revestimiento.- es el cociente entre la distancia que separa los centros de núcleo y revestimiento y el diámetro del núcleo. Es adimensional, se expresa de forma porcentual.

-Diámetro del revestimiento.- es el diámetro de la circunferencia circunscrita que mejor se adapta a la sección transversal del revestimiento de la fibra óptica. Se expresa en micras.

-No circularidad del revestimiento.- es el cociente entre la diferencia de los dos diámetros que determinan el campo de tolerancia del revestimiento y el diámetro del revestimiento. Es adimensional, es porcentual.

-Diámetro medio del recubrimiento primario.- es la media aritmética de los dos diámetros que determinan el campo de tolerancia del recubrimiento primario.

-No circularidad del recubrimiento primario.- es el cociente entre la diferencia de los dos diámetros que determinan el campo de tolerancia del recubrimiento primario y el diámetro medio -del recubrimiento primario: es adimensional, es porcentual.

-Error de concentricidad revestimiento-recubrimiento primario.- es el cociente entre la distancia que separa los centros de revestimiento y recubrimiento primario y el diámetro del revestimiento. Es adimensional, se expresa adimensionalmente.

2.1.5. Características ópticas

Estas características se encargarán de determinar el comportamiento de la fibra óptica a partir de las características que la fibra óptica tenga. A través de esto es posible determinar el número total de modos que pueden propagarse simultáneamente por el núcleo de la fibra óptica, así como el rango de longitudes de onda de los mismos.

Apertura numérica [A.N.]

Es el parámetro que delimita el rango de pulsos luminosos capaces de ser acoplados y de propagarse por el núcleo de la fibra. Es el valor numérico del seno del máximo ángulo α_{0M} que posibilita el acoplamiento de la onda luminosa desde el exterior de la fibra hasta su interior. Cuanto mayor sea la diferencia entre el índice del núcleo y el de la cubierta mayor será la apertura numérica, por lo que aumentará el número de ángulos de entrada que permiten la propagación de la luz. En el caso de que el medio externo sea el aire, la apertura numérica *A.N.* está dada por:

$$A.N. = \text{sen} \alpha_{0M} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-1)$$

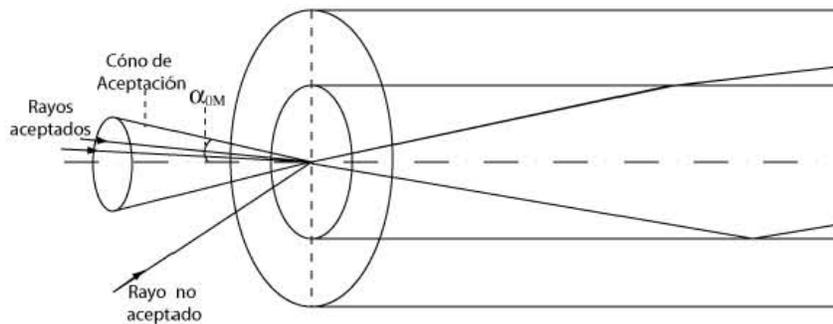


Fig. 2.4 Cono de aceptación de una fibra óptica.

Frecuencia normalizada [V]

Es un parámetro adimensional que se utiliza para generalizar y poder comparar los fenómenos de propagación en la fibras que tienen radios de núcleo a diferentes, e índices de núcleo n_1 y de cubierta n_2 diferentes, además que a través de él permite el cálculo del número de modos que es posible propagar por el núcleo de la fibra óptica. Se define como:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda} A.N. \quad (2-2)$$

V – frecuencia normalizada

a – radio del núcleo de la fibra

$A.N.$ – apertura numérica

λ – longitud de onda del pulso luminoso

En el caso de las fibras ópticas monomodo, sirve para determinar el valor de la longitud de onda de corte y para obtener el diámetro del campo modal.

Número de modos de propagación [M]

Este parámetro será determinado a través de la siguiente ecuación matemática:

$$M = \frac{V^2}{2} \frac{g}{g+2} \quad (2-3)$$

M – número de modos de propagación

V – frecuencia normalizada

g – coeficiente que caracteriza al perfil de índice

Para valores de V inferiores a 2.405 existe un único modo de propagación, mientras que para valores mayores es posible la existencia de más modos [1].

Longitud de onda de corte

La longitud de onda de corte es definido como la longitud de onda a la cual la atenuación del modo de segundo orden es por lo menos 19.34 dB arriba de la atenuación del modo fundamental, es decir el valor de α a partir del cual la fibra óptica se comporta como monomodo; también se puede definir como aquella longitud de onda, donde la relación entre la potencia total y potencia del modo fundamental es igual a 0.1 dB [1]. La longitud de onda de corte teóricamente se puede definir para un perfil de índice arbitrario calculando la longitud de onda donde la constante de propagación para el modo de propagación mas alto, es igual al del revestimiento.

La longitud de onda de corte representa un límite superior establecido en donde se tenga la menor pérdida, lo cual llevaría a un ancho de banda infinito y un revestimiento infinito algo imposible. En principio, el modo de orden mas alto es conducido a longitudes de onda por debajo de este valor; sin embargo, la actual medición de longitud de onda será generalmente menor por que el modo de orden mas alto sufre grandes pérdidas por curvaturas como la longitud de onda de corte es aprovechada por debajo. Este fenómeno limita los modos de alto orden y desplaza a la longitud de onda de corte efectiva a longitudes de onda bajas.

Diámetro del campo modal

La apertura numérica $A.N.$ no se define para fibras ópticas monomodo, tampoco se define el radio del núcleo. En cambio, se utiliza el denominado diámetro del campo modal. Este diámetro se define como aquel valor del diámetro del núcleo para el que la intensidad del campo óptico del modo fundamental se reduce a un valor de $1/e$ o 37 % con respecto al valor máximo alcanzado en el centro del núcleo de la fibra lo que implicaría el 100 % o un diámetro de cero [1].

El diámetro del campo modal depende directamente del parámetro V y del radio del núcleo, lo que implica que este parámetro depende de la $A.N.$ y de la longitud de onda de trabajo.

Su cálculo a partir de la frecuencia normalizada V , se puede determinar a través de la siguiente expresión:

$$\omega_0 = 2a \frac{2.6}{V} \quad (2-4)$$

ω_0 – diámetro del campo modal

a – radio del núcleo de la fibra óptica

V – frecuencia normalizada

2.1.6. Características de transmisión

Atenuación

El atributo clave en muchos de los sistemas de transmisión de la fibra óptica es la atenuación, la cual determina la amplificación o el espacio entre repetidores y es una pieza importante en el diseño de un sistema.

Cuando es deseable una baja atenuación, es importante que el valor permanezca estable durante el proceso de cableado y en el tiempo de vida del sistema. Una necesidad adicional es que la atenuación siga siendo uniforme a través del paso de la zona de transmisión.

Los mecanismos de atenuación de la fibra se pueden clasificar en: intrínsecos y extrínsecos. El primero incluye la dispersión de Rayleigh y la absorción del vidrio de silicio, el último comprende las pérdidas debidas a las impurezas y curvaturas.

La atenuación por la dispersión de Rayleigh en silicio puro es de aproximadamente de 0.14 dB/Km. Esto es aproximadamente el 70 % del total de las pérdidas en muchas de las fibras de transmisión. La incorporación de dopantes en el vidrio aumenta las pérdidas por dispersión de una forma que es linealmente proporcional a la concentración de dopantes. Pueden existir más pérdidas por dispersión debido a las irregularidades y a la presión en la fibra. Ésta generalmente puede ser minimizada con un cuidado especial de la temperatura y de la tensión durante su manufactura.

Una fuente importante de las pérdidas extrínsecas es la absorción de iones OH⁻, los cuales entran al vidrio en forma de vapor de agua. En el proceso de IVD (*inside vapor deposition*), esta impureza es primeramente introducida a través del tubo de inicio, para el proceso OVD (*outside vapor deposition*), la contaminación ocurre como resultado de la flama de hidrólisis.

Las microcurvaturas y macrocurvaturas también proveen adicionales fuentes de atenuación. Las microcurvaturas son pérdidas acumulativas debido a pequeñas ondulaciones. Estas ondulaciones son comparables con una escala en el orden de las micras, la cual es comparable con la longitud de onda de la señal. Las pérdidas por microcurvaturas regularmente se presentan en puntos de tensión creados por la cubierta o por fluctuaciones del diámetro de la fibra óptica.

Las macrocurvaturas son sensibles a curvas con radio de curvatura mucho mayor a la longitud de onda de la señal. Las contribuciones a las pérdidas por micro y macrocurvaturas se pueden estimar analíticamente, pero éstas son generalmente pequeñas comparadas con las pérdidas por absorción y por dispersión. Sin embargo, las pérdidas por macrocurvaturas se pueden observar en longitudes de onda grandes, desde que el modo del diámetro de campo incrementa la longitud de onda y los modos son menos limitados. Estos modos como son débiles son susceptibles a perturbaciones por macrocurvaturas las cuales producen salida de luz en la cubierta. Una característica sabida es que el borde de la curva puede aparecer en el perfil del diseño en donde la longitud de onda de corte del modo fundamental es reducida para conseguir mayor dispersión de la guía de onda. Esto desplaza la longitud de onda de corte efectiva para

este modo hacia la zona de WDM y se podría producir un incremento agudo en la atenuación a grandes longitudes de onda lo cual limitaría el funcionamiento en banda ancha.

Dispersión

Este parámetro define la capacidad máxima que, por unidad de longitud, se puede transmitir por una fibra, por lo que puede medirse en términos de retardo relativo o de la máxima frecuencia pasante que admite ya sea señal analógica o digital.

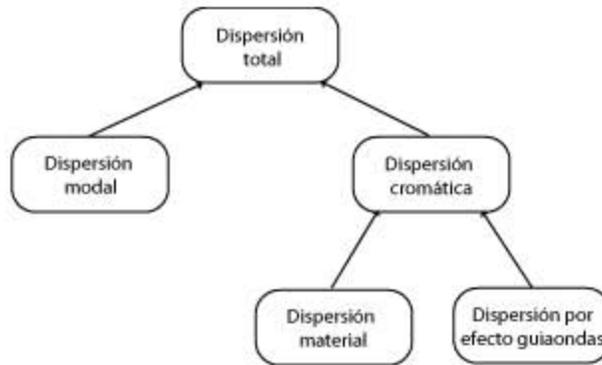


Fig. 2.5 Tipos de dispersión en las fibras ópticas.

-*Dispersión modal.* Los modos de orden pequeño viajan periódicamente en línea recta, mientras que los de orden mayor reciben un gran número de reflexiones totales.

Es la diferencia en tiempo que tardan los diversos modos en recorrer una longitud dada de fibra. Este retardo está en función de la velocidad de la luz, del índice de refracción de la luz y del revestimiento y de la longitud de la fibra óptica.

Este tipo de dispersión es el parámetro más importante para las fibras ópticas multimodo y el que produce prácticamente la totalidad de las limitaciones en el ancho de banda de este tipo de fibras.

-*Dispersión cromática.* La dispersión cromática depende de la longitud de onda utilizada y es el parámetro fundamental que determina el ancho de banda en las fibras ópticas monomodo. Ésta es la suma de dos tipos existentes de dispersión debida al material que compone la fibra óptica.

1) *Dispersión material.*- es el retardo existente a la salida de una fibra óptica cuando se inyecta luz de diversas longitudes de onda, aun cuando se inyecte en el mismo instante, en una dirección dada y se propaga a diferentes velocidades.

2) *Dispersión por efecto de guía de ondas.*- es provocada por que a cada longitud de onda le corresponde un índice de refracción diferente, por lo mismo el ángulo que forma la trayectoria asociada a ellos será distinta así como las trayectorias recorridas. Este tipo de dispersión afecta la velocidad de propagación de cada uno de los modos que conforman el haz luminoso.

2.1.7. Efectos no lineales en la fibra óptica

Entre los fenómenos no lineales más conocidos que se producen en las fibras ópticas de sílice destacan: dispersiones estimuladas de Raman y Brillouin, modulaciones de fase inducidas por las portadoras o por la mezcla de cuatro ondas. A continuación describiré cada uno de ellos:

Dispersión estimulada de Raman

La dispersión de Raman [2] se refiere a la interacción que sufren las ondas ópticas con las vibraciones moleculares del material. Las ondas incidentes se dispersan al chocar con las moléculas y experimentan una reducción de su frecuencia óptica. Este desplazamiento de frecuencia coincide precisamente con la frecuencia de vibración de las moléculas, llamada frecuencia de Stokes. Una cuestión a tener en cuenta se produce cuando se inyectan simultáneamente dos ondas ópticas separadas por la frecuencia de Stokes en un medio raman activo. En este caso, la onda de menor frecuencia experimentará una ganancia óptica generada por, y a expensas, de la onda de mayor frecuencia (bombeo). Este proceso de ganancia se conoce como dispersión estimulada de Raman (SRS, *stimulated Raman scattering*) y constituye la base para la fabricación de los amplificadores ópticos de Raman.

Dispersión estimulada de Brillouin

El proceso no lineal de dispersión estimulada de Brillouin [2] (SBS, *stimulated Brillouin scattering*) es similar al SRS, salvo que el SBS depende de ondas sonoras en lugar de vibraciones moleculares. En este aspecto, ambos procesos involucran tres ondas según las cuales la onda óptica incidente (bombeo) se convierte en una onda de Stokes de mayor longitud de onda por medio de la excitación de una vibración molecular (SRS) o de un fonón acústico (SBS). No obstante, existen importantes diferencias entre el SBS y el SRS que conducen a consecuencias distintas en el sistema de comunicaciones ópticas.

Modulación de fase cruzada

En sistemas que emplean modulación PSK la información se imprime digitalmente sobre la fase de la portadora óptica (típicamente desplazamientos de $+p/2$ y $-p/2$ para representar los símbolos lógicos "0" y "1"). Cualquier fuente de ruido de fase conducirá a una degradación en las prestaciones de dichos sistemas. Precisamente una no linealidad óptica que afecta solamente a la fase de la señal que se propaga por la fibra es el índice de refracción no lineal, el cual da lugar a una modulación de fase inducida por la portadora. En sistemas monocal, este fenómeno se conoce como automodulación de fase[8] (SPM, *self-phase modulation*) y convierte las fluctuaciones de potencia óptica de una determinada onda en fluctuaciones de fase de la misma onda. En sistemas WDM, por otro lado, la modulación de fase cruzada (XPM, *cross-phase modulation*) convierte las fluctuaciones de potencia óptica de un determinado canal en fluctuaciones de fase en el resto de canales. Para idénticos parámetros del sistema, el fenómeno no lineal de XPM es el doble de eficiente que el SPM.

Los fenómenos de SPM y XPM en fibras estándar se producen debido a la existencia de una componente del índice de refracción dependiente de la intensidad de las señales ópticas (efecto de Kerr).

Mezcla de cuatro ondas

La misma no linealidad que da lugar al índice de refracción no lineal participa también en el proceso de mezcla de cuatro ondas [2] (FWM, *four-wave mixing*) en fibras ópticas monomodo. Este proceso no lineal se caracteriza por mezclas de tercer orden entre las portadoras ópticas que dan lugar a la aparición de nuevas frecuencias a la salida del medio de transmisión. Considerando que se propagan dos portadoras a frecuencias ópticas f_1 y f_2 por una misma fibra, el proceso no lineal generará dos nuevas bandas laterales a frecuencias $2f_1 - f_2$ y $2f_2 - f_1$. Estas bandas laterales se propagarán junto con las dos ondas iniciales aumentando su amplitud a expensas de la energía de las originales. De forma similar, tres canales propagándose por la fibra darán lugar a la generación de nueve ondas adicionales a frecuencias $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$, donde i, j y k pueden ser 1, 2 ó 3. Estos nuevos productos generados por FWM se muestran en la figura 2.6. Si los canales se encuentran igualmente espaciados, algunas de las nuevas ondas generadas tendrán frecuencias coincidentes con las de los canales inyectados en la fibra. De la figura 2.6 se desprende que las nuevas ondas generadas por FWM degradarán considerablemente las prestaciones en sistemas WDM con gran número de canales. Los efectos inmediatos serán una atenuación adicional de la potencia de los canales y fenómenos de diafonía.

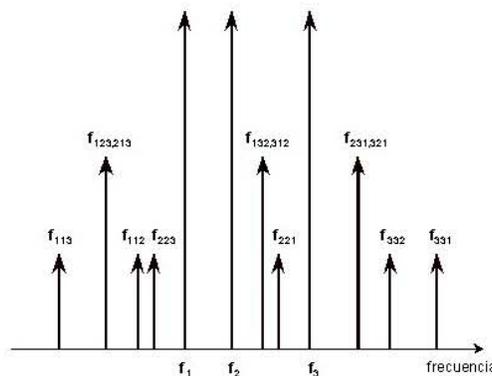


Fig. 2.6 Productos de FWM generados por tres portadoras ópticas.

Un método para reducir las degradaciones introducidas por el FWM en sistemas multicanal WDM consiste en emplear fibras dispersivas para conseguir aumentar la desadaptación de fases del proceso no lineal. Sin embargo, dado que valores elevados de dispersión cromática conducen a otro tipo de degradaciones, suelen emplearse fibras ópticas NZDSFs (*nearly zero dispersion-shifted fibers*). Este tipo de fibras se caracterizan por valores de dispersión suficientemente reducidos, pero no nulos, para evitar simultáneamente los efectos dispersivos y no lineales. Finalmente, se ha demostrado que la técnica de inversión espectral (conjugación óptica) también resulta válida para compensar las degradaciones producidas por FWM. Este hecho es buena muestra de un principio general: la compensación de efectos no lineales por medio de la generación de otros efectos no lineales.

2.1.8. Siguiete generación de fibras ópticas

En los párrafos anteriores se ha descrito las características básicas de las fibras ópticas. Se espera que éstas jueguen un papel muy importante en la siguiente generación de sistemas

de telecomunicaciones, los cuales requerirán de perfiles de índice de refracción más sofisticados y de procesos de manufactura más robustos. Muchos de los sistemas actuales están limitados por la relación señal a ruido. Las mejoras en esta área requieren de bajos valores de atenuación en la ventana de 1250-1650 nm. [3], lo que implica que las pérdidas debidas a impurezas, dispersión y curvaturas necesitan reducirse. Una reducción de la longitud de onda de corte puede ser necesaria para asegurar la implementación de un único modo de propagación o bombeo Raman en la ventana de 1400-1500 nm. Un desafío en el diseño del perfil es reducir la longitud de onda de corte de la fibra sin reducir substancialmente el área efectiva o incrementar la sensibilidad a las curvaturas. Es deseable que se realicen mejoras en varias de las áreas relacionadas con la dispersión, incluyendo la compensación en banda ancha y reducciones en PMD (*polarization mode dispersion*) y variabilidad en la dispersión. Finalmente, todavía continúa el interés en incrementar el área efectiva de todos los tipos de fibra. A continuación se muestra una tabla de fibras ópticas y sus aplicaciones que se encuentran disponibles en el mercado, de la empresa Corning.

Tabla 2.1 Aplicaciones para algunos tipos de fibras ópticas [4].

Tipo de Fibra Óptica	Aplicaciones
Vascade® R1000 Optical Fiber	Alta capacidad, alta tasa de transmisión de datos, redes transoceánicas; largas distancias bajo el mar
Vascade® L1000 Optical Fiber	Alta velocidad, alta capacidad, redes submarinas sin repetidores
LEAF® Optical Fiber	Alta capacidad, alta tasa de transmisión de datos, redes terrestres de largo alcance; optimizadas para multiplexación por división de longitud de onda (DWDM) y tecnología de redes ópticas
MetroCor® Optical Fiber	Alta transferencia de datos, redes de anillo regionales y metropolitanas; optimizada para redes metropolitanas por multiplexación por división de longitud de onda (WDM) en la zona EDFA y tecnología óptica
SMF-28e® Optical Fiber	Telefonía de acceso local, metropolitano y regional, redes para televisión, aplicaciones CWDM, longitudes de onda de la banda de 1310 nm a la banda de 1550 nm

NexCor™ Optical Fiber with MaxPower™ Technology	Red de convergencia de voz, video y datos ("triple play), transmisión rentable de video analógico con una entrega eficiente para la migración a video digital
InfiniCor® SX+ Optical Fiber	Alta velocidad, , redes de área local basadas en láser, redes de almacenamiento, alta velocidad para interconexiones paralelas para oficinas centrales y acceso a redes
InfiniCor® SXi Optical Fiber	Alta velocidad, redes de almacenamiento basadas en láser, alta velocidad para interconexiones paralelas para oficinas centrales y acceso a redes
InfiniCor® CL™ 1000 Optical Fiber	Alta velocidad, redes de área local basadas en láser que requieren conexión a grandes distancias, redes de acceso local
InfiniCor® 300 Optical Fiber InfiniCor® 600 Optical Fiber	Alta velocidad, redes de área local basadas en láser, redes de acceso local

Fibras de cristal fotónico (PCF)

Las fibras de cristal fotónico [5], [6] (PCF- *photonic crystal fiber*) son un nuevo tipo de fibras ópticas que contienen un arreglo microscópico de huecos de aire a lo largo de la fibra, mas o menos con la misma longitud de onda.

Mas de una década después del origen del concepto de las fibras de cristal fotónico es cuando esta tecnología está compitiendo con fibras convencionales en muchas e importantes aplicaciones como puede ser espectroscopia, biomedicina, formación de imágenes y telecomunicaciones y está abierta a otras aplicaciones que no son accesibles para todos los tipos de fibras de vidrio.

Las fibras ópticas convencionales están limitadas a pequeñas diferencias en el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento. El gran índice de refracción entre aire y vidrio para las fibras de cristal fotónico y la habilidad de modificar los tamaños y las posiciones de los huecos de aire da como resultado un mayor rango de perfiles de índice de refracción y como consecuencia fibras con características ópticas poco comunes.

Este tipo de fibras pueden ser monomodo para todas las longitudes de onda o para una longitud de onda en específico para núcleos de diámetro grandes. Sin embargo, pueden ser altamente no lineales, poseen dispersión poco común o pueden ser altamente birrefringentes.

Existen dos tipos de fibras ópticas de cristal fotónico diferentes, aunque quizá el tipo mas novedoso sean las fibras con núcleo hueco (*hollow core fiber*) a diferencia de las fibras con núcleo sólido (*solid core fiber*).

-*Fibra de cristal fotónico con núcleo sólido.* Como las fibras convencionales, éstas fibras guían la luz por reflexión total interna en la frontera entre un bajo índice de refracción del revestimiento y un alto índice del núcleo. En la mayoría de las fibras de este tipo la diferencia de índice requerida es creada por el dopaje del núcleo o del revestimiento. En una fibra de cristal fotónico lo mismo es logrado incorporando agujeros en el revestimiento. Por esta alteración del arreglo de huecos o la figura del núcleo, propiedades ópticas como la forma de la figura, la no linealidad, la dispersión y la birrefringencia pueden ser modificadas por encima del rango. Como la distribución de luz entre el aire y vidrio cambia con la longitud de onda también lo hará el promedio del índice. Esto puede ser explotado para crear fibras con grandes cantidades de dispersión de ambas señales o de hecho de muy baja dispersión usando la dependencia del índice de refracción efectivo para la compensación por material y dispersión por guía de onda.

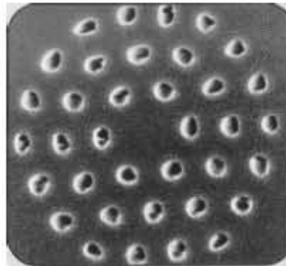


Fig. 2.7 Fotografía ampliada de una fibra óptica de cristal fotónico con núcleo sólido [5].

Es muy fácil incorporar mas de un núcleo dentro del revestimiento del cristal fotónico, permitiendo arreglos de guía de onda acoplado o independiente. Tanto en las fibras ópticas de cristal fotónico de núcleo sólido como en las fibras convencionales que guían la luz por reflexión total interna la mayoría de la luz se propaga en el vidrio.

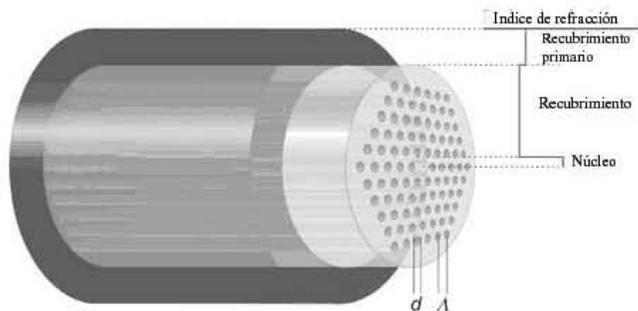


Fig. 2.8 Estructura de una fibra óptica de cristal fotónico con núcleo sólido.

-Fibra de cristal fotónico con núcleo hueco. Emplean fundamentalmente un mecanismo diferente para guiar la luz. Una banda prohibida fotónica en el revestimiento actúa como un espejo virtual libre de pérdidas confinando la luz en el núcleo que no necesariamente tiene que ser de material sólido. Esto hace posible crear guías de onda de bajas pérdidas rellenas de gas o con un núcleo vacío a una longitud de onda idéntica a las guías de onda huecas utilizadas en la tecnología de microondas.

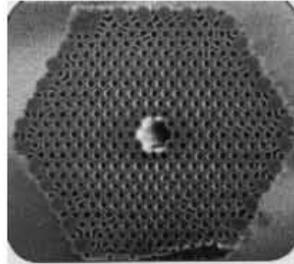


Fig. 2.9 Fotografía ampliada de una fibra óptica de cristal fotónico con núcleo hueco [5].

Las bandas prohibidas fotónicas se pueden formar de materiales con un índice de refracción de estructura periódica; en las fibras de cristal fotónico se logra incorporando huecos en la matriz de vidrio. Lo que hace interesante este concepto es que la interacción entre la luz y el vidrio puede ser extraordinariamente pequeña. En algunos tipos de fibras de cristal fotónico menos del 1% de la potencia óptica se propaga en el vidrio [4], se reduce el factor para el cual la mayor parte de las propiedades del vidrio determina las propiedades de la fibra.

Las fibras ópticas de cristal fotónico con núcleo hueco puede tener por lo tanto muy baja no linealidad, alto umbral de mal funcionamiento, dispersión cero a cualquier longitud de diseño y una interfaz de reflexión insignificante.

Además se puede fabricar fibras de bajas pérdidas relativamente con materiales de altas pérdidas haciendo mas grande el rango de materiales que pueden ser considerados para la fabricación de fibras.

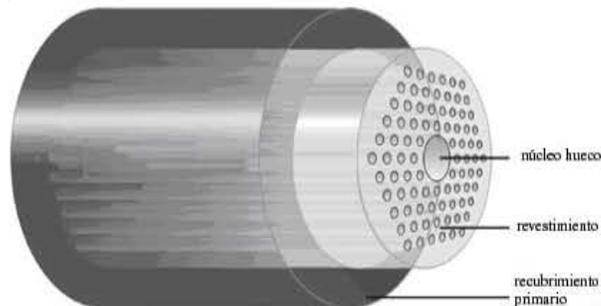


Fig. 2.10 Estructura de una fibra óptica de cristal fotónico con núcleo hueco.

Estructuras mas complejas se pueden construir utilizando arreglos de huecos de diferente tamaño en estructuras periódicas o no periódicas. Adicionalmente, núcleos de fibras asimétricos pueden ser fabricados de fibras con alto nivel de birrefringencia. La tecnología permite crear fibras altamente no lineales.

Pero uno de los principales proyectos de investigación es reducir la atenuación tanto para las fibras ópticas de cristal fotónico de núcleo sólido como para las fibras ópticas de cristal fotónico de núcleo hueco. Para las fibras ópticas de cristal fotónico de núcleo sólido se ha encontrado una forma de reducir la atenuación, esto es a través de la dispersión de Rayleigh y ya se encuentran en el mercado fibras con pérdidas de >2 dB/Km [6] y es posible que en un tiempo se logren fibras con pérdidas menores a las fibras ópticas convencionales. En combinación con la ausencia virtual de la no linealidad, es probable que algún día se conviertan en fibras que se pueden utilizar en comunicaciones de largo alcance.

Otra área importante de desarrollo de las PCF son las longitudes de onda corta, las cuales prometen mejorar el nivel de potencia de salida o extender las aplicaciones en la región ultravioleta. Probablemente en un futuro, las fibras de cristal fotónico de núcleo hueco se puedan utilizar en la región media del infrarrojo, extendiendo el rango de longitud de onda cubierto con fibras de sílice y en un futuro aún más lejano para longitudes de onda mayores con fibras de vidrio que no sean de sílice.

Para un sistema de transmisión óptica de ultra alta capacidad usando TDM y WDM ambos para alta velocidad, el control de la dispersión será inevitable. Como un ejemplo, la tolerancia de dispersión para una señal NRZ a una velocidad de 40 GB/s en un sistema de amplificación óptica sin un límite de compensación de la dispersión la distancia de transmisión es de 5 Km. para fibras ópticas NZDF y 30 Km. para fibras ópticas sin dispersión [7]. La dispersión total limita la distancia de transmisión para los canales individuales; por lo tanto la dispersión debe ser cuidadosamente compensada para todos los canales de la rejilla de WDM. La post-compensación puede ser utilizada pero no es recomendable debido al incremento en el número de componentes además de que agrega complejidad al sistema. Para los sistemas de largo alcance, la interacción entre la gran dispersión acumulada y la no linealidad, crea la necesidad del uso de compensadores. Por lo tanto existe la necesidad de desarrollar componentes para la dispersión simultánea y la compensación de la dispersión para fibras de transmisión comúnmente usadas. Hasta ahora el componente mas usado ha sido las fibras que compensan la dispersión (DCF - *dispersion compensating fibers*).

2.2. Aplicaciones de las fibras ópticas en telecomunicaciones

Las aplicaciones de la fibra óptica hoy en día son múltiples. Además, está en un continuo proceso de expansión, sin conocer exactamente límites sobre ello. Partiendo de que la fibra óptica transmite luz, todas las aplicaciones que se basan en la luminosidad –bien sea por falta de esta, por difícil acceso, con fines decorativos o búsqueda de precisión– tiene espacio en este campo.



Fig. 2.11 Diagrama de las aplicaciones de las fibras ópticas en las telecomunicaciones.

Si a todo esto sumamos la gran capacidad de transmisión de información de este medio, como se puede ver en la tabla 2.2, dichas aplicaciones se multiplican; campos tales como las telecomunicaciones, medicina, prácticas militares, mecánica y vigilancia se benefician de las cualidades de este herramienta óptica, como a continuación se describe.

Tabla 2.2 Particularidades de los sistemas de comunicaciones por fibras ópticas.

Características	Ventajas
Eliminación de las interferencias electromagnéticas	Alta calidad de transmisión Reducción de costos de protección contra el ruido Localización cercana a líneas de alta tensión
Aislamiento eléctrico	Seguridad contra descargas eléctricas Recorrido seguro en zonas peligrosas y de difícil acceso
Pérdidas pequeñas	Espaciamiento grande entre repetidores Gran confiabilidad gracias al pequeño numero que se necesitan de repetidores
Ancho de banda grande	Gran capacidad de transmisión Atenuación independiente del ancho de banda del mensaje transmitido
Diámetro y peso pequeños	Reducción de los costos de instalación y reparación
Estabilidad en medios severos	Alta confiabilidad de la transmisión Reducción de la protección contra el medio ambiente

Aplicaciones en medicina

En este campo son evidentes las ventajas que puede aportar el uso de la fibra óptica como ayuda a las técnicas endoscópicas clásicas y, de hecho, están siendo sustituidos los sistemas tradicionales por los modernos fibroscopios. Diversos aparatos como laringoscopios, broncoscopios, gastroscopios y laparoscopios, incluyen ya esta tecnología,

la cual nos permite con gran precisión la exploración de cavidades internas del cuerpo humano.

Los fibroscopios realizados con ayuda de las técnicas optoelectrónicas cuentan con un extremo fijo o adaptable para la inserción de agujas, pinzas para toma de muestras, electrodos de cauterización, tubos para la introducción de anestésicos, evacuación de líquidos, etc. Una fibra se encarga de transportar la luz al interior del organismo y la otra lleva la imagen a un monitor.

Los campos generales de empleo en medicina son:

- Diagnóstico: complementa a la radiología, al proporcionar visiones cercanas y amplificadas de puntos concretos y permitir la toma de muestras. El fibroscopio es particularmente útil para la detección de cánceres y úlceras en estado inicial que no son visibles a través de rayos X.
- Terapéutico: permiten la actuación quirúrgica en vías biliares para eliminar cálculos, extraer cuerpos extraños, etc.
- Postoperatorio: observación directa y prácticamente inmediata a la operación de las zonas afectadas.

Otra importante aplicación de la fibra óptica aparecida hace relativamente poco tiempo son las operaciones transatlánticas. Gracias a los inmensos anchos de banda y a la velocidad a la que viaja la información a través de este medio, hoy en día ya es posible que, un cirujano pueda operar a un paciente interactuando en tiempo real mediante altas tecnologías sobre un paciente que se encuentra en otro continente. Esto es un gran avance en la medicina, ya que en un futuro evitará los costosos traslados que supone a un paciente -y en la mayoría de los casos a sus familiares- el trasladarse a otro continente y la estancia de estos durante la recuperación de dicho paciente.

Aplicaciones militares

Los beneficios de esta tecnología para los militares radican fundamentalmente en la seguridad de este medio de transmisión frente a las comunicaciones por radio y cables convencionales. De este modo se reduce notablemente la necesidad de la codificación de mensajes en virtud de la seguridad inherente a las fibras.

Otra razón de tanta importancia como la anterior, y que justifica su aplicación militar, es el poco peso de los cables de fibras, lo que proporciona importantes ahorros logísticos de material de campaña y personal.

El comportamiento de los conductores ópticos frente a las radiaciones nucleares es de alta seguridad, porque éstas no se transmiten hasta los equipos terminales; la capacidad de transmisión, por otra parte, se recupera en pocos minutos tras una explosión.

Una aplicación táctica muy interesante es el uso de la fibra para la colocación de radares distantes del centro de operaciones; así se pueden disponer con gran margen de

seguridad los radares de detección en cualquier punto de las operaciones, ya que la seguridad de la fibra frente a los factores ambientales es extraordinaria.

También en el caso de misiles de crucero se lleva a cabo el control de lanzamiento mediante fibras ópticas. Los misiles se controlan desde uno o más centros y las rampas están interconectadas por una red redundante de cables ópticos. También se puede llevar a cabo el guiado del misil mediante fibras ópticas.

Los factores que son muy importantes a considerar en el uso de estos sistemas en el campo militar es el de la sencillez, fiabilidad y duración de los componentes de intemperie, tales como los conectores.

Aplicaciones en iluminación

Es obvio que, ante todo, lo que la fibra óptica transporta es luz. Al margen de la información que esta pueda enviar, esta aplicación es bastante importante, ya que, debido a sus particulares características nombradas anteriormente, nos permite con suma facilidad iluminar zonas especiales sometidas a toxicidades, riesgos de incendio, etc. tales como industrias petrolíferas, explotaciones mineras, industrias de altos componentes inflamables y muchas otras.

Otra aplicación en la que la fibra está tomando importancia, es en la señalización en las carreteras, aumentando considerablemente la visión de estas a los conductores nocturnos.

En cuanto a ocio, y para mayor seguridad en cuanto a la no necesidad de uso de la electricidad, la fibra a tomado gran relevancia en lo que a iluminaciones de fuentes y piscinas se refiere, evitando así el riesgo de electrocutarse como puede suceder en piscinas que son iluminadas mediante sistemas convencionales.

Siguiendo con las aplicaciones de la fibra para iluminación cabe destacar el factible uso que se le da en museos, ya que puede filtrar los componentes ultravioletas de la luz, consiguiendo así evitar el deterioro de las pinturas.

Aplicaciones en telecomunicaciones

Un sistema de comunicaciones ópticas es una forma de transmitir información cuyo soporte básico es la luz. La información viaja en forma de luz a lo largo de dicho sistema. Hoy en día , se sabe que la forma más eficiente de que la luz viaje desde un punto hasta otro es mediante la fibra óptica.

- Internet. El servicio de conexión a Internet mediante fibra óptica, a parte de ser mucho mas rápida, no nos plantea un gran problema como sucede con el método convencional: interrupciones continuas de la red. Nos permite trabajar con gran rapidez en entornos multimedia, tales como videos, sonidos, etc. Por ello las líneas telefónicas no son la única vía hacia el ciberespacio.

-Redes. Las aplicaciones incluyen redes terrestres y bajo el mar, anillos regionales y metropolitanos, redes internas en oficinas y en la casa. Una gran fracción del trafico de Internet es traído por enlaces transoceánicos los cuales conectan redes principales de

largo alcance y redes regionales a lo largo de el mundo. El incremento de segmentos sin repetición ha creado sistemas submarinos masivos que amplifican y conectan a cada continente. La importancia de estas conexiones bajo del mar en las telecomunicaciones ha estimulado el desarrollo de fibras ópticas submarinas con las mas estrictas normas de calidad y bajo los estándares de funcionamiento y confiabilidad establecidos.

Este gran desarrollo de fibras se acopla con los avances tecnológicos como lo es: área efectiva amplia, amplificadores de fibra dopados por erbio (EDFA - Erbium doped fiber amplifier) y la multicanalización por división de longitud de onda WDM los cuales han logrado expandir la capacidad de transmisión. Los sistemas submarinos de largo alcance han evolucionado de unas cuantos pares de fibras que operaban a 2.5 Gb/s hace 5 años a unos 12 pares transmitiendo a 10 Gb/s en estos días [3]. La siguiente generación de sistemas se espera que trabajen a 40 Gb/s, con amplificación distribuida Raman, y con la capacidad de las bandas L y S. Estas tecnologías solo podrán ser implementadas si hay avances conjuntos en el desarrollo y manufactura de fibras ópticas.

La fibra óptica también ha ganado gran importancias en el campo de las redes de área local; al contrario de las comunicaciones de larga distancia, estos sistemas conectan a una serie de abonados locales con equipos centralizados como computadoras o impresoras. Este sistema aumenta el rendimiento de los equipos y permite fácilmente la incorporación a la red de nuevos usuarios. El desarrollo de nuevos componentes electro-ópticos y de óptica integrada aumentará aún más la capacidad de los sistemas de comunicación por fibra.

Las computadoras de una red de área local están separadas por distancias de hasta unos pocos kilómetros, y suelen usarse en oficinas o campus universitarios. Una red de área local LAN permite la transferencia rápida y eficaz de información en el seno de un grupo de usuarios y reduce los costes de explotación.

Otros recursos informáticos conectados son las redes de área amplia WAN o las centrales particulares (PBX). Las WAN son similares a las LAN, pero conectan entre sí ordenadores separados por distancias mayores, situados en distintos lugares de un país o en diferentes países; emplean equipo físico especializado y costoso y arriendan los servicios de comunicaciones.

-*Telefonía.* En este campo es en el que más se está extendiendo la fibra óptica. Actualmente, en todas las modernas ciudades se está introduciendo el sistema de fibra para el teléfono e internet. La fibra nos permite una comunicación libre de interferencias, así como de posibilidad de boicoteo de la línea (tan común en las líneas de cobre). El sonido es mucho mas nítido, y no hace falta, como en el resto de las telecomunicaciones por fibra el empleo de amplificadores de señal cada pocos kilómetros.

Otra ventaja del teléfono mediante fibra óptica es la posibilidad de establecer conexión de Internet y teléfono al mismo tiempo y con tan solo una línea. Esto no sería posible en una línea de teléfono convencional debido a lo reducido de su ancho de banda para transmitir información.

-Otras aplicaciones. La fibra óptica permite acceder a una infinidad de servicios referente a las telecomunicaciones tales como:

a. Televisión: Recepción de una gran número de canales con distintas opciones de compra. Una oferta amplísima compuesta por canales informativos, musicales, espectáculos, deportivos, documentales, infantiles.

b. Banco en Casa: Realización de cualquier tipo de transacción bancaria, desde movimientos entre cuentas, contratación de un depósito o la cancelación y cambio de entidad.

c. Telecompra: Tendrá acceso directo a anuncios por palabras con opción a compra, hasta navegar por un centro comercial con la posibilidad de adquirir el objeto que más desee.

d. Telemedición: La fibra óptica permite recoger información sobre medidas de servicios como el agua, el gas o la electricidad que, posteriormente serán enviados a las empresas correspondientes que nos pasarán la factura de acuerdo con lo consumido.

e. Web TV: Será uno de los mejores ejemplos de la interactividad que permite la fibra óptica. Facilitará el acceso a información sobre restaurantes, comercios, eventos, espectáculos

f. Radio Digital: Canales temáticos para todos los gustos musicales, pero con la mejor calidad de sonido.

Aplicaciones en transportes

Las especiales características de la fibra óptica han suscitado su interés en aplicaciones a otros sectores de actividad con exigencias especiales en materia de comunicaciones; un ejemplo típico es el sector de los transportes ferroviarios y metropolitanos.

Las instalaciones de telecomunicación de interés en estos sectores pueden subdividirse en:

- Redes de telecomunicación (telefonía y transmisión de datos).
- Sistemas punto a punto - transmisión de video.
- Instalaciones de control y adquisición de datos.
- Instalaciones de mando y señalización.

Pueden encontrarse otras aplicaciones interesantes de la fibra óptica a bordo de vehículos, especialmente en el sector del automóvil, donde hace años que existen usos especiales. Esta aplicación en particular, ha encontrado una difusión tan amplia que en la actualidad cada vehículo tiene en promedio dos metros de haz de fibras ópticas.

Aplicaciones en sensores

Los sistemas eléctricos convencionales son a menudo inadecuados en entornos de altas tensiones, zonas con campos interferentes y locales de industrias con emanaciones, la fibra óptica nos facilita el acceso a este tipo de lugares.

Gracias a la exactitud que nos proporciona este medio, los sensores son un punto bastante importante en el que se aplica la tecnología de la fibra óptica. Hay sensores de muchos tipos que incluyen esta tecnología, tales como:

- Sensores acústicos.
- Sensores eléctricos y magnéticos.
- Sensores de rotación.
- Sensores de aceleración.
- Sensores de presión.
- Sensores de temperatura.

Estos dispositivos exhiben numerosas ventajas, la más importante son flexibilidad geométrica, inmunidad interferencia electromagnética y pulsos electromagnéticos, gran ancho de banda y una gran sensibilidad, como por ejemplo habilidad para detectar señales de niveles muy bajos y con pequeños cambios, así como su reducido tamaño.

Además, también han adquirido una gran importancia en los transportes aéreos, debido a su ligereza y a su resistencia a condiciones climáticas adversas.

2.3. Sensores de fibra óptica de diferentes cantidades físicas

Un sensor es un instrumento que permite traducir un fenómeno físico a una señal eléctrica. En el caso de los sensores de fibra óptica son dispositivos dieléctricos que son inmunes a interferencia electromagnética y a pulsos electromagnéticos, pueden operar en ambientes que están lejos de los componentes electrónicos; los componentes que tienen en común los sensores de fibra óptica son: una fuente de luz, una interfaz óptica, una o más fibras ópticas, un mecanismo de modulación óptica, un fotodetector, y un equipo de procesamiento de señales. Algunas o varios de los componentes utilizados se muestran en la figura 2.12 mediante un diagrama de bloques.

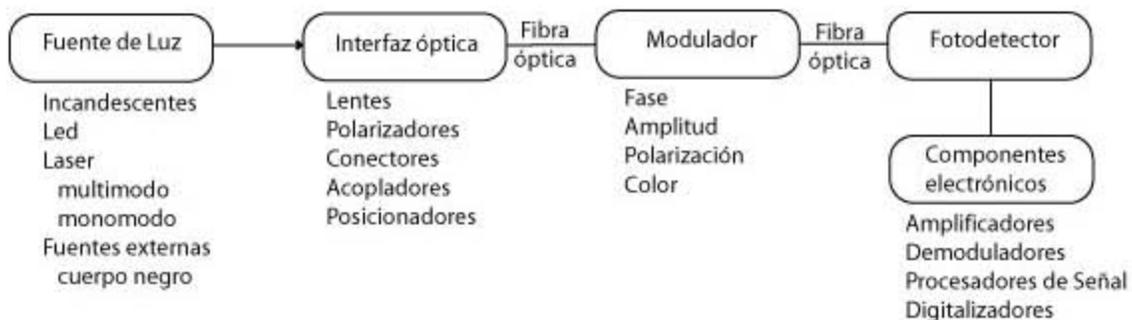


Fig. 2.12 Componentes en común para cualquier tipo de sensor óptico.

La fuente puede ser de banda estrecha (LED láser multimodo), de banda amplia (incandescente) de una sola frecuencia (láser monomodo). La radiación de un cuerpo negro interno o externo puede ser usado como la fuente. Así mismo la fibra óptica u otros componentes ópticos deben ser monomodo o multimodo, la elección depende del tipo de sensor. La dificultad de acoplar la fuente óptica con la fibra depende de si se utiliza una

fibra monomodo o una multimodo, en el primer caso se utiliza un acoplador de extremo ya sea de material epóxico o de líquido de tal forma que el índice se pueden acoplar, se pueden emplear lentes simples; y en el último caso, se requerirá un arreglo más complicado de lentes y posiciones[8]. Los parámetros ópticos que pueden ser modulados son: fase amplitud, color, estado de polarización. La modulación puede ocurrir afuera o dentro de la fibra. Es necesaria una interfaz óptica entre la fibra óptica y el fotodetector, pero en general el acoplador del extremo es suficiente. Finalmente se requieren varias demodulaciones y procesamientos de datos.

Los efectos ópticos en fibras son considerados para 6 tipos de perturbaciones físicas:

- mecánicas;
- eléctricas;
- magnéticas;
- térmicas;
- radioactivas;
- químicas.

Los avances en la fibra óptica de bajas pérdidas presenta una nueva y poderosa tecnología de larga distancia en telecomunicaciones. Existen dos áreas de investigación para nuevos tipos de sensores; por un lado se tiene la sensibilidad de las fibras a perturbaciones externas (sensibilidad de fase, pérdidas por microcurvaturas en cableado, ruido modal) y la solución a estos problemas, y por el otro se tiene la explotación de esa excepcional sensibilidad de las fibras.

La alta sensibilidad de las fibras ópticas para obtener medidas, deriva de la posibilidad de la gran interacción existente entre la longitud de la luz con la variable física. Los sensores de fibra óptica son convencionalmente divididos en 2 tipos:

- transductores continuos;
- transductores de punto.

Los transductores continuos son aquellos en donde la luz es modulada a lo largo de toda la longitud de la fibra, y los transductores de punto los cuales son sensibles a una variable externa en un solo punto.

En un transductor continuo, la luz es modulada a lo largo de la fibra por la interacción con la variable física. La señal de intensidad es la integral de línea hecha sobre la interacción de la longitud, la cual es también la longitud de onda de una perturbación de onda o una perturbación permanente en la fibra entera. Para transductores continuos, la interferometría, es una técnica de detección de sensibilidad. Sin embargo, la sensibilidad de un transductor continuo, o la selectividad que es la sensibilidad hacia un solo tipo de perturbación y la insensibilidad hacia otros tipos de perturbaciones se puede incrementar alternando el material de la fibra o su cubierta externa.

Se pueden distinguir 3 categorías de sensor de fibras continuo:

- La fibra en si misma, donde la composición material es optimizada.
- Un material especial de la cubierta, la cual realza la sensibilidad.
- Una estructura particular del cable.

Un transductor de punto mide la interacción del campo físico externo en un punto discreto. Éstos son especialmente contruidos de un material diferente o la fibra debe ser tratada para que sea sensible en un solo punto, como por ejemplo en los transductores de punto, donde la ventaja de utilizar fibras ópticas radica en la sensibilidad o interferencia electromagnética, sus bajos riesgos de incendiarse debida a su alto aislamiento, y su habilidad de poder censar en lugares inaccesibles sin perturbaciones de las señales de transmisión.

Un abundante número de fenómenos físicos pueden ser utilizados para medir variables físicas. La tabla 2.3 proporciona un resumen de los parámetros físicos que pueden ser medidos y el efecto que tendrá en la fibra óptica, el cual da como resultado un cambio en el índice de refracción, un cambio en la absorción o un cambio en la fluorecscencia después de haber modulado la luz.

Tabla 2.3 Parámetros ópticos medidos después de la modulación de la luz en una fibra óptica (n: medición del cambio en el índice de refracción; a: medición del cambio en la absorción; e: medición del cambio en la fluorecscencia) [9].

Parámetro físico a medir		Efecto de la modulación en la fibra óptica	
<i>F</i>	fuerza mecánica	birrefringencia de tensión	n, a
<i>P</i>	presión	efecto piezo-óptico	n
Δl	deformación	piezo-absorción	a
Δd	cambio en la densidad	triboluminiscencia	e
<i>E</i>	campo eléctrico	efecto electro-óptico	n
<i>D</i>	polarización dieléctrica	electrocromismo	a
<i>i</i>	corriente eléctrica	electroluminiscencia	e
<i>H</i>	campo magnético	efecto magneto-óptico	n
<i>M</i>	polarización magnética	efecto Faraday	n
		magneto-absorción	a
<i>T</i>	temperatura	efectos térmicos	n, a, e
		termoluminiscencia	e
	flujo fotoeléctrico	defecto de producción	a, n
	rayos X y Y	radiación inducida	e
	flujo nuclear	luminiscencia	
	cambios en la composición química	absorción y cambios de índice	a, n
	transición de fase	quimioluminiscencia	e

Como existe un amplio rango de fenómenos ópticos, los cuales pueden medir muchos parámetros, la sensibilidad de cada dispositivo dependerá del material de la fibra y de las configuraciones de instrumentación usadas. Estas configuraciones se encuentran ubicadas en 5 categorías de acuerdo a la forma en que la luz es modulada, los cuales son resumidos en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Métodos de modulación óptica [9].

Tipo de Información	Mecanismo físico	Limitaciones principales	Ejemplos típicos
1. Coherencia	Interferencia entre la señal y las fibras de referencia (sistema Mach-Zehnder monomodo) o propagación diferente de los modos en una fibra multimodo	-Estabilidad y ruido del láser -Medición de pequeños desplazamientos de fase -eliminación de efectos espurio	-Hidrófono y giroscopio de fibra -Indicador multimodo de presión y medición de tensión
2. Amplitud	Modulación de la luz transmitida por absorción, emisión o cambios en el índice de refracción	Normalización para las variaciones de la intensidad de la fuente y pérdidas en los conectores (para largas distancias)	Indicador de tensión y presión usando la modulación por pérdidas por microcurvaturas
3. Longitud de onda	Variaciones dependientes del espectro de absorción, emisión e índice de refracción	-Inspección de las fuentes de longitud de onda -Longitud de onda dependiente de las pérdidas de la línea	Medición de la temperatura a través de: -Cavidad Fabry-Perot -Cristal birrefringente -Cambio de la banda prohibida
4. Frecuencia	Absorción transitoria o comportamiento de la emisión. Tiempo de transición del cerrado del lazo con la retroalimentación	Dispersión modal en las fibras	-Indicador de temperatura a través del paso del tiempo o por la fluorescencia de un iones -Diagnóstico de radiación nuclear por luz de Cerenekov
5. Polarización	Cambios en sentido de girado de la tensión óptica	Birrefringencia espontánea e inherente a las fibras	Transductor por el efecto Faraday para medición de corriente de líneas de transmisión de alto voltaje

3. Principios de los instrumentos para medir el índice de refracción



3.1. Las fibras ópticas y el índice de refracción del medio externo

3.1.1. Índice de refracción

El estudio de la refracción es interesante para propósitos que incluyen desde el análisis de las propiedades de la luz hasta el estudio de los medios que atraviesa, por lo que presenta gran interés en la óptica y en otras áreas como la mineralogía o la química.

Cuando la radiación electromagnética se propaga en línea recta y atraviesa un límite entre dos medios, cambia su velocidad de propagación. Si la radiación incidente no es perpendicular al límite, también cambia su dirección. El índice de refracción del medio es el cociente entre la velocidad de propagación en el espacio libre (vacío) y la velocidad de propagación dentro de un medio [10].

$$n = \frac{c}{v} \tag{3-1}$$

n - índice de refracción

c - velocidad de la luz en el vacío

v - velocidad de la luz en el medio material



El índice de refracción varía según el medio considerado y por consiguiente no es un número fijo para cada cuerpo, siendo una relación que cambia con la naturaleza del medio con que se compara. El índice de refracción es una cantidad adimensional.

Cuando la luz pasa de un medio a otro (o del vacío a un medio material) ocurren varios fenómenos, de los cuales puede usarse cualquiera como base de medición del índice de refracción del medio. La velocidad de propagación cambia; cierta cantidad de luz se pierde por reflexión; si la luz incidente no es perpendicular a la superficie límite entre los dos medios, cambia la dirección de propagación y aparecen ciertos efectos de polarización y, por último, en determinados ángulos de incidencia, puede ocurrir reflexión total. Como todos estos efectos varían con la longitud de onda de la luz, el índice de refracción es una función de la longitud de onda.

La razón entre la velocidad de propagación en el vacío y en un medio es el índice de refracción absoluto y se designa aquí por n_{abs} . La razón entre la velocidad de propagación en el medio 1 y en el medio 2 se llama índice de refracción relativo y se designa por n_{re} . En la mayoría de los casos se determina el índice de refracción absoluto para los gases, y en cambio para los líquidos y los sólidos se determina el índice con relación al aire.

3.1.2. Leyes de la refracción

Desde la antigüedad se conoce y se aplican dos leyes básicas de la refracción. Estas leyes se enuncian como sigue:

1ª Ley: El haz incidente, el haz refractado y la normal, en el punto de incidencia, están en el mismo plano (plano de incidencia).

2ª Ley: Los senos de los ángulos de incidencia θ_i y de refracción θ_r son directamente proporcionales a las velocidades de propagación v_1 y v_2 de la luz en los respectivos medios. (ley de Snell)

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_r} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3-2)$$

Recordando que el índice de refracción y la velocidad son inversamente proporcionales, la segunda ley de la refracción se puede escribir en función de los índices de refracción en la forma:

$$n_1 \text{ sen}\theta_i = n_2 \text{ sen}\theta_r \quad (3-3)$$

n_1 - índice de refracción del medio inicial

θ_i - ángulo de incidencia

n_2 - índice de refracción del medio final

θ_r - ángulo de refracción

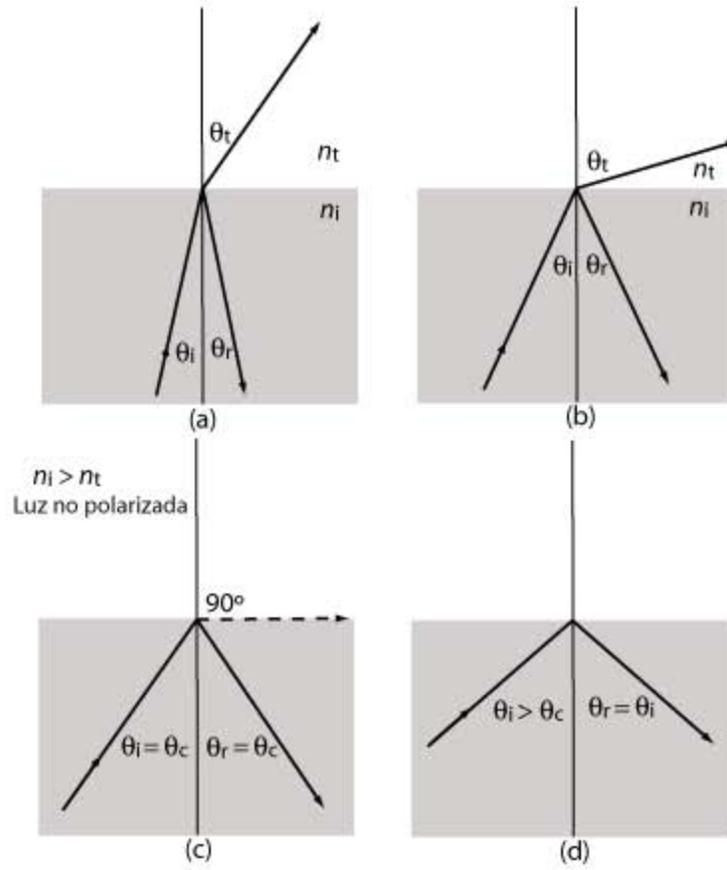


Fig. 3.1 Condiciones necesarias para la reflexión total interna y ángulo crítico.

El ángulo θ_i que se forma entre el haz incidente y la normal a la superficie se conoce como ángulo de incidencia. El ángulo θ_r formado entre el haz refractado y la normal se la llama ángulo de refracción.

Si la luz pasa de un medio más rápido a otro más lento, el ángulo de refracción es menor que el de incidencia. Si pasa de un medio de mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia.

En éste último caso, si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite no se produce refracción, sino lo que se denomina reflexión total. Este fenómeno permite canalizar la luz a través de fibras ópticas.

Si la luz incide en ángulo θ_i sobre el límite entre dos medios de índices absolutos n_1 y n_2 , la luz que pasa al segundo medio marcha en una dirección definida por el ángulo de refracción, θ_r .

Por la ley de Snell, si el medio 1 es el vacío, para el cual $n = 1$, entonces:

$$n_{abs} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} \quad (3-4)$$

Si $n_1 < n_2$ y el ángulo de incidencia θ_i aumenta a 90° (fig. 3.1), el ángulo de refracción θ_r alcanza un valor máximo dado por:

$$n_1 = n_2 \text{ sen } \theta_r \quad (3-5)$$

Inversamente, si $n_1 > n_2$, a valores de θ_i mayores que un cierto valor dado por $n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2$ ($\theta_r = 90^\circ$) no entra luz en el segundo medio y se produce reflexión total de la luz incidente. El ángulo que forma la luz incidente con la normal a la superficie límite en el medio de índice más alto es el mismo en estos dos casos y se llama ángulo límite para la reflexión total, también denominado ángulo crítico θ_c .

En un ángulo de incidencia particular, llamado ángulo de Brewster o ángulo de polarización, el cual se designa por θ_p , no se refleja nada de la vibración en el plano de incidencia y se reflejará solamente la componente polarizada normal al plano de incidencia y por lo tanto paralela a la superficie, donde $\theta_p + r = 90^\circ$. Como puede demostrarse que el ángulo de Brewster viene dado por:

$$n_1 \text{ sen } \theta_p = n_2 \text{ sen } \theta_r \quad (3-6)$$

y como $r = 90^\circ - \theta_p$ se obtiene que:

$$n_1 \text{ sen } \theta_p = n_2 \text{ cos } \theta_r \quad (3-7)$$

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1} \quad (3-8)$$

La cantidad de luz reflejada y transmitida depende del ángulo de incidencia y de los índices de refracción n_1 y n_2 , en la forma dada por las ecuaciones de Fresnel [10]. En la incidencia normal, esto es, si $\theta_i = 0$ y $n_1 = 1$, las ecuaciones se simplifican en:

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{(n_2 - 1)^2}{(n_2 + 1)^2} \quad (3-9)$$

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{4n_2}{(n_2 + 1)^2} \quad (3-10)$$

I_i es la intensidad incidente, I_r la intensidad reflejada e I_t la intensidad transmitida. Por ello la medición de I_r/I_i o de I_t/I_i es un dato suficiente para determinar n_2 .

3.1.3. Factores que alteran el índice de refracción.

Las variables que afectan las mediciones del índice de refracción y que se pueden controlar experimentalmente son:

-Temperatura

Al variar la temperatura de un medio, varia su densidad y esto influye en el índice de refracción. Por lo tanto para realizar mediciones correctas del índice de refracción, debe controlarse esta variable.

-Longitud de onda

El índice de refracción de un medio transparente disminuye gradualmente al aumentar al longitud de onda λ , este efecto se conoce como dispersión normal.

La luz que se propaga a la misma velocidad en el vacío en determinada longitud de onda λ , al atravesar sustancias materiales, se separa en diferentes longitudes de onda λ que se propagan a diferente velocidad. Por lo tanto la velocidad en un medio con un índice de refracción n depende de la longitud de onda λ .

Los fenómenos de dispersión hacen que sea necesario especificar la longitud de onda λ empleada, cuando se reporta un índice de refracción n .

-Presión

Un índice de refracción n de una sustancia aumenta con la presión, porque está provoca un aumento de la densidad de las sustancias. Este efecto es mas pronunciado en los gases. Por lo que la variación de la presión atmosférica, solo es importante para determinaciones precisas con los gases y para mediciones más exigentes con los líquidos y sólidos.

3.2. El origen y el desarrollo del concepto refracción

Newton introdujo el concepto de "refracción" a la ciencia al comienzo del siglo XVIII y dio a conocer por primera vez en su publicación "Opticks" la primera fórmula en términos de el índice de refracción y de la densidad [11]:

$$\frac{n^2 - 1}{d} = constante \quad (3-11)$$

d - densidad

n - índice de refracción

El utilizó una construcción geométrica simple (fig. 3.2) para determinar la fórmula (3-11). Un rayo de luz S , cae en la superficie, MN de un medio de refracción; después de la refracción, este rayo viaja a lo largo del vector AC, cuya longitud es proporcional a la velocidad de la luz refractada. Se puede usar la ley del paralelogramo para descomponer AC en dos componentes, una el rayo AB en la interfaz, y el otro rayo BC perpendicular a él. El rayo AB viaja en el aire; si su velocidad es igual a la unidad, se encuentra que la magnitud del vector AC es igual a el índice de refracción n , de acuerdo a Newton.

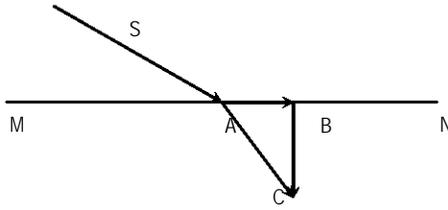


Fig. 3.2 Esquema del experimento para la obtención de la fórmula de Newton sobre refracción.

$$n = \frac{\text{velocidad de la luz en la materia}}{\text{velocidad de la luz en el aire}} \quad (3-12)$$

Newton postuló que el movimiento de la luz a lo largo de BC es debido a una fuerza de refracción la cual es proporcional al cuadrado de la magnitud del vector BC:

$$n^2 - 1 = \text{const} \cdot F \quad (3-13)$$

n - índice de refracción
 F - fuerza de refracción

La fuerza de refracción será mejor, mientras mayor sea la densidad:

$$\frac{n^2 - 1}{d} = \text{const} = r_1 \quad (3-14)$$

d - densidad
 n - índice de refracción
 r_1 - refracción

Los intereses en la fórmula de Newton despertaron después de que Laplace proporcionó, un estricto análisis a dicha fórmula, que apoyó en la teoría de la emanación y postuló que la refracción r_1 debería de ser invariante bajo alteraciones de temperatura y presión. Este postulado abrió la posibilidad de utilizar la refracción para evaluar el índice refracción a través de la densidad, bajo condiciones de temperatura y presión.

Es de interés que la fórmula de Newton fue confirmada experimentalmente y forma parte de las subsecuentes fórmulas, aunque fue obtenida de (3-12), la cual es totalmente inversa a la teoría moderna:

$$n = \frac{\text{velocidad de la luz en el aire}}{\text{velocidad de la luz en la materia}} \quad (3-15)$$

Esto se explica por que el tratado newtoniano sobre el índice de refracción no es muy diferente de la teoría moderna ya que para una se involucra a la velocidad de la partícula

y para la otra la fase de la velocidad que se encuentran relacionada por la siguiente ecuación:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{u_1}{u_2} \quad (3-16)$$

$v_{1,2}$ - velocidad de la partícula 1 y 2

$u_{1,2}$ - fase de la velocidad de la partícula 1 y 2

Siendo ésta la razón por la cual la fórmula de Newton es consistente con la teoría ondulatoria de la luz.

Experimentos subsecuentes mostraron que r_1 no siempre es constante para variaciones en temperatura y varía considerablemente con el cambio de estado de agregación. Estos hechos permiten obtener otras deducciones para la fórmula de la refracción.

En 1853, Beer expresó que para los gases [12]:

$$r_2 = \frac{n-1}{d} \quad (3-17)$$

d - densidad

n - índice de refracción

r_2 - refracción

sería mas independiente de las condiciones termodinámicas que r_1 . Diez años mas tarde, Gladstone y Dale [12] concluyeron que la anterior fórmula también sería válida para los líquidos. Estos autores demostraron que r_2 se altera un poco con cambios de temperatura, estados de agregación, mezclando con otros líquidos, o incluso, dentro de ciertos límites por la unión química.

En 1880, la fórmula:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{d} = r_3 \quad (3-18)$$

d - densidad

n - índice de refracción

r_3 - refracción

fue obtenida por L. Lorentz, a través de la teoría electromagnética de G. Lorentz [12], y por su propia teoría de propagación de la luz. La deducción de esta fórmula fue realizada considerando la propagación de la luz para una longitud de onda infinita en un medio isotrópico.

Los incesantes intentos por descubrir nuevas fórmulas para encontrar una fórmula para la refracción fueron indicadores de que es imposible tener una característica universal que sea invariante bajo cualquier condición. La existencia de una fórmula que se obtuvo bajo una estricta deducción teórica como lo es la fórmula de Lorenz-Lorentz, la coloca por encima de las demás fórmulas para la refracción y continua utilizándose en el presente.

De esta forma, fórmulas como las anteriormente descritas de Newton-Laplace, Glaston-Dale y la de Lorenz-Lorentz dieron pie para el descubrimiento de la refractometría. Estas tres fórmulas únicamente difieren en sus denominadores.

$$r_1 = \frac{n^2 - 1}{1} \cdot \frac{1}{d}, \quad r_2 = \frac{n^2 - 1}{n + 1} \cdot \frac{1}{d}, \quad r_3 = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{1}{d}$$

Por esta razón las tres fórmulas dan valores consistentes para valores de refracción de gases donde los índices de refracción se encuentran cerca de la unidad y estas expresiones se pueden igualar multiplicándolas por un factor como se puede ver a continuación:

$$r_1 = 2r_2 = 3r_3$$

Para líquidos y sólidos si existen diferencias evidentes entre cada una de las fórmulas.

3.3. Refractometría óptica y sus aplicaciones

La refractometría es una técnica que mide cuanta luz es refractada cuando pasa a través de una sustancia dada, en este caso puede ser un compuesto desconocido. La cantidad de luz que es refractada determina el índice de refracción. Y éste puede ser utilizado para identificar el compuesto desconocido o puede ser usado también como la medida de la pureza de un compuesto líquido comparando los valores con algunos ya establecidos. Lo más cercano que se encuentre el valor obtenido al registrado la muestra será de mayor pureza.

3.3.1. Instrumentos para medir el índice de refracción

Los refractómetros son instrumentos que se utilizan para medir la concentración de sustancias que se disolvieron en agua o en aceites; emplean las propiedades ondulatorias de la luz para estudiar las propiedades de muestras atravesadas por rayos luminosos. En este sentido, presentan características comunes a otros instrumentos, tales como espectrómetros o polarímetros que también emplean propiedades de la luz para el conocimiento de las características de las sustancias. Como su nombre indica, los refractómetros basan su funcionamiento en el estudio de la refracción de la luz, un fenómeno bastante fácilmente observable cuando la luz pasa de un medio a otro. Por ejemplo, cuando la luz pasa del aire al agua, sufre una desviación que viene determinada por la relación entre los índices de refracción de los dos medios.

Espectrómetros

Un espectrómetro consiste esencialmente en un círculo graduado exactamente, una rendija y una lente colimadora para que la luz entre en un plano con la rendija y una lente

para mirar la imagen de la rendija. La precisión en las marcaciones se consigue haciendo girar la lente y el círculo alrededor de un eje que pasa por el centro del círculo.

En el método más común, el de la desviación mínima, se usa primero el espectrómetro para medir el ángulo entre dos superficies del prisma y después para medir la desviación del haz de luz colimado producido al pasar por el prisma.

Polarímetros

La luz reflejada de la superficie de un medio transparente está completamente polarizada en el plano, si incide en el ángulo de Brewster. Como este ángulo guarda una relación muy sencilla con el índice de refracción, su medición conduce al valor del índice de refracción. En principio, se puede iluminar la muestra con luz no polarizada y hallar el ángulo en el cual la luz reflejada está polarizada en el plano. En la práctica es más sencillo y más sensible usar para la iluminación luz polarizada en el plano y observar algún efecto importante en el ángulo de polarización.

Refractómetros clásicos

Los instrumentos más usados para la medición del índice de refracción son de tipo de ángulo crítico. Cuando la radiación incidente es de 90° con respecto a la normal, N , pasa rasante en la frontera de los dos medios. El ángulo de 90° se llama ángulo rasante y la radiación incidente, rayo crítico.

Este rayo crítico se refracta, formando con la normal el ángulo crítico, que limita al campo oscuro del campo iluminado, fenómeno que se utiliza en los refractómetros para medir el índice de la refracción de las sustancias.

Los refractómetros clásicos para la determinación del índice de refracción n en líquidos utiliza las leyes de la reflexión y la ley de Snell para la refracción, únicamente con el cambio de las configuraciones geométricas. Este es caso de el refractómetro Abbe [13], el refractómetro de Pulfrich [14] y refractómetros basados en la mínima desviación de ángulo o en las medidas de desplazamiento del rayo [15]-[16]. En general estos métodos requieren un conocimiento preciso del índice de refracción y de las características geométricas de los componentes ópticos utilizados en las mediciones.

Aunque los refractómetros Abbe y de Pulfrich se dieron a conocer hace ya mucho tiempo ahora se proponen nuevas configuraciones empleando como fuente de luz láseres. De hecho por una parte la coherencia temporal y espacial del haz del láser permite una mayor precisión en las mediciones y por otra el extenso uso de láseres en experimentos ópticos hace importante la realización de la caracterización óptica de los materiales con las fuentes de luz que se utilizaban con anterioridad. El principio de trabajo de los dispositivos arriba mencionados es descrito en las siguientes figuras.

En la figura 3.3 se ilustra el esquema de un refractómetro Abbe típico, éste explota las condiciones de refracción óptica, el patrón de luz es opuesto a la reflexión total: midiendo L y d , el ángulo crítico es obtenido y a través de la ley de Snell se obtiene el índice de refracción de la muestra. Solamente se podrán obtener índices con valores menores que el índice de refracción del vidrio.

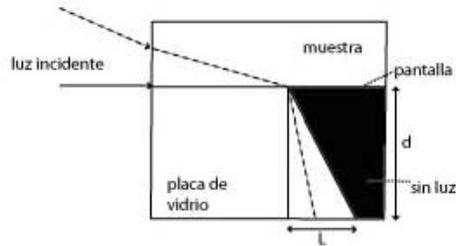


Fig. 3.3 Esquema del refractómetro Abbe.

En la figura 3.4 se muestra una configuración posible del refractómetro de Pulfrich: se utiliza un prisma en forma de V, relleno con el líquido que se quiere conocer el índice de refracción y se realiza la medición de la desviación del ángulo; existe otra configuración similar a la anterior, la única diferencia es el método utilizado para determinar el ángulo. Para la primera configuración se requiere saber la apertura angular y el índice de refracción del prisma en forma de V, para la segunda configuración se necesita saber el índice de refracción del prisma. El refractómetro Abbe representa un límite superior para los índices que habrán de ser medidos, en comparación del refractómetro de Pulfrich.

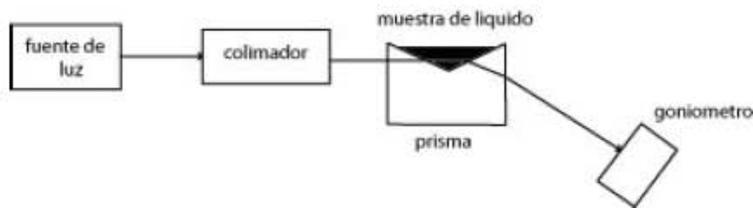


Fig. 3.4 Esquema del refractómetro Pulfrich.

La figura 3.5 muestra el esquema para la determinación del índice de refracción a través de la medición del ángulo de desviación mínima. Un prisma de vidrio vacío es colocado en una plataforma que gira. La posición cero es determinada cuando el prisma está vacío; después el prisma es llenado con el líquido a el cual se le efectuará la medición y es determinada la posición angular que ocurre en la condición de mínima desviación.

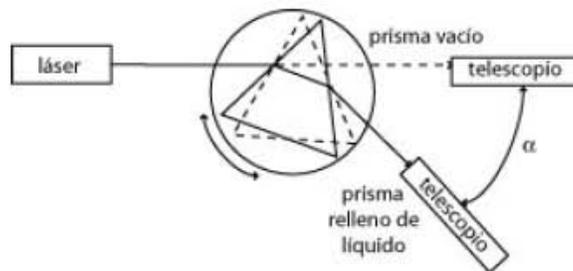


Fig. 3.5 Esquema para la medición del ángulo de desviación mínima.

La figura 3.6 ilustra como determinar el índice de refracción de un líquido midiendo el desplazamiento d del haz de un láser que pasa a través de una celda rectangular vacía, la cual es llenada con el líquido de muestra. Todos los parámetros geométricos de la celda y

del índice de refracción de las paredes se deben de conocer con alta precisión. Por otra parte, se tiene una referencia para la medición cuando la celda se encuentra vacía: en tal caso solo la longitud interna de la celda se tiene que conocer.

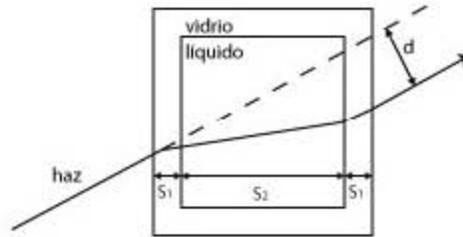


Fig. 3.6 Esquema del método del desplazamiento del haz.

Refractómetros interferométricos

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 se quiere medir. Los dos haces se recombinan en 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. Como el desplazamiento de las franjas es muy sensible a pequeños cambios de índice, el método ofrece gran precisión.

Existen diferentes configuraciones que se pueden utilizar: interferómetro de Michelson [17]-[18], interferómetro de Mach-Zender [19]-[20], interferómetro de Rayleigh [21]. Configuraciones más complejas han sido reportadas como por ejemplo la combinación de dos interferómetros de Michelson [22] o utilizando interferómetros de rejilla [23]-[24].

Refractómetros no convencionales

Se han propuesto refractómetros combinando diferentes fenómenos o utilizando situaciones muy particulares para aplicaciones de pequeñas gotas de líquido.

La figura 3.7 muestra un microrefractómetro con una rejilla de difracción donde la muestra de líquido es colocado en una rejilla de difracción y un prisma es superpuesto a ésta última. Cuando el ángulo de incidencia del haz de entrada en el prisma es tal que la luz es transmitida a través del líquido y pega en la rejilla de difracción, se podrán observar haces difractados en la pantalla. Variando el ángulo de incidencia los haces difractados desaparecerán cuando el ángulo correspondiente a la reflexión total interna en la interfaz líquido-prisma sea alcanzado. El índice de refracción no será más grande que el índice del prisma como siempre pasa cuando la reflexión total está involucrada.

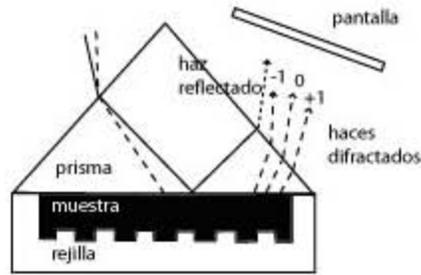


Fig. 3.7 Esquema del micro refractómetro de rejilla de difracción.

Refractómetros de fibra óptica

Las características de las fibras ópticas y la posibilidad de alterar la propagación de la luz y las condiciones de acoplamiento actuando en las interfaces se han utilizado en algunos refractómetros.

Cuando el final de una fibra óptica es introducida en la muestra de líquido, el índice de refracción puede ser determinado monitoreando la potencia reflejada con respecto a la potencia de entrada, de acuerdo con los coeficientes de Fresnel.

Un ejemplo de este tipo de refractómetros se encuentra en la figura 3.8 en donde una sección del recubrimiento de la fibra es removido quedando el núcleo de la fibra expuesto a el líquido muestra, el modo de propagación de los rayos y las pérdidas obtenidas serán dependientes del índice de refracción del líquido. Por tanto, midiendo las pérdidas obtenidas y la potencia transmitida en condiciones geométricas específicas, podrá ser efectuada la medición del índice de refracción.

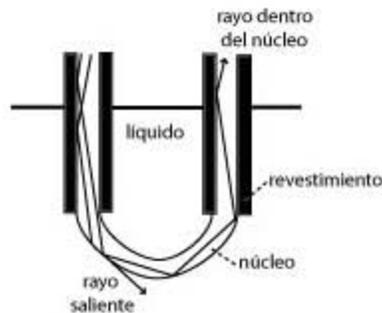


Fig. 3.8 Esquema del refractómetro de fibra óptica en forma de U.

El recubrimiento de la fibra puede ser substituido, en una región, por una capa de oro para después introducirla al líquido, como se muestra en la figura 3.9. Se Ajusta el acoplamiento de entrada del ángulo α , hasta igualar la fase del modo guiado de la fibra y el modo del plasmon [25]. Cuando esto ocurre, la potencia de transmisión cae en forma dramática. Desde que las condiciones de igualación de fase depende del índice de refracción del líquido, puede ser determinado éste parámetro monitoreando la potencia transmitida como función de α .

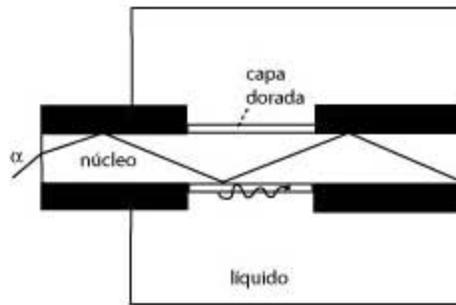


Fig. 3.9 Esquema del refractómetro de fibras ópticas basado en la excitación de la superficie de plasmón.

Refractómetros de guía de onda

El principio básico que permitió el diseño de refractómetro de fibra óptica se extendió a las guías de ondas. Este tipo de interferómetros son diseñados para poder alcanzar una mayor precisión. Un ejemplo de refractómetro es el basado en la resonancia de plasmones [26]. Se propone la siguiente configuración: una capa del búfer de SiO₂, una capa de sintonización de TiO₂ y una capa de oro son colocadas en una guía de onda con un intercambio de iones K⁺-Na⁻ y una capa de la muestra (no necesariamente líquido) es puesta sobre la anterior haciendo las veces de cubierta. La ocurrencia de la comparación de la fase entre los modos guiados y el modo de la superficie de plasmones, el cual depende del índice de refracción de la cubierta, que afecta en las pérdidas en las guías. El índice de refracción de la muestra es evaluado, midiendo la potencia transmitida. La guía tiene que ser perfectamente diseñada para que el índice de refracción del substrato no tenga un valor muy lejano del que se quiere conocer.

3.4. Estructuras de fibra óptica como sensores de índice de refracción del medio externo

En este caso se utilizará la fibra óptica como un sensor; esto es exponer una zona de la fibra a un medio externo; éste alterará alguna de las características físicas de la fibra a fin de que la información transmitida a través de la zona de exposición sea alterada o modulada por dicha influencia externa; es decir que en gran medida el parámetro que se alteró en el material de exposición pueda alterar alguna o varias de las características de la luz introducida en la zona de exposición. Esta modulación llevará la información del fenómeno que la provocó y la interpretación que se le de a esa características de la luz nos dirán el grado de influencia que se tuvo en la zona de exposición.

Las características de los elementos de prueba de los sensores refractométricos de intensidad en fibra óptica dependen esencialmente de la configuración y forma de sus superficies de trabajo. Toda la variedad de formas de los elementos de prueba que se usan en los refractómetros de fibra óptica se pueden dividir en cuatro grupos principales según su configuración básica, independientemente de su designación y aplicación:

- 1) Secciones rectas cilíndricas o cónicas de las barras dieléctricas o fibras ópticas sin cubierta (fig. 3.10), la superficie lateral de las cuales se usa como la superficie de trabajo [27].

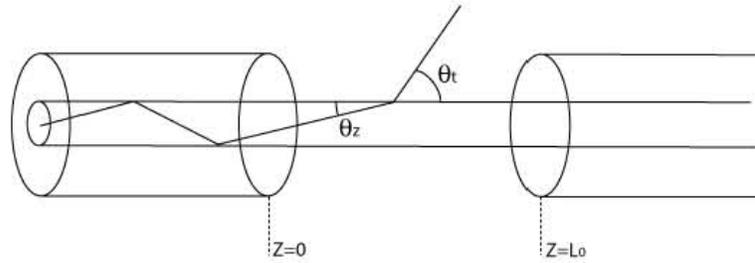


Fig. 3.10 Esquema del sensor refractométrico de sección de fibra óptica sin cubierta.

- 2) Secciones de las barras dieléctricas o fibras ópticas (fig. 3.11) dobladas en forma de U [28].

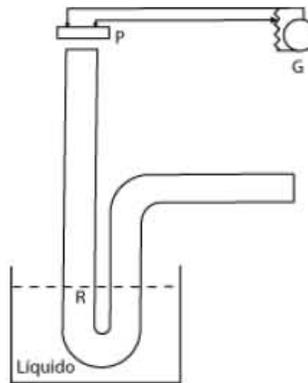


Fig. 3.11 Esquema del sensor refractométrico de sección de fibra óptica doblada en forma de U.

- 3) Barras dieléctricas o fibras ópticas, cuyo extremo sirve como superficie de trabajo, y está elaborado como una superficie plana, prisma reflector (fig. 3.12), retroreflector, con o superficie redondeada [29]-[30].

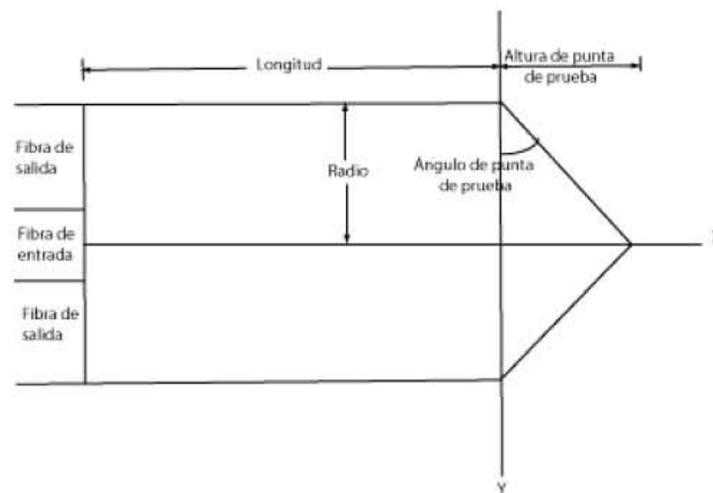


Fig. 3.12 Esquema del sensor refractométrico de sección de fibra óptica en forma de prisma.

- 4) Elementos de acoplamiento óptico de dos fibras elaborados en forma de un prisma (fig. 3.13), cono, paraboloides o de otra forma mas compleja [31].

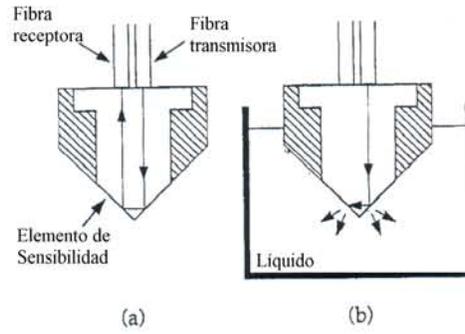


Fig. 3.13 Esquema del sensor refractométrico de fibras ópticas con elemento de acoplamiento en forma de prisma.

4. Fundamentos de análisis numérico de los elementos de fibra óptica



4.1. Características de un haz luminoso

Abertura lineal

La apertura lineal es el diámetro d formado por los rayos más divergentes de un haz luminoso, se puede observar en la figura 4.1.

Abertura angular

La apertura angular es el ángulo subtendido en el foco principal F entre los rayos más divergentes de un sistema óptico por el diámetro de la entrada de luz. La apertura angular está definida por el ángulo α .

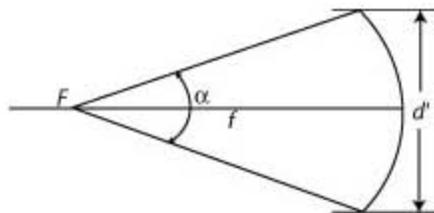


Fig. 4.1 Ilustración de los conceptos de apertura lineal y angular.



Se tiene que para la abertura angular:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{d'}{2f} \quad (4-1)$$

f es la longitud focal y d' es el diámetro de la apertura.

Divergencia

La divergencia de un haz electromagnético, en cualquier plano que interseque el eje del haz, es la tendencia que tiene un haz de ampliarse en su diámetro al irse moviendo desde la fuente, en puntos específicos. La divergencia del haz se utiliza generalmente para caracterizar los haces electromagnéticos en el régimen óptico, es decir, casos en los cuales la abertura de la cual el haz que emerge es muy grande con respecto a la longitud de onda. Por otra parte, la divergencia del haz refiere generalmente a un haz con sección transversal circular, pero no necesariamente. Una haz también puede tener una sección transversal elíptica, en este caso la orientación de la divergencia del haz se debe especificar, con respecto al eje principal o al eje menor de la sección transversal elíptica.

La figura 4.2 muestra de forma exagerada la manera en la cual el haz de la sección transversal circular diverge. En la apertura de salida del láser, el diámetro del haz es d . El ángulo de la divergencia del haz es θ , expresado generalmente en miliradianes. Al atravesar una distancia ℓ el haz diverge a un círculo de diámetro d' . Simples consideraciones geométricas indican que para un ángulo pequeño de la divergencia, el diámetro d' del haz a una distancia de la apertura de la salida a la posición de la medida es aproximado por la ecuación siguiente:

$$d' = \ell \theta + d \quad (4-2)$$

ℓ - distancia de la apertura de salida de la fuente óptica a la posición de medida

θ - ángulo de la divergencia completo

d - diámetro inicial del haz

d' - diámetro del haz en la posición de medida

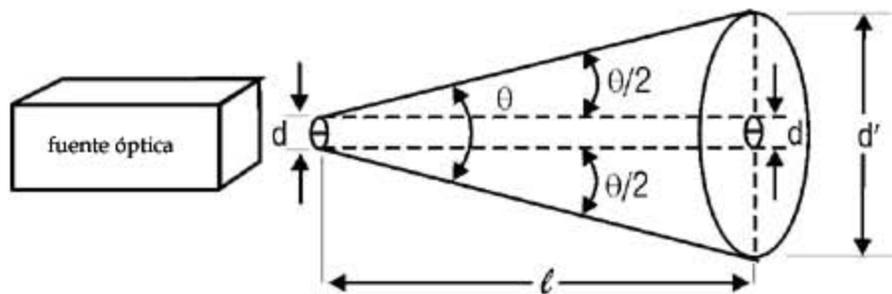


Fig. 4.2 Ilustración del concepto de la divergencia de una fuente óptica.

4.2. Modelado de las fuentes de luz y haces luminosos

Una fuente es definida por la distribución luminosa de todos los rayos emitidos de cada diferencial de área dA . Por ejemplo, la fuente de la figura 4.3 emite luz dentro de un cono de la mitad del ángulo θ_s [32].

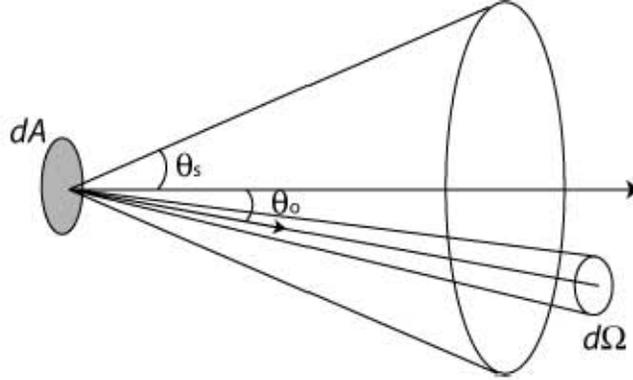


Fig. 4.3 Elemento de área dA de la fuente que emite luz en un ángulo sólido $d\Omega$ dentro de un cono de la mitad del ángulo θ_s .

La luz emitida a un ángulo θ_0 de la normal tiene una intensidad $I(\theta_0)$ por unidad de ángulo sólido por unidad de la fuente. Así el elemento de potencia dP radiado está dado por:

$$dP = I(\theta_0)d\Omega dA, \quad 0 \leq \theta_0 \leq \theta_s; \quad dP = 0, \quad \theta_s \leq \theta_0 \leq \pi/2 \quad (4-3)$$

donde $d\Omega$ es el elemento del ángulo sólido como se muestra en la figura 4.3. A continuación se definirá dos de los tipos de fuentes que se podrían utilizar para simulación de las condiciones de entrada para el sensor refractométrico de fibras ópticas.

4.2.1. Fuente lambertiana

Es una fuente en la que cada diferencial de área dA de la fuente emite luz en todas las direcciones. En la figura 4.4.a es mostrada esquemáticamente la sección transversal de una fuente. Esta es la fuente más común en la práctica y aproxima la salida de la luz emitida por un LED. La distribución de la intensidad está dada por:

$$I(\theta_0) = I_0 \cos \theta_0; \quad 0 \leq \theta_0 \leq \pi/2 \quad (4-2)$$

donde I_0 es una constante. Sin embargo el LED puede ser no uniforme, con la salida de la luz decreciendo hacia los límites de la fuente. En tal caso I_0 depende del radio r del centro de la fuente, que se toma como axialmente simétrico, y puede ser aproximado por la distribución Gaussiana:

$$I_0(r) = A \exp(-\alpha r^2 / \rho_s) \quad (4-3)$$

ρ_s es el radio de la fuente y A, α son constantes

4.2.2. Fuente parcialmente difusa

La fuente es llamada parcialmente difusa por que la dirección de la luz no ocupa todo el rango de valores θ_0 en (ec. 4.2), por ejemplo $0 \leq \theta_0 \leq \pi/2$ como se ilustra en la figura 4.3

4.2.3. Haz colimado

Una fuente de una sección transversal finita, la cual radie a lo largo de su dirección axial, únicamente producirá un haz colimado como se muestra en la figura 4.4.b. Cada elemento diferencial dA de la fuente de la figura 4.3 emite luz en la dirección $\theta_s=0$. Para un haz uniforme, la intensidad I_0 dada por (ec. 4-1) será constante por arriba de la sección transversal del haz lo cual aproxima la salida a una de un láser.

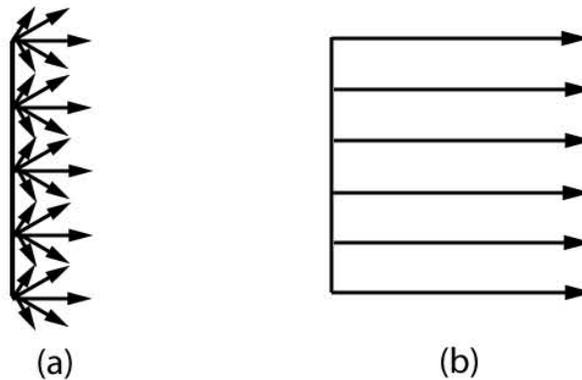


Fig. 4.4 Modelo de una sección transversal de (a) una fuente lambertiana, y (b) un haz colimado.

4.3. Características de transmisión de los elementos de fibra óptica

En un sistema de transmisión por fibra óptica existe un transmisor que se encarga de transformar las ondas electromagnéticas en energía óptica o en luminosa, por ello se le considera el componente activo de este proceso. Una vez que es transmitida la señal luminosa por las minúsculas fibras, en otro extremo del circuito se encuentra un tercer componente al que se le denomina detector óptico o receptor, cuya misión consiste en transformar la señal luminosa en energía electromagnética, similar a la señal original. El sistema básico de transmisión se compone en este orden, de señal de entrada, amplificador, fuente de luz, corrector óptico, línea de fibra óptica (primer tramo), empalme, línea de fibra óptica (segundo tramo), corrector óptico, receptor, amplificador y señal de salida.

En resumen, se puede decir que en este proceso de comunicación, la fibra óptica funciona como medio de transportación de la señal luminosa, generada por un LED o un láser.

4.3.1. Función de transmisión del sensor de intensidad en fibra óptica

La función de transmisión se puede representar por medio de la proporción entre la corriente del fotodetector I_f y la influencia exterior i [33]:

$$I_f(n) = P_e T_0 T^*(n) S_n \quad (4-4)$$

P_e - potencia emitida de la fuente óptica,

$T^*(n)$ - coeficiente de transmisión relativa de la fuente óptica,

T_0 - Factor de atenuación cuando el elemento de prueba se encuentra en el aire,

S_n - Sensibilidad de corriente del fotodetector.

La función de transmisión de un sensor de intensidad en la fibra óptica se determina por un solo coeficiente de transmisión del medio óptico $T^*(n)$.

Existen sensores analógicos y sensores discretos. Los sensores analógicos son los sensores para los cuales será necesario medir el valor absoluto de la influencia externa en un intervalo determinado, siendo preferible aplicar la función lineal de transmisión. Para los sensores discretos es necesario detectar el cambio relativo de la influencia externa, es preferible aplicar la función no lineal de transmisión.

Para un sensor refractométrico analógico se tiene que:

$$T(i) = T(n) = \text{variable cuando } n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \quad (4-5)$$

Para el caso de un sensor refractométrico discreto la influencia externa solo adquiere dos valores fijos; en el caso de un sensor de nivel de líquido tendríamos los siguientes casos:

- a) $i=0$ cuando el elemento de prueba se encuentra fuera del líquido con índice de refracción $n_a=1$
- b) $i=1$ cuando el elemento de prueba se encuentra dentro del líquido y el índice de refracción será $n_l > 1$

Por lo tanto la función de transferencia está dada por:

$$T(i) = T(n) = \begin{cases} T_{\max}, & \text{cuando } n = n_a \\ T_{\min}, & \text{cuando } n = n_l \end{cases} \quad (4-6)$$

4.3.2. Características de transmisión del elemento de prueba refractométrico

Debido a que se trata de un sensor de intensidad, la característica fundamental de elemento de prueba a través del cual se puede saber su calidad, es el coeficiente de transmisión de potencia de luz [34].

De esta forma se presenta el coeficiente de transmisión en función del índice de refracción:

$$T(n) = \frac{P_2(n)}{P_1} \quad (4-7)$$

P_1 y P_2 son las potencias ópticas en la entrada y salida del elemento de prueba respectivamente.

Para representarlo en decibels tenemos que:

$$t(n) = 10 \log T(n) \quad (4-8)$$

Las pérdidas ópticas del elemento de prueba se dividen en dos partes:

- 1) Pérdidas ópticas, provocadas por la estructura geométrica del elemento de prueba, no depende del índice de refracción del medio de referencia.
- 2) Pérdidas de Fresnel, estas aparecen cuando la luz refleja en la superficie del elemento de prueba en el estado inicial, esto ocurre cuando el elemento se encuentra en el medio de referencia, por lo tanto si depende del índice de refracción del medio de referencia.

Para conocer las pérdidas ópticas provocadas por la estructura geométrica del elemento de prueba se tiene que analizar el coeficiente de transmisión para tres casos: reflexión total, en el estado inicial y en relación al coeficiente de transmisión en el aire

El coeficiente de transmisión con reflexión total del 100% se define a continuación:

$$T_p = \frac{P_{2p}}{P_1} \quad (4-9)$$

P_{2p} - potencia óptica a la salida en el elemento de prueba con la superficie con reflexión total

P_1 - potencia óptica en la entrada del elemento de prueba

De esta forma no se tiene ninguna influencia con el índice de refracción del medio de referencia y se puede analizar las pérdidas ópticas en el elemento de prueba.

Se tomará como medio de referencia el aire ya que por lo general el elemento de prueba en el estado inicial se encuentra en este medio. El coeficiente de transmisión en el aire se encuentra definido por:

$$T_a = \frac{P_{2a}}{P_1} \quad (4-10)$$

P_{2a} - potencia óptica en la salida del elemento de prueba que se encuentra en el aire

P_1 - potencia óptica en la entrada del elemento de prueba

Una de las características principales del elemento refractométrico de prueba que corresponde a su designación básica, es el coeficiente de transmisión relativa $T^*(n)$, este coeficiente define la respuesta del sensor solamente con respecto al índice de refracción del medio de referencia, no se relaciona con las pérdidas ópticas del elemento de prueba y

no depende de la potencia de la señal a la entrada del elemento. Por medio de esta característica se puede determinar:

- 1) La sensibilidad del sensor al cambio del índice de refracción del medio de referencia.
- 2) La afinidad del sensor de acuerdo a su aplicación.

Este coeficiente relativo se define como el coeficiente de transmisión del elemento de prueba en cualquier medio normalizado con respecto a el coeficiente de transmisión en el aire:

$$T^*(n) = \frac{T(n)}{T_a} = \frac{P_2(n)}{P_{2a}} \quad (4-11)$$

Para la descripción del tipo de la función $T^*(n)$ es útil utilizar 3 características adicionales [34]:

- 1) Intervalo de trabajo en el cambio de índice de refracción de medio de referencia

$$\Delta n = n_2 - n_1 \quad (4-12)$$

n_1 y n_2 - valores mínimo y máximo del índice de refracción del medio de referencia respectivamente con los valores extremos determinados del coeficiente de transmisión relativo $T^*(n_1)$ y $T^*(n_2)$.

- 2) Pendiente media del coeficiente de transmisión relativo

$$S = \frac{T^*(n_2) - T^*(n_1)}{n_2 - n_1} \quad (4-13)$$

- 3) No linealidad del coeficiente de transmisión relativo

$$\delta(n) = \frac{T^*(n_j) - T'^*(n_j)}{T'^*(n_j)} \times 100\% \quad (4-14)$$

donde $T^*(n_j)$ y $T'^*(n_j)$ son valores de la función real $T^*(n)$ y de la función ideal $T'^*(n)$ respectivamente, cuando el valor del índice de refracción del medio de referencia $n=n_j$ está dentro del intervalo ($n_1 < n_j < n_2$).

4.3.3. Cálculo del coeficiente de transmisión del elemento de prueba

Se puede aplicar la óptica geométrica debido a que las dimensiones lineal es del sensor superan considerablemente la longitud de onda de la luz y por que las fibras ópticas que se utilizarían para este tipo de sensores serían multimodo.

Por tanto el elemento de potencia dP , presentado en la figura 4.5, emitido por el elemento de área dA del núcleo del extremo de salida de la fibra óptica transmisora dentro de los límites del elemento del ángulo sólido se puede presentar en aspecto general como [33]:

$$dP = J(r, \varphi, \theta, \psi) dA d\Omega = J(r, \varphi, \theta, \psi) r dr d\varphi \sin\theta d\theta d\psi \quad (4-15)$$

$J(r, \varphi, \theta, \psi)$ - distribución de la intensidad de luz por la superficie del extremo y por las direcciones de emisión de los rayos

r, φ - coordenadas polares del elemento del área respecto al centro del extremo

θ, ψ - coordenadas polares esféricas del eje del elemento del ángulo

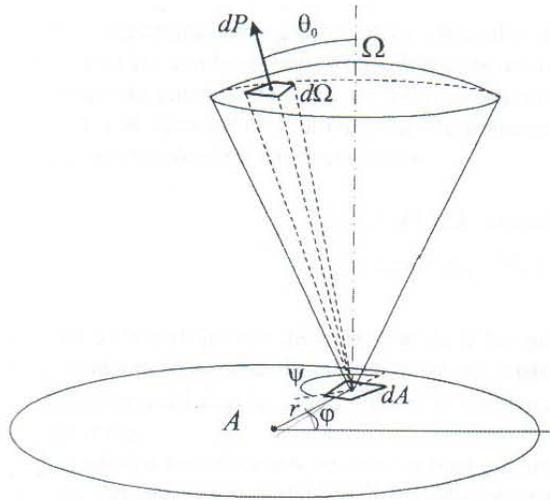


Fig. 4.5 Sistema de coordenadas para la definición del elemento de potencia emitida de la superficie del núcleo de salida de la fibra óptica transmisora.

La potencia óptica en la fibra óptica receptora se calcula integrando la expresión que describe la evolución del flujo elemental del rayo, propagado desde la fibra óptica transmisora hacia la fibra óptica receptora para esto se cuenta con el valor inicial de la potencia elemental dP (ec. 4-15), la atenuación de la misma al reflejarse del elemento de prueba, y la pérdida de algunos rayos que no coinciden con la apertura de la fibra óptica receptora:

$$P_2(n) = \iiint_A \iiint_{\Omega} J(r, \varphi, \psi) R(n, \varphi, \theta, \psi, F) \quad (4-16)$$

$R(n, \varphi, \theta, \psi, F)$ - función de atenuación de potencia del rayo como consecuencia de las reflexiones de la superficie del elemento de prueba.

4.4. Consideraciones para la optimización de los elementos de fibra óptica.

Existen algunas características de las fibras ópticas que contribuyen a un mejor funcionamiento de un sensor refractométrico con fibras ópticas.

El primer parámetro es la atenuación (ver cap. 3), la cual es una función de la longitud de la fibra y de la longitud de onda de la luz.

El segundo parámetro de importancia es la dispersión cromática, la cual está caracterizada por la longitud de onda de la fibra con dispersión cero y la pendiente de dispersión. La dispersión cromática es mejor para una fuente con ancho espectral grande o con una longitud de onda desplazada de la longitud de onda correspondiente a la fibra óptica de dispersión cero.

El tercer parámetro a considerar es el ancho de banda modal. El ancho de banda modal describe la respuesta en frecuencia de la fibra óptica y es una función de la longitud de la fibra óptica, de la condición de acoplamiento de la fuente óptica y de la longitud de onda de operación de la fuente óptica. Es necesario que el ancho de banda modal, sea especificado para condiciones particulares de acoplamiento de la fuente para una longitud de onda específica.

Aunque la atenuación, la longitud de onda con dispersión cero y la pendiente de la dispersión son parámetros importantes es bueno no hacer muchos cambios en estos parámetros. Unas pequeñas mejoras son posibles para núcleos de fibras pequeños, como puede ser un núcleo de fibra multimodo de 50 μm . Este tipo de fibra tienen un 20 % menos de atenuación y tiene una menor longitud de onda de dispersión cero comparada con la más común de 62.5 μm [36]. Ambos dan como resultado un mejor funcionamiento si se trabaja con LEDs o láseres de longitudes de onda cortas. Se pueden observar mejoras substanciales del funcionamiento de las fibras multimodo con láseres como fuente óptica, mejorando el ancho de banda modal. Esta mejora toma ventaja de las diferencias de condiciones de acoplamiento entre LEDs y láseres.

Para la optimización de la construcción del elemento refractométrico de prueba se tiene que tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) Utilizar cierta forma de la función de transmisión del elemento de prueba para caso de aplicación, es decir garantizar la pendiente y linealidad necesaria del coeficiente de transmisión normalizado en el intervalo del índice de refracción del medio de referencia.
- 2) Minimizar las pérdidas propias del elemento, esto es garantizar el valor máximo posible del coeficiente de transmisión en el aire.

Otras características importantes que se relacionan con el elemento de prueba son:

- a) Sensibilidad de umbral, se define como la variación mínima detectada del índice de refracción del medio de referencia.
- b) Rango dinámico, se define como el intervalo máximo del cambio de la señal saliente del dispositivo de medida.

5. Resultados del análisis de las características de un sensor refractométrico



5.1. Metodología de cálculo de los elementos de prueba

El sensor utilizado es un sensor refractométrico de fibras ópticas, de un material dieléctrico transparente, un elemento de prueba que se caracteriza por una ecuación de segundo grado general (ec. 5-1) y un par de fibras ópticas multimodo que conectan al elemento de prueba con una fuente óptica a la entrada de la fibra óptica trasmisora y un fotodetector en la fibra óptica receptora. Estas dos fibras ópticas son multimodo con un perfil del índice de refracción escalonado, las cuales se encuentran acopladas debido a la reflexión total interna dentro del elemento de prueba.

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fzx + 2Gx + 2Hy + 2Iz + J = 0 \quad (5-1)$$

La ecuación se reduce si se toma el centro de las coordenadas en el centro de la superficie de segundo grado y los ejes de las coordenadas se colocan paralelamente a los ejes de simetría de la superficie y da como resultado lo que se conoce como forma canónica (ec. 5-2).

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + J = 0 \quad (5-2)$$



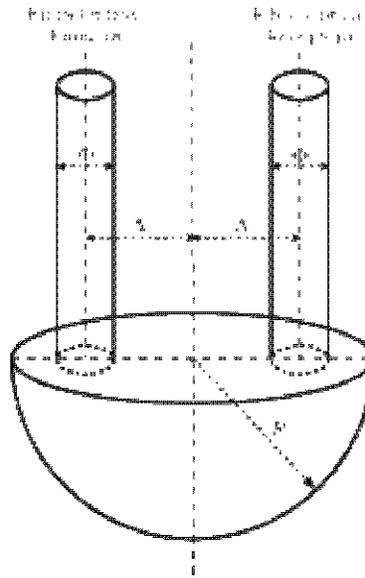


Fig. 5.1 Modelo de sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico de fibra óptica.

Para mostrar las características de los sensores refractométricos se escogieron dos formas diferentes del elemento de prueba: 1. sensor de forma semiesférica, 2. sensor de forma semielipsoidal.

Para la semiesfera se tiene que $A=B=C= \frac{1}{R^2}$, $J=0$ donde R es el radio de la esfera. Por lo tanto la ecuación del elemento de prueba semiesférico (fig. 5.1) se reduce a:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (5-3)$$

Para el elemento de prueba semielipsoidal (fig. 5.2) se tiene que $A \neq B \neq C$ donde A y B son los semiejes en el plano XY y está a una distancia C del origen de coordenadas. Así, la ecuación del elemento de prueba en forma de semielipsoide en su forma canónica es:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (5-4)$$

El principio del cálculo numérico consiste en la observación de las trayectorias de distribución de los rayos que salen de la fibra óptica transmisora y de la suma de las contribuciones de los rayos que entraron a la fibra óptica receptora, incluyendo los coeficientes de reflexión.

Para el desarrollo del análisis de las características de un sensor refractométrico, se utilizó un programa de nombre SRFO 3.0 (fig. 5.3), el cual fue desarrollado en nuestro laboratorio de comunicaciones ópticas para la simulación de sensores refractométricos de fibra óptica (Ver apéndice B).

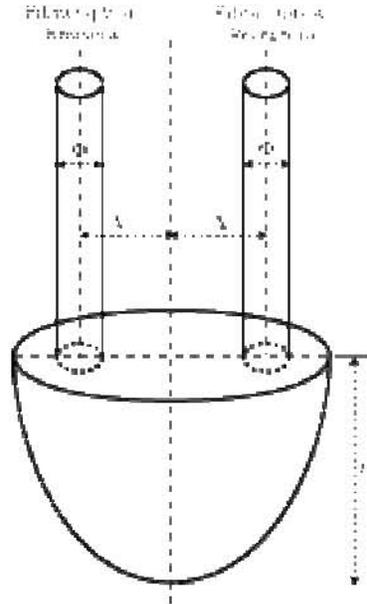


Fig. 5.2 Modelo de sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal de fibra óptica.

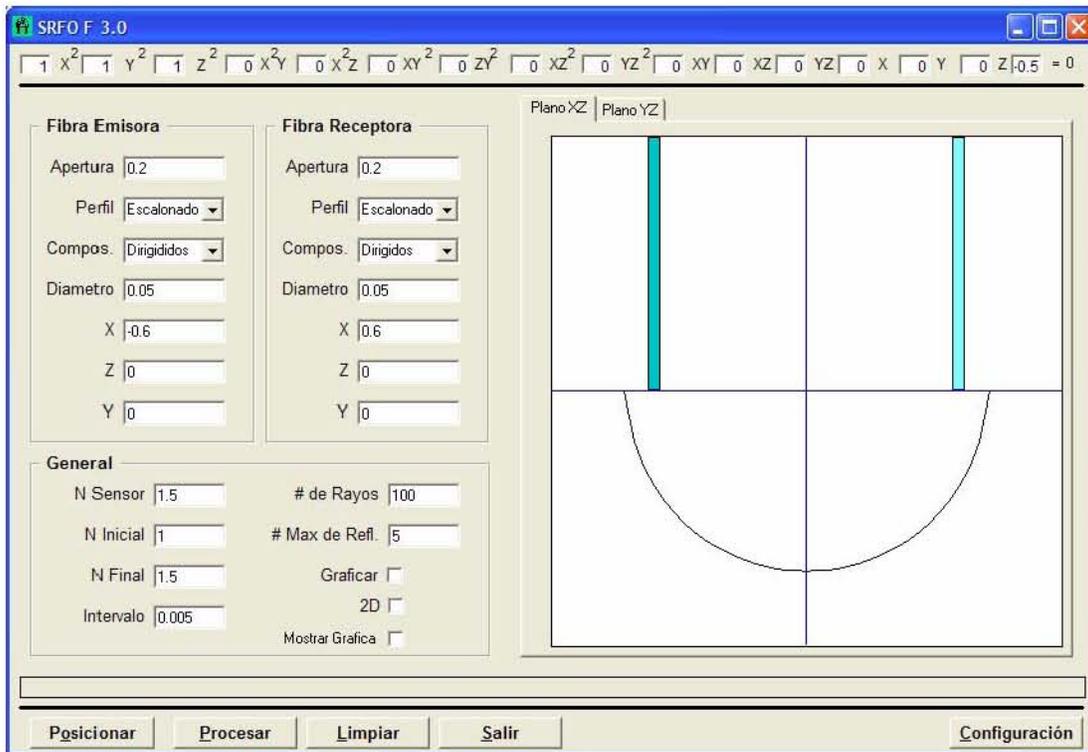


Fig. 5.3 Pantalla del programa SRFO 3.0.

Una vez que se introducen los datos iniciales como son: la ecuación de la superficie, que en este trabajo se denomina elemento de prueba, índice de refracción de la misma, los parámetros principales de las fibras ópticas –la posición de las fibras ópticas Λ , el diámetro de las fibras ópticas Φ , el perfil del índice de refracción, la apertura numérica de

las fibras ópticas A.N. – el índice de refracción del medio n_m , el número de rayos y el número de reflexiones del rayo, el software realiza por si solo todo el proceso; a continuación describo su funcionamiento y en la figura 5.4 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del programa.

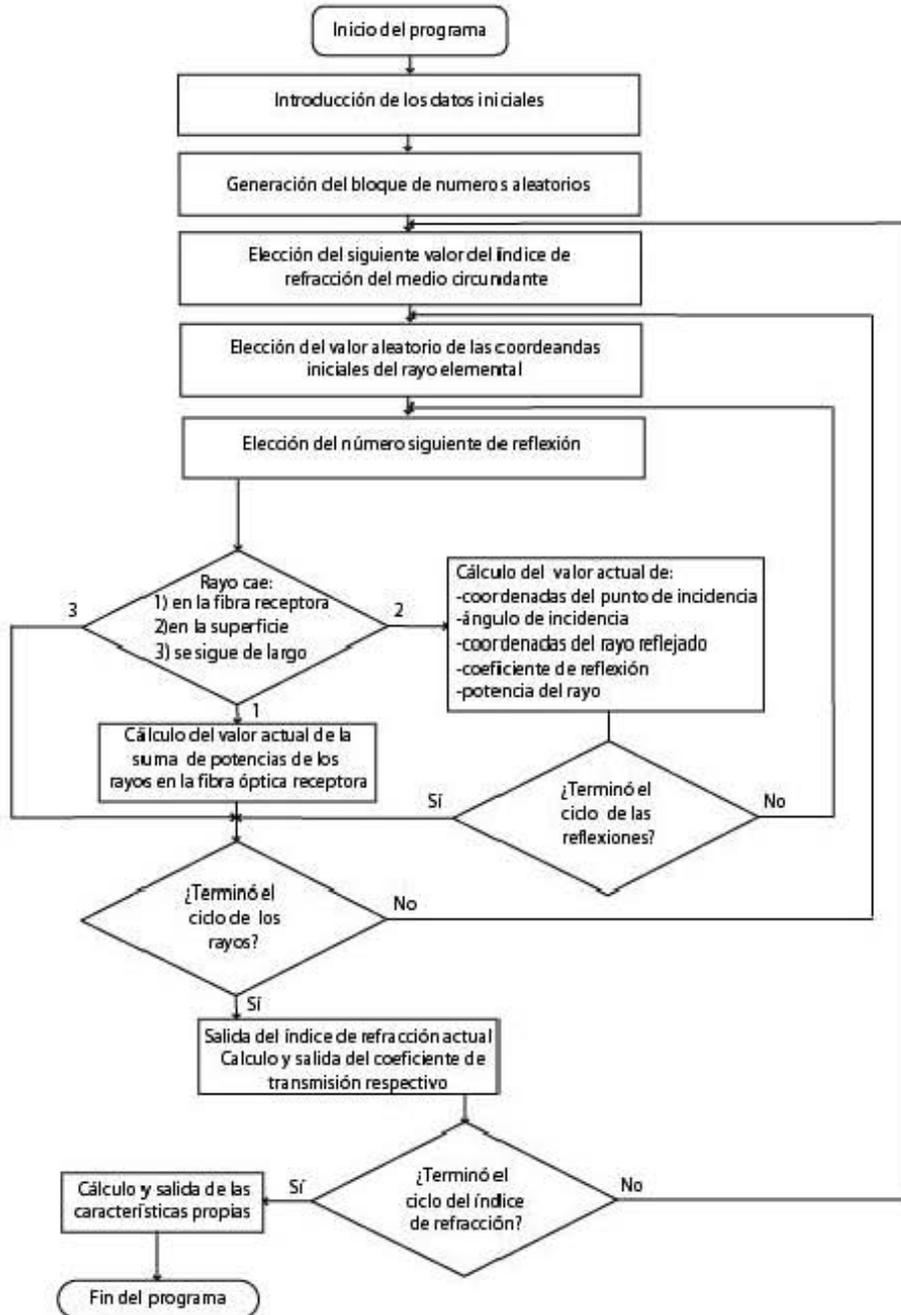


Fig. 5.4 Diagrama de flujo del programa de simulación de sensores refractométricos de fibras ópticas.

1. Genera al azar las coordenadas iniciales de los rayos.
2. Verifica que el rayo haya entrado en la apertura de la fibra óptica receptora.

3. Calcula los siguientes valores:
 - a. Las coordenadas del punto de incidencia del rayo en la superficie del elemento de prueba.
 - b. Las coordenadas del vector normal a la superficie en el punto de incidencia.
 - c. El ángulo de incidencia del rayo en la superficie.
 - d. Las coordenadas del vector del rayo reflejado.
 - e. El coeficiente de Fresnel.
4. Calcula el valor actual de la potencia del rayo elemental.
5. Repite los pasos del 3 al 5 para el ciclo:
 - a. Las reflexiones del rayo de la superficie
 - b. Las coordenadas iniciales de los rayos
6. Calcula el coeficiente de transmisión, como la relación de la potencia total de los rayos entrantes a la fibra receptora con la potencia total a la salida de la fibra óptica receptora.
7. Repite los pasos del 3 al 7 para el índice de refracción del medio de referencia.
8. Calcula las características propias.

Las parámetros de nuestro interés serán utilizados de forma adimensional, por lo tanto para la posición relativa de las fibras ópticas x se relaciona la posición de la fibra óptica Λ y el radio del elemento de prueba semiesférico R o la altura del elemento de prueba semielipsoidal H . Para el diámetro relativo de las fibras ópticas d se relaciona el diámetro de las fibras ópticas Φ y el radio del elemento de prueba semiesférico R o la altura del elemento de prueba H según sea el caso. En adelante se considerará $R=H$ para simplificar los parámetros.

- a. Posición de relativa de la fibra óptica, $x=\Lambda/H$
- b. Diámetro relativo del núcleo de la fibra óptica, $d=\Phi/H$
- c. Apertura numérica de la fibra óptica, $A.N.$
- d. Índice de refracción del medio, n_m

Para mostrar las características de los sensores refractométricos se escogieron dos variantes de la forma geométrica del elemento de prueba: un sensor de forma semiesférica (fig. 5.1) y un sensor de forma semielipsoidal (fig. 5.2).

Para el sensor refractométrico de fibras ópticas de elemento de prueba semiesférico se tomó en cuenta la ecuación (5-3), donde r^2 toma para este estudio los valores de 0.25, 0.5, 0.75 y 1, por lo tanto tenemos 4 ecuaciones que se utilizan únicamente para encontrar las características del sensor en el programa SRFO 3.0.

$$x^2 + y^2 + z^2 = 0.25 \quad (5-5)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = 0.5 \quad (5-6)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = 0.75 \quad (5-7)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1 \quad (5-8)$$

Para efectos de encontrar las características que se ven afectadas en un sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico, las superficies no serán distintas

aunque (ec. 5-3) adquiera diferentes valores para el radio r , por lo tanto para la óptica el comportamiento de la trayectoria de los rayos no tendrá alteraciones.

Para los sensores refractométricos de fibras ópticas de elemento de prueba semielipsoidal se tomó en cuenta la ecuación (ec. 5-4) de donde tomamos los tres tipos de sensores refractométricos de elemento de prueba semielipsoidal, como son diferentes superficies no se puede hacer la misma analogía que para los sensores refractométricos de elemento de prueba semiesférico.

$$2.9x^2 + y^2 + 1.2z^2 = 1 \quad (5-9)$$

$$4.6x^2 + 3.7y^2 + z^2 = 1 \quad (5-10)$$

$$2.5x^2 + 3.7y^2 + z^2 = 1 \quad (5-11)$$

A continuación se representa los resultados obtenidos de las dos formas del elemento de prueba de los sensores refractométricos propuestos.

5.2. Resultados de simulación de sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico

Solo serán analizadas las características para el sensor refractométrico con fibras ópticas multimodo de perfil escalonado del índice de refracción, la posición de acoplamiento es simétrica con respecto al eje Z (fig. 5.5), a una distancia del eje de simetría del sensor Λ . El elemento de prueba se considera realizado de un material transparente con índice de refracción $n_s=1.5$. A la entrada de la fibra óptica se tienen 10000 rayos. Estos se consideran como los parámetros constantes.

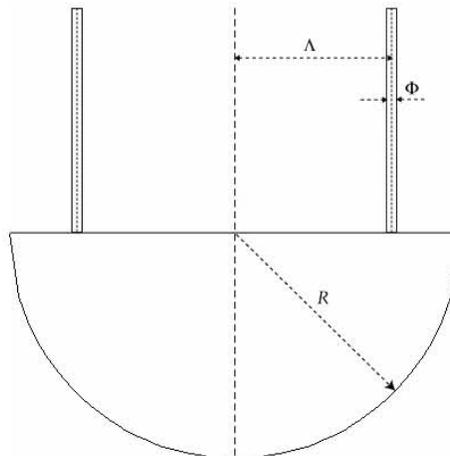


Fig. 5.5 Esquema del sensor con elemento de prueba semiesférico.

Los parámetros de las características básicas del sensor refractométrico son la posición relativa de las fibras ópticas x , el diámetro relativo de las fibras ópticas d , la apertura numérica de las fibras ópticas $A.N.$; los cuales serán estudiados para el índice de refracción del aire n_a igual a 1. Los parámetros geométricos anteriores se consideran iguales para las dos fibras ópticas a menos que se especifique en el texto. Para el análisis del índice de

refracción del medio n_m , se considera en un intervalo de 1 a 1.5. A continuación son mostradas las gráficas del cálculo de las características básicas del sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico.

En primer lugar se tiene la figura 5.6 en donde se muestra la relación entre la transmisión absoluta T y la posición relativa de las fibras ópticas x para diferentes diámetros relativos de las fibras ópticas d . Cada una de las gráficas corresponde a un caso en donde la apertura numérica $A.N.$ es igual a 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 respectivamente empezando por la figura 5.6.a que corresponde a una apertura numérica $A.N.$ igual a 0.1 y así sucesivamente hasta llegar a la figura 5.6.d que corresponde a la apertura numérica $A.N.$ igual a 0.4.

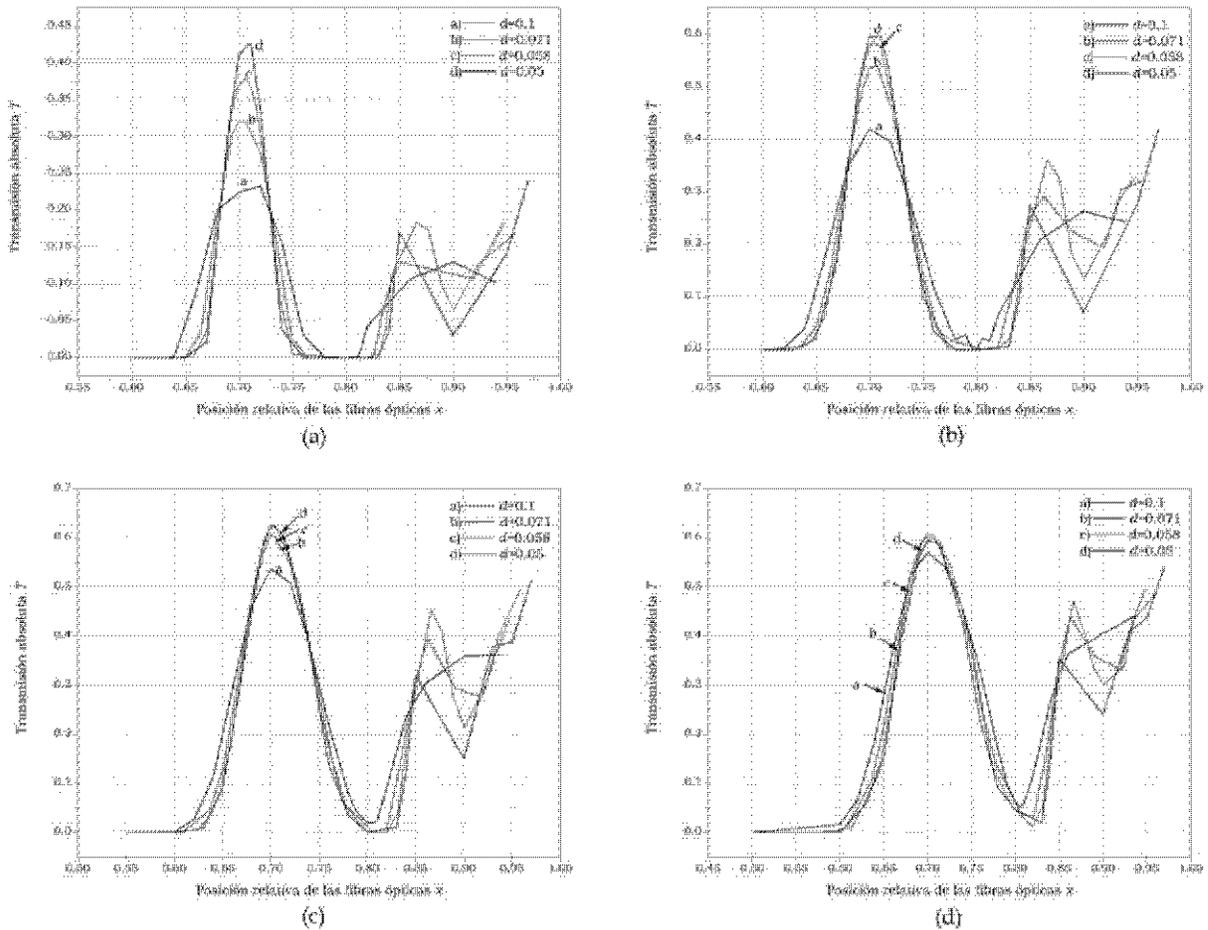


Fig. 5.6 Transmisión absoluta T vs. posición relativa de las fibras ópticas x para la apertura numérica (a) $A.N.=0.1$, (b) $A.N.=0.2$, (c) $A.N.=0.3$, (d) $A.N.=0.4$, $n_m=1$.

A continuación se presenta la característica de la relación de la transmisión absoluta T contra la apertura numérica $A.N.$ para cuatro diferentes diámetros relativos de las fibras ópticas d (0.05, 0.058, 0.071 y 0.1) con posición relativa de las fibras ópticas $x=0.7$ (fig. 5.7).

En la figura 5.8 se muestra la gráfica de la relación entre la transmisión absoluta T y el diámetro relativo de las fibras ópticas d para la posición relativa de las fibras ópticas $x=0.7$

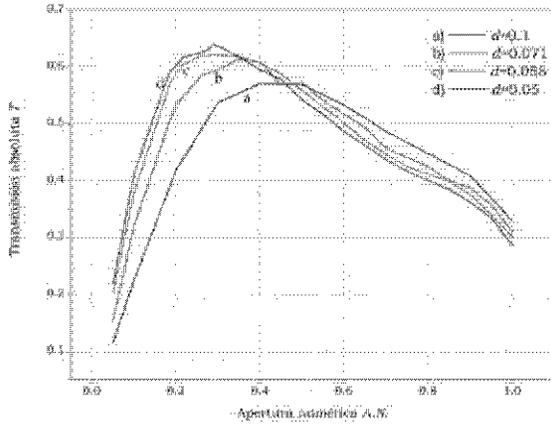


Fig. 5.7 Transmisión absoluta T vs. apertura numérica $A.N.$, $x=0.7$, $n_m=1$.

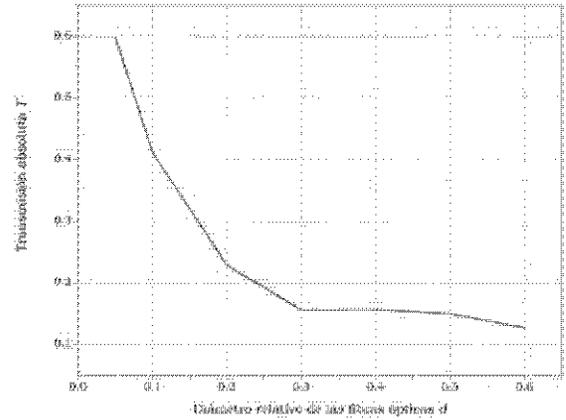


Fig. 5.8 Transmisión absoluta T vs. diámetro relativo de las fibras ópticas d , $x=0.7$, $A.N.=0.2$, $n_m=1$.

Por último en la figura 5.9 se tiene la gráfica de la relación entre la transmisión relativa T^* y el índice de refracción del medio n_m para ocho diferentes diámetros relativos de las fibras ópticas d (0.05, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.56 y 0.6) con posición relativa de las fibras ópticas $x=0.7$.

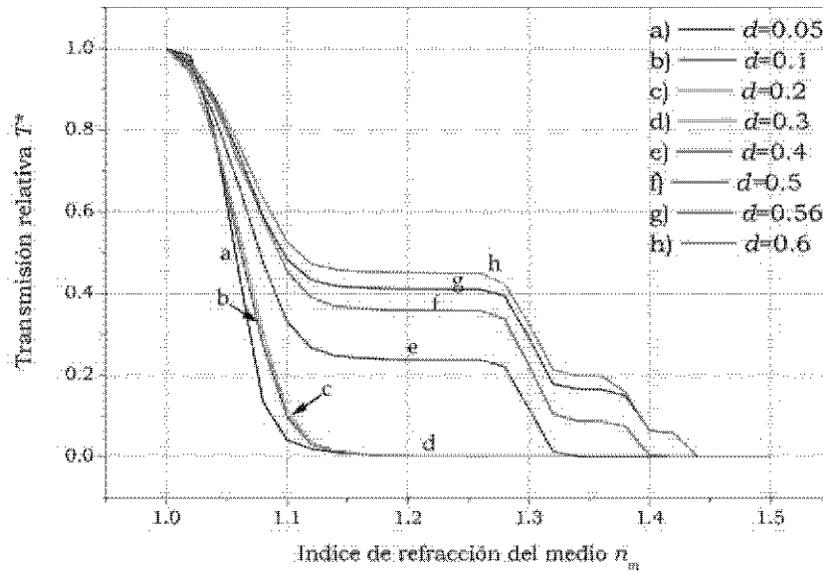


Fig. 5.9 Transmisión relativa T^* vs. índice de refracción del medio n_m , $x=0.7$, $A.N.=0.2$.

5.2.1. Discusión de los resultados de simulación del sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico

La primera característica a analizar es el coeficiente de transmisión absoluta T en función de la posición relativa de las fibras ópticas x , para diferentes aperturas numéricas $A.N.$ igual a 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 y cuatro diferentes diámetros relativos de las fibras ópticas d 0.05, 0.058, 0.071 y 0.1 (fig. 5.6). Es por eso que se presenta una gráfica para cada caso para poder hacer una mejor comparación del comportamiento de la apertura numérica de las fibras ópticas $A.N.$ para cada uno de los diámetros relativos de las fibras ópticas d .

Analizando la figura 5.6.a para la característica transmisión absoluta T en función de la posición relativa de las fibras ópticas x y apertura numérica $A.N.$ igual a 0.1 observamos que tiene tres zonas de transmisión.

La primera zona de transmisión para el análisis de los resultados será la zona que tiene el valor máximo para la transmisión absoluta T en la curva. El ancho zona de transmisión 1 se determinó como la diferencia de las posiciones relativas de las fibras ópticas x para las que la transmisión absoluta T es igual a 0.05.

Se observa que el ancho de la primera zona de transmisión para una apertura numérica $A.N.$ igual a 0.1 y diámetro relativo de las fibras ópticas d igual 0.05 es menor que para aperturas numéricas $A.N.$ igual a 0.2, 0.3 y 0.4 como lo podemos comprobar en la tabla 5.1. Por otra parte cuando el diámetro relativo de las fibras ópticas d se incrementa, el ancho de la zona de transmisión también se incrementa.

Tabla 5.1 Ancho de la primer zona de transmisión para sensores de elemento de prueba semiesférico para fibras ópticas de diámetro relativo d .

$A.N.$	Ancho de zona de transmisión 1 $\Delta x (d=0.05)$	Ancho de zona de transmisión 1 $\Delta x (d=0.058)$	Ancho de zona de transmisión 1 $\Delta x (d=0.071)$	Ancho de zona de transmisión 1 $\Delta x (d=0.1)$
0.1	0.067	0.073	0.08	0.107
0.2	0.103	0.107	0.111	0.132
0.3	0.134	0.141	0.144	0.160
0.4	0.172	0.172	0.184	0.193

Es muy importante tomar en cuenta la posición relativa de las fibras ópticas x ya que en la figura 5.10 podemos ver que para ciertas posiciones es imposible lograr un acoplamiento eficiente de las fibras ópticas y es en las denominadas zonas de transmisión donde se logra tener un acoplamiento. Si observamos en cualquiera de las gráficas de la transmisión absoluta T contra la posición relativa de las fibras ópticas x para este sensor podemos ver que cuando las fibras ópticas se encuentran ubicadas en los extremos del sensor también se logra un acoplamiento pero el valor de la transmisión absoluta T disminuye, debido a las múltiples reflexiones que sufre el rayo desde su salida de la fibra transmisora.

Las posiciones de un acoplamiento eficiente son dos, una cuando la posición relativa de las fibras x es igual a 0.7 y la otra cuando las fibras se localizan en los extremos del elemento de prueba semiesférico en donde la posición relativa de las fibras ópticas x es igual a 0.97. Se encuentra otro caso más (fig. 5.10) para cuando las fibras ópticas no se encuentran acopladas, un ejemplo de este comportamiento es cuando la posición relativa de las fibras ópticas x es igual a 0.8.

A través de la tabla 5.2 se puede verificar el comportamiento del sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico. Incrementando el valor de la apertura numérica $A.N.$ se mejora la respuesta de la transmisión absoluta T y con ayuda de la figura 5.7 comprobamos dicho comportamiento. Hay que resaltar que para la apertura numérica

$A.N.$ igual a 0.4 el comportamiento del sensor cambia un poco, disminuyendo la respuesta de la transmisión absoluta T por que algunos de los rayos no consiguen entrar en la fibra receptora.

Tabla 5.2 Valores de la transmisión absoluta máxima T_m para sensores de elemento de prueba semiesférico para diferentes valores de apertura numérica $A.N.$

	$A.N.=0.1$	$A.N.=0.2$	$A.N.=0.3$	$A.N.=0.4$
d	Transmisión absoluta T_m	Transmisión absoluta T_m	Transmisión absoluta T_m	Transmisión absoluta T_m
0.1	0.233	0.418	0.537	0.571
0.071	0.320	0.540	0.607	0.608
0.058	0.378	0.588	0.625	0.600
0.05	0.426	0.596	0.627	0.594

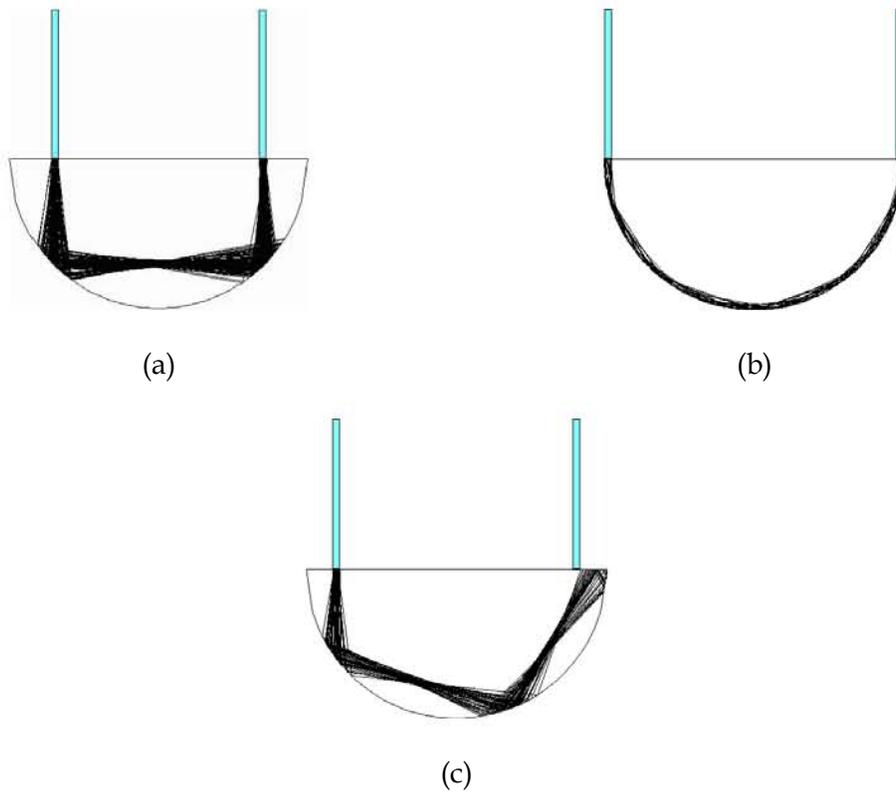


Fig. 5.10 Esquema del sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico con trazado de rayos para $d=0.05$, $A.N.=0.2$ y diferentes posiciones de acoplamiento (a) $x=0.7$, (b) $x=0.97$, (c) $x=0.8$.

En la figura 5.7 se observa que las curvas tienen un comportamiento similar para los diferentes diámetros relativos d pero la respuesta de la transmisión absoluta T , depende de la apertura numérica $A.N.$ Pero sí podemos concluir que el rango de la apertura numérica $A.N.$ para el cual se tiene un acoplamiento eficiente de la fibras ópticas oscila de 0.18 a 0.35 y después comienza a decrecer.

Por otra parte utilizando el trazado de los rayos (fig. 5.11) podemos observar el efecto de la apertura numérica $A.N.$ sobre la respuesta de la transmisión absoluta T , ya que al aumentar la apertura numérica $A.N.$ es mayor la oportunidad de que todos los rayos entren a la fibra óptica receptora y la forma del elemento de prueba nos ayuda a que exista un acoplamiento eficiente de las fibras ópticas y los rayos no se desvíen por culpa de las reflexiones, saliendo fuera del elemento de prueba.

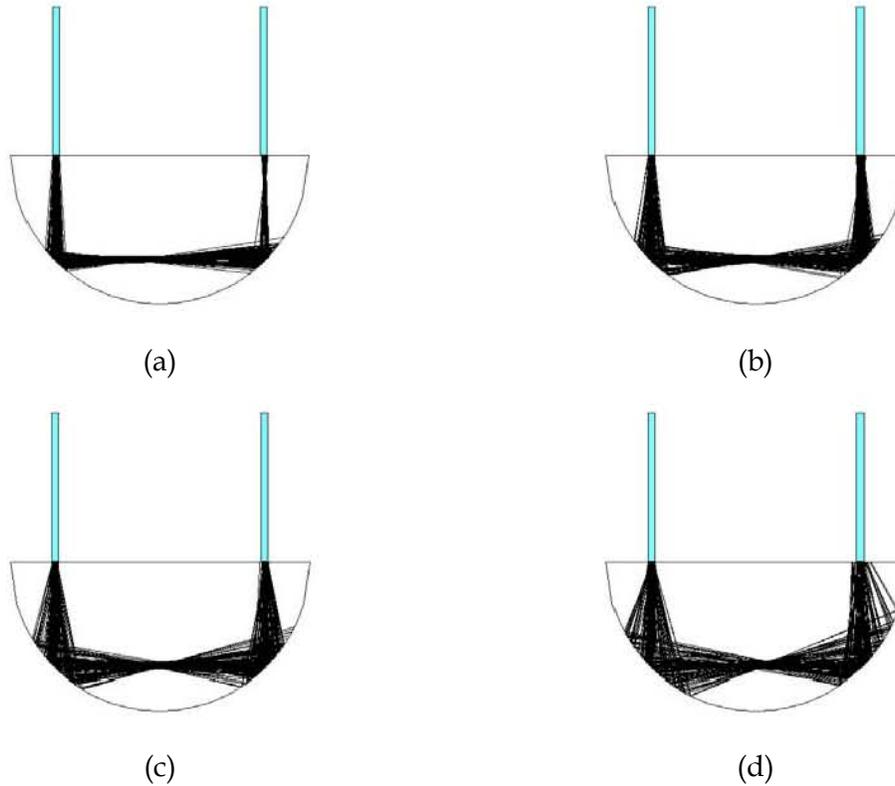


Fig. 5.11 Esquema del sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico con trazado de rayos para $x=0.7$, $d=0.05$ y diferentes aperturas numéricas: (a) $A.N.=0.1$, (b) $A.N.=0.2$, (c) $A.N.=0.3$, (d) $A.N.=0.4$.

Con respecto al parámetro diámetro relativo de las fibras ópticas d podemos verificar que cuando se tiene un mayor diámetro relativo de las fibras ópticas d la transmisión absoluta T disminuye, como se presenta en la gráfica transmisión absoluta T frente al diámetro relativo de las fibras ópticas d (fig. 5.8) en donde se incremento d tanto como lo permitió la superficie del elemento de prueba. También podemos observar a detalle en la tabla 5.2 el efecto de la respuesta de transmisión absoluta T en función del diámetro relativo de la fibra óptica d . Los valores máximos de transmisión se obtienen para d igual a 0.05.

Para la característica de la transmisión relativa T^* en función del índice de refracción del medio n_m , la cual permite diseñar los sensores refractométricos en la región de la mejor respuesta del coeficiente de la transmisión relativa T^* en un intervalo de 1 a 1.5 del índice de refracción del medio n_m , tenemos lo siguiente:

A través de la gráfica transmisión relativa T^* contra el índice de refracción del medio n_m para la posición relativa de las fibras ópticas x igual a 0.7, apertura numérica $A.N.$ igual a 0.2 y diámetro relativo de las fibras ópticas d igual a 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.56 y 0.6 (fig. 5.9), se observa que las características tienen una fuerte dependencia del diámetro relativo de las fibras ópticas d .

Las gráficas $T^*=f(n)$ para los diámetros relativos de las fibras ópticas d iguales a 0.05, 0.1, 0.2 y 0.3 tienen una pequeña desviación de índice de refracción del medio n_m cuando es igual a 1. Esta pequeña desviación se debe a que las trayectorias de los rayos ya no coinciden para el ángulo crítico debido a la interfaz entre el aire y el material transparente del elemento de prueba semiesférico. Bajo estas condiciones un pequeño incremento en el índice de refracción del medio n_m con respecto a la unidad da como resultado una disminución en los rayos que sufren reflexión total interna en la superficie del elemento de prueba.

Las gráficas $T^*=f(n)$ para los diámetros relativos de las fibras ópticas d igual a 0.4 y 0.5 tienen la forma de un escalón, este comportamiento es por que es mas amplio el diámetro del grupo de rayos que para el caso anterior. Esto implica que parte de los rayos alcanzan a formar parte de la segunda zona de transmisión y por lo tanto se suma la transmisión relativa de esa zona y no cambiará hasta que el índice de refracción del medio n_m sea lo suficientemente grande para que se lleve a cabo la reflexión total interna.

El efecto para el diámetro relativo de las fibras ópticas d igual a 0.56 y 0.6 es mayor por lo tanto en la figura 5.9 podemos observar otros dos escalones mas pequeños, que alcanzarían la tercera zona de transmisión, que se demuestra con la relación $x=0.7 \pm d/2$. Con lo cual tenemos que para las fibras ópticas de diámetro relativo d igual a 0.6 el intervalo en donde los rayos comienzan a tener un efecto sobre la estructura del elemento de prueba es $x_1=0.5$ y se detiene en $x_2=1$ (ver fig. 5.6.b).

5.3. Resultados de simulación de sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal

Al igual que para el sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico, el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal consta de dos fibras ópticas, una emisora y otra receptora, multimodo de perfil escalonado del índice de refracción con la posición de acoplamiento simétrico con respecto al eje Z. El elemento de prueba se considera realizado de un material transparente con índice de refracción $n_s=1.5$. La simulación se realizó con 10000 rayos que salen por la fibra óptica emisora.

El índice de refracción del medio externo n_m en los casos que se analizan los parámetros geométricos de las fibras ópticas se considera igual a 1 por ser el medio el aire y para el análisis de la característica del índice de refracción del medio n_m el rango propuesto es de 1 a 1.5. El valor de los parámetros geométricos de las fibras ópticas (diámetro relativo de las fibras ópticas d y apertura numérica $A.N.$) se consideran iguales para las dos fibras ópticas a menos que se especifique en el texto.

Como se tienen tres sensores de elemento de prueba de forma semielipsoidal se le denomina en lo siguiente sensor no. 1 al sensor refractométrico que su elemento de prueba es descrito por (ec. 5-9); para el sensor no. 2 la ecuación que describe al elemento de prueba es (ec. 5-10) y por último para el sensor no. 3 la ecuación del elemento de prueba de forma semielipsoidal es (ec. 5-11). En la figura 5.12 se tiene el esquema del sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal en dos dimensiones para cada uno de los sensores mencionados anteriormente.

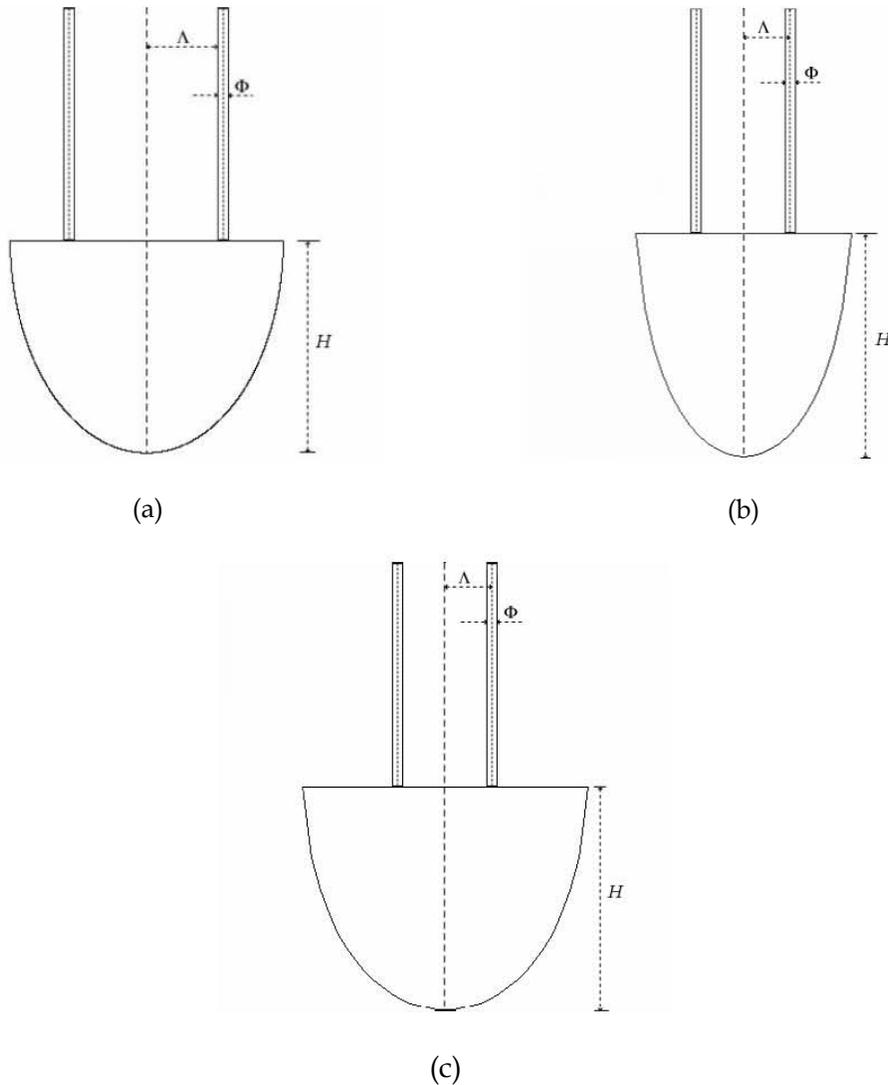


Fig. 5.12 Esquema del sensor refractométrico (a) elemento de prueba semielipsoidal no. 1, (b) elemento de prueba semielipsoidal no. 2, (c) elemento de prueba semielipsoidal no. 3.

Para el cálculo de las características básicas del sensor refractométrico semielipsoidal se obtuvieron las graficas que a continuación se enumeran.

En la figura 5.13 se presenta la característica de la transmisión absoluta T frente a la posición relativa de las fibras ópticas x , para cada uno de los sensores refractométricos de elemento de prueba semielipsoidal.

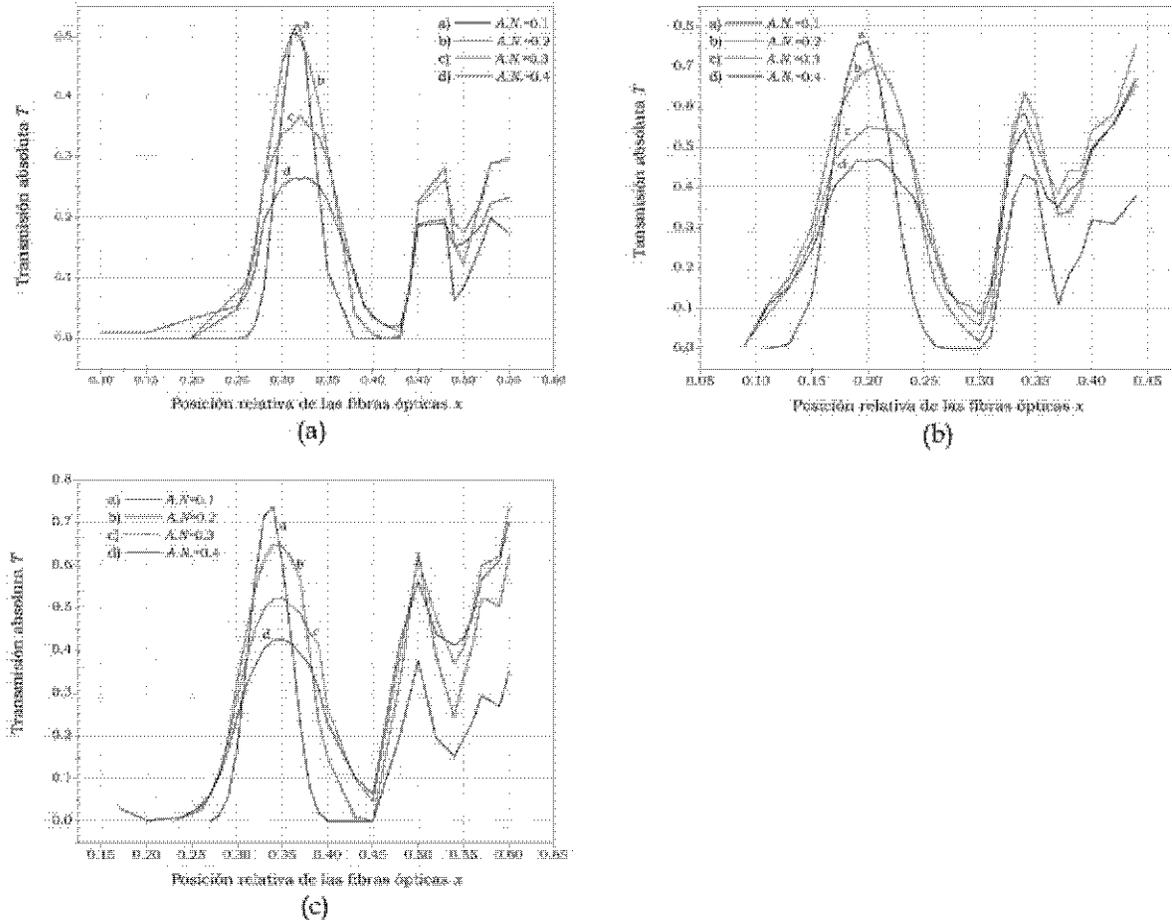


Fig. 5.13 Transmisión absoluta T vs. posición relativa de las fibras ópticas x para la apertura numérica $A.N.=0.1-0.4$, $d=0.05$, $n_m=1$ para el (a) sensor no. 1, (b) sensor no. 2, (c) sensor no. 3.

Enseguida se muestra la gráfica de la característica de transmisión absoluta T en función a la apertura numérica $A.N.$ con una curva para cada uno de los sensores refractométricos semielipsoidales acotados como se citó anteriormente e indicando la posición relativa de las fibras ópticas x (fig. 5.14) y la gráfica de la característica de transmisión absoluta T en función al diámetro relativo de las fibras ópticas d que igualmente que para la característica de la apertura numérica $A.N.$ se tiene tres curvas por gráfica, una para cada sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal (fig. 5.15).

Por último en la figura 5.16 se presenta la característica de la transmisión relativa T^* en función del índice de refracción del medio n_m , para cada uno de los sensores refractométricos de elemento de prueba semielipsoidal.

5. Resultados del análisis de las características de un sensor refractométrico

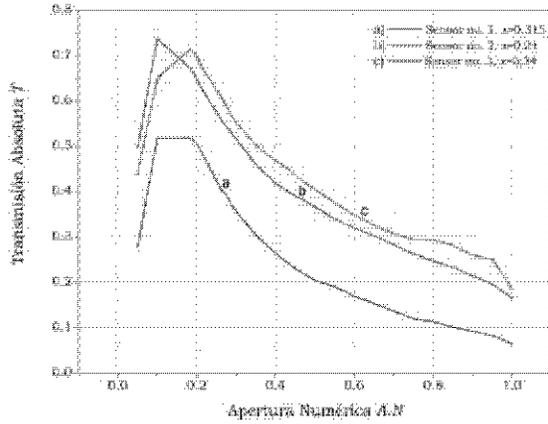


Fig. 5.14 Transmisión absoluta T vs. apertura numérica $A.N.$, $d=0.05$ $n_m=1$.

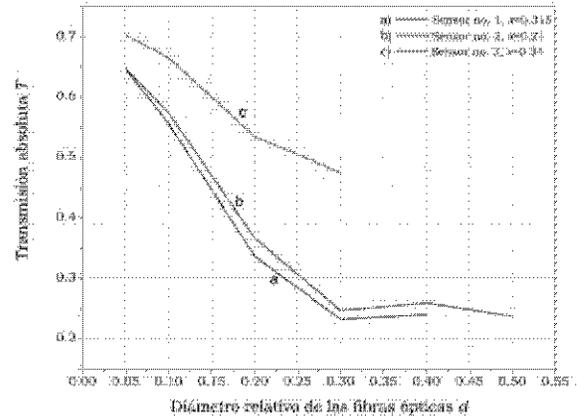
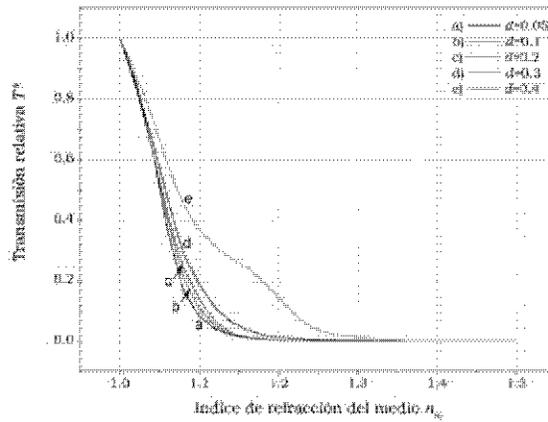
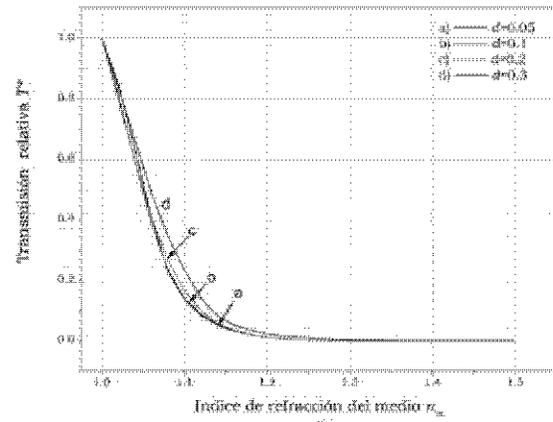


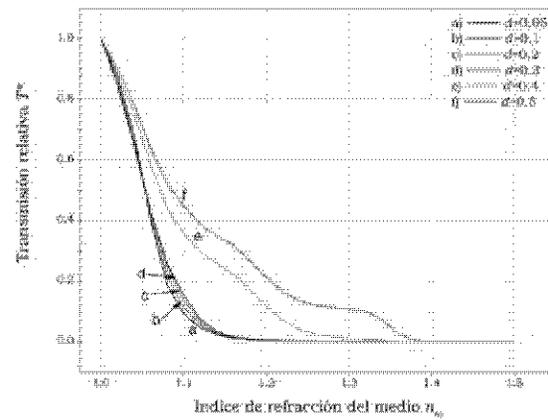
Fig. 5.15 Transmisión absoluta T vs. diámetro relativo de las fibras ópticas d , $A.N.=0.2$, $n_m=1$.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5.16 Transmisión relativa T^* vs. índice de refracción n_c , $x=0.315$, $A.N.=0.2$ y diferentes diámetros relativos de las fibras ópticas d : (a) sensor no. 1, (b) sensor no. 2, (c) sensor no. 3.

5.3.1. Discusión de los resultados de simulación de sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal

A través del comportamiento de la función $T=f(x)$ para cuatro diferentes aperturas numéricas $A.N.$ igual a 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 del sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 1 (fig. 5.13.a), se observa que conforme la apertura numérica de la fibra óptica $A.N.$ se incrementa, la transmisión absoluta T es menor; como se comprueba a través de tabla 5.3. En este sentido, para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 2 (fig. 5.13.b) y el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 3 (fig. 5.13.c) se obtiene comportamientos similares de la característica de la transmisión absoluta T en función de la posición relativa de las fibras ópticas x .

El sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 2 obtuvo la máxima transmisión absoluta T para una apertura numérica $A.N.$ igual a 0.2 y diámetro relativo de las fibra ópticas d igual a 0.05; de esta forma se concluye que el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 2 tiene el mejor desempeño en función de la transmisión absoluta T obtenida.

Tabla 5.3 Valores obtenidos para la transmisión absoluta máxima T_m para sensores de elemento de prueba semielipsoidal con diámetro relativo de fibras ópticas d igual a 0.05.

	Sensor no. 1	Sensor no. 2	Sensor no. 3
$A.N.$	Transmisión absoluta T_m	Transmisión absoluta T_m	Transmisión absoluta T_m
0.1	0.520	0.763	0.737
0.2	0.508	0.705	0.650
0.3	0.358	0.552	0.524
0.4	0.267	0.469	0.427

Del comportamiento de las zonas de transmisión (fig. 5.13) se observa que a mayor apertura numérica mayor será el ancho de la ventana de transmisión. A través de la tabla 5.4 se muestra que el ancho de las zonas de transmisión de los tres sensores refractométricos de elemento de prueba semielipsoidal, se encuentran dentro de un rango similar para la misma aperturas numéricas $A.N.$ Esta característica es importante ya que es necesaria la reproducción de todos los parámetros en forma experimental y tenemos que asegurar que la respuesta del sensor se encuentre dentro del rango de una de las zonas de transmisión, para que no se modifique la característica de la transmisión absoluta T .

Por otra parte, de los datos de la figura 5.14 de la característica transmisión absoluta T en función de la apertura numérica $A.N.$ podemos observar que el rango de aperturas numéricas $A.N.$ en el que se tiene un buen desempeño de los sensores en función de la transmisión absoluta T obtenida es entre 0.18 y 0.25 sin tomar en cuenta que para cada uno de los sensores refractométricos de forma semielipsoidal se tienen valores diferentes de transmisión absoluta T .

Por medio de las figura 5.17 se muestra el comportamiento de los rayos para los tres sensores refractométricos de elemento de prueba semielipsoidal para diferentes aperturas

numéricas $A.N.$ Podemos observar que existe un acoplamiento eficiente de las fibras ópticas para una apertura numérica $A.N.$ igual a 0.1, pero conforme la apertura numérica $A.N.$ aumenta, menor número de rayos consiguen entrar en la fibra receptora, esto ocasiona pérdidas que se traducen en un valor deficiente de transmisión absoluta T a la salida de la fibra óptica receptora.

Tabla 5.4 Ancho de zonas de transmisión para sensores de elemento de prueba semielipsoidal con diámetro relativo fibras ópticas d igual a 0.05.

	Sensor no. 1	Sensor no. 2	Sensor no. 3
$A.N.$	Ancho de zona de transmisión 1 Δx_1	Ancho de zona de transmisión 1 Δx_2	Ancho de zona de transmisión 1 Δx_3
0.1	0.091	0.113	0.096
0.2	0.129	0.188	0.154
0.3	0.150	0.20	0.183
0.4	0.162	0.20	0.234

La causa de este comportamiento son las reflexiones que experimenta el rayo, por un lado conforme la apertura numérica $A.N.$ aumenta, los rayos se van expandiendo y van reflejándose en distintas partes de la superficie cambiando su trayectoria. Algunos rayos no son admitidos por el cono de aceptación de la fibra receptora ya que las fibras ópticas emisora y receptora se propusieron de valores iguales de apertura numérica $A.N.$ y otros rayos sufren una desviación de tal forma que salen fuera del elemento de prueba.

La posición de acoplamiento eficiente de las fibras ópticas es diferente para cada sensor refractométrico, para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 1 la posición relativa de las fibras ópticas x es igual a 0.315; para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 2 es igual a 0.21 y para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 3 es igual a 0.34.

En las figura 5.18 se observa dos casos (a) y (b) en donde se logra un acoplamiento eficiente, para el primer caso (a) el acoplamiento se facilita en la primera zona de transmisión y en el segundo caso (b) se logra el acoplamiento en la segunda zona de transmisión pero debido a las múltiples reflexiones que sufre el rayo, el valor de la transmisión absoluta T para esa posición es deficiente. En la figura (c) se muestra otro caso en donde no existe acoplamiento de las fibras ópticas ya que ninguno de los rayos que salen de la fibra óptica emisora entra en la fibra óptica receptora.

En la figura 5.15 se observa un comportamiento similar de la función $T=f(d)$ para cada una de las curvas de cada sensor. La diferencia es que para cada una de las superficies de cada sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal, es diferente el rango de diámetros relativos de las fibras ópticas d , por que las superficies no son iguales geoméricamente y cada una admite diferentes rangos de diámetro relativo de las fibras ópticas. Pero a partir de los datos obtenidos se concluye que a mayor diámetro relativo de las fibras ópticas d la transmisión absoluta T será menor.

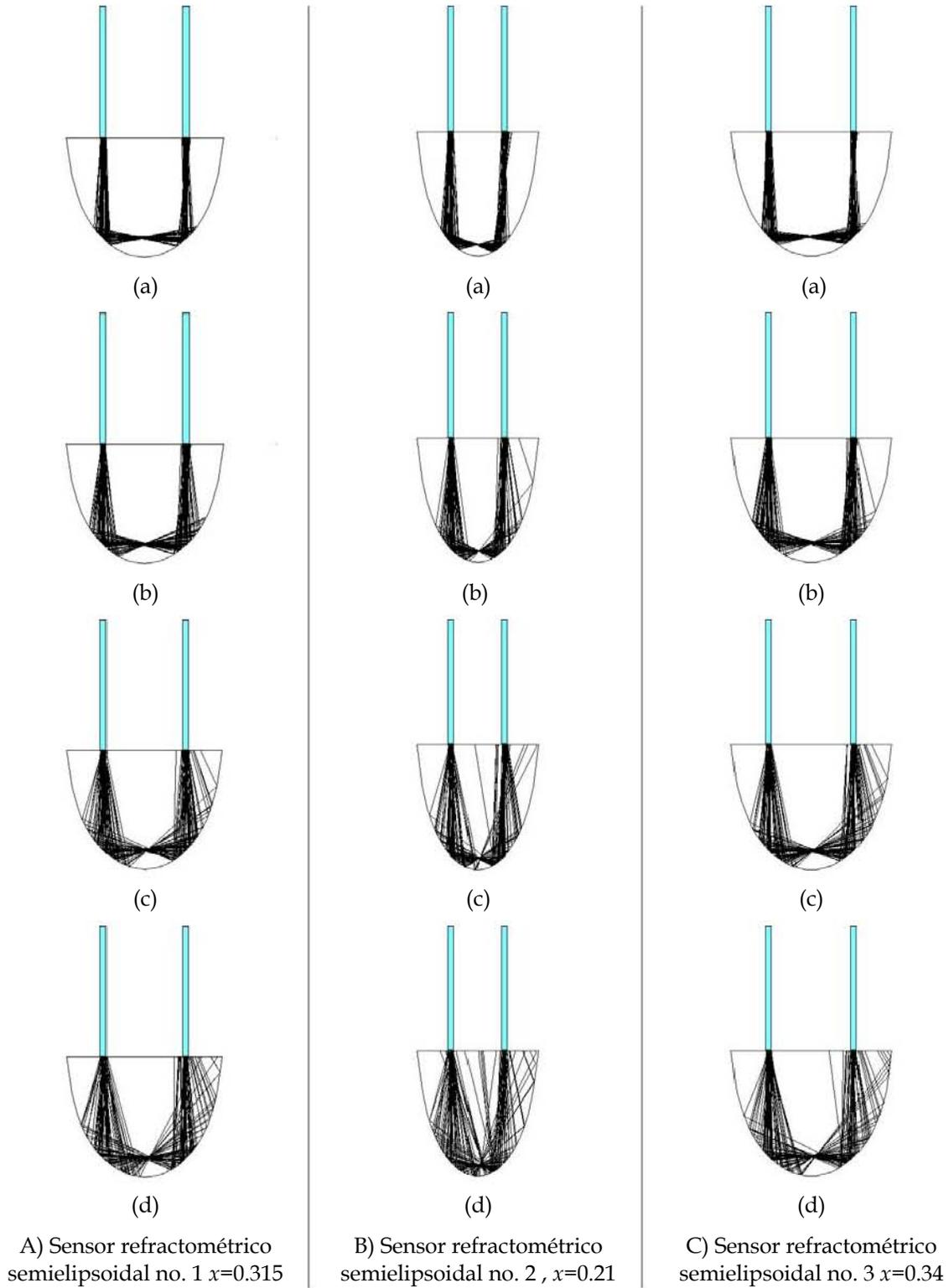


Fig. 5.17 Esquema de los sensores refractométricos de elemento de prueba semielipsoidal con trazado de rayos para diferentes posición relativas de las fibras ópticas $x, d=0.05$ y diferentes aperturas numéricas: (a) $A.N.=0.1$, (b) $A.N.=0.2$, (c) $A.N.=0.3$, (d) $A.N.=0.4$.

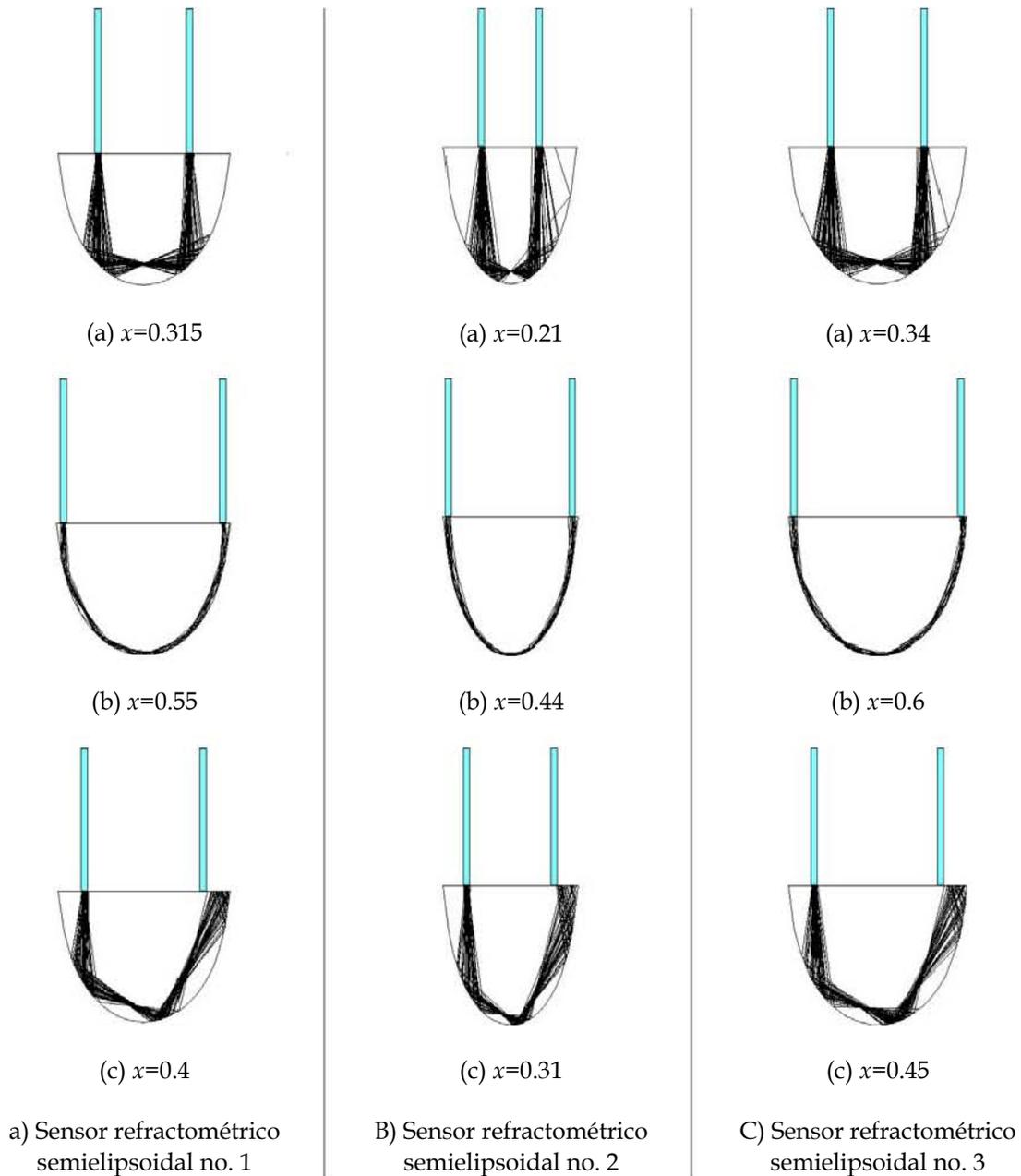


Fig. 5.18 Esquema del sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal con trazado de rayos para $d=0.05$, $A.N.=0.2$ y diferentes posiciones de acoplamiento.

En cuanto a la transmisión relativa T^* en función del índice de refracción del medio n_m se muestra una gráfica para cada sensor (fig. 5.16). De la gráfica de transmisión relativa T^* contra el índice de refracción del medio n_m para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 2 (fig. 5.16.b) no se observa variaciones del comportamiento de la transmisión relativa en función del índice de refracción del medio n_m , caso contrario para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 1 y no. 3.

Para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 1 (fig. 5.16.a) con diámetro relativo de las fibras ópticas d igual a 0.05, 0.1, 0.2 y 0.3 no existe variación en el comportamiento de la transmisión relativa en función del índice de refracción del medio externo n_m , de esta forma todos los casos se encuentran dentro de la primera zona de transmisión. Para d igual a 0.4 se tiene un pequeño escalón alcanzando parte de la segunda zona de transmisión.

Se observa el comportamiento de la curva como escalón para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 3 (fig. 5.16.c) de diámetro relativo de las fibras ópticas d igual a 0.4 y 0.5. Cuyos casos forman parte de la segunda zona de transmisión muy ligeramente. Como se puede comprobar por la relación $x=0.34\pm d/2$ para $d=0.04$ tenemos $x_1=0.14$ y $x_2=0.54$ y con la ayuda de la gráfica (fig. 5.13.c), igualmente para $d=0.5$ donde $x_1=0.09$ y $x_2=0.59$ que los rayos alcanzan a formar parte de la tercer zona de transmisión.

5.4. Comparación de elementos de prueba del sensor refractométrico semiesférico y semielipsoidal

El primer parámetro de las fibras ópticas a comparar es la apertura numérica $A.N.$ El sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico tiene un buen desempeño en función de la transmisión absoluta T para cuando la apertura numérica $A.N.$ va incrementándose de 0.1 a 0.4 (valores de apertura numérica $A.N.$ propuestos). Sin embargo para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal al ir incrementando la apertura numérica $A.N.$ el valor de la transmisión absoluta T disminuye. Por lo tanto se observan comportamientos opuestos de las dos formas del elemento de prueba propuestos: semiesférico y semielipsoidal. Este parámetro es importante ya que se debe garantizar el valor máximo posible que se pueda obtener del coeficiente de transmisión absoluta T en el aire, para minimizar las pérdidas propias del elemento.

Comparando el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 2, contra el sensor refractométrico semiesférico, ambos para una apertura numérica $A.N.$ igual a 0.2 y un diámetro relativo de las fibras ópticas d igual a 0.05, se observa un mejor desempeño para el sensor refractométrico semielipsoidal no. 2 en función de la transmisión absoluta T obtenida. No obstante estos resultados, se pueden optimizar los parámetros de las fibras ópticas para el sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico y utilizar fibras ópticas con apertura numérica $A.N.$ igual a 0.3. Así se consigue una transmisión absoluta T igual a 0.623 y de esta forma se aproxima al valor de la transmisión absoluta T obtenido para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal no. 2 igual a 0.705 y se asegura la respuesta de la transmisión absoluta T del sensor en el aire para el sensor de elemento de prueba semiesférico.

Como se debe de asegurar la respuesta del sensor en el aire en función de la transmisión absoluta se debe de considerar la posición relativa de las fibras ópticas x ya que debe de ser un parámetro que nos permita tener un rango de variación al reproducir estos parámetros para su construcción. Mientras mayor sea el rango de la posición relativa de las fibras x en donde se obtenga una respuesta eficiente del sensor y no se presenten

cambios bruscos, mejor se va a poder reproducir los parámetros experimentalmente. En este sentido es importante escoger la zona de transmisión en donde se va a trabajar. La primera zona de transmisión de los sensores refractométricos de elemento de prueba semielipsoidal son de mayor tamaño en comparación de la primera zona de transmisión del sensor refractométrico semiesférico como se observó a través de las tablas 5.4 y 5.1 respectivamente.

El efecto de la variación del diámetro relativo de las fibras ópticas d es similar para ambos elementos de prueba: semiesférico y semielipsoidal, a mayor diámetro relativo de las fibras ópticas d , la transmisión absoluta T va decreciendo. Por lo tanto el diámetro relativo de las fibras ópticas d no es un parámetro que convenga utilizar para determinar que tipo de superficie del elemento de prueba es más eficiente.

Como podemos ver en (fig. 5.11) para el sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico y (fig. 5.17) para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal, a través del trazado de los rayos tenemos que la posición de las fibras ópticas Λ en donde se obtiene el valor máximo de la transmisión absoluta T , es para cuando se circunscribe un polígono de cuatro lados dentro de la superficie del elemento de prueba en el plano XZ.

Para el sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico tenemos que la posición de las fibras ópticas Λ esta determinada por (ec. 5-12) determinada a partir de la construcción geométrica de la figura 5.19.

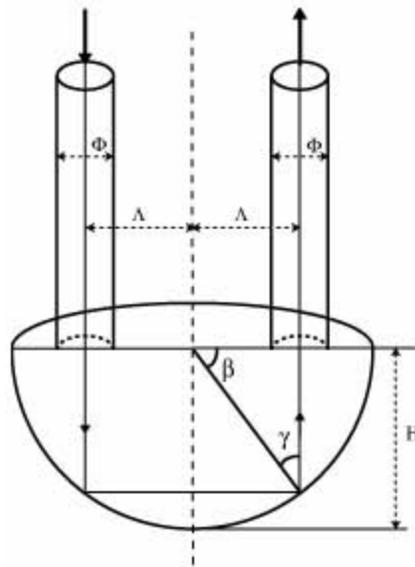


Fig. 5.19 Construcción geométrica para determinar la posición de las fibras ópticas Λ .

$$\Lambda = \text{sen} \left[\left(1 - \frac{1}{n} \right) \frac{\pi}{2} \right] \quad (5-12)$$

Otra característica a comparar es el índice de refracción del medio n_m , el tamaño y forma del elemento de prueba del sensor refractométrico es determinante para poder establecer el campo de aplicación del sensor. Mientras que el sensor refractométrico semiesférico presenta características con las cuales se puede fabricar sensores para la medición del índice de refracción del medio n_m de prácticamente todos los líquidos y gases licuados en un intervalo de 1 a 1.5; el sensor refractométrico semielipsoidal no presenta las características para adecuarse a las necesidades de un tipo específico de aplicación, debido a la complejidad de la forma geométrica del elemento de prueba y a los intervalos del índice de refracción con los que opera.

5.5. Optimización de las características de transmisión para su aplicación

Una de las aplicaciones para los sensores refractométricos es un sensor detector de nivel de líquido el cual se podría utilizar en tanques de petróleo, oleoductos, tanques de gasolina en las gasolineras, etc. También es de gran utilidad para cualquier otro líquido o gas que se utiliza en la industria. La forma de utilizar los sensores es como detectores discretos, se necesita determinar la precisión para poner tantos sensores como se necesite a lo largo de un tanque. Por ejemplo en un gasolinera instalarlos en los contenedores y en un cuarto de control tener un sistema el cual enviará directamente a la central de procesamiento la información de que los niveles de producto están por debajo de lo necesario y de esta forma volver a llenar los contenedores automatizadamente. Así se puede monitorear la disponibilidad del líquido o gas de una forma rápida, sin interferencias y sin tener que estar presente en el sitio.

En algunas aplicaciones de la industria química, lo que se necesita es medir el nivel de un líquido flamable o de un líquido a muy bajas temperaturas, monitorear líquidos que necesitan estar bajo un estricto control de temperatura y presión. Es por eso que a través de un sensor refractométrico se pueden realizar esas tareas que involucran alta precisión en sus mediciones.

También se puede utilizar este tipo de sensor refractométrico para averiguar el índice de refracción n de algún líquido; para esto se necesita que el procesamiento de los datos sea analógico y que el índices de refracción del medio n_m se encuentre en un intervalo entre 1 y 1.5, por ser el intervalo propuesto para el desarrollo de este trabajo. Eso no quiere decir que no se pueda proponer para otro intervalo del índice de refracción del medio n_m diferente.

Durante el desarrollo de este trabajo se encontraron otras aplicaciones y se realizaron estudios en el laboratorio para medir concentraciones de sal en el agua. Además los sensores refractométricos propuestos se pueden utilizar para medir concentraciones de azúcar o determinar la composición de una mezcla.

Las aplicaciones del sensor refractométrico son muy diversas y es por que todas las variables involucradas en estas aplicaciones tienen una relación directa con el cambio al índice de refracción n .

5.6. Comparación entre los resultados teóricos y experimentales y estudio del efecto de variaciones pequeñas de algunos parámetros sobre las características del sensor

En esta sección se compara el comportamiento teórico de un sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal y los resultados experimentales; además se estudia el efecto de pequeñas variaciones de algunos parámetros sobre las características del sensor.

Los resultados experimentales fueron obtenidos por el grupo de trabajo del Laboratorio de comunicaciones ópticas del Departamento de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM [37]. Estos estudios tuvieron su enfoque sobre la aplicación de un sensor refractométrico para la medición de la salinidad del agua. La importancia de este estudio fue relacionada al hecho que la salinidad en el agua es importante para muchos seres vivos. Por ejemplo en un estuario la interacción entre dos tipos de agua trae como consecuencia variaciones en la salinidad del sistema. En algunos estuarios se ha encontrado que el agua de mar y el agua dulce se mezclan tan bien, que es homogénea, mientras que en otros sitios se forman dos capas, la superior de agua dulce y la inferior de agua salada por ser ésta más densa. Pese a que las condiciones físicas a menudo son difíciles y la diversidad de las especies es consecuentemente baja, las condiciones alimenticias son con todo tan favorables que la región está repleta de vida. En estas condiciones se observa que algunos organismos se adaptan, por tener unas tolerancias amplias a la salinidad y temperatura, mientras que otros no pueden subsistir en este medio y mueren. Por lo tanto es importante el desarrollo de nuevos instrumentos de medición para medir la salinidad en lagos, lagunas, estuarios. y océanos, para preservar los ecosistemas que habitan en dichos lugares.

La refractometría óptica es uno de los métodos populares para tener acceso a los niveles de salinidad en el agua. Varios dispositivos refractométricos han sido propuestos para realizar la medición del índice de refracción de líquidos y en particular de la salinidad en el agua. Sin embargo, aun hay dificultades para satisfacer las necesidades operacionales de usuarios como por ejemplo de biólogos marinos, oceanógrafos y limnólogos. Los factores más importantes son: el alto costo, el tamaño, la posibilidad de la integración de grandes arreglos y el nivel adecuado de funcionamiento en dicha aplicación.

En el experimento el sensor fue conectado a una fuente remota de luz (LED-IR) y a un fotodetector como se muestra en la figura 5.20. El índice de refracción del elemento n_s es igual a 1.459, la posición relativa de las fibras ópticas x es igual a 0.913, el diámetro relativo de ambas fibras ópticas d es igual a 0.05 la apertura numérica $A.N.$ de la fibra emisora es igual a 0.1 y la de la fibra receptora es igual a 0.5.

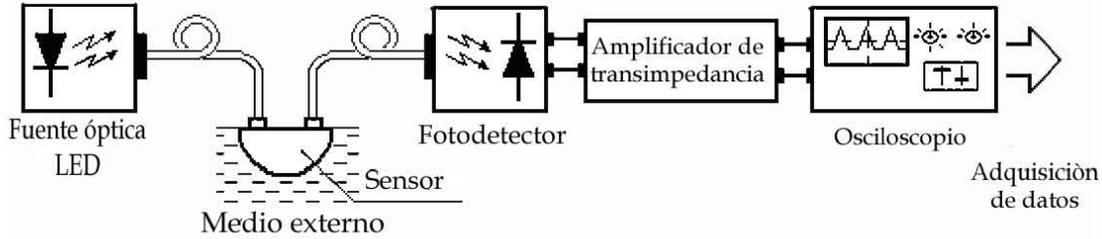


Fig. 5.20 Construcción geométrica para determinar la posición de las fibras ópticas Δ [37].

En la gráfica experimental de la figura 5.21 se exhibe la transmisión del sensor contra las posición relativa de las fibras ópticas x . Este parámetro tiene un efecto muy importante en la sensibilidad del sensor al índice de refracción del medio externo n_m .

La transmisión experimental del sensor en función de la posición relativa de las fibras ópticas x para diferentes concentraciones de sal en el agua se presenta en la figura 5.22.a. Se puede observar que la transmisión absoluta T del sensor es sensible a variaciones de la salinidad en el intervalo de la posición relativa de las fibras $x= 0.905\dots 0.940$. En la figura 5.22.b se presenta la respuesta experimental de la transmisión relativa contra la salinidad en el agua para diferentes distancias x .

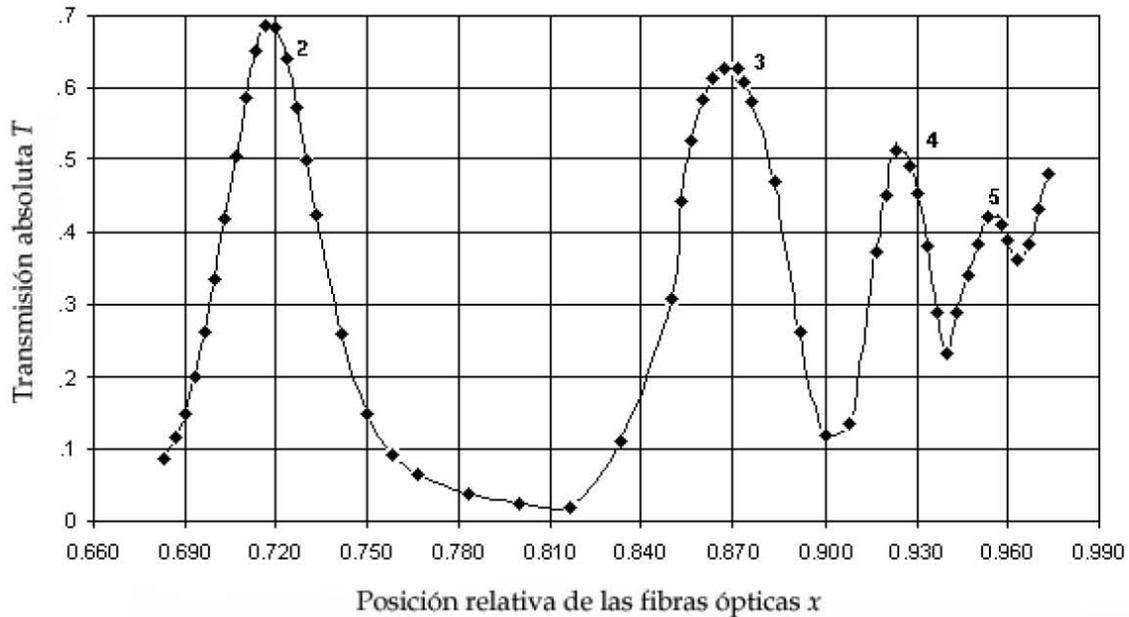


Fig. 5.21 Transmisión absoluta experimental T en función de la distancia las fibras ópticas del sensor refractométrico en el aire como medio externo (Los números corresponden al número de la zona de transmisión) [37].

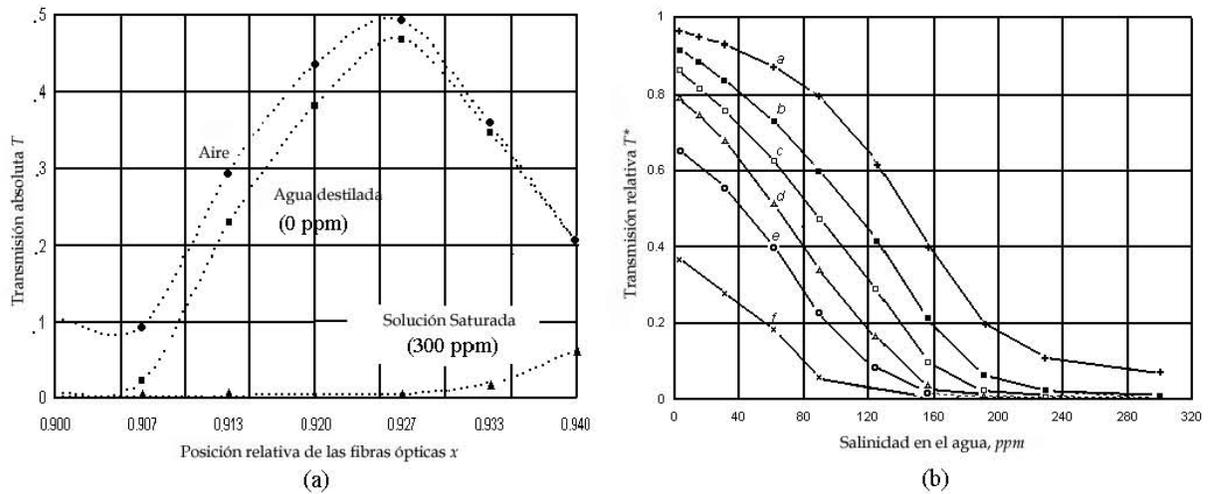


Fig. 5.22 (a) - Datos experimentales sobre la transmisión absoluta T en función de la posición relativa de las fibras ópticas x para el aire, agua destilada (0 ‰) y agua con una concentración de sal de 301.2 ‰; (b) - Transmisión relativa experimental T^* en función de la concentración de sal para las distintas posición relativas de las fibras ópticas x : (a) $x=0.933$, (b) $x=0.927$, (c) $x=0.920$, (d) $x=0.913$, (e) $x=0.910$, (f) $x=0.907$ [37].

5.6.1. Comparación del experimento con los resultados de la simulación numérica

Se observa de la fig. 5.22b que la respuesta del sensor a la salinidad en el agua en general no es lineal. La linealidad de la respuesta del sensor al índice de refracción del medio externo n_m , depende esencialmente del parámetro posición relativa de las fibras ópticas x . El rango de la salinidad en el agua con la cual se puede utilizar este sensor, también depende del parámetro posición relativa de las fibras ópticas x . Para valores de x menores a 0.913 la respuesta a la salinidad del agua es casi lineal, aunque el rango de las mediciones de la salinidad en el agua está limitada por el valor máximo de 160 ppm aproximadamente.

Antes de comparar los resultados experimentales con nuestras predicciones teóricas hay que aclarar lo siguiente: En la simulación numérica realizada en este trabajo el argumento siempre fue el índice de refracción del medio externo n_m , pero en el experimento el argumento fue la concentración de sal en el agua. La relación experimental entre estas dos cantidades se muestra en la fig. 5.23. En adelante los datos de la fig. 5.23 están utilizados en todas las comparaciones de la teoría y el experimento.

Los resultados de la simulación numérica correspondientes a los parámetros del sensor utilizados en el experimento se presentan en la fig. 5.24. En esta figura se muestra la transmisión relativa del sensor T^* contra el índice de refracción del medio externo n_m (que es proporcional a la salinidad del agua), el parámetro es la distancia entre las fibras ópticas x .

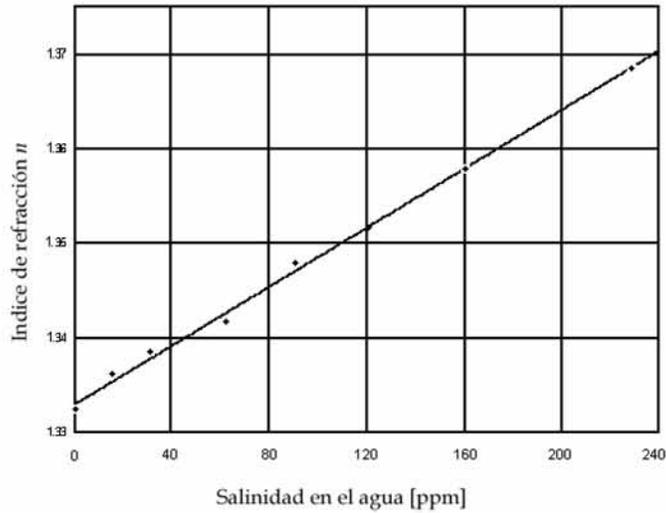


Fig. 5.23 Índice de refracción del agua n en función de la salinidad en el agua (datos experimentales).

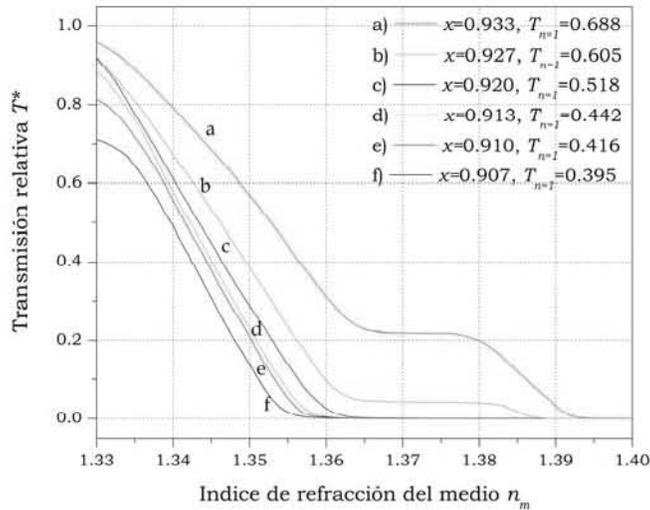


Fig. 5.24 Transmisión absoluta T vs. índice de refracción del medio para diferentes posiciones relativas de las fibras ópticas x (Simulación numérica). La variante "c" corresponde al experimento sobre la respuesta del sensor a la salinidad del agua.

Comparando los datos de las figuras 5.22.b y 5.24, se observa que hay un comportamiento similar de las características $T^*=f(n)$ teóricas y experimentales, sin embargo existe una diferencia cuantitativa entre las características teóricas y el experimento.

Esto se atribuye a los posibles errores en la determinación de algunos de los parámetros geométricos del sensor y la distribución de la luz en los haces ópticos empleados. En virtud de la diferencia mencionada, en la sección siguiente estamos analizando el efecto de las pequeñas variaciones de los parámetros geométricos y las constantes ópticas del sensor sobre su característica de transmisión relativa T^* contra el índice de refracción del medio externo n_m .

5.6.2. Cálculo de la no linealidad $\delta(n)$ de la respuesta de la transmisión relativa T^*

En cualquier dispositivo de medición, la linealidad de su respuesta al factor físico que mide el dispositivo es de suma importancia. En nuestro caso, la respuesta del sensor es su característica de transmisión relativa contra el índice de refracción del medio externo, $T^*(n)$. La linealidad de la respuesta cuantifican por medio del factor de no linealidad δ , el cual se definen en un intervalo del índice de refracción del medio n_m [35].

En la figura 5.25 se presenta el aspecto típico de la función $T^*(n)$ representada por los puntos que corresponden a los valores discretos del coeficiente de transmisión relativa T^* , en un intervalo del índice de refracción del medio n_m .

Una característica $T'^*(n)$ ideal lineal corresponde a una línea recta de la forma $T'^*(n)=a+bn$. Esta línea pasa por dos puntos de la función real $T^*(n)$ que corresponden a $T^*_{n_1}=0.9$ y $T^*_{n_2}=0.1$.

El factor de la no linealidad $\delta(n)$ se define a través de la ecuación citada en la sección 4.3.2 (ec. 4-14).

$$\delta(n) = \frac{T^*(n_j) - T'^*(n_j)}{T'^*(n_j)} \times 100\%$$

donde $T^*(n_j)$ y $T'^*(n_j)$ son valores de la función real $T^*(n)$ y de la función ideal $T'^*(n)$ respectivamente, cuando el valor del índice de refracción del medio de referencia $n=n_j$ está dentro del intervalo ($n_1 < n_j < n_2$).

Al conocer el factor $\delta(n)$ se puede estimar el error máximo en las mediciones causado por no linealidad de la respuesta del sensor y de esta manera garantizar que el sensor es adecuado para una aplicación particular.

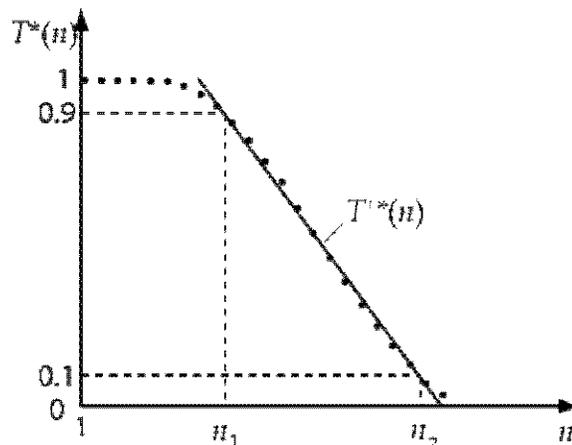


Fig. 5. 25 Función $T^*(n)$ típica representada por los puntos que corresponden a los valores discretos del coeficiente de transmisión relativa T^* , y su aproximación ideal lineal por la función $T'^*(n)$.

En la figura 5.26 se presentan la característica teórica y experimental de la transmisión relativa T^* en función del índice de refracción del medio n_m . Los parámetros son: el índice de refracción del elemento $n_s = 1.459$, posición relativa de las fibras ópticas $x=0.913$, diámetro relativo de las fibras ópticas $d=0.05$ y apertura numérica $A.N._1=0.1$ y $A.N._2=0.5$. En la misma figura 5.26 se muestran los resultados del cálculo del factor de no linealidad $\delta(n)$ que corresponde a la característica de transmisión $T^*(n)$ teórica y experimental.

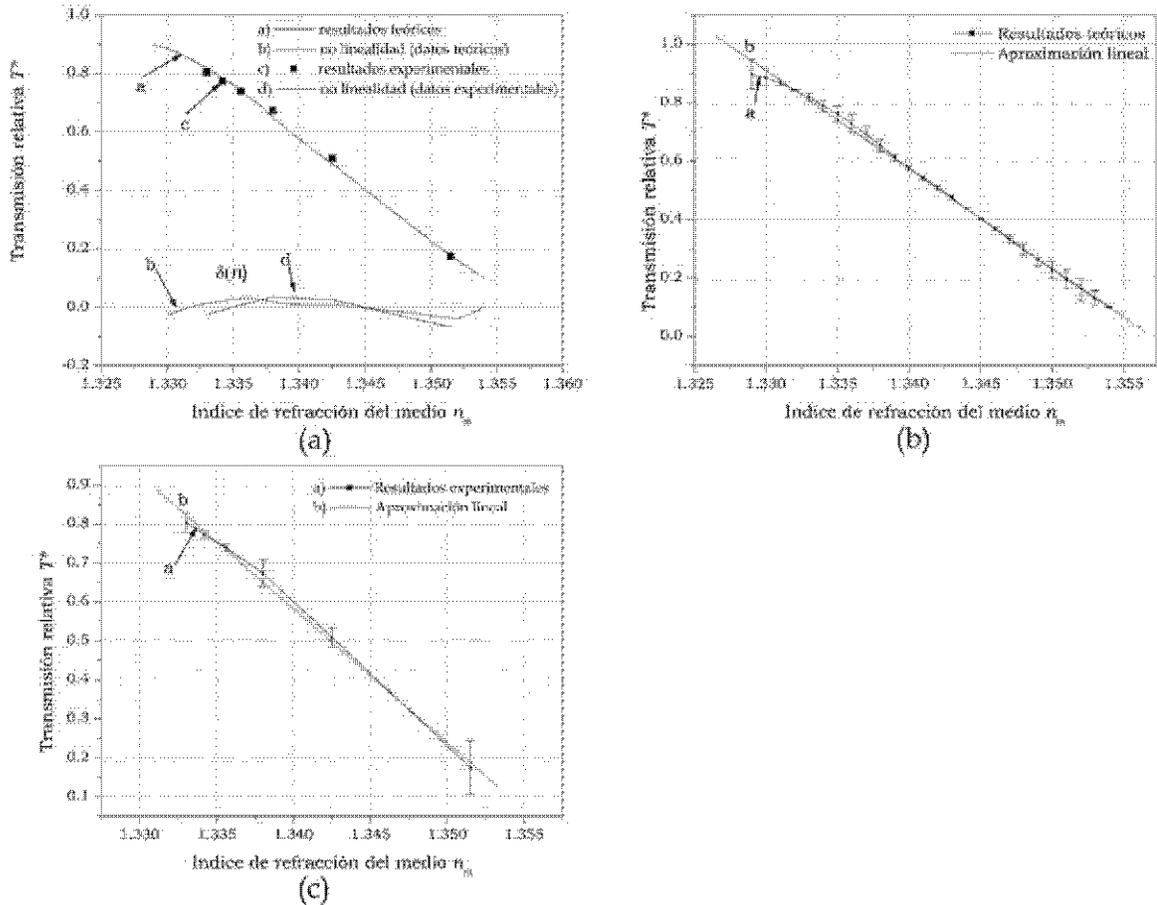


Fig. 5.26 (a) - Transmisión relativa T^* teórica y experimental en función del índice de refracción del medio n_m y el factor de no linealidad $\delta(n)$ correspondiente; (b) - Función $T^*(n)$ teórica y su aproximación lineal; (c) - Función $T^*(n)$ experimental y su aproximación lineal.

De la Tabla 5.5 se puede ver que el factor máximo de no linealidad $\delta(n)$ es de 4.9 % para la función $T^*(n)$ teórica, y de 6.8% para la función $T^*(n)$ experimental, en el intervalo del índice de refracción $n_m = 1.300 \dots 1.355$.

Tabla 5.5 Factor máximo de no linealidad $\delta(n)$ de la función $T^*(n)$ teórica y experimental.

Caso	x	d	$A.N._1$	$A.N._2$	δ [%]
Teórico	0.913	0.05	0.1	0.5	4.9
Experimental	0.913	0.05	0.1	0.5	6.8

5.7. Efecto de la variación de diferentes parámetros sobre la respuesta de la transmisión relativa $T^*(n)$ del sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico

En esta sección se cuantifica el efecto de la variación de diferentes parámetros: la posición relativa de las fibras ópticas x , el diámetro relativo de las fibras ópticas d , y la apertura numérica NA sobre la transmisión relativa T^* del sensor. Se utilizan los parámetros básicos del sensor similares a los utilizados en el experimento. (ver Sección 5.6).

5.7.1. Efecto de la posición relativa de las fibras ópticas x

Para estudiar el efecto de la posición relativa de las fibras ópticas x , se modificó esta cantidad por $\pm 0.5\%$ y $\pm 1.1\%$ de los valores experimentales. Se escogieron estos porcentajes relativamente pequeños debido a que la respuesta del sensor refractométrico a la transmisión relativa T^* es muy sensible a cambios en la posición relativa de las fibras ópticas. En la Tabla 5.6 se muestra la forma en que se hicieron las variaciones del parámetro x , donde x_1 es la posición relativa de la fibra óptica emisora y x_2 es la posición relativa de fibra óptica receptor. En la figura 5.27 se presentan los resultados obtenidos en una forma gráfica, a través de una gráfica de superficie.

Tabla 5.6 Porcentajes de variación de la posición relativa de las fibras ópticas emisora y receptora.

Número de variante	x_1	x_2
1.1	1.1%	-1.1%
1.2	-0.5%	0.5%
1.3	0.0%	0.0%
1.4	0.5%	-0.5%
1.5	-1.1%	1.1%

La sensibilidad al cambio de la posición de las fibras ópticas x , sin importar si se aumenta o disminuye en cierto porcentaje el parámetro, fue probado a través de su cálculo. El caso más crítico es para la variante número 1.5 cuando se disminuye en un 1.1% el valor de la posición x de la fibra óptica emisora. Para la variante 1.2 también se observa un decremento de la respuesta de la transmisión relativa T^* . Por tanto, se concluye que reduciendo el valor de la posición de la fibra óptica receptora tiene un mayor efecto en la respuesta a la transmisión relativa T^* .

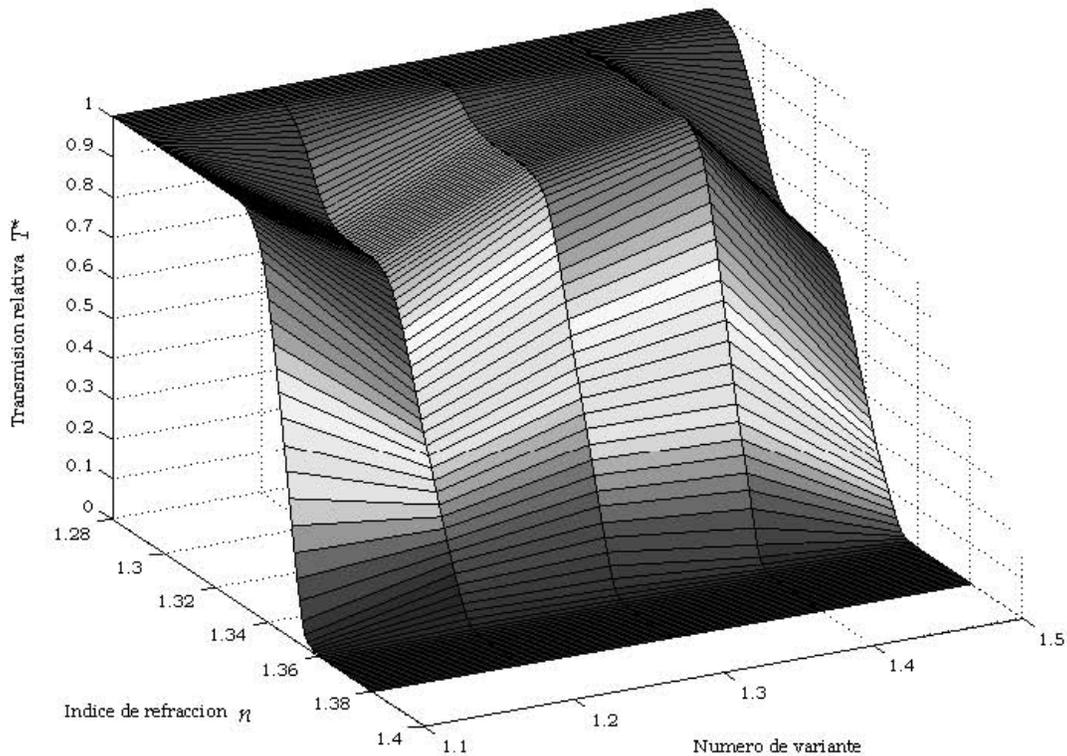


Fig. 5.27 Efecto del cambio de la posición relativa de las fibras ópticas x sobre la transmisión relativa T^* en función del cambio del índice de refracción del medio n_m .

5.7.2. Efecto de la variación del diámetro relativo de las fibras óptica d y la apertura numérica $A.N.$

Para analizar el efecto del diámetro relativo de las fibras ópticas d y la apertura numérica $A.N.$ sobre la respuesta del sensor, se modificó en un $\pm 20\%$ cada una de estas cantidades respecto a su valor base. Se escogieron estos porcentajes de cambio debido a que la transmisión relativa T^* no es muy sensible a cambios en el diámetro relativo de las fibras ópticas d y la apertura numérica $A.N.$ En la tabla 5.7 se muestra la forma en que se hicieron las variaciones de los parámetros d y $A.N.$ En la figura 5.28 se presentan los resultados obtenidos a través de una gráfica de superficie.

La sensibilidad del cambio al diámetro relativo de las fibras ópticas d y de la apertura numérica $A.N.$ es menos brusca que para la posición relativa de las fibras ópticas x . El porcentaje de variación es de $\pm 20\%$ mientras que para x la máxima variación es de 1.1% .

El caso más crítico del efecto del diámetro relativo de las fibras ópticas d y de la apertura numérica $A.N.$ a la respuesta de la transmisión relativa T^* es para la variante número 4.1 y 4.7.

Tabla 5.7 Porcentajes de variación del diámetro relativo d y de la apertura numérica $A.N.$ de las fibras ópticas emisora y receptora.

Número de variante	d_1	d_2	$A.N._1$	$A.N._2$
4.1	20%	20%	20%	20%
4.2	-20%	-20%	-20%	-20%
4.3	20%	20%	-20%	-20%
4.4	-20%	-20%	20%	20%
4.5	0%	0%	0%	0%
4.6	-20%	20%	20%	-20%
4.7	20%	-20%	-20%	20%
4.8	-20%	20%	-20%	20%
4.9	20%	-20%	20%	-20%

La variación positiva del diámetro relativo de la fibra óptica emisora d_1 igual a +20 % (variantes no. 4.2, 4.4, 4.6 y 4.8) tienen un comportamiento similar a la de la variante 4.5 que son los parámetros que corresponden al sensor experimental. El efecto sobre la función $T^*(n)$ de la variación negativa en el diámetro la fibra óptica emisora d_1 igual a -20% (variantes no. 4.6, 4.7, 4.8, 4.9) es mayor que el efecto de las variaciones positivas del diámetro relativo de las fibras d_1 .

Estas variaciones se enumeran en la tabla 5.8 conforme al grado del efecto. El grado no. 1 es para el que tiene el menor efecto a la respuesta de la transmisión relativa T^* y el grado no. 8 para el que tiene el mayor efecto. Para las variaciones positivas de d_1 , aumenta la transmisión relativa T^* con respecto a la variante no. 4.5; para las variaciones negativas de d_1 la transmisión relativa T^* disminuye.

Tabla 5.8 Variaciones del diámetro relativo d y de la apertura numérica $A.N.$ de las fibras ópticas emisora y receptora utilizadas en el trabajo.

Número de variante	d_1	d_2	$A.N._1$	$A.N._2$	Grado del efecto
4.5	0%	0%	0%	0%	0
4.6	-20%	20%	20%	-20%	1
4.8	-20%	20%	-20%	20%	2
4.4	-20%	-20%	20%	20%	3
4.2	-20%	-20%	-20%	-20%	4
4.3	20%	20%	-20%	-20%	5
4.9	20%	-20%	20%	-20%	6
4.7	20%	-20%	-20%	20%	7
4.1	20%	20%	20%	20%	8

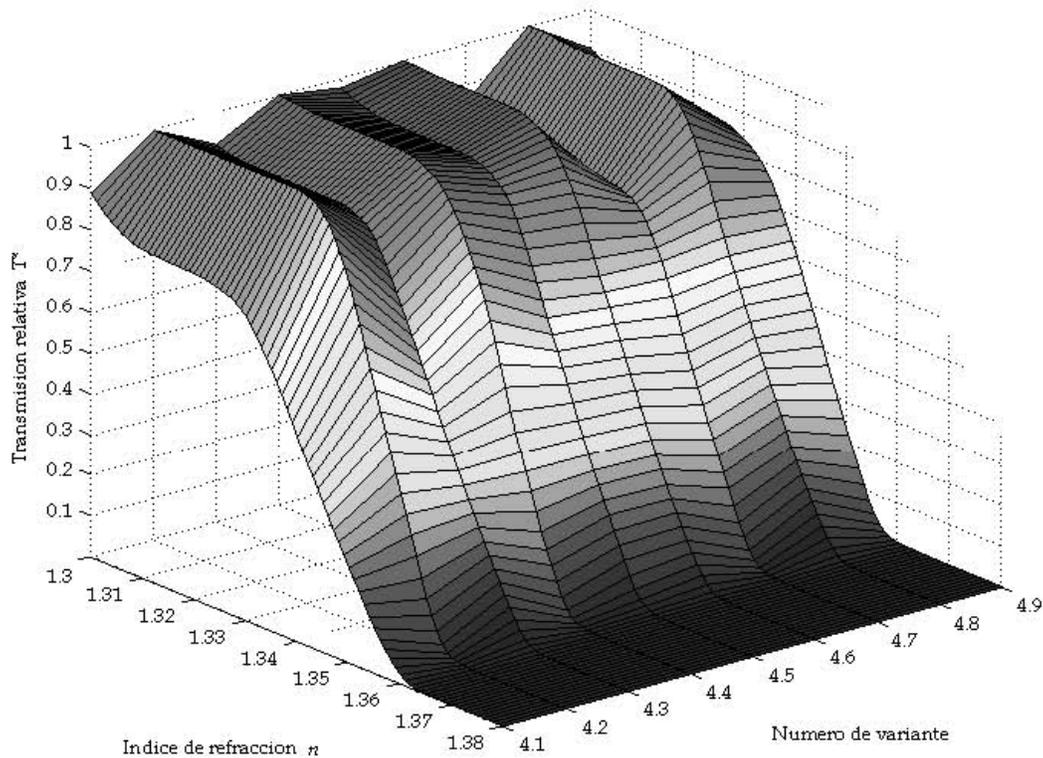


Fig. 5.28 Efecto del cambio del diámetro relativo de las fibras ópticas d y apertura numérica $A.N.$ sobre la transmisión relativa T^* en función del cambio del índice de refracción del medio n_m .

De esta forma se puede concluir que no tendremos mucha variación de la respuesta del sensor para cuando el diámetro relativo de la fibra óptica emisora d_1 varía hasta por -20 %. Las variaciones más críticas se observan para una variación del diámetro relativo de la fibras óptica emisora d_1 de +20%. En general se puede concluir que la función $T^*(n)$ no es muy sensible al cambio de la apertura numérica $A.N.$ y del diámetro relativo de las fibras ópticas d .

6. Conclusiones generales



1. Mediante un análisis numérico, se calculó las características de transmisión óptica de un sensor refractométrico en función de varios parámetros geométricos del sensor (forma de su superficie, posición relativa de las fibras ópticas x , diámetro relativo de las fibras ópticas d , apertura numérica $A.N.$) y del índice de refracción del medio externo n_m . Este análisis permitió encontrar la combinación de parámetros que resulta en una respuesta deseada del sensor refractométrico al índice de refracción del medio externo n_m .

2. Se obtuvo las características de transmisión mencionadas para dos tipos de superficie del elemento de prueba del sensor: una semiesférica y una semielipsoidal, de las cuales se determinó que el parámetro geométrico más importante para el diseño de un sensor refractométrico cualquiera que sea la forma del elemento de prueba, es el parámetro de la posición de las fibras Λ .

Una vez determinada la posición de las fibras ópticas Λ , el segundo parámetro en importancia, para el diseño del sensor refractométrico, es la apertura numérica de las fibras ópticas $A.N.$ El intervalo de la apertura numérica $A.N.$ para un buen desempeño de un sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico es de 0.185 a 0.4 y de un elemento de prueba semielipsoidal es de 0.18 a 0.25, para un diámetro relativo de las fibras ópticas d igual a 0.05



3. De acuerdo al comportamiento de la característica transmisión absoluta T y el trazado de los rayos de los sensores refractométricos de elemento de prueba semiesférico y semielipsoidal, se puede definir que la posición de las fibras ópticas Λ en donde se obtiene el valor máximo de la transmisión absoluta T es para cuando se circunscribe un polígono de cuatro lados dentro del elemento de prueba, en el plano XZ; esto permite homogeneizar el método para encontrar la posición de las fibras ópticas Λ . Para que el haz de luz trace esta trayectoria es necesario que tenga el menor diámetro posible a la salida de la fibra óptica emisora.

4. Se mostró la relación y diferencias entre las características de los dos tipos de elementos de prueba: semiesférica y semielipsoidal y las ventajas que tienen ellos para su implementación en algunas aplicaciones de la industria. Se determinó que el sensor refractométrico más eficiente es el sensor refractométrico de elemento de prueba semiesférico. Esto en comparación con las tres variantes del sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal estudiados. Los parámetros geométricos son más fáciles de controlar para el sensor refractométrico semiesférico por la forma de la estructura geométrica de la superficie del elemento de prueba.

5. Por medio de la variación del conjunto de parámetros geométricos antes mencionados, se determinó la región del índice de refracción del medio n_m donde el sensor trabajará de una manera óptima para una aplicación específica de la industria. La selección del intervalo de trabajo del índice de refracción del medio es posible ya que se puede variar la posición relativa de las fibras x . Por lo tanto se podrá efectuar la medición del índice de refracción n prácticamente para casi todos los líquidos y gases licuados. El rango del índice de refracción del medio externo n_m para los sensores refractométricos del elemento de prueba semiesférico es de 1 a 1.6 y para el sensor refractométrico de elemento de prueba semielipsoidal es de 1 a 1.2.

6. La desventaja de estos sensores es la limitada posibilidad de la variación de la característica de transmisión relativa T^* en función del índice de refracción del medio n_m a través de la modificación de los parámetros: posición relativa de las fibras ópticas x , diámetro relativo de las fibras ópticas d , y apertura numérica $A.N.$. Esto es que al reproducir de manera experimental los parámetros para las cuales el sensor refractométrico tuvo un buen desempeño teórico, cualquier variación de estos parámetros puede ocasionar que se obtengan resultados diferentes a los previstos.

7. A través del cálculo del efecto de la variación de parámetros geométricos del sensor sobre la transmisión relativa T^* en función del índice de refracción del medio n_m , se concluye que el efecto más crítico es para la variación de la posición relativa de las fibras ópticas x . Para variaciones positivas de la posición relativa de la fibra óptica emisora x_1 iguales a 0.5 % y 1.1% el efecto de la respuesta de la transmisión relativa T^* en función del índice refracción del medio n_m , es menor que para variaciones iguales a -0.5 y -1.1%

El efecto de la variación del diámetro relativo de las fibras ópticas d y la apertura numérica $A.N.$ sobre la transmisión relativa T^* en función del índice del medio n_m , no es crítico y por lo tanto este factor no presenta problemas para el desarrollo y fabricación de sensores refractométricos.

8. De la comparación del experimento y el desarrollo teórico, se concluye que el programa SRFO 3.0 es una buena herramienta para el diseño de sensores refractométricos para una aplicación en específico. En particular, se comprobó a través del cálculo de la no linealidad que los resultados obtenidos son muy similares entre lo obtenido experimentalmente y teóricamente.

9. Con el perfeccionamiento de las técnicas para la fabricación de sensores refractométricos de fibras ópticas, se tendrá el desarrollo y fabricación de un sensor útil para la industria lo que conlleva a que los costos de producción irán disminuyendo y se pueda utilizar el presente sensor de manera común en la industria.

7. Referencias

2.

- [1] J. M. Sanz, *Comunicaciones Ópticas*. Paraninfo S.A., España, 1996.
- [2] F. Ramos, *Efectos no lineales en la fibra óptica*,
<http://www.radioptica.com/Fibra/efectos.asp>
- [3] J. Chesnoy, *Undersea Fiber Communications Systems*,
http://www.corning.com/docs/corporate/discovery_center/innovation_library/2002/bickhamsubmarinefiber.pdf
- [4] Corning, *Fiber selection guide*,
http://www.corning.com/opticalfiber/products__applications/fiber_selection_guide.aspx
- [5] Thorlabs.Inc, *Thorlabs product catalog*, vol. 17, 2005.
- [6] Crystal Fibre, <http://www.crystal-fibre.com>
- [7] S. N. Knudsen and L. Grüner-Nielsen, "New fibers for future telecommunication systems," in *Proc. of Optical Fiber Communication Conference '00, TuZ2*, pp. 338-339, 2000.
- [8] C. M. Davis, "Fiber optic sensors: an overview," *Optical Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 347-351, Apr. 1985.
- [9] A. L. Harmer, "Principles of optical fibre sensors and instrumentation," *Measurement and Control*, vol. 15, pp. 143-151, Apr. 1982.

3.

- [10] E. Hecht, *Óptica*, Addison Wesley Iberoamericana S.A, España, 2000.
- [11] I. Newton, *Opticks*, Dover Publications, New York, 1952.

- [12] S. S. Batsanov, *Refractometry and Chemical Structure*, D. Van Nostrand Company Inc., New York, 1966.
- [13] K. Kuhler, E.L. Dereniak, and M. Buchanan, "Measurement of the index of refraction of the plastic phenoxy PKFE," *Appl. Opt.*, vol. 30, pp. 1711-1714, 1991.
- [14] E. Moreels, C. de Greef and R. Finsy, "Laser light refractometer," *Appl. Opt.*, vol. 23, pp. 3010-3013, 1984.
- [15] B. W. Grange, W. H. Stevenson and R. Viskanta, "Refractive index of liquid solutions at low temperatures: an accurate measurement," *Appl. Opt.*, vol. 15, pp. 858-863, 1976.
- [16] F. Docchio, S. Corini, M. Perini, and R. S. Kasana, "A simple and reliable system for measuring the refractive index of liquids using a position-sensitive detector," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 44, pp. 68-70, 1995.
- [17] B. Richerzhagen, "Interferometer for measuring the absolute refractive index of liquid water as a function of temperature at 1.064 μm ," *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 1650-1653, 1996.
- [18] E. Udd, "Fiber optic smart structures," in *Proc. IEEE*, vol. 84, no. 6, pp. 884-894, 1996.
- [19] W. Lu and W. R. Worek, "Two wavelength interferometric technique for measuring the refractive index of salt-water solutions," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 3992-4002, 1996.
- [20] H. El Kashaf, G. E. Hassan, and I. El-Ghazaly, "Mach Zehnder optical system as a sensitive measuring instrument," *Appl. Opt.*, vol. 33, pp. 3540-3544, 1994.
- [21] F. A. Jenkins and H. E. White, *Fundamentals of Optics*, Mc Graw Hill, New York, 1976.
- [22] J. M. St-Arnaud, J. Ge, J. Orbriot, T. K. Bose, and Ph. Marteau, "An accurate method for refractive index measurements of liquids using two Michelson laser interferometers," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, pp. 1411-1414, 1991.
- [23] M. de Angelis, S. de Nicola, P. Ferraro, A. Finizioe and G. Pierattini, "A reflective grating interferometer for measuring the refractive index of liquids," *Pure Appl. Opt.*, vol. 5, pp. 761-765, 1996.
- [24] T. H. Barnes, K. Matsumoto, T. Eiju, K Matsuda and N. Ooyama, "Grating interferometer with extremely high stability suitable for measuring small refractive index changes," *Appl. Opt.*, vol. 30, pp. 745-751, 1991.
- [25] C. Ronot-Trioli, A. Trouillet, C. Veillas and H. Gagnaire, "Monochromatic excitation of surface plasmon resonance in an optical fiber refractive index sensor," *Sens. Act. A*, vol. 54, p.p. 589-593, 1996.
- [26] M. N. Weiss, R. Srivastava, H. Groger, and P. Lo, "A theoretical investigation of environmental monitoring using surface plasmon resonance waveguide sensors," *Sen. Act. A*, vol. 51, pp. 211-218, 1996.
- [27] G. Betta, "A digital liquid level transducer based on optical fiber," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 45, num. 2, pp. 551-555, 1996.
- [28] M. Ogita, C. D. Singh, Y. Shibata, and T. Fujinami, "A simple U-shaped fiber optic probes for measurement of critical micell concentration (CMC) in surfactant solutions," in *IECON Conference Proceedings*, IEEE, pp. 1511-1513, Nov. 2003.
- [29] M. A. Vince, H. Breed, G. Krycuk, and R. T. Lahey, "Optical probe for high temperature local void fraction determination," *J. Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 886-892, 1982.
- [30] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandrige and G. H. Siegel, "Optical fiber sensor technology," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 4, pp. 626-665, Apr. 1982.
- [31] P. Raatikainen, I. Kassamakov, R. Kakanakov and M. Luukkala, "Fiber-optic level sensor," *Sen. Act. A*, vol. 58, pp. 93-97, 1997.

4.

[32] A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*, Chapman & Hall Medical, Great Britain, 1996.

[33] V. Svirid, S. Khotiaintsev and P. L. Swart, "Mathematical modeling of optical-fiber refractometric device," *Recent Advances in Simulation, Computational Methods and Soft Computing*, /Ed.: Nikos E. Mastorakis, WSEAS Press, Grecia-Brazil, pp. 134-139, 2002.

[34] S. Khotiaintsev, V. Svirid, and P. L. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherically detection element," *Opt. Eng.*, vol. 41, no. 4. pp. 779-787, 2002.

[35] S. Khotiaintsev, V. Svirid, and P. L. Swart, "Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 5, pp. 1383-1389, 2003.

[36] P. Pondillo, "Multimode fiber for use with lasers sources," *White paper WPA119*, Corning, 2001.

5.

[37] S. Khotiaintsev, C. E. Garcia-Guerra, J. E. Morales-Farah, L. E. Yam-Ontiveros, "Measurement of water salinity using optical-fiber refractometric transducer," *Electronics and Communications*, Special Issue, part 2, pp. 62-65, 2006.

8. Apéndice

┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌ ┌

8.1. Apéndice A

Analysis of refractometric optical-fiber sensors: comparison between different forms of optical detection elements

Katya Romo-Medrano M.^a, Sergei Khotiaintsev^b, Ariadna García-Moreno^b

^a Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Ciudad de México, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Calle del Puente 222 Ejidos de Huipulco, Tlalpan 14380, México D. F., kerm@itesm.mx

^b Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F., sergeikh@hotmail.com

ABSTRACT

The state of the art in the area of optical-fiber refractometric sensors includes a large number of different proposals about sensor designs and applications. However, there are few works that compare the transducer response to the refractive index of refractometric sensors with different geometrical shape. This makes it difficult to design the refractometric sensors optimized for particular applications. In addition, the existing knowledge relates mainly to the refractometric sensors with perfectly clean surfaces, while the surface of real sensors is frequently contaminated. In this work, we analyzed the response of optical-fiber refractometric sensors of ellipsoidal shape and the effect of the residual film of liquid (water, oil, etc.) on the transducer's surface on the transducer's response. Also, we determined the sensibility of the response to small variations of the geometrical parameters, in turn, allowed us to determine the tolerance margin in sensor fabrication. We obtained data on the effect of the liquid film of different thickness on the response of the optical detection element as well. These data allow one to make an optimal choice between different possible shapes of detection elements.

Keywords: optical-fiber sensors, refractometry

1. INTRODUCTION

Refractometry is widely used to detect the presence or the level of a liquid and for refractive index measurement of fluids. Refractometry has shown its importance for instrumentation, because through the refractive index one can obtain several physical quantities such as density, chemical composition, liquid level, etc.

Most of commercial general purpose refractometers use the measurement of the critical angle to achieve a high precision. The typical accuracy of this corresponds to four or five digits of the refractive index, but with some instruments (Pulfrich type refractometer) there has been reported a precision of up to six digits^[6]. In this class of refractometers the light is incident to a prism on the sample side, so the light travels long distances across the sample. Later developments^[7] use the internal reflection configuration to measure the critical angle. The specific feature of these type of refractometers is the use of the derivative of reflected power rather than the angle of incidence. An advantage of this technique is that it can be used on a large number of substances (including the absorbing ones). Because of their relatively large size, these refractometers are useful in laboratories but not in the industrial environment.

To improve refractometers of this type, the dynamic reflectometry has been developed^[7], which makes use of an angle modulation. This technique can access the complex refractive index with great accuracy. Recently, the designs based on dynamic reflectometry with angle scan^[8] has been developed. They have high resolution and also can access the refractive index of absorbent or turbid liquids. They have been built in a relatively compact packages (15x15 cm²), which allows to use them outside the research laboratories.

In addition to the mentioned refractometers, the designs that use optical fibers, have been developed for a large number of applications. This is due to the following advantages of the optical fibers: portability, ease of sensor array of fabrication. Fiber optic refractometric sensors can have a distributed sensor element (optical fiber without coating), or

point sensor element (optical fiber with a prism on its end). The present work is dedicated to the study of point sensor elements of refractometric type. They have many applications, but there is no detailed comparison of characteristics of different sensors, which makes it difficult to decide which type is the most advantageous for a certain application.

1.1 Fiber optical refractometric sensor evolution

The first fiber optical refractometric sensor reported in literature ^[9] consists of two multimode parallel optical fibers, joined by a prismatic element at the optical fiber extremes. Two optical fibers are coupled due to two serial internal reflections on the two facets of the prism. If the sensor is immersed in a liquid, the total internal reflection vanishes and the signal in the receiver optical fiber diminishes. This design was used to detect the gas bubbles in a liquid flow. This sensor, however, has a disadvantage of low accuracy in refractive index measurement. This is because of a finite interval of incidence angles of the rays that propagate in the optical fiber and strikes the facets of the prism at different angles, instead of striking at a single angle of incidence.

Subsequent work improved the characteristics of fiber optic refractometric sensor while maintaining their advantages such as miniature design. In particular, there were proposed designs with a bended optical fiber (U shape sensor), and designs with non planar surfaces: domes, ellipsoids, paraboloids and hemispheres ^{[2]-[4],[10]-[12]}.

Non planar sensor surfaces feature a reduced interval of incidence angle and at the same time have focusing properties. This improves the coupling of the two optical fibers. Previous works had shown the possibility of modifying the transmission characteristic (step-like or linear) of the detection element of spherical shape by changing the geometrical parameters of the sensor ^[3]. In this work we analyze the ellipsoidal shape sensor. The advantage of the ellipsoidal detection element consists in its reduced height in comparison to hemispherical shaped one. For the sake of generality we analyze two positions of the ellipsoid: horizontal and vertical. Also, we analyze the effect of the residual film of liquid (water, oil, etc.) on the transducer's surface.

2. SENSOR DESCRIPTION

We considered a refractometric fiber optic sensor composed of a solid transparent dielectric detection element having a form of a second order surface and a pair of multimode optical fibers that connect the detection element with a remote light source and a photometer (Fig 1) ^{[1],[3]}. The two optical fibers are coupled due to the internal reflection of light at the element's surface when the element is in the air. The optical transmission of the element depends on the refractive index of the surrounding media n and, thus, serves to access this quantity.

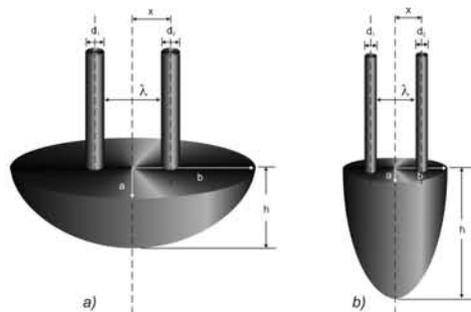


Fig 1. Refractometric transducer with ellipsoidal optical detection element: a) horizontal; b) vertical.

The transducer's response to the refractive index of the surrounding media n is characterized by a relative transmission $T^*(n)$:

$$T^*(n) = \frac{T(n)}{T_{air}} = \frac{I_2(n)}{I_{2air}}, \quad (1)$$

T_{air} , I_{2air} is the transducer's transmission and the output light intensity correspondingly when the surrounding medium is the air ^[3].

We accessed the sensor relative transmission $T^*(n)$ by employing numerical ray-tracing. The geometrical shape of the detection element was described by a general second-order algebraic equation of the form:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Dxy + 2Eyz + 2Fxz + 2Gx + 2Hy + 2Iz + J = 0 \quad (2)$$

Under $A=B=C$ the surface is a sphere. Under one of this coefficients of a different value, the surface is an ellipsoid. Under one of this terms equal to zero the surface is a paraboloid.

For the case of the hemispherical surface, the behaviour of the function $T^*(n)$ under different combinations of the transducer parameters has been studied in [2],[12] and the paraboloidal shaped refractometric sensor has been studied in [5]. Following is the analysis of the ellipsoidal shaped refractometric sensor.

The ellipsoidal sensors studied on this work can be divided in two main groups: those with the horizontal major axis and those with the vertical major axis (see Fig 2).

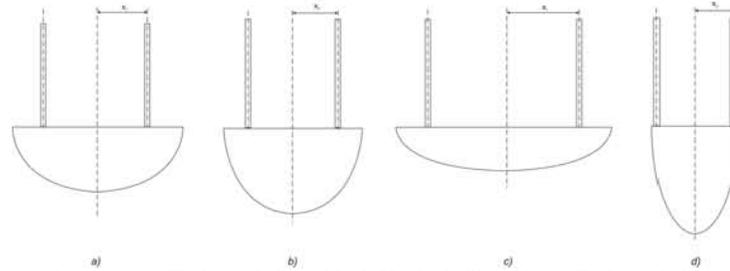


Fig 2. Ellipsoidal refractometric sensors: a)Horizontal ellipsoid 1 b)Vertical ellipsoid 1 c) Horizontal ellipsoid 2 d)Vertical ellipsoid 2.

3. RESULTS

3.1 Horizontal major axis ellipsoid 1

For the analysis of these ellipsoids we used:

$$1.6x^2 + 1y^2 + 2.5z^2 = 1 \quad (3)$$

for modelling the horizontal major axis ellipsoid 1, and

$$2.5x^2 + 1y^2 + 1.6z^2 = 1 \quad (4)$$

for modelling the vertical major axis ellipsoid 2. That is, the same ellipsoid was employed in vertical and horizontal position. The refractive index of the sensors material was assumed to be of $n_s=1.5$. The core refractive index of the multimode step index optical fibers was also assumed of 1.5. The fibers were of a non dimensional diameter $d=0.05$ and a numerical aperture $NA=0.2$. If not specified differently, the sensors were considered to be in the air of $n=1$. The optical fibers were placed symmetrically at a distance x from the center.

The horizontal ellipsoid 1 represented by the equation (3) is shown in Fig 2a. The results of the numerical ray-tracing are shown in Fig 3.

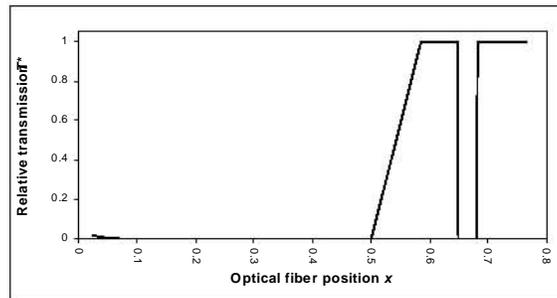


Fig 3. Horizontal Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. optical fiber position x .

One can see in Figs 3 and 4 that the position of the optical fibers affects the relative transmission characteristic. This is due to the coupling of the optical fibers at certain position x . This sensor shows two “transmission windows” as shown in Fig 3. There are two reflections on the sensor surface when the optical fibers are symmetrically placed at $x=0.6$. The second transmission window is at $x=0.76$ when the fibers are placed on the extremes of the element. In this case, the light follows the surface by multiple reflections. In this case, some rays experienced up to six serial reflections on the sensor surface before entering the second optical fiber.

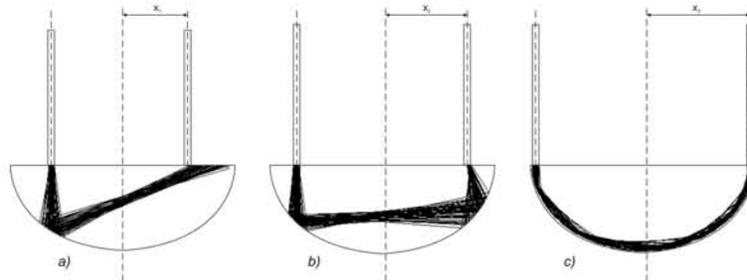


Fig 4. Horizontal Ellipsoid 1: Results of ray tracing for different positions of the optical fibers x : a) $x=0.45$; b) $x=0.6$; c) $x=0.76$.

The relative transmission characteristic was obtained for different optical fiber diameter from $d=0.05$ to $d=0.35$ with the symmetrical axis of the optical fibers at the position $x=0.6$ as shown in Fig 5. There is a reduction of the relative transmission in the interval $d=0.1 \dots 0.3$, with an increase under $d=0.35$. This happens because under a larger diameter d , the optical fiber end face covers the two transmission windows simultaneously, therefore a larger number of the light beams contributes to the coupling.

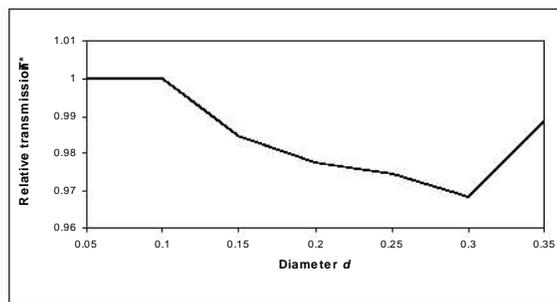


Fig 5. Horizontal Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. optical fiber diameter d .

We varied the numerical aperture of the optical fibers at a position $x=0.6$. The relative transmission characteristic is shown in Fig 6. The relative transmission has a maximum in a range of $NA=0.05 \dots 0.215$. For larger numerical apertures, the incidence angle increases at some reflection points. This contributes to an increase in the optical beam diameter, which in turn reduces the coupling between the two optical fibers (Fig 7).

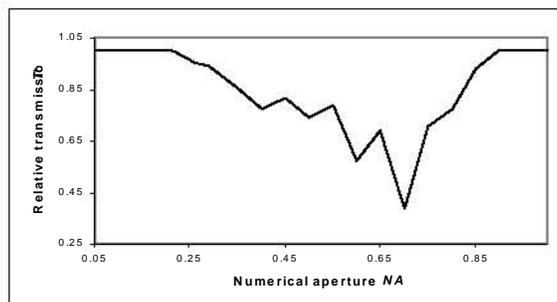


Fig 6. Horizontal Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. numerical aperture NA .

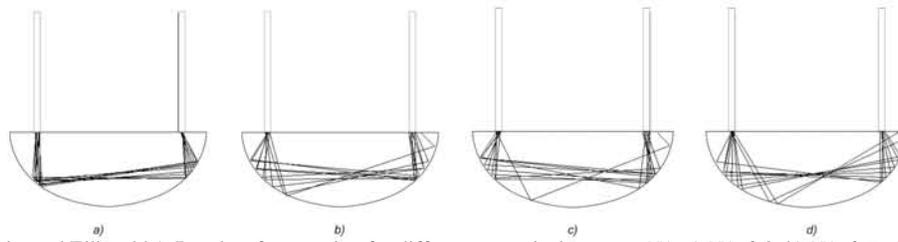


Fig 7. Horizontal Ellipsoid 1. Results of ray tracing for different numerical aperture NA : a) $NA=0.2$; b) $NA=0.6$; c) $NA=0.7$; d) $NA=0.85$.

3.2 Horizontal major axis ellipsoid 2

The horizontal ellipsoid 2 of Fig 2c is represented by equation (5)

$$1x^2 + 1y^2 + 6.4z^2 = 1 \quad (5)$$

We chosen these parameters in order to analyze two very different cases: an ellipsoid with a major axis more than two times larger than the minor axis. The optical fibers used in this sensor had the same characteristics as in the previous case. The sensors are shown in Figs 8 and 9. When the light beams follow the sensor surface (Fig 8b), the transmission is lower than in the previous case.

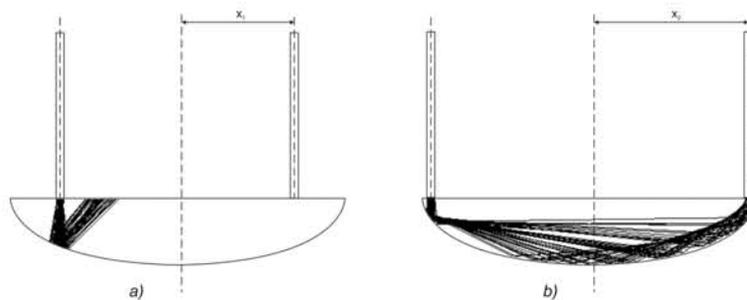


Fig 8. Horizontal Ellipsoid 2: Results of ray tracing for different positions of the optical fiber x : a) $x=0.8$; b) $x=0.95$.

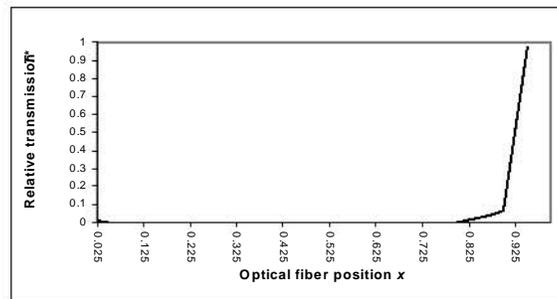


Fig 9. Horizontal Ellipsoid 2:Relative transmission T^* vs. optical fiber x position.

Increasing optical fiber diameters improves the relative transmission for different positions, but there is still a poor coupling between the fibers (Fig 10).

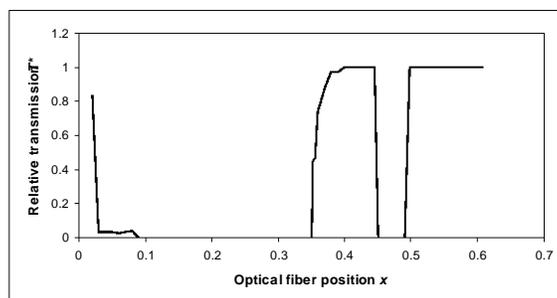


Fig 14. Vertical Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. optical fiber position x .

Increasing the optical fiber diameter from $d=0.05\dots0.45$, under position $x=0.41$ (the centre of one of the transmission windows), results in a behaviour similar to the horizontal ellipsoid 1 case as shown in Fig 15, but for in a wider range of optical fiber diameter d .

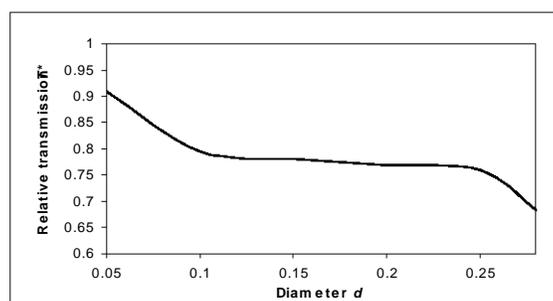


Fig 15. Vertical Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. optical fiber diameter d .

We found that this type of sensor has a relative transmission characteristic less sensitive to variations of numerical aperture, from $NA=0.12\dots0.6$. For greater apertures, the transmission characteristic is similar to the horizontal ellipsoid 1 case as shown in Fig 6. For numerical aperture larger than 0.6, there is a variation in relative transmission. This is, due to the increase in the optical beam diameter. In addition the rays at the extremes of the optical beam do not enter the receiver fiber, as seen in Figs 16 and 17.

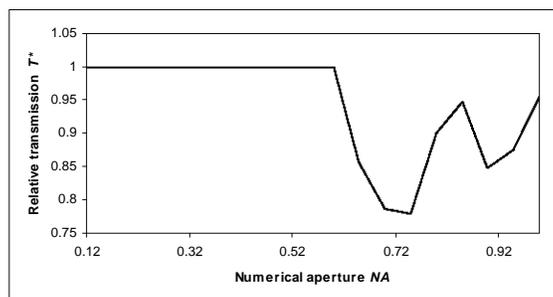


Fig 16. Vertical Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. numerical aperture NA .

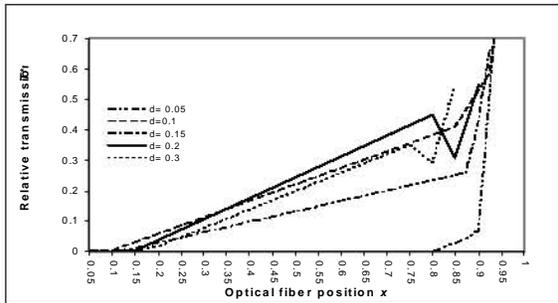


Fig 10. Horizontal Ellipsoid 2: Relative transmission T^* vs. position of the optical fibers of different diameters d .

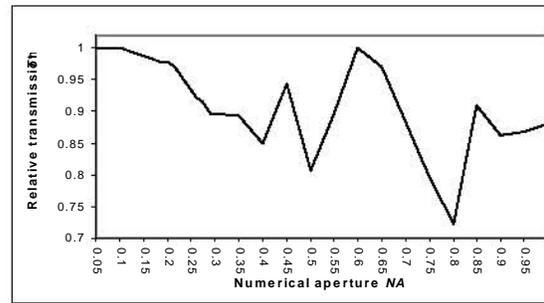


Fig 11. Horizontal Ellipsoid 2: Relative transmission T^* vs. numerical aperture NA .

The sensor relative transmission is very sensitive to the changes on the NA as shown on Fig 11. For certain NA , the ray tracing reveals small incident angles at the second reflection point. Therefore, the reflected beams do not enter the receiver fiber (Fig 12).

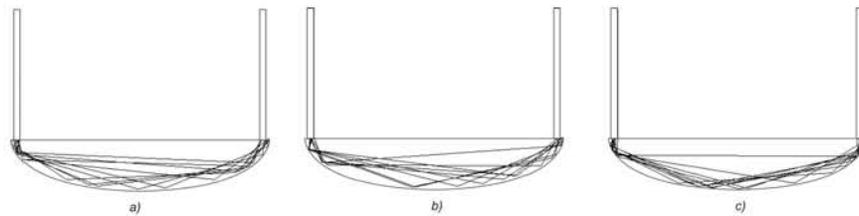


Fig 12. Horizontal Ellipsoid 2. Results of ray tracing for different numerical aperture NA : a) $NA=0.6$; b) $NA=0.8$; c) $NA=0.85$.

3.3 Vertical major axis ellipsoid 1

The vertical ellipsoid 1 of Fig 2b is represented by equation (4). The results of the numerical ray tracing are shown in Fig 13.

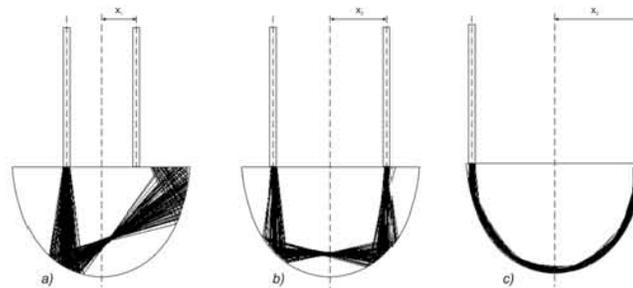


Fig 13. Vertical Ellipsoid 1: Results of ray tracing for different positions of the optical fibers x : a) $x=0.25$; b) $x=0.41$; c) $x=0.6$.

In this sensor, optical fiber position x also has an influence on the coupling and relative transmission (Fig 13), but compared with the horizontal ellipsoid 1 case, this sensor has three transmission windows, as shown in Fig 14. This windows are wider than in the horizontal ellipsoid 1 case, so this kind of sensor have a larger range of positions where good coupling is observed.

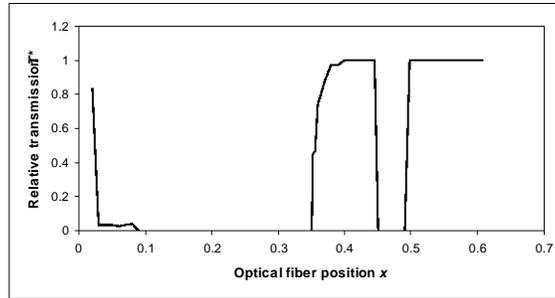


Fig 14. Vertical Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. optical fiber position x .

Increasing the optical fiber diameter from $d=0.05\dots0.45$, under position $x=0.41$ (the centre of one of the transmission windows), results in a behaviour similar to the horizontal ellipsoid 1 case as shown in Fig 15, but for in a wider range of optical fiber diameter d .

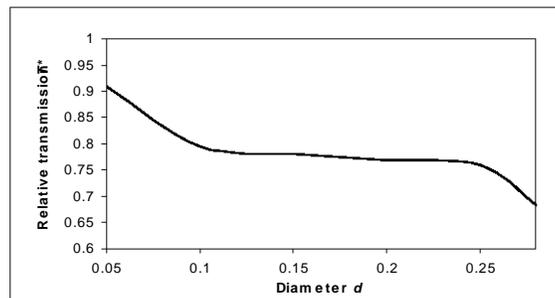


Fig 15. Vertical Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. optical fiber diameter d .

We found that this type of sensor has a relative transmission characteristic less sensitive to variations of numerical aperture, from $NA=0.12\dots0.6$. For greater apertures, the transmission characteristic is similar to the horizontal ellipsoid 1 case as shown in Fig 6. For numerical aperture larger than 0.6, there is a variation in relative transmission. This is, due to the increase in the optical beam diameter. In addition the rays at the extremes of the optical beam do not enter the receiver fiber, as seen in Figs 16 and 17.

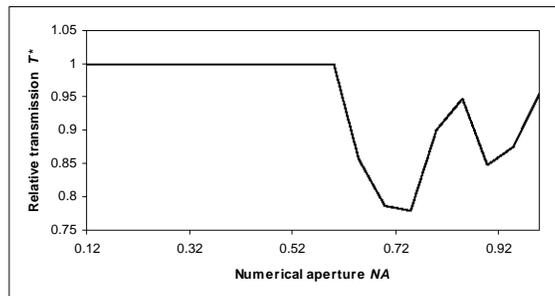


Fig 16. Vertical Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. numerical aperture NA .

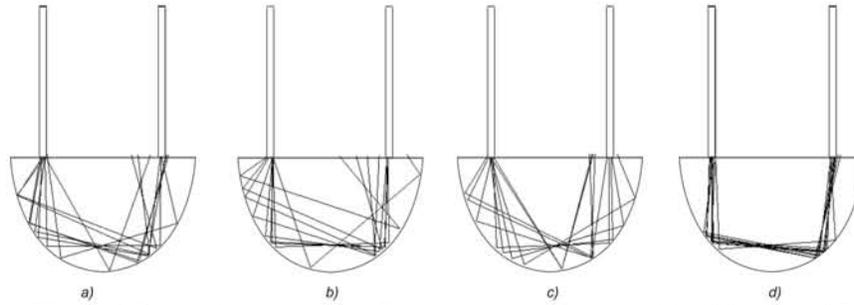


Fig 17. Vertical Ellipsoid 1. Results of ray tracing for different numerical aperture NA: a) $NA=0.95$; b) $NA=0.7$; c) $NA=0.87$; d) $NA=0.2$.

3.4 Vertical major axis ellipsoid 2

Similarly to the analysis of the horizontal ellipsoid 2 case, we studied another ellipsoid with the major axis in the vertical position (vertical ellipsoid 2, Fig 2d), with the major axis more than two times larger than the minor axis. This ellipsoid is represented by equation (6)

$$6.4x^2 + 1y^2 + 1z^2 = 1 \quad (6).$$

We found that this sensor has two transmission window at different optical fiber position x , with maximum coupling at $x=0.15$ and $x=0.25$ as shown in Figs 18 and 19.

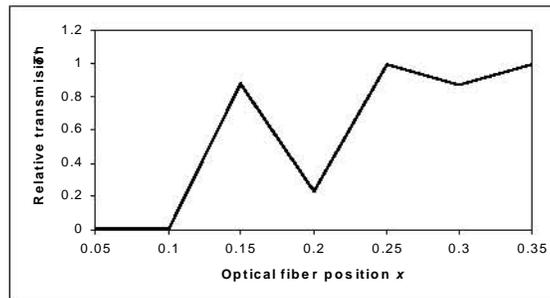


Fig 18. Vertical Ellipsoid 2: Relative transmission T^* vs. optical fiber position x .

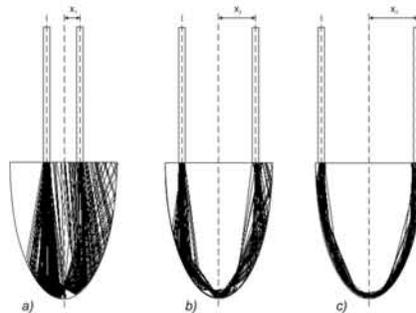


Fig 19. Vertical Ellipsoid 2. Results of ray tracing for different positions of the optical fibers x : a) $x=0.1$; b) $x=0.15$; c) $x=0.25$.

This sensor shows less coupling between the optical fibers than the other three sensors. This is due to a larger sensitivity of relative transmission to the optical fiber diameter changes. Also, the relative transmission decreases in all the mentioned diameter range. The observed minimum relative transmission is almost 1.5 times smaller than the minimum relative transmission of the other sensors analyzed (Fig 20).

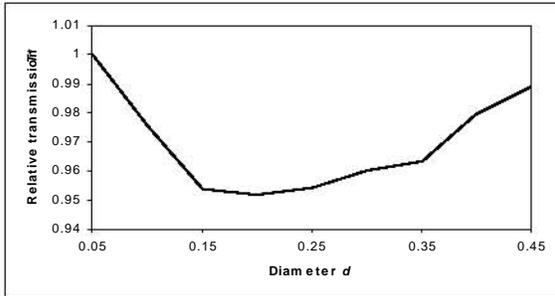


Fig 20. Vertical Ellipsoid 2: Relative transmission T^* vs. optical fiber diameter d .

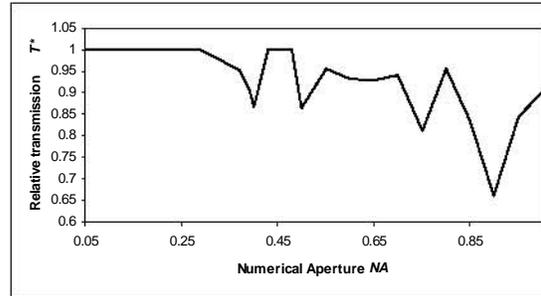


Fig 21. Vertical Ellipsoid 2: Relative transmission T^* vs. numerical aperture NA .

The relative transmission variation under the changes of the numerical aperture is shown in Figs 21 and 22. The relative transmission is very sensitive to numerical aperture changes. In our opinion, these variations resulted from the changes in the beam diameter and the existence of several (three) transmission windows in this sensor.

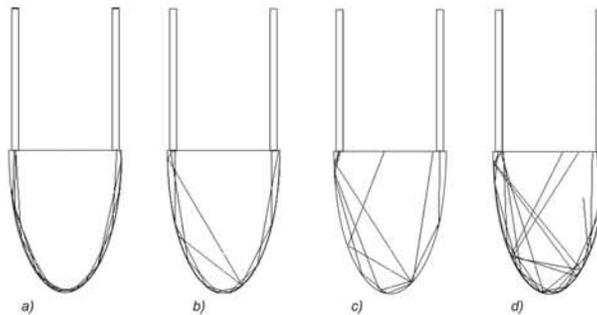


Fig 22. Vertical Ellipsoid 1. Results of ray tracing for different numerical apertures NA : a) $NA =0.2$; b) $NA =0.7$; c) $NA =0.87$; d) $NA =0.95$.

The relative transmission characteristic of the sensors represented by equations (3), (4),(5) and (6) versus variations of the refractive index of external media n is shown in Fig 23. The ellipsoids of equations (3) and (5) have larger sensitivity to refractive index variation in the interval $n =1...1.1$, while the curve for the sensors with the major axis two times greater than the minor axis is shifted to the right. Thus, the horizontal ellipsoid of equation (4) has an operational interval of $n =1.18 ... 1.28$, and the vertical ellipsoid of equation (6) has an operational interval of $n =1.2... n =1.6$.

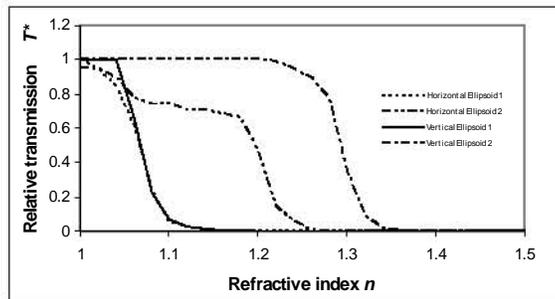


Fig 23. Relative transmission T^* vs. refractive index n .

Under a thick uniform liquid film on the surface of the horizontal ellipsoid 1 (Fig 24), there is no coupling between the optical fibers at $x=0.6$. Under the position $x=0.76$ the second transmission window, the relative transmission characteristic is shifted to the left, as shown on Fig 25.

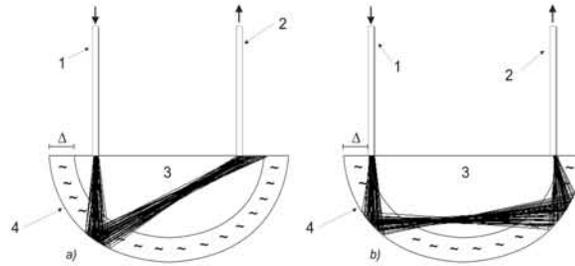


Fig 24. Results of ray tracing for the horizontal ellipsoidal sensor 1 with a liquid film: a) optical fibers position $x=0.6$ corresponds to the first transmission window; b) optical fibers position $x=0.76$ corresponds to the second transmission window.

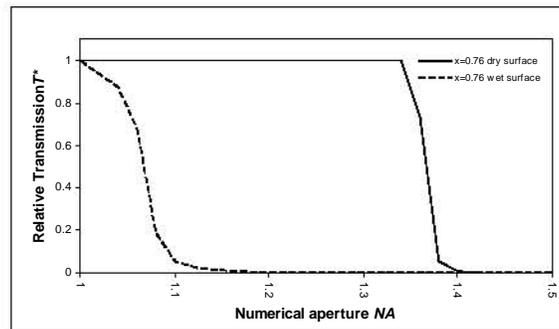


Fig 25. Horizontal Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. numerical aperture NA for dry and wet surfaces.

The non-uniform thick liquid film on the surface of vertical ellipsoid 1 (Fig 26) also reduces the coupling between the two optical fibers. This happens both under $x=0.41$ and $x=0.6$. The relative transmission curve shows the behaviour similar to that of the horizontal ellipsoid 1 sensor: there is a shift to the left as shown in Fig 27.

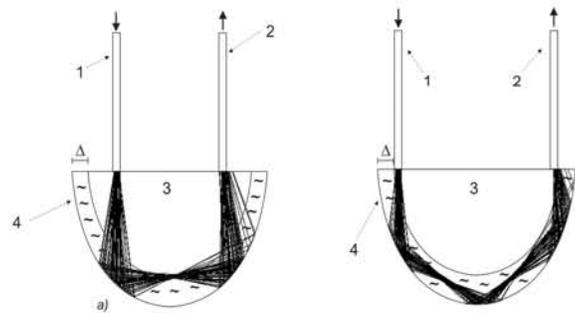


Fig 26. Results of ray tracing for vertical sensor 1 with a thick non uniform liquid film: a) Optical fibers at the first transmission window $x=0.41$; b) Optical fibers at the second transmission window $x=0.6$.

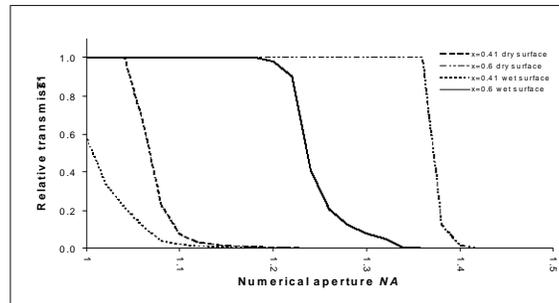


Fig 27. Vertical Ellipsoid 1: Relative transmission T^* vs. numerical aperture NA , for dry and wet surfaces with the optical fibers at the two transmission windows.

Finally, in Fig 28. we show that the relative transmission characteristic of the ellipsoid represented by equation (3) has a relative transmission characteristic similar to the sensor of the hemispherical shape. The linear part of the transmission characteristic can be displaced to the desired refractive index interval, by changing the ellipsoid size. The presence of a thick uniform liquid film on the surface of a hemispherical sensor can result in the complete vanishing of the optical coupling.

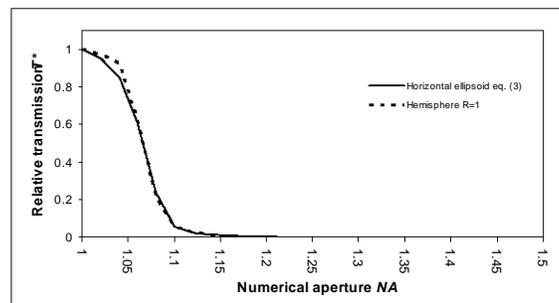


Fig 28. Horizontal Ellipsoid 1 and Hemisphere: Relative transmission T^* vs. refractive index n

4. CONCLUSIONS

Some small variations of one or more sensor geometrical parameters can affect the sensor transmission in the air. The position of the optical fiber x and its numerical aperture NA are the most important factors.

The linear part of the relative transmission characteristic can be displaced to different working intervals of refractive index by changing the lengths of the ellipsoid axis. The shift can be also achieved by a change of the refractive index of the sensor material. The presence of a liquid film on the ellipsoidal surface of the sensor can change drastically the coupling of the optical fibers when they are at the first transmission window in both cases (horizontal and vertical ellipsoid). If the optical fibers are placed at the second transmission window, the relative transmission characteristic is shifted to the left, but there is still a good coupling between the optical fibers. The hemisphere shaped sensor has a poor performance under thick liquid film on its surface^[1]. Therefore the ellipsoidal shape of a refractometric sensor with optical fibers placed at the position corresponding to the second transmission window secures a good coupling between the optical fibers and is substantially immune to a liquid film presence on its surface. The approach developed in this work permits one to analyze the properties of detection elements of other shapes.

REFERENCES

- [1] K. E Romo-Medrano, S. N Khotiaintsev, V. García-Garduño, "Optical-fiber sensor system for monitoring the performance of the gas-propellant centrifuge separator of a spacecraft," *Meas. Sci. Technol.* **15** 1568-1575 (2004)
- [2] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. L. Swart, "Novel optical fiber refractometric transducer employing **hemispherical detection element**," *Optical Engineering*, **41** 779-787 (2002)
- [3] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. L. Swart, "Linear and step-like characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," *Optical Engineering*, **42** 1383-1389 (2003)
- [4] V. Svirid, V. De Leon, S. Khotiaintsev, "A prototype fiber-optic discrete level-sensor for liquid propane-butane," *Institute of Electronics, Informatics and Communications Engineers (IEICE) Transactions on Electronics (Japan)* **E83-C** 303-308 (2000)
- [5] V. De Leon, S. Khotiaintsev, "Microoptical paraboloidal-shaped sensing elements for refractometric applications," *Instrumentation and Development*, **4-1** 31-39 (1999)
- [6] Augusto García-Valenzuela, M. Peña-Gomar ,C. García-Segundo, V. Flandes-Aburto, "Dynamic reflectometry near the critical angle for high-resolution sensing of the index of refraction," *Sensors & Actuators B*, vol. 52, pp. 236-242, 1998.
- [7] Augusto García-Valenzuela, Mary Carmen Peña-Gomar y Claudia Fajardo-Lira, "Measuring and sensing a complex refractive index by laser reflection near the critical angle," *Opt. Eng.*, **41**, pp. 1-13, 2002.
- [8] Mary Carmen Peña-Gomar, Augusto García-Valenzuela, Martha Rosete-Aguilar, "Design of an optical probe based on angle scanning reflectometry near the critical angle," *Opt. Eng.*, **42**, pp. 1-9, 2003.
- [9] N. Abuaf, O. C. Jones Jr., G. A. Zimmer, "Optical probe for local void fraction and interface velocity measurements," *Rev. Sci. Instrum.*, **49**, no 8, pp. 1090-1094, 1978
- [10] K. Spenner, M.D. Singh, H. Schulte, H.J Boehnel, "Experimental Investigations on fiber optic liquid level sensors and refractometers," *1st International Conference on Optical Fiber Sensors*, IEE Conf. **221**, pp. 96-99, 1983.
- [11] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. Swart, "Mathematical modeling of optical-fiber refractometric device," in: *Recent Advances in Simulation Computational Methods and Soft Computing, Electrical & Computer Engineering Series*, Nikos E. Mastorakis, pp. 134-139, 2002.
- [12] S. Khotiaintsev ,V. Svirid , P. Swart, "Novel fiber-optical refractometric sensor employing hemispherically-shaped detection element," in: *Advances in Systems Science: Measurement, Circuits and Control, Electrical and Computer Engineering Series*, 2001.

8.2. Apéndice B

MODELING OF THE FIBER-OPTICAL WATER SALINITY SENSOR

S. Khotiaintsev, K. Khotiaintsev, A. Garcia-Moreno

Faculty of Engineering, National Autonomous University of Mexico

Ciudad Universitaria, Mexico, D. F., 04510, Mexico

Phone: 52-55-5622-3055, Fax: 52-55-5616-1855, e-mail: sergeikh@hotmail.com

Abstract – We describe the mathematical model, the calculation algorithm, the computer program, and the user interface developed for numerical simulation of the optical fiber refractometric sensor. The sensor consists of a pair of multimode optical fibers which are coupled via the hemispherical optical detection element. We employ the geometrical approach for the modeling of the sensor. The computer program is written in Visual Basic programming language. We obtained the optical transmission of the sensor as a function of the refractive index of the surrounding medium and showed that the present sensor can be used for water salinity measurement.

Keywords: Optical fibers, optical fiber sensors, optical refractometry, ray-tracing algorithms.

INTRODUCTION

Fiber-optical sensors are well suited for the integration in large arrays. Such arrays can collect information about some physical quantity or quantities over large areas. In particular, the water salinity is important for many living beings. Therefore, it is important to develop new methods for the measurement of water salinity *in situ* in lagoons, river estuaries and sea littoral. In our previous works [1], [2] we described a new fiber optical refractometric detection element of a hemispherical working surface. This is a multimode optical structure in which the optical coupling of the two optical fibers depends on the internal reflection of light at the element's surface, which in turn depends on the refractive index of the surrounding medium. This element in principle can be used for the water salinity measurements. However, the experimentally observed response of this element to water salinity is essentially non linear. This is a serious obstacle in introducing this type of sensor in practical measurement systems. The aim of this work was to develop software suitable for the numerical simulation of the present sensor.

MATHEMATICAL MODEL, CALCULATION ALGORITHM AND COMPUTER PROGRAM

We employed the geometrical optics model of light propagation in the sensor. We considered an optical detection element having a second-order working surface. This allowed

us to analyze the detection elements having a form of a sphere, ellipsoid, and paraboloid [3]. We accounted for the optical and geometrical parameters of the detection element, optical fibers, and for the material constants. Also, we accounted for the light distribution at the detection element entrance. In particular, we accounted for the contribution of the core, cladding, and tunneling modes of the optical fiber. Accounting for the cladding and tunneling modes was important because optical fiber sensor arrays employ optical fibers of a relatively short length in comparison to the optical fiber communications systems. Therefore, the energy associated with the cladding and tunneling modes can have a significant effect on the sensor transmission as a function of the refractive index of the surrounding medium.

The generic optical fiber refractometric sensor employing the hemispherical detection element is shown in Fig. 1. The bottom part of the glass sphere is the sensor working surface, where the liquid-dependent internal reflection of light takes place. Depending on the distance between the two optical fibers, the optical coupling can occur via two, three, or more serial reflections of light at the working hemispherical surface.

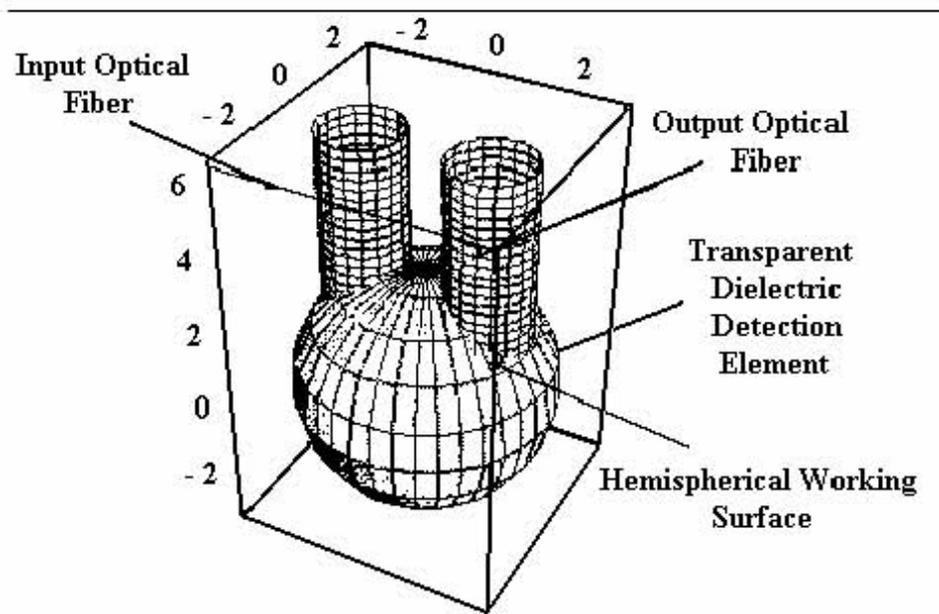


Fig. 1 – Generic optical fiber refractometric sensor which employs the hemispherical optical detection element.

The user interface of the developed computer program in Visual Basic is shown in Fig. 2. The interface allows for easy assignment of sensor parameters. Also, it displays the calculated trajectories of optical rays in the sensor and the optical transmission as a function of the refractive index of the surrounding media.

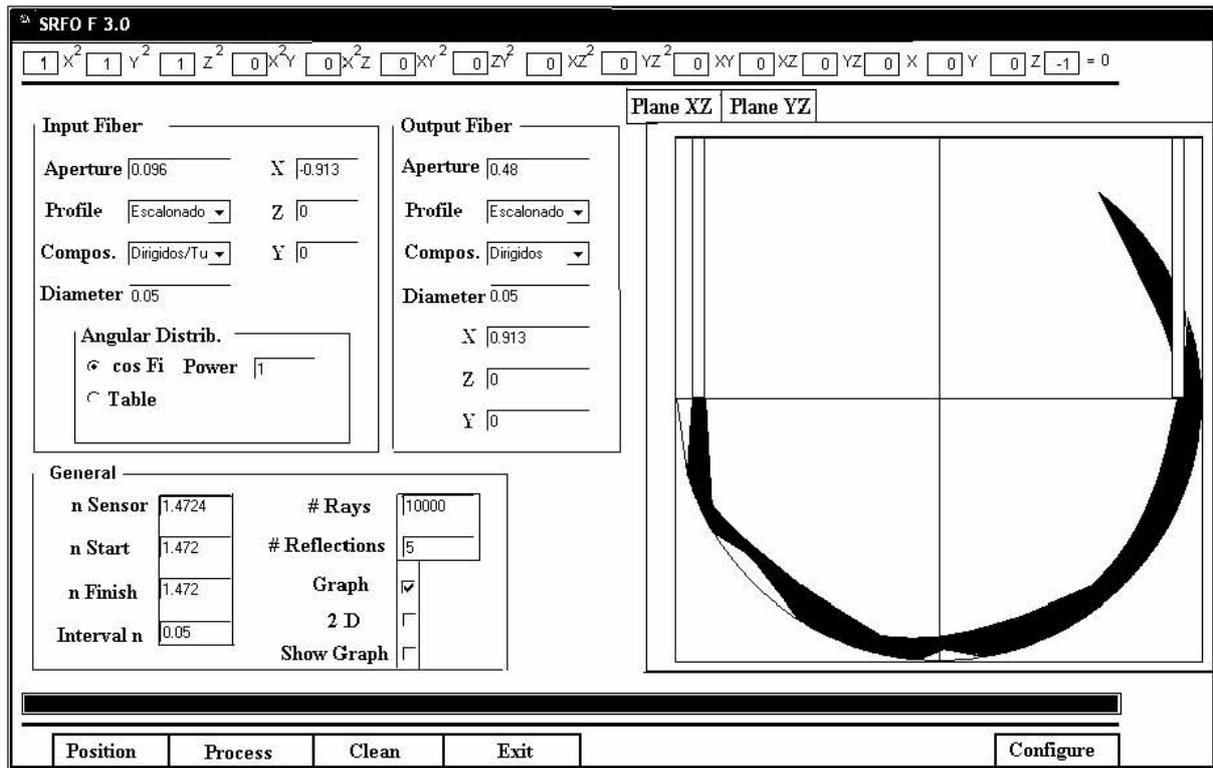


Figure 2- The user interface of the developed computer program for the numerical ray-tracing of light propagation in the optical-fiber refractometric sensor.

RESULTS

We performed the computer simulations of light propagation in the sensor and obtained quantitative data on the effect of various geometrical and optical parameters of the sensor on its transmission function. We have found the parameter combinations that result in an essentially linear change of sensor optical transmission vs. the water salinity. Fig. 3 a illustrates the effect of the optical fiber dimensionless distance from the sensor axis on the sensor transmission in the air T . Fig. 3 b illustrates the sensor transmission vs. the refractive index of the surrounding medium. One can see in Fig. 3 b that the sensor transmission function $T(n)$ is linear in an interval $n=1.333\dots 1.350$ which corresponds to various water salinity (the refractive index of the distilled water is $n=1.333$; the refractive index of salt water is larger than that of the distilled water).

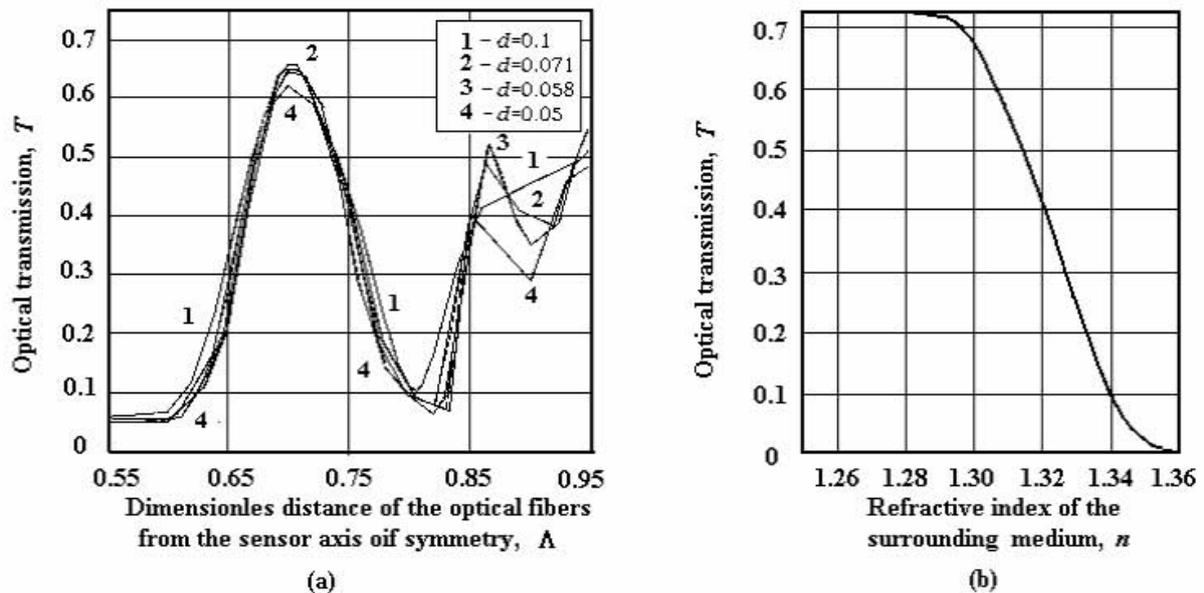


Fig. 3 – Sensor optical transmission vs. the dimensionless distance of the optical fibers from the sensor axis of symmetry (a) and the refractive index of the surrounding medium (b).

The approach used in this work can be used in the development and optimization of various multimode fiber-optical sensors of different physical quantities.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the support of the Faculty of Engineering and the DGAPA-PAPIIT of the National Autonomous University of Mexico in the form of a research grant IN100502 and IN106906.

REFERENCES

- [1] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. L. Swart. "Novel optical fiber refractometric transducer employing hemispherical detection element," *Optical Engineering*, vol. 41, p 779, 2002.
- [2] V. Svirid, S. Khotiaintsev, P. L. Swart, "Linear and steplike characteristics in an optical fiber refractometric transducer with hemispherical detection element," *Optical Engineering*, vol. 42, p. 1383, 2003.
- [3] K. S. Khotiaintsev-Umanets. *Development of an Application of Numerical Simulation of the Optical Fiber Refractometric Sensor* (In Spanish). Undergraduate Thesis. Faculty of Computer Science, Puebla Autonomous University, 2005, p. 65.